

Development of a New Approach to the Problem of Detecting the Integrity Violations of a Digital Image

Bobok I., Kobozeva A.

Odesa Polytechnic National University
Odesa, Ukraine

Abstract. The energy sector is an integral part of the critical infrastructure of any state and is particularly sensitive to the quality of information security systems. Due to the diversity of activities of various organizations in the energy industry, almost all threats to information security are relevant to them, in particular, unauthorized changes in information content. The aim of the work is to develop the new approach to the examination of the integrity of images, which will provide the possibility of building universal methods for detecting its violations, effective regardless of the strength and type of influences that change them. The aim was achieved by: introducing the concept of “frequency index” for the singular vector of the image matrix, and study of the properties of the dependence of the frequency index of a singular vector on its number. The most important result of the work is the almost constant rate of increase the trend of the studied function, which results in the linearity of the frequency index of singular vectors for digital images, the integrity of which is not violated. This characteristic is sensitive to any changes in the image matrix. The significance of the obtained result lies in the fact that the use of the established properties for the function of the dependence of the frequency index of singular vectors on its number makes it possible to develop universal integrity examination methods that are effective regardless of the strength and type of disturbances that violated the integrity of the image.

Keywords: digital image, integrity violation, singular vector, frequency index, sensitivity.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.10>

UDC: 004.056

Elaborarea unei noi abordări a problemei detectării unei încălcări a integrității unei imagini digitale

Bobok I., Kobozeva A.

Universitatea Națională Politehnică din Odesa, Odesa, Ucraina

Rezumat. Sectorul energetic este o parte integrantă a infrastructurii critice a oricărui stat și este deosebit de sensibil la calitatea sistemelor de securitate a informațiilor. Datorită diversității activităților diferitelor organizații din industria energetică, aproape toate amenințările la adresa securității informațiilor sunt relevante pentru acestea, în special modificările neautorizate ale conținutului informațiilor. În această lucrare, imaginile digitale sunt considerate conținut informațional. Metodele experte devin extrem de relevante astăzi, a căror eficacitate nu depinde de specificul influenței perturbatoare utilizate, inclusiv de puterea acesteia. Cu toate acestea, metodele universale sunt practic absente în domeniul activității experților, ceea ce se datorează complexității semnificative a sarcinii în sine și lipsei unei baze matematice universale. Scopul lucrării este de a elabora o nouă abordare a examinării integrității imaginilor, care să ofere posibilitatea construirii unor metode universale de detectare a încălcărilor acesteia, eficiente indiferent de puterea și tipul de influențe care le modifică. Scopul a fost atins prin: introducerea conceptului de „indice de frecvență” pentru vectorul singular al matricei imaginii și studiul proprietăților dependenței indicelui de frecvență al unui vector singular de numărul acestuia. Cel mai important rezultat al lucrării este rata aproape constantă de creștere a tendinței funcției studiate, ceea ce are ca rezultat liniaritatea indicelui de frecvență al vectorilor singulari pentru imagini digitale, a căror integritate nu este încălcată. Această caracteristică este sensibilă la orice modificări ale matricei imaginii. Semnificația rezultatului obținut constă în faptul că utilizarea proprietăților stabilite pentru funcția de dependență a indicelui de frecvență al vectorilor singulari de numărul acestuia face posibilă elaborarea unor metode universale de examinare a integrității care sunt eficiente indiferent de puterea și tipul de tulburări care au încălcat integritatea imaginii.

Cuvinte-cheie: imagine digitală, încălcarea integrității, vector singular, indice de frecvență, sensibilitate.

Разработка нового подхода к проблеме выявления нарушения целостности цифрового изображения

Бобок И.И., Кобозева А.А.

