

## Universal Method for Detecting Violations in the Integrity of a Digital Image Based on Analysis of Blocks of its Matrix

**Bobok I., Kobozeva A.**

Odesa Polytechnic National University  
Odesa, Ukraine

**Abstract.** The requirement to provide the content expertise (particularly digital video) in real time is becoming critical. Thus, the aim of the work is to increase the efficiency of identifying the fact of violation of image integrity by developing a universal expert method with low computational complexity. This aim was achieved by using a new approach developed by the authors earlier that based on the properties of the dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number, adapted for the case of a block organization of expertise. The most important theoretical result of the work is the higher rate of growth of the linear approximation of the dependence of the block-average values of the frequency indexes of singular vectors on its number, which was established for the original content, as compared to the non-original content. The significance of the obtained results is that the developed expert method, being a block one, has insignificant computational complexity –  $O(n^2)$  operations for an  $n \times n$  image matrix, which makes it promising for working with digital content, in particular with video, in real time. At the same time, the algorithmic implementation of the method made it possible to increase the efficiency of detecting violations of image integrity by reducing type I errors by 2% compared to the best analogue; type II errors remained at the same level. The versatility of the method is confirmed by its high efficiency regardless of the specifics of the perturbation effect, including in conditions of minor disturbances.

**Keywords:** digital image, integrity violation, singular vector, frequency index of singular vector, integrity expertise.

**DOI:** <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.08>

**UDC:** 004.056

### Metodă universală de detectare a încălcărilor integrității unei imagini digitale pe baza analizei blocurilor din matricea acesteia

**Boboc I., Kobozeva A.**

Universitatea Națională Politehnică din Odesa, Ucraina

**Rezumat.** Cerința de a oferi expertiza integrității care să permită separarea unei imagini originale de una neoriginală fără a ține cont de specificul influenței perturbatoare (în special video digital) în timp real devine critică. Astfel, scopul lucrării este de a crește eficiența identificării faptului de încălcare a integrității imaginii prin elaborarea unei metode expert universale cu complexitate de calcul scăzută. Acest obiectiv a fost atins prin utilizarea unei noi abordări elaborate de autori anterior, care se bazează pe proprietățile dependenței indicelui de frecvență al vectorului singular al matricei imaginii de numărul acestuia, adaptată pentru cazul unei organizări bloc de expertiză. Cel mai important rezultat teoretic al lucrării este rata mai mare de creștere a aproximării liniare a dependenței valorilor medii bloc ale indicilor de frecvență ai vectorilor singulari de numărul acestuia, care a fost stabilită pentru conținutul original, în comparație cu conținut neoriginal. Semnificația rezultatelor obținute este că metoda expert elaborată, fiind una bloc, are o complexitate computațională nesemnificativă  $O(n^2)$  – operații pentru  $n \times n$  o matrice imagine, ceea ce o face promițătoare pentru lucrul cu conținut digital, în special cu video, în timp real. În același timp, implementarea algoritmică a metodei a făcut posibilă creșterea eficienței detectării încălcărilor integrității imaginii prin reducerea erorilor de tip I cu 2% față de cel mai bun analog; erorile de tip II au rămas la același nivel. Versatilitatea metodei este confirmată de eficiența sa ridicată, indiferent de specificul efectului de perturbare, inclusiv în condiții de perturbări minore.

**Cuvinte-cheie:** imagine digitală, încălcare a integrității, vector singular, indice de frecvență al vectorului singular, expertiză în integritate.

## Универсальный метод выявления нарушения целостности цифрового изображения, основанный на анализе блоков его матрицы

Бобок И.И., Кобозева А.А.

Национальный университет «Одесская политехника»

Одесса, Украина

**Аннотация.** Современные информационные технологии предоставляют широкие возможности для осуществления несанкционированных изменений цифровых контентов, в частности, цифровых изображений, которым посвящена работа, что может привести к негативным последствиям, вплоть до катастрофических, как для отдельно взятых людей, так и для человечества в целом, когда такие контенты используются в неразвлекательных целях. В настоящий момент растет востребованность универсальных методов экспертизы целостности, позволяющих отделять оригинальные изображения от неоригинального без учета специфики использованного возмущающего воздействия. Критически важным становится требование обеспечения экспертизы контента, в частности цифрового видео, в режиме реального времени. С учетом этого целью работы является повышение эффективности выявления факта нарушения целостности изображения путем разработки универсального экспертного метода, обладающего незначительной вычислительной сложностью. Поставленная цель была достигнута путем использования нового подхода, разработанного авторами ранее, – СНВ-подхода, основанного на учете свойств функции зависимости частоты сингулярного вектора матрицы изображения от его номера, адаптированного для случая блоковой организации экспертизы, когда матрица изображения предварительно разбивается на блоки, анализируемые по отдельности. Наиболее важным теоретическим результатом работы является установленная для оригинального контента большая скорость роста линейной аппроксимации функции, отражающей зависимость средних по блокам значений частот сингулярных векторов от номера вектора, по сравнению с неоригинальным. Значимость полученных результатов заключается в том, что разработанный экспертный метод, являясь блоковым, имеет незначительную вычислительную сложность –  $O(n^2)$  операций для  $n \times n$ -матрицы изображения, что делает его перспективным для работы с цифровыми контентами, в частности, с видео, в режиме реального времени. При этом алгоритмическая реализация метода позволила повысить эффективность выявления нарушения целостности изображения путем снижения ошибок 1-го рода на 2% по сравнению с наилучшим аналогом, ошибки 2-го рода остались на том же уровне. Универсальность метода подтверждается его высокой эффективностью независимо от специфики возмущающего воздействия, в том числе и в условиях незначительных возмущений.

**Ключевые слова:** цифровое изображение, нарушение целостности, сингулярный вектор, частота сингулярного вектора, экспертиза целостности.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс внедрения новых информационных технологий во все сферы жизни общества требует незамедлительного повышения эффективности процессов защиты информации. Широкомасштабное использование вычислительной техники и телекоммуникационных систем, переход к безбумажным технологиям, предполагающий расширение цифровых технологий, увеличение объемов обрабатываемой информации и расширение круга пользователей приводят к качественно новым возможностям несанкционированного доступа к ресурсам и данным информационных систем, к их высокой уязвимости. В современных условиях защита информации в целом и защита информации в автоматизированных информационных системах в частности становится все более сложной проблемой, требует для своего решения привлечения современных научных исследований [1, 2].

Нарушение целостности информации, представленной в цифровом виде, в частности, цифрового изображения (ЦИ), проблеме экспертизы которого посвящена настоящая работа, может привести к значительным негативным последствиям, вплоть до катастрофических, когда несанкционированно измененные контенты используются в неразвлекательных целях. Современные информационные технологии предоставляют широкие возможности для осуществления несанкционированных изменений цифровых контентов, следствием чего является повышение актуальности проблемы выявления нарушения целостности цифровой информации, рост востребованности эффективных экспертных методов [3-5].

Все существующие экспертные методы, работающие с ЦИ, можно разделить на две большие группы: универсальные, целью которых является отделение оригинального ЦИ от такого, которое было изменено, без

определения конкретного источника, способа изменения изображения [6], и направленные, действия которых ориентированы на выявление результатов конкретных возмущающих воздействий, учитывают их особенности [7-10]. Узкая область применимости методов второй группы делает их более эффективными, чем универсальные, в условиях, на которые рассчитаны направленные методы. Универсальные методы выявления нарушения целостности, являющиеся в общем случае менее чувствительными к возмущающим воздействиям, можно рассматривать в качестве «первой линии обороны», позволяющей «откинуть» значительную часть измененных контентов, прохождение которой приводит к более чувствительной направленной экспертизе. Учитывая, что чаще всего у эксперта отсутствует точная информация о конкретном виде атаки на контент; универсальные подходы являются гибкими и способными быстро адаптироваться к новым возмущающим воздействиям, в частности к новым стеганографическим методам [11]; экспертиза целостности контента часто является необходимой для возможности его дальнейшего использования и может требовать ограниченного времени для проведения, актуальность универсальных методов растет.

Универсальные экспертные методы сегодня чаще всего предлагаются в условиях стеганоанализа [12] с учетом бурного развития стеганографии, относясь в большинстве своем к группе статистических методов.

Так в [13] предложен универсальный стеганоаналитический метод, позволяющий выявлять стеганосообщения, сформированные на основе контейнеро-изображений, изначально хранимых в формате Jpeg, с учетом того, что Jpeg-компрессия накладывает уникальный отпечаток на изображение, позволяющий определять произошедшие искажения. Выявление изменений в изображении здесь основывается на анализе совместимости  $8 \times 8$ -блоков пикселей Jpeg-изображения с заданной матрицей квантования. Метод фактически применим к любым стеганографическим алгоритмам, за исключением тех, которые осуществляют встраивание дополнительной информации в

коэффициенты дискретного косинусного преобразования. Поскольку все стеганографические алгоритмы всегда стремятся к минимизации искажений для уменьшения вероятности появления артефактов, то процесс стеганопреобразования не будет полностью уничтожать характерную структуру, созданную Jpeg-компрессией, оставляя возможность определения того, было или нет данное ЦИ сохранено в формате Jpeg до внедрения дополнительной информации. Положительный ответ на вопрос является указателем на стеганопреобразование. Предложенный подход широко используется в стеганоанализе и в настоящий момент, хотя его применимость предполагает использование контейнера исключительно в формате Jpeg, ограничивая его возможности. При этом эффективность предложенного метода значительно падает с уменьшением пропускной способности скрытого канала связи – величины возмущающего воздействия.

Универсальный стеганоаналитический метод, основанный на анализе набора чувствительных статистических параметров, полученных в результате вейвлет-преобразования стеганосообщения, для которого в качестве контейнера используется ЦИ, предложен в [14]. Однако этот метод, как и метод разработанный в [15], основой которого является анализ гистограмм значений яркости пикселей изображения и дискретного преобразования Фурье с учетом отличий этих характеристик для оригинального контейнера и стеганосообщения, не обеспечивают достаточную эффективность стеганоанализа в условиях малых возмущающих воздействий – малой пропускной способности скрытого канала связи.

Универсальные стеганоаналитические методы, имеющие различные математические базисы, которые авторами позиционируются как эффективные, предложены в [16,17]. Однако универсальный стеганоанализ, даже будучи эффективным, не может заменить универсальной экспертизы целостности ЦИ, нарушение которой произошло в результате возмущающих воздействий, которые могут быть отличны от стеганопреобразования. На сегодняшний день универсальные методы выявления нарушений целостности ЦИ практически отсутствуют, что объясняется

крайней сложностью решаемой задачи и концентрацией внимания специалистов на конкретных наиболее распространенных и часто используемых возмущающих воздействиях.

Одним из немногочисленных существующих сегодня эффективных универсальных методов выявления нарушения целостности ЦИ является метод, разработанный в [6], базирующийся на доказанном для большинства  $l \times l$ -блоков матрицы оригинального ЦИ, полученных путем стандартного разбиения его матрицы [18], соотношении:

$\angle(u_i, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_i, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^\circ, e_1)$ , где  $u_i, v_i$  – ортонормированные левый и правый сингулярные векторы (СНВ) блока, которые соответствуют его наибольшему сингулярному числу  $\sigma_1$ ;  $\bar{\sigma} = \sigma / \|\sigma\|$ ,  $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)^T$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$  – сингулярные числа (СНЧ) блока;  $\|\sigma\|$  – норма вектора  $\sigma$ ;

$$n^\circ = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l \quad (1)$$

–  $n$ -оптимальный вектор пространства  $R^l$ ,  $\angle(u_i, \bar{\sigma})$ ,  $\angle(v_i, \bar{\sigma})$ ,  $\angle(n^\circ, e_1)$  – величины углов между векторами  $u_i$  и  $\bar{\sigma}$ ,  $v_i$  и  $\bar{\sigma}$ ,  $n^\circ$  и вектором стандартного базиса  $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$  пространства  $R^l$  соответственно. Указанное соотношение нарушается для ЦИ, не являющихся оригинальными. Предложенный метод хорошо зарекомендовал себя при выявлении результатов различных возмущающих воздействий (наложение шума, фильтрация, размытие и т.д.), в том числе и в качестве стеганоаналитического: ошибки I рода, когда ЦИ, целостность которого была нарушена, определялось методом как оригинальное, составили 5.7%, ошибки II рода, когда оригинальное изображение трактовалось как претерпевшее изменения, составили 4.1%. В силу того, что эффективность остается для метода значительной независимо от конкретики возмущающего воздействия, подтверждая его универсальность, он используется авторами для проведения сравнительной оценки эффективности метода, разработанного в данной работе.

Существующие экспертные методы не решают окончательно проблему выявления

нарушения целостности ЦИ. Все еще остается актуальным вопрос повышения эффективности такого выявления, в том числе, в условиях малых возмущающих воздействий, а в случае стеганоаналитических методов – в условиях малой пропускной способности скрытого канала связи. С учетом того, что разнообразие возмущающих воздействий на ЦИ можно считать бесконечным, разработка универсальных экспертных методов требует более пристального внимания со стороны специалистов в области защиты информации для устранения все еще существующей зависимости качества этой экспертизы от вида и силы возмущающего воздействия.

Недавно авторами в статье, опубликованной в 2023 году в настоящем научном журнале, был предложен новый подход к выявлению неоригинальных ЦИ, основанный на анализе характерных свойств сингулярных векторов матрицы ЦИ, который везде ниже будем называть СНВ-подходом. Данный подход видится перспективным для разработки на его основе новых универсальных экспертных методов, поскольку ориентирован на отличие свойств оригинального и неоригинального ЦИ без учета какой-либо конкретики того возмущающего воздействия, которое привело к нарушению целостности ЦИ.

В настоящий момент с учетом значительных размеров ЦИ, цифрового видео (ЦВ), рассматриваемого как последовательность кадров-ЦИ, критическим важным является обеспечение малой вычислительной сложности соответствующего экспертного метода, особенно в случае, когда экспертиза проводится в режиме реального времени, что часто является актуальной необходимостью.

С учетом всего выше изложенного

Целью работы является повышение эффективности выявления факта нарушения целостности ЦИ путем разработки универсального экспертного метода, обладающего незначительной вычислительной сложностью, на основе СНВ-подхода.

Эффективность метода оценивается количественно ошибками 1-го и 2-го рода.

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основы СНВ-подхода. Пусть  $F$  -  $n \times n$ -матрица оригинального ЦИ. Для нее возможно построение однозначно определяемого в случае отсутствия кратных СНЧ нормального сингулярного разложения [19]:

$$F = U\Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T, \quad (2)$$

где  $U, V$  - ортогональные  $n \times n$ -матрицы, столбцы которых  $u_i, v_i, i = \overline{1, n}$ , - левые и правые СНВ  $F$  соответственно, при этом левые СНВ дополнительно являются лексикографически положительными [19];  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ ,

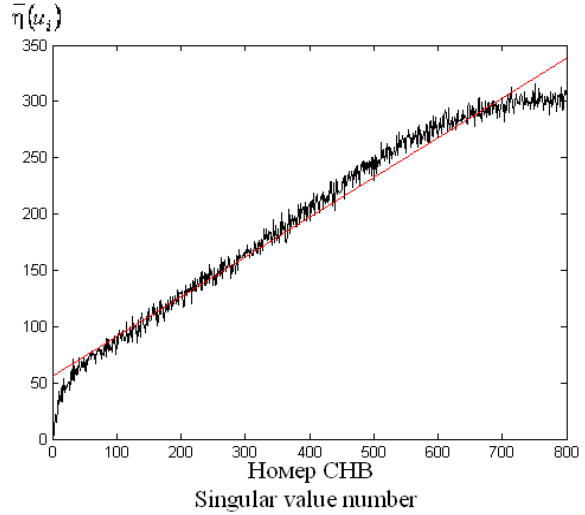
$$\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0 \quad (3)$$

- СНЧ  $F$ ; правая часть формулы (2) дает представление сингулярного разложения в форме внешних произведений, т.е. разложение исходной матрицы на сумму матриц  $\sigma_i u_i v_i^T, i = \overline{1, n}$ , единичного ранга, каждая из которых определяется сингулярной тройкой  $(\sigma_i, u_i, v_i)$ . Каждому СНВ  $u_i (v_i)$  ЦИ ставится в соответствие числовая характеристика, определяемая следующим образом:

$$\bar{\eta} = \begin{cases} \frac{\eta}{2}, & \text{если } \eta - \text{четное} \\ \frac{\eta+1}{2}, & \text{если } \eta - \text{нечетное} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\eta$  - число изменений знака в последовательных компонентах СНВ. Для ЦИ определяется дискретная функция  $fr(i), i = \overline{1, n}$ , отражающей зависимость  $\bar{\eta}(u_i) (\bar{\eta}(v_i))$  - частоты СНВ  $u_i (v_i)$  от его номера  $i$ . Основой СНВ-подхода является установленное свойство линейности частоты СНВ для оригинального ЦИ в формате без потерь, которое заключается в следующем: практически постоянной является скорость возрастания тренда функции  $fr(i)$ , т.е.  $fr(i)$  хорошо аппроксимируется линейной функцией практически на всей области определения (рис.1).