Национальный университет «Одесская политехника», Одесса, Украина

Аннотация. Энергетическая сфера - составная часть критической инфраструктуры любого государства, является особенно чувствительной к качеству систем защиты информации. В связи с разнообразием деятельности различных организаций энергетической отрасли для них актуальны практически все угрозы информационной безопасности, в частности несанкционированные изменения информационных контентов, в качестве которых в работе рассматриваются цифровые изображения. Критически актуальными на сегодняшний день становятся экспертные методы, эффективность которых не зависит от конкретики использованного возмущающего воздействия, в том числе его силы – универсальные методы, которые практически отсутствуют в поле деятельности экспертов, что связано со значительной сложностью самой задачи, отсутствием универсального математического базиса. Целью работы является разработка нового подхода к проблеме выявления нарушения целостности изображений, который обеспечит возможность построения универсальных экспертных методов, эффективных независимо от силы и вида изменяющих изображения воздействий. Поставленная цель была достигнута путем решения следующих задач: выбора для сингулярного вектора матрицы изображения такого количественного параметра – частоты, который дает возможность учета поведения всех сингулярных векторов при экспертизе целостности изображения; исследования свойств функции зависимости частоты сингулярного вектора от его номера. Наиболее важным результатом работы является установленная в ходе исследования практически постоянная скорость возрастания тренда упомянутой функции, следствием чего является линейность частоты сингулярных векторов для цифровых изображений, целостность которых не нарушена. Данная характеристика является чувствительной к любым изменениям матрицы изображения. Значимость полученного результата заключается в том, что использование установленных свойств для функции зависимости частоты сингулярных векторов от его номера позволяет разработать универсальные методы экспертизы целостности, эффективные, независимо от силы и вида возмущающих воздействий, повлекших нарушение целостности изображения.

Ключевые слова: цифровое изображение, нарушение целостности изображения, сингулярный вектор, частота, чувствительность.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из главных, наиболее дорогих результатов человеческой деятельности во всех ее сферах является информация, а задача защиты информации от несанкционированного доступа, несанкционированного изменения становится все более сложной, критически важной [1,2]. Очевидно, что энергетическая сфера – составная часть критической инфраструктуры любого государства, является особенно чувствительной к качеству систем защиты информации, высокая цена ошибки заставляет подходить к вопросам защиты данных здесь с максимальной ответственностью. В связи с разнообразием деятельности различных организаций энергетической отрасли для них актуальны практически все угрозы информационной безопасности, в частности несанкционированные изменения информационных контентов, своевременное выявление которых в таких компаниях является жизненной необходимостью.

Одним из самых распространенных способов представления информации в современном мире является цифровое изображение (ЦИ). Существующие и разрабатываемые программные средства, используемые сегодня в процессе изменения ЦИ, становятся все более совершенными, такими, для выявления результатов которых имеющийся арсенал экспертных методов является недостаточным [3-5]. Нарушение целостности ЦИ, в качестве которого в работе рассматривается любое изменение его матрицы, может происходить в результате различных возмущающих воздействий: наложения шума, фильтрации, сжатия с потерями, стеганообразования и т.д., которые оставляют свои «уникальные отпечатки» на оригинальном изображении.

Вопросы, касающиеся экспертизы целостности ЦИ, активно решаются сегодня учеными. Все экспертные методы принято разделять на две группы: активные, требующие информацию об оригинальном ЦИ, использующие, как правило, электронную цифровую подпись или цифровые водяные знаки, и пассивные

(«слепые»), для которых информация об оригинальном изображении не нужна [6,7]. На сегодняшний день именно пассивные экспертные методы занимают приоритетные позиции [5,7]. При этом, в свою очередь, в зависимости от информации, которая присутствует у эксперта, их можно разделить на направленные (настроенные на конкретные возмущающие воздействия, учитывающие особенности, свойства возмущений, которые является результатом таких воздействий) и универсальные (настроенные на выявления наличия отличий исследуемого контента от оригинального независимо от того, каким образом эти изменения были получены). Направленные методы, как правило, являются более эффективными при выявлении того действия, на которое они настроены, чем универсальные в тех же условиях применения. Однако на практике очень часто основной является задача отделения оригинального ЦИ от такого, целостность которого нарушена, без определения конкретного источника, способа изменения изображения. Так для возможности использования ЦИ в судебных расследованиях в качестве вещественных доказательств, в средствах массовой информации для формирования общественного мнения и т.д. критическим является вопрос оригинальности ЦИ, установления факта отсутствия какой-либо его обработки. Кроме того, при осуществлении экспертизы целостности ЦИ эксперт, как правило, не имеет достоверной информации о характере, силе, конкретике возмущающего воздействия (ВВ), которому оно подверглось. И даже наличие такой информации, с учетом бесконечного многообразия различных возмущающих воздействий, но конечности имеющихся экспертных (программных, аппаратных) средств, на практике не гарантирует наличие у эксперта такого средства, которое будет ориентировано на выявления результатов конкретного произошедшего воздействия. Все вышеизложенное говорит о критической актуальности на сегодняшний день экспертных методов, способных эффективно выявлять нарушение целостности изображения независимо от специфики примененного ВВ, зафиксировать результат несоответствия параметров измененного ЦИ их состоянию для оригинального