<sup>1</sup> Appendix 1



**Рис.1. Графики зависимости частоты СНВ от его номера для оригинального ЦИ в формате без потерь и линейной аппроксимирующей функции.<sup>1</sup>**

Линейность частоты СНВ является характеристикой, чувствительной к возмущающим воздействиям, а значит дает принципиальную возможность для отделения оригинального контента от такого, целостность которого нарушена, в том числе в условиях малых возмущающих воздействий, независимо от их конкретики.

Поскольку ранее авторами показано, что частоты соответствующих левых и правых СНВ  $u_k$  и  $v_k$  матрицы ЦИ сравнимы между собой, как и частоты соответствующих им гармонических функций, далее для определенности рассматриваются левые СНВ.

В настоящий момент обработка ЦИ, в частности, процессы стеганопреобразования, сжатия с потерями с использованием стандартов Jpeg, Jpeg2000 и др. происходят поблоково после предварительного (стандартного) разбиения матрицы ЦИ на блоки [18]. Можно указать несколько причин повышения приоритетности блоковых алгоритмов:

- Вычислительная сложность любого блокового алгоритма определяется количеством обрабатываемых блоков, т.е. для  $n \times n$ -матрицы  $F$  составляет  $O(n^2)$  операций, что делает такой алгоритм перспективным для работы с цифровыми контентами, в частности, с ЦВ, в режиме реального времени;
- Блоковая обработка ЦИ дает возможность естественным образом распараллелить

этот процесс, проводя одновременно обработку нескольких блоков;

- Нарушение целостности ЦИ сегодня часто связано с процессом его стеганообразования. Современные стеганометоды, как правило, должны быть устойчивыми к атаке сжатием с потерями для обеспечения возможности сохранения ЦИ-стеганосообщения в таком формате (Jpeg), что, кроме всего прочего, дает возможность избежать дополнительного внимания к полученному стеганосообщению. Поскольку алгоритмы Jpeg, Jpeg2000 разбивают матрицу на блоки с последующей их обработкой, то для обеспечения возможности эффективного декодирования встроенной информации после сжатия стеганосообщения процесс стеганообразования целесообразно проводить также поблоково, управляя составляющими блока таким образом, чтобы устранить возможность разрушения встроенной информации в результате сжатия, что и приводит к блочной обработке ЦИ при встраивании дополнительной информации.

С учетом вышеперечисленного очевидной представляется приоритетность блочной обработки ЦИ на сегодняшний день, что приводит к целесообразности проведения экспертизы аналогичным образом, используя блочные методы. Необходимо отметить, что организация экспертизы при помощи блочных методов имеет смысл независимо от наличия/отсутствия первичной блочной обработки ЦИ с учетом незначительной вычислительной сложности таких методов.

Рассмотрим возможность применимости СНВ-подхода при организации блочной экспертизы. Для этого исследуем вопрос о том, насколько свойство линейности частоты СНВ является чувствительным к размеру матрицы ЦИ (блока), или иначе: насколько это свойство будет оставаться «определяемым» по мере уменьшения размеров контента. С учетом того, что функция  $fr(i), i = \overline{1, n}$  монотонной не является, можно предположить, что с уменьшением размером матрицы  $F$  линейность частоты СНВ будет все менее

очевидной даже для оригинальных контентов, что подтверждается вычислительным экспериментом, типичные наглядные результаты которого демонстрирует рис.2. Более того, при малом размере  $F$  (например, для наиболее часто используемого на практике  $8 \times 8$ -блока) не только не просматривается линейность частоты СНВ, но и отличить поведение функции  $fr(i), i = \overline{1, n}$  для оригинального ЦИ и ЦИ, целостность которого нарушена, не представляется возможным (рис.3), что подтверждается практической неразличимостью и количественных оценок:

$$L = \max_i |fr(i) - l(i)|,$$

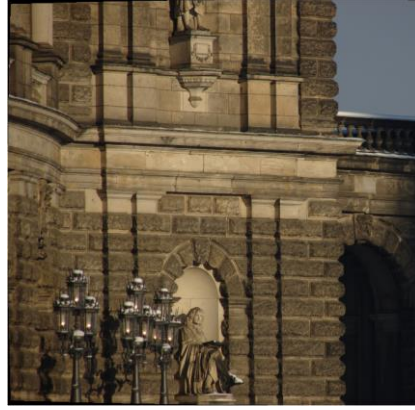
$$P = \left( \sum_{i=1}^n (fr(i) - l(i))^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $l(i), i = \overline{1, n}$  – результат дискретизации линейной аппроксимации функции  $fr(i)$ , которые рассматриваются в качестве показателей нарушения линейности частоты СНВ для ЦИ (кадра ЦВ).

С учетом результатов проведенных экспериментов очевиден вывод о необходимости адаптации СНВ-подхода для случая, когда экспертиза ЦИ осуществляется поблоково.

Рассмотрим зависимость всей совокупности частоты СНВ от их номера для всех блоков ЦИ одновременно. Здесь в силу возрастания количества данных проявление линейности частоты СНВ является ожидаемым и ярко проявляется в изменениях мод гистограмм значений частоты конкретных СНВ блоков (рис.4).

Учитывая результаты последнего эксперимента, можно предположить, что свойство линейности частоты СНВ будет явно просматриваться для блоков оригинальных ЦИ при рассмотрении для каждого СНВ его среднего по всем блокам ЦИ значения частоты  $\bar{\eta}_s(u_i(B))$ , что подтверждается на практике (рис.5(a)), а его отсутствие имеет место для возмущенных ЦИ (рис.5(б-г)).



а

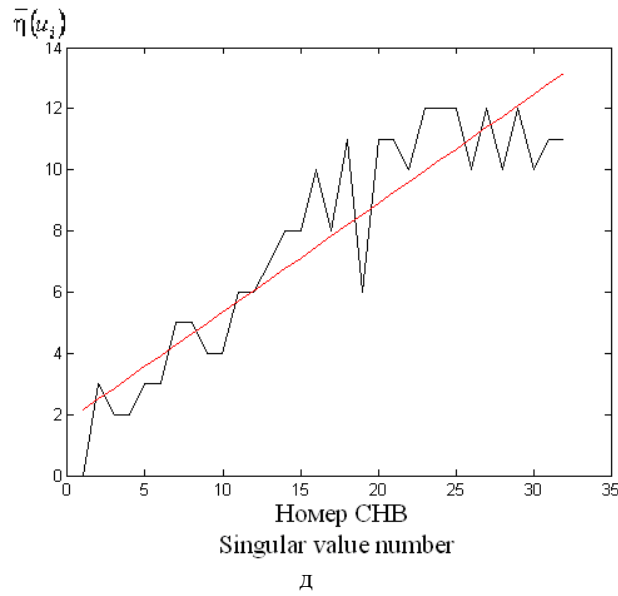
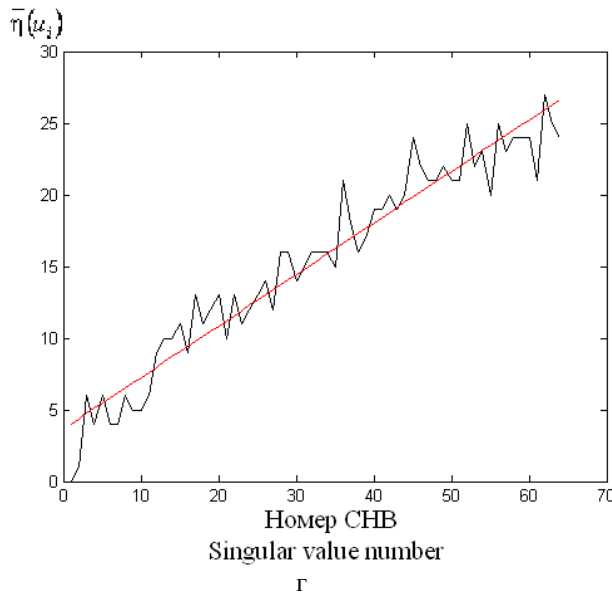
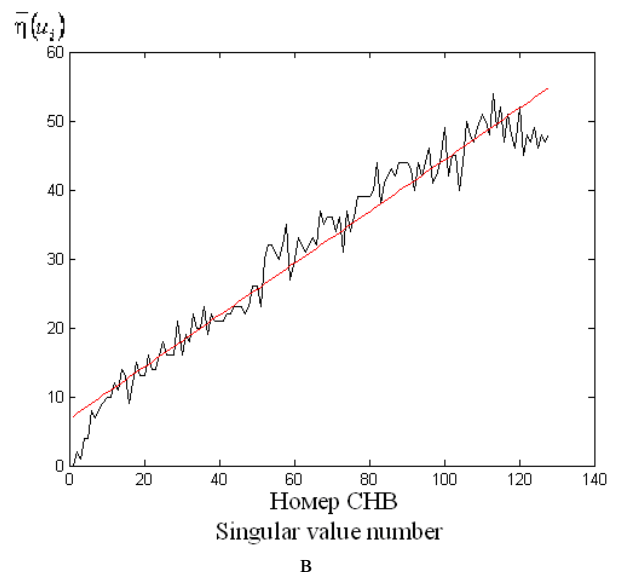
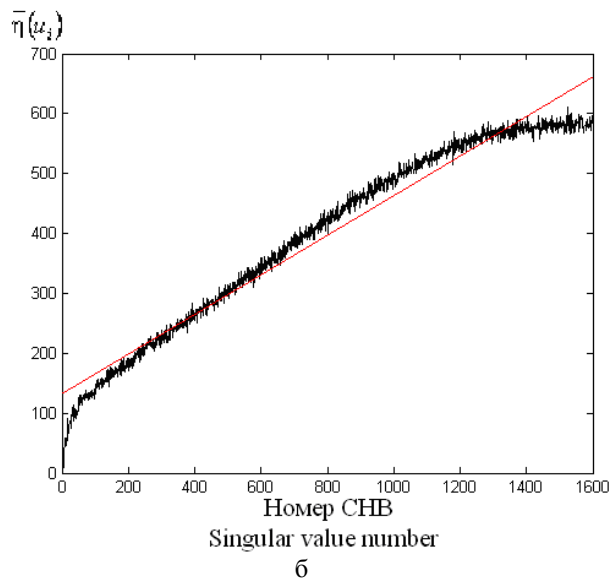


Рис.2. Графики зависимости частоты СНВ от его номера и их линейные аппроксимации для  $l \times l$ -подматриц матрицы оригинального ЦИ: а – оригинальное ЦИ; б –  $l=1600$ ; в –  $l=124$ ; г –  $l=64$ ; д –  $l=32^2$

<sup>2</sup> Appendix 1

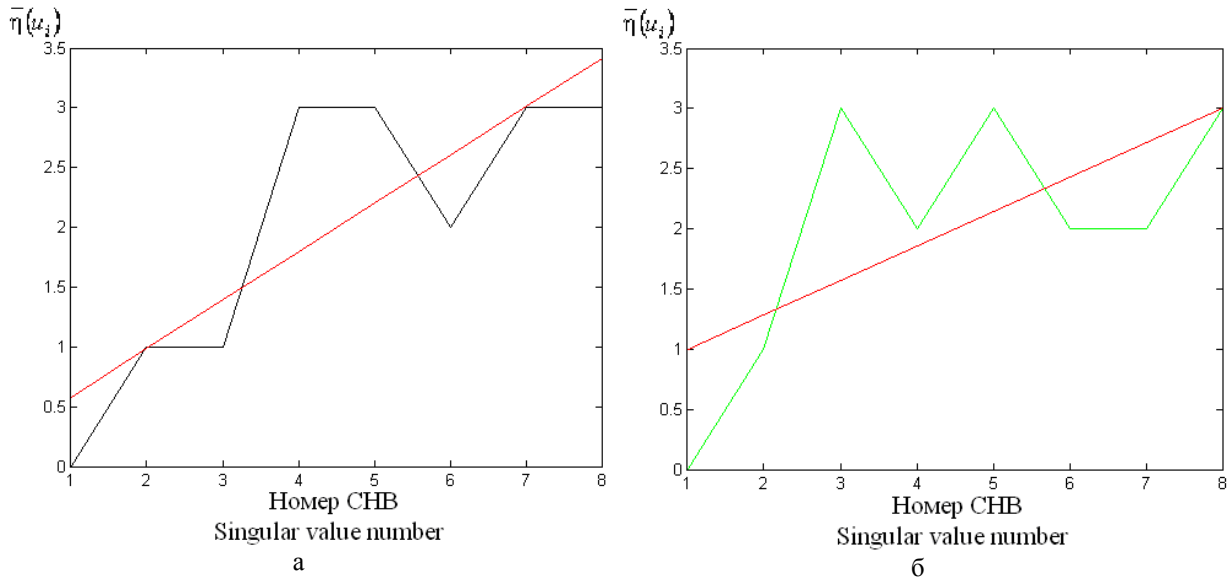


Рис.3. Графики зависимости частоты СНВ от его номера и их линейные аппроксимации для конкретного 8×8-блока конкретного ЦИ: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ после наложения гауссовского шума ( $D=0.0001$ )<sup>3</sup>

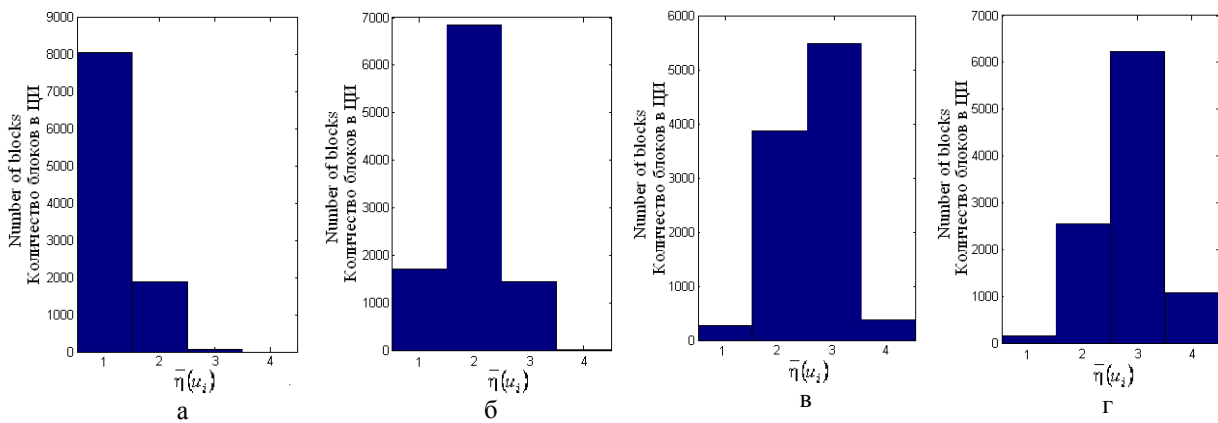


Рис.4. Гистограммы значений частоты для СНВ 8×8-блоков оригинального 800×800-ЦИ: а – для  $u_2$ ; б – для  $u_4$ ; в – для  $u_6$ ; г – для  $u_8$ <sup>4</sup>