изображения – универсальных методов. И хотя разработки в этом направлении ведутся [8], при этом чаще всего – в пределах стеганоанализа [9,10], на сегодняшний день универсальные методы выявления нарушений целостности ЦИ практически отсутствуют, что объясняется крайней сложностью задачи их разработки, особенно обеспечения их эффективности в условиях незначительных изменений контента, а усилия ученых чаще всего все же направлены на выявление результатов конкретных возмущающих воздействий, поиска их «уникальных отпечатков» [11-13]. Так, в [14] предложен экспертный метод, ориентированный на выявление результатов наложения на ЦИ мультипликативного шума – часто используемого возмущающего воздействия при неавторизованных изменениях изображения. Метод основан на анализе высокочастотных коэффициентов дискретного косинусного преобразования блоков, полученных в результате стандартного разбиения матрицы изображения [15], а именно, на анализе разности между максимальным и минимальным значениями таких коэффициентов. Алгоритмическая реализация метода подтверждает его высокую эффективность, но условия его применения ограничены мультипликативным шумом. Экспертный метод, разработанный в [16], ориентирован на выявление результатов применения к ЦИ шума Перлина, который широко используется для создания таких визуальных эффектов, как дым, облака, туман, огонь и т. д. Метод, предложенный в [17], направлен на выявление искусственного повышения резкости изображения путем анализа близких пар цветов и является недееспособным в случае другого ВВ. Существует целый ряд методов, которые применяются для экспертизы ЦИ в формате *Jpeg*, основанных на выявлении «эффекта двойного квантования», который возникает в гистограммах частотных коэффициентов изображения при первоначальном и повторном его сохранении в *Jpeg*. Данные методы имеют сегодня значительное распространение в силу широкого использования этого формата для хранения ЦИ [18,19], но очевидно, что ориентированность на формат *Jpeg*, а также зависимость их эффективности от соотношения коэффициентов качества

первичного и повторного сжатия с потерями значительно ограничивает область применения таких методов для экспертизы целостности и не дает возможности отнести их к группе универсальных.

Одним из немногочисленных существующих сегодня эффективных универсальных методов выявления нарушения целостности ЦИ является метод, разработанный в [8]. Основой метода является доказанное для большинства $l \times l$ -блоков оригинального ЦИ, полученных стандартным разбиением его матрицы, соотношение:

$$\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^\circ, e_1), \quad (1)$$

где u_1, v_1 – ортонормированные левый и правый сингулярные векторы (СНВ) блока, которые соответствуют его наибольшему сингулярному числу σ_1 ; $\bar{\sigma} = \sigma / \|\sigma\|$, где $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)^T$, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$ – сингулярные числа (СНЧ) блока; $\|\sigma\|$ – норма вектора σ ;

$$n^\circ = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l \quad (2)$$

– n -оптимальный вектор пространства R^l , $\angle(u_1, \bar{\sigma})$, $\angle(v_1, \bar{\sigma})$, $\angle(n^\circ, e_1)$ – величины углов между векторами u_1 и $\bar{\sigma}$, v_1 и $\bar{\sigma}$, n° и вектором стандартного базиса $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$ пространства R^l соответственно. Соотношение (1) 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. Однако в случаях возмущающего воздействия незначительной силы эффективность метода существенно снижается, что оставляет актуальной задачу поиска и разработки новых подходов, новых математических решений проблемы выявления нарушений целостности ЦИ, дееспособных независимо от конкретики и силы ВВ.