Необходимо установить количественный показатель/показатели нарушения линейности частоты СНВ блоков ЦИ. Ранее авторами было показано, что частота СНВ  $u_i$  ( $v_i$ ) определенным образом отвечает той частотной составляющей контента, информация о которой, главным образом, содержится в сингулярной тройке  $(\sigma_i, u_i, v_i)$ , а именно в матрице ранга 1, имеющей вид  $\sigma_i u_i v_i^T$  (2): чем больше частота, максимально представленная в  $\sigma_i u_i v_i^T$ , тем больше и частота СНВ  $u_i$  ( $v_i$ ). Сингулярные тройки, отвечающие СНВ с наибольшими номерами, несут в себе информацию, главным образом, о высокочастотной составляющей сигнала, а соответствующие СНВ имеют наибольшие частоты. Однако эти же СНВ являются и

наиболее чувствительными к возмущающим воздействиям в соответствии с соотношением [20]:

$$\sin 2\theta_i \leq 2\|\Delta F\|_2 / \text{svdgap}(i, F),$$

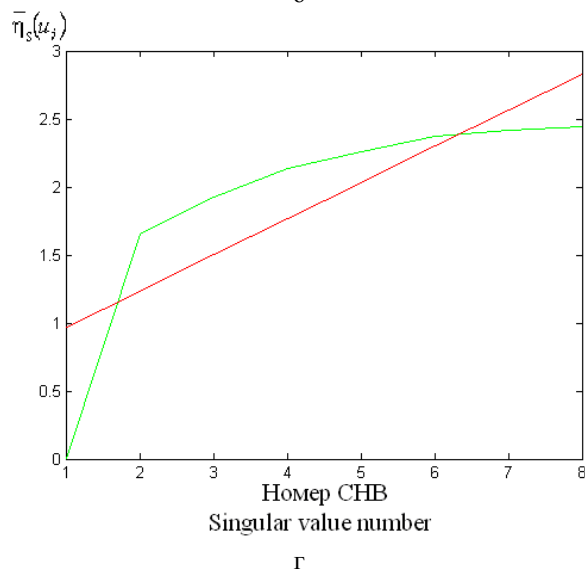
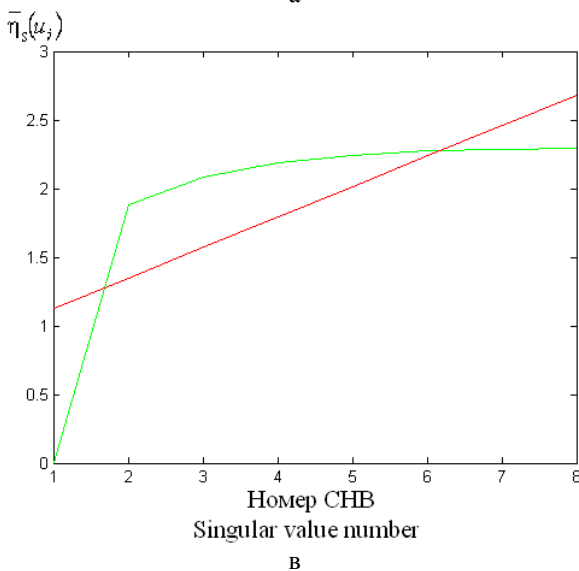
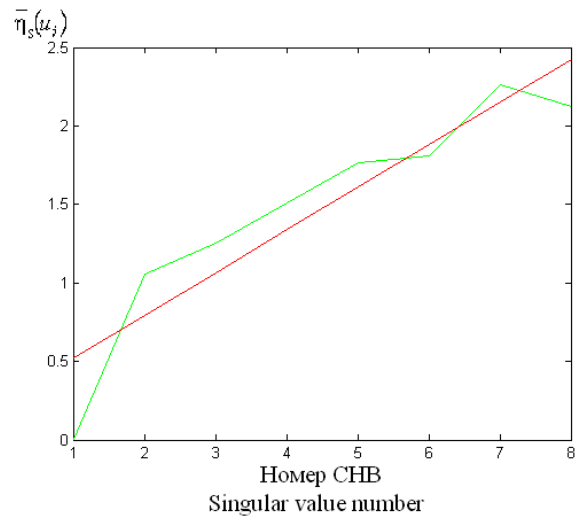
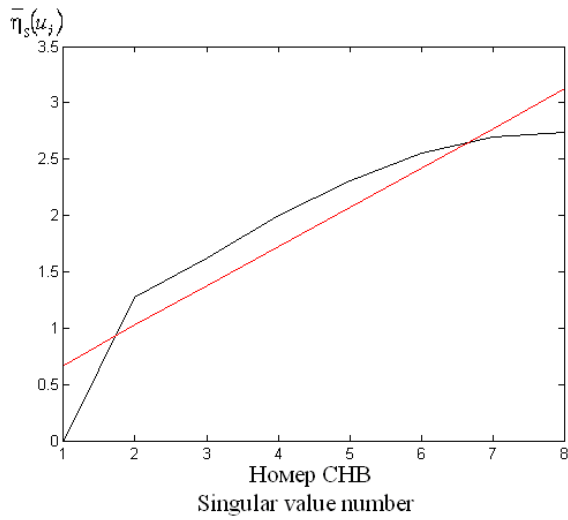
где  $\theta_i$  – угол поворота СНВ  $u_i$  в результате возмущающего воздействия, матричным представлением которого является  $n \times n$ -матрица  $\Delta F$ ,  $\|\cdot\|_2$  - спектральная матричная норма,  $\text{svdgap}(i, F) = \min_{i \neq j} |\sigma_i - \sigma_j|$  -

отделенность СНЧ  $\sigma_i$ , являющаяся мерой чувствительности СНВ к возмущающим воздействиям. С учетом (3) наименьшую отделенность будут иметь СНЧ с наибольшими номерами, следствием чего и является значительная чувствительность соответствующих СНВ, которые могут прореагировать значительным углом



поворота даже на округления, которые присутствуют в любом вычислительном процессе в системе чисел с плавающей точкой. Такая реакция СНВ может вывести

его за пределы того координатного ортанта соответствующего пространства, в котором этот вектор находился первоначально, изменив знаки некоторых его компонент.



**Рис.5. Графики зависимости  $\bar{\eta}_s(u_i(B))$  для  $8 \times 8$ -блоков конкретного ЦИ от его номера: а – оригинальное ЦИ (в формате без потерь); б – ЦИ, подвергшееся сжатию (Jpeg,  $QF=75$ ); в – ЦИ, подвергшееся наложению гауссовского шума ( $D=0.0001$ ); г – ЦИ, подвергшееся наложению мультипликативного шума ( $D=0.0001$ )<sup>5</sup>**

Блоки, которые рассматриваются при блоковой обработке ЦИ на практике, как правило, имеют размер  $l = 2^k$ , где  $k$  – натуральное число. Максимальная частота СНВ блока при таком размере не может превышать  $2^{k-1}$  (случай изменения знака при переходе от каждой компоненты вектора к последующей). Так максимальная частота СНВ в  $8 \times 8$ -блоках не может быть больше 4. Именно для последних СНВ в большинстве блоков оригинального ЦИ и будет наблюдаться максимальная (близкая к

максимальной) частота (см. пример рис.4). Однако в силу их большой чувствительности к возмущающим воздействиям эти воздействия, с учетом вышесказанного, с большой вероятностью приведут к изменению их частоты вместе с изменением знаков компонент, а поскольку у большинства СНВ с наибольшими номерами она максимальная (близкая к максимальной) из принципиально возможных значений, то возмущающие воздействия приведут к неувеличению/уменьшению частоты для

<sup>5</sup> Appendix 1

таких векторов (рис. 6 (рассматривается возмущение ЦИ, информация о котором представлена на рис. 4)), которое подтверждают также результаты вычислительного эксперимента, представленные в табл. 1.

Здесь и ниже при проведении вычислительного эксперимента задействуются следующие множества ЦИ:

- $M_1$  - оригинальные ЦИ в формате без потерь, из которых 400 ЦИ из баз [21,22], 200 ЦИ, полученных непрофессиональными видеокамерами,  $|M_1| = 600$ ;
- $M_2$  - ЦИ, целостность которых нарушена. Множество  $M_2$  сформировано из изображений, принадлежащих  $M_1$ , путем

применения различных возмущающих воздействий: наложения гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и  $D \in \{0.00001, 0.0001, 0.001\}$ ; мультипликативного шума ( $D \in \{0.001, 0.01\}$ ); шума «соль-перец» ( $d \in \{0.02, 0.05\}$ ); сжатия с потерями (алгоритм Jpeg с наиболее распространенным коэффициентом качества  $QF=75$ ); стеганопреобразования при помощи метода модификации наименьшего значащего бита (LSB-метод) с различными значениями пропускной способности скрытого канала связи (ПССК) (ПССК=1, 0.75, 0.5 бит/пиксель);  $|M_2| = 6120$ .

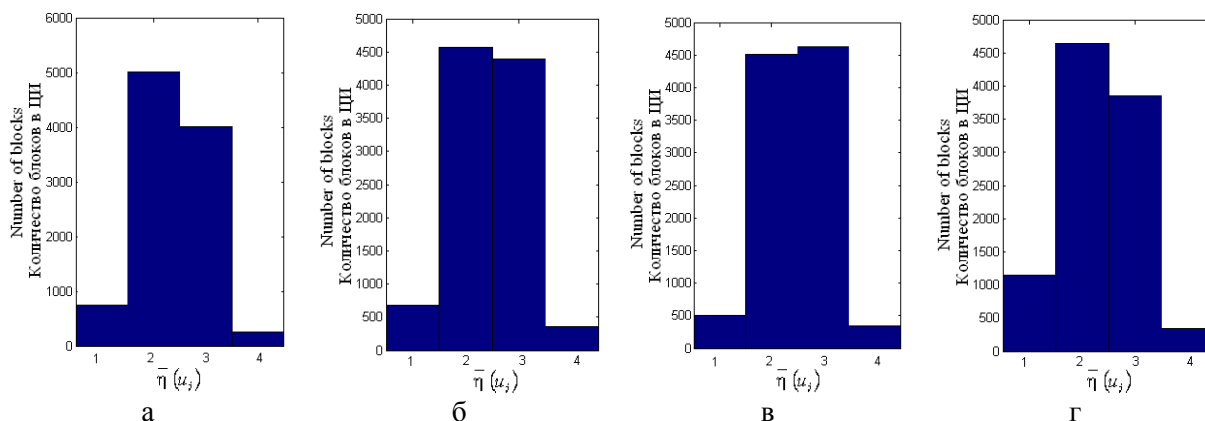


Рис.6. Гистограммы значений частоты для 8-го СНВ 8×8-блоков возмущенного 800×800-ЦИ: а – наложением гауссовского шума ( $D=0.0001$ ); б – наложением мультипликативного шума ( $D=0.001$ ); в – наложением шума «соль-перец» ( $d=0.05$ ); г – сжатием с потерями (Jpeg,  $QF=75$ )<sup>6</sup>

Большое внимание, которое уделяется в работе возмущающим воздействиям-шумам обусловлено тем, что результат любого возмущения принципиально может рассматриваться как наложение некоторого шума [23,24], кроме того шум часто используется для маскировки локальных нарушений целостности ЦИ (клонирование, фотомонтаж и др.).

Полученные результаты для характера изменения частоты СНВ блоков с наибольшими номерами с учетом того, что частота первого СНВ  $u_1$  во всех блоках всегда равна 0, поскольку все компоненты  $u_1$  положительны, а сам вектор близок к  $n$ -оптимальному вектору (1) [6], приводят к следующему выводу: скорость роста

линейной аппроксимации функции  $fr(i), i = \overline{1, l}$  для средних по блокам значений частот СНВ будет больше для оригинального контента, чем для того, целостность которого нарушена, что полностью подтверждается результатами вычислительного эксперимента (табл.2).

Необходимо отметить, что отличие как среднего по эксперименту значения среднего по блокам ЦИ значения частоты СНВ блока с наибольшим номером, так и среднего значения углового коэффициента линейной аппроксимации функции  $fr(i)$  зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера для полученных блоков, для оригинального и неоригинального контентов будет увеличиваться с ростом силы

<sup>6</sup> Appendix 1

применяемого возмущающего воздействия (табл. 1, 2 – уменьшение рассматриваемых параметров с увеличением параметров шумов, увеличением ПССК при стеганопреобразовании), что может быть впоследствии использовано для оценки величины возмущающего воздействия, примененного к ЦИ.

С учетом полученных результатов основные шаги предлагаемого универсального метода выявления нарушения целостности ЦИ следующие.

**Шаг 1.** Матрицу  $F$  ЦИ разбить стандартным образом на  $l \times l$ -блоки, произвольный из которых –  $B$ .

**Шаг 2.** Для каждого блока  $B$ :

2.1. Построить нормальное сингулярное разложение (2):  $B = U_B \Sigma_B V_B^T$ , определить левые СНВ блока -  $u_1(B), u_2(B), \dots, u_l(B)$ ;

2.2. Для каждого СНВ  $u_i(B), u_2(B), \dots, u_l(B)$  определить частоту  $\bar{\eta}(u_i(B)), i = \overline{1, l}$  в соответствии с (4).

**Шаг 3.** Построить гистограмму  $\Gamma_{\bar{\eta}}$  значений частоты СНВ  $u_i(B)$  блоков ЦИ. Определить  $\text{mod}(\Gamma_{\bar{\eta}})$  - моду  $\Gamma_{\bar{\eta}}$ .

**Шаг 4.** Если

$$\text{mod}(\Gamma_{\bar{\eta}}) < \frac{l}{2} - 1$$

то целостность ЦИ нарушена, переход на шаг 10.

**Шаг 5.** Определить  $\bar{\eta}_s(u_i(B)), i = \overline{1, l}$ , - средние по блокам ЦИ значения частот  $u_i(B)$  СНВ.

**Шаг 6.** Если

$$\bar{\eta}_s(u_i(B)) > C,$$

где  $C$  – пороговое значение, устанавливаемое экспериментально, то целостность ЦИ не нарушена, переход на шаг 10.

**Шаг 7.** Построить функцию  $fr(i), i = \overline{1, l}$ , зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ  $\bar{\eta}_s(u_i(B))$  от его номера.

**Шаг 8.** Определить угловой коэффициент  $\alpha$  для линейной аппроксимации функции  $fr(i), i = \overline{1, l}$ , полученной на предыдущем шаге.

**Шаг 9.** Если

$$\alpha \geq P,$$

где  $P$  – пороговое значение, устанавливаемое экспериментально, то целостность ЦИ не нарушена, иначе ЦИ претерпело нарушение целостности.

**Шаг 10.** Окончание экспертизы целостности ЦИ.

Алгоритмическая реализация метода была проведена для  $l=8$ . Для определения параметров  $C, P$  был проведен вычислительный эксперимент, условия которого соответствуют описанным выше. Для матрицы каждого из ЦИ множеств  $M_1, M_2$  строилось предварительное разбиение на  $8 \times 8$ -блоки, после чего для каждого блока находились частоты всех, в том числе и последнего, СНВ, полученных путем нормального сингулярного разложения матрицы блока; для каждого ЦИ строилась функция  $fr(i), i = \overline{1, l}$ , зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера, для линейной аппроксимации которой определялся угловой коэффициент  $\alpha$ ; а также определялось среднее значение  $\bar{\eta}_s(u_i(B))$  частоты  $u_i$  по всем блокам. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 7, 8.

В результате вычислительного эксперимента, где основное внимание уделялось ошибкам 1-го рода, пороговые значения для алгоритмической реализации разработанного метода определились как:  $C=2.28; P=0.35$ .

При тестировании алгоритмической реализации на ЦИ из множества  $M_1 \cup M_2$  были получены следующие оценки эффективности: ошибки 1-го рода – 3.9%, ошибки 2-го рода – 4.2%. Сравнительный анализ эффективности с методом, предложенным в [6], показал уменьшение ошибок 1-го рода практически на 2%, ошибки 2-го рода сравнимы по значению. Заметим, что возмущающие воздействия, в условиях которых происходило формирование множества  $M_2$ , включают очень незначительные по силе, в условиях некоторых из них метод из [6] вообще не тестировался, как, например, наложение гауссовского шума с  $D=0.00001$ , мультипликативного с  $D=0.001$ ,

стеганопреобразование методом выявления результатов этих воздействий не модификации наименьшего значащего бита с ПССК = 0.5 бит/пиксель, при этом снижается, что свидетельствует в его пользу эффективность разработанного метода по сравнению с аналогом.

Таблица 1<sup>7</sup>.

Среднее по эксперименту значение среднего по блокам ЦИ значения частоты восьмого СНВ блока для 8×8-блоков<sup>8</sup>.

Оригинальное ЦИ Original image	ЦИ, целостность которого нарушена в результате возмущающего воздействия The digital image whose integrity is compromised as a result of disturbance									
	Гауссовский шум Gaussian noise			Мультипликативный шум Multiplicative noise		Шум «соль-перец» «Salt & pepper» noise		Стеганопреобразование методом LSB Steganotransformation using LSB-method		Сжатие с потерями Jpeg (QF=75) Lossy compression
	D=0.00001	D=0.0001	D=0.001	D=0.001	D=0.01	d=0.02	d=0.05	ПССК 1 bpp	ПССК 0.5 bpp	
<b>2.7342</b>	2.5069	2.3134	2.2204	2.4146	2.2834	2.5837	2.4319	2.4724	2.5463	2.0829

Таблица 2<sup>9</sup>.

Среднее значение углового коэффициента линейной аппроксимации функции  $fr(i)$  зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера для 8×8-блоков<sup>10</sup>.

Оригинальное ЦИ Original image	ЦИ, целостность которого нарушена в результате возмущающего воздействия The digital image whose integrity is compromised as a result of disturbance										
	Гауссовский шум Gaussian noise			Мультипликативный шум Multiplicative noise		Шум «соль-перец» «Salt & pepper» noise		Стеганопреобразование методом LSB Steganotransformation using LSB-method		Сжатие с потерями Jpeg (QF=75) Lossy compression	
	D=0.00001	D=0.0001	D=0.001	D=0.001	D=0.01	d=0.02	d=0.05	ПССК 1 bpp	ПССК 0.75 bpp		ПССК 0.5 bpp
<b>0.3526</b>	0.2962	0.2312	0.1975	0.2682	0.2240	0.3273	0.2832	0.2820	0.2960	0.3046	0.2535

<sup>7,8,9,10</sup>Appendix 1

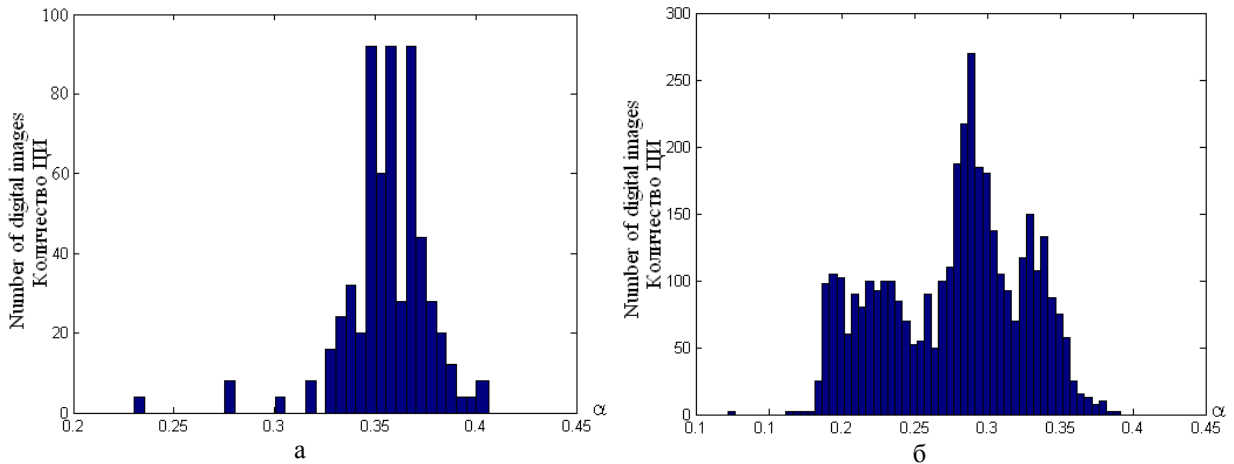


Рис.7. Гистограммы значений угловых коэффициентов  $\alpha$  линейных аппроксимаций для функции  $fr(i)$  зависимости среднего по блокам значения частоты СНВ от его номера, полученных для ЦИ: а – из множества  $M_1$ ; б – из множества  $M_2$ <sup>11</sup>

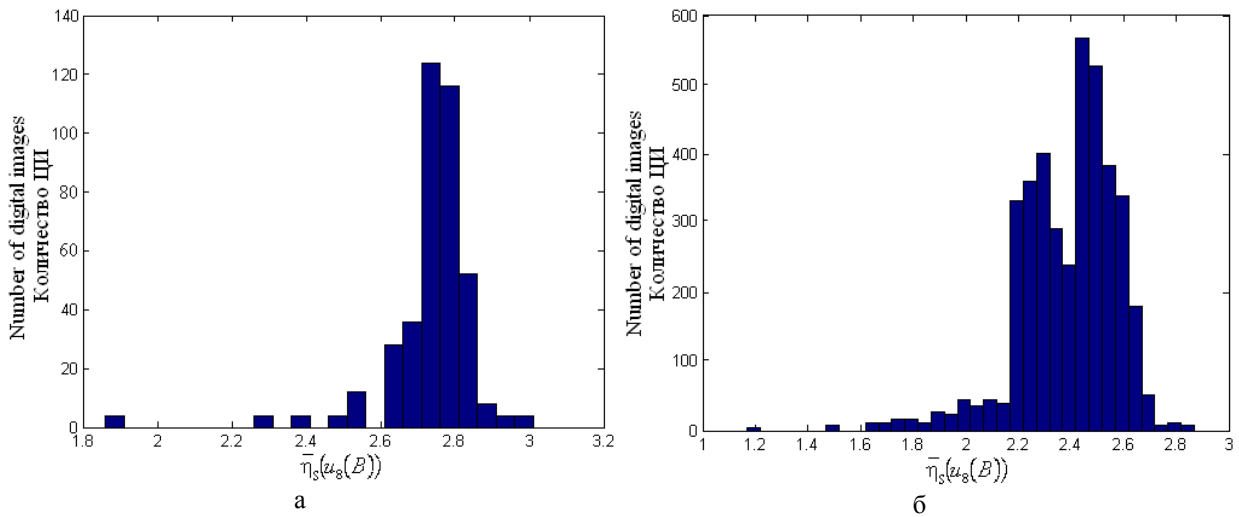


Рис.8. Гистограммы средних по блокам ЦИ значений частоты  $u_8(B)$ : а – для ЦИ из множества  $M_1$ ; б – из множества  $M_2$ <sup>12</sup>.

Вычислительная сложность предложенного метода в силу его блоковой организации определяется как  $O(n^2)$  операций для  $n \times n$ -матрицы ЦИ.

С учетом того, что формально ЦВ может рассматриваться как последовательность ЦИ-кадров, разработанный метод может использоваться для экспертизы целостности ЦВ.

### ВЫВОДЫ

В работе решена важная научно-практическая задача повышение эффективности выявления факта нарушения целостности ЦИ путем разработки универсального экспертного метода на основе СНВ-подхода.

Разработанный метод, являясь блоковым, имеет незначительную вычислительную сложность –  $O(n^2)$  операций для  $n \times n$ -матрицы ЦИ, что делает его перспективным для работы с цифровыми контентом, в частности с ЦВ, в режиме реального времени.

В ходе разработки метода:

- проведена адаптация СНВ-подхода для обеспечения эффективности его использования в случае блоковой организации экспертизы ЦИ;
- установлено, что частота СНВ, отвечающих наименьшим СНЧ  $l \times l$ -блоков матрицы ЦИ, является характеристикой, чувствительной к возмущающим воздействиям. Для оригинальных ЦИ среднее значение частоты СНВ  $u_l(B)$  значитель-

но превосходит этот параметр для ЦИ, целостность которого нарушена, причем отличие возрастает с ростом силы возмущающего воздействия. Учет данного свойства при разработке метода позволил значительно уменьшить количество ошибок 2-го рода при экспертизе по сравнению с вариантом, где это свойство учтено не было;

- установлено, что скорость роста линейной аппроксимации функции  $fr(i), i = \overline{1, l}$ , отражающей зависимость средних по блокам значений частот СНВ от номера вектора, будет больше для оригинального контента, чем для того, целостность которого нарушена, причем, как и для частоты СНВ, отвечающих наименьшим СНЧ  $l \times l$ -блоков, это отличие возрастает с ростом силы возмущающего воздействия, что может быть впоследствии использовано для оценки его величины. Данное свойство позволило в разработанном методе эффективно использовать количественную характеристику линейной аппроксимирующей функции для  $fr(i)$  - угловой коэффициент для отделения оригинального ЦИ от такого, целостность которого нарушена.

Разработанная алгоритмическая реализация предложенного экспертного метода позволила повысить эффективность выявления нарушения целостности ЦИ путем снижения ошибок 1-го рода на 2% по сравнению с аналогом, при этом ошибки 2-го рода остались на том же уровне. Универсальность метода подтверждается его высокой эффективностью независимо от специфики возмущающего воздействия, в том числе и в условиях незначительных возмущений.

#### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>Fig. 1. The dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number for the original lossy digital image and linear approximating function

<sup>2</sup>Fig. 2. The dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number and linear approximating function for  $l \times l$ -submatrix of original digital image: a – original digital image, b –  $l=1600$ , c –  $l=124$ , d –  $l=64$ , e –  $l=32$

<sup>3</sup>Fig. 3. The dependence of the frequency index of the singular vector of the image matrix on its number and linear approximating function for  $8 \times 8$ -block of digital

image: a – original digital image, b – digital image after applying Gaussian noise ( $D=0.0001$ )

<sup>4</sup>Fig. 4. Histograms of the frequency indexes' values for singular vectors of  $8 \times 8$ -blocks of original  $800 \times 800$  digital images: a –  $u_2$ , b –  $u_4$ , c –  $u_6$ ; d –  $u_8$

<sup>5</sup>Fig. 5. The dependences  $\bar{\eta}_s(u_i(B))$  of blocks of original digital images on its number: a – original lossless digital image, b – digital image under compression (Jpeg, QF=75), c – digital image after applying Gaussian noise ( $D=0.0001$ ), d – digital image after applying multiplicative noise ( $D=0.0001$ )

<sup>6</sup>Fig. 6. Histograms of the frequency indexes' values for 8<sup>th</sup> singular vector of disturbed  $800 \times 800$  digital image: a – after applying Gaussian noise ( $D=0.0001$ ), b – after applying multiplicative noise ( $D=0.001$ ), c – after salt-and-pepper noise ( $D=0.05$ ), d – after lossy compression (Jpeg, QF=75)

<sup>7,8</sup>Table 1. The experimental average value of the average value over digital image blocks of the frequency index's value of the eighth singular vector of a block for  $8 \times 8$  blocks

<sup>9,10</sup>Table 2. The average value of the angular coefficient of the linear approximation of the dependence of the block-average value of the frequency index of singular vector on its number for  $8 \times 8$  blocks

<sup>11</sup>Fig. 7. Histograms of angular coefficients values  $\alpha$  of linear approximation for  $fr(i)$  function of the dependence of the block-average value of the frequency index of singular vector on its number: a – for digital images from  $M_1$ , b – for digital images from  $M_2$

<sup>12</sup>Fig. 8. Histograms of average frequency index's values over digital image blocks  $u_8(B)$ : a – for digital images from  $M_1$ , b – for digital images from  $M_2$

#### Литература (References)

- [1] Rai A., Singh A.S., Kumar A.S. A Review of Information Security: Issues and Techniques. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2020, vol. 8, no. 5, pp. 953–960
- [2] Alqahtani F.H. Developing an Information Security Policy: A Case Study Approach. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 124, pp. 691–697
- [3] Korus P. Digital image integrity – a survey of protection and verification techniques. *Digital Signal Processing*, 2017, vol. 71, pp. 1–26
- [4] Thakur, T., Singh, K., Yadav, A. Blind approach for digital image forgery detection. *International Journal of Computer Applications*, 2018, vol. 179, no. 10, pp. 34–42
- [5] Shwetha B., Sathyanarayana S.V. Digital image forgery detection techniques: a survey. *AC-*

- CENTS Transactions on Information Security*, 2017, vol. 2(5), pp. 22–31
- [6] Kobozeva A.A., Bobok I.I., Garbuz A.I. General principles of integrity checking of digital images and application for steganalysis. *Transport and Telecommunication Journal*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 128–137.
- [7] Zorilo V.V., Petruk K.O., Lebedieva O.Yu. Vyyavlenyaya multiplykatyvnoho shumy v tsifrovyykh zobrazhennykh v umovakh zberezhennya z vtratamy [Detection of multiplicative noise in digital images under lossy storage conditions]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2018, vol. 13, no. 1-2, pp. 87-96. (in Ukrainian).;
- [8] Li H., Luo W., Qiu X., Huang J. Image forgery localization via integrating tampering possibility maps. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017, vol. 12, no. 5, pp. 1240–1252.
- [9] Khan S., Khan K., Ali F., Kwak K.-S. Forgery detection and localization of modifications at the pixel level. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 1, 137.
- [10] Chu X., Li H. A survey of blind forensics techniques for jpeg image tampering. *Journal of Computer and Communications*, 2019, vol. 7, no. 10, pp. 1–13.
- [11] Fridrich J., Goljan M. Practical steganalysis of digital images-state of the art. *SPIE International Symposium on Electronic Imaging 2002, Security and Watermarking of Multimedia Contents IV*, vol. 4675. Bellingham, 2002. P. 1–13.
- [12] Mandal P.C., Mukherjee I., Paul G., Chatterji B.N. Digital image steganography: A literature survey. *Information Sciences*, 2022, vol. 609, pp. 1451–1488.
- [13] Fridrich J., Goljan M., Du R. Steganalysis based on JPEG compatibility. Proceedings Volume 4518, Multimedia Systems and Applications IV. Denver, 2001. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.448213> (accessed 23.09.2022).
- [14] Farid H. Detecting Steganographic Message in Digital Images. Report TR2001-412, Dartmouth College, Hanover, NH, 2001.
- [15] T. H. Manjula Devi T.H. et al. Extracting hidden image using histogram, DFT and SVM. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Bangalore Annual Compute Conference (COMPUTE '09). Association for Computing Machinery, New York, 2009. Article 26, 1–4. Available at: <https://doi.org/10.1145/1517303.1517331> (accessed 23.09.2022)
- [16] Yan Y., Li L., Zhang Q. Universal steganalysis method based on multi-domain features. *J. of Information & Comp. Sci.*, 2013, pp. 2177–2185.
- [17] Natarajan V., Anitha R. Blind image steganalysis based on contourlet transform. *Int. J. on Cryptography and Information Security*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 77–87.
- [18] Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. 4<sup>th</sup> Ed. Pearson, 2018. 1019 p.
- [19] Bergman C., Davidson J. Unitary embedding for data hiding with the SVD. Available at: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/bb2b5041-1c92-4ff5-b7f4-ff73c3483eed> (accessed 23.09.2022)
- [20] Demmel J. *Applied Numerical Linear Algebra*. SIAM, 1997. 430 p.
- [21] NRCS Photo Gallery. Available at: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/newsroom/multimedia/> (accessed 23.09.2022).
- [22] Gloe T., Böhme R. The “Dresden Image Database” for benchmarking digital image forensics. *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing (SAC '10)*. New York, 2010, pp. 1585–1591
- [23] Srinivas R., Panda S. Performance analysis of various filters for image noise removal in different noise environment. *International Journal of Advanced Computer Research*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 47–52.
- [24] Srivastava C., Mishra S.K., Asthana P. Performance Comparison of Various Filters and Wavelet Transform for Image De-Noising. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 2013, 10, pp. 55-63.

**Сведения об авторах.**



**Бобок Иван Игоревич** – д.т.н., доц., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ, социальная инженерия.  
E-mail: [onu\\_metal@ukr.net](mailto:onu_metal@ukr.net)



**Кобозева Алла Анатольевна** – д.т.н., проф., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ.  
Email: [alla\\_kobozeva@ukr.net](mailto:alla_kobozeva@ukr.net)