Целью настоящей работы является разработка нового подхода к проблеме выявления нарушения целостности ЦИ,

который обеспечит возможность построения универсальных экспертных методов, эффективных независимо от силы и вида возмущающего воздействия.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Универсальность искомого подхода обязана базироваться на универсальности математического представления нарушения целостности ЦИ, свободного от ориентированности/необходимости учета каких-либо особенностей того или иного ВВ. С учетом этого результат любого изменения изображения с $n \times n$ -матрицей F будем представлять в виде:

$$\bar{F} = F + \Delta F, \quad (3)$$

где $\bar{F}, \Delta F$ – $n \times n$ -матрицы измененного ЦИ и возмущающего воздействия соответственно, при этом количественной оценкой силы ВВ выступает норма матрицы ΔF : $\|\Delta F\|$. Необходимо отметить, что рассмотрение в качестве формального представления ЦИ одной матрицы F никак не ограничивает общность последующих рассуждений: в случае цветного изображения в качестве F может выступать произвольная цветовая составляющая (схема RGB) либо матрица яркости (схема YUV).

Пусть

$$F = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \quad (4)$$

– однозначно определяемое нормальное сингулярное разложение F [20], 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 [20]; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$ – СНЧ F ; правая часть (4) дает представление сингулярного разложения в форме внешних произведений. Нарушение целостности ЦИ приведет к возмущениям как СНЧ, так и СНВ матрицы F . Ранее авторами показано, что результат любого изменения ЦИ может быть формально представлен в виде совокупности возмущений СНВ и СНЧ его матрицы, а в качестве характеристик возмущающего воздействия могут

рассматриваются характерные свойства полученных возмущений СНЧ и СНВ; установлено соответствие между сингулярными тройками $(\sigma_i, u_i, v_i), i = \overline{1, n}$, матрицы ЦИ, определяющими матрицы единичного ранга $\sigma_i u_i v_i^T$ (4), и его частотными составляющими: тройки, отвечающие максимальным/средним/минимальным СНЧ несут, главным образом, информацию о низкочастотных/среднечастотных/высокочастотных составляющих ЦИ, имея различные свойства, в частности, различную чувствительность к возмущающим воздействиям, в пределах одной матрицы. При этом чувствительность тройки (σ_i, u_i, v_i) (матрицы $\sigma_i u_i v_i^T$) определяется чувствительностью входящих в нее СНВ, поскольку все СНЧ являются Хорошо обусловленными [21]. Чувствительность, определяющая степень реакции любой системы на ВВ, является одной из ключевых характеристик формальных параметров для задачи, рассматриваемой в работе. Однако чувствительность СНВ в пределах одной матрицы является характеристикой, не контролируемой систематически, поскольку для СНВ u_i определяется соотношением [21]:

$$\sin 2\theta_i \leq 2\|\Delta F\|_2 / \text{svdgap}(i, F), \quad (5)$$

где θ_i – угол поворота u_i в результате возмущающего воздействия ΔF (3), $\text{svdgap}(i, F) = \min_{i \neq j} |\sigma_i - \sigma_j|$ – отделенность СНЧ σ_i . Действительно, соотношение (5) дает практически ценную оценку сверху для угла θ_i только тогда, когда его правая часть меньше либо равна 1. В противном случае поведение вектора u_i после атаки непредсказуемо, что иллюстрирует рис.1 (заметим, при очень незначительном ВВ), где красным цветом выделена часть графика, отвечающая СНВ, для которых $2\|\Delta F\|_2 / \text{svdgap}(i, F) \leq 1$, при этом возмущение вектора u_i определяется как: $p = \|u_i - \bar{u}_i\|$, где \bar{u}_i – i -ый СНВ ЦИ после ВВ ΔF .

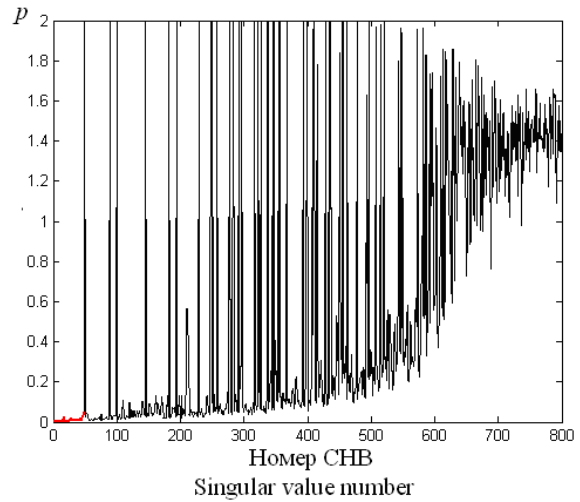


Рис. 1. Зависимость величины возмущения p СНВ от его номера при наложении на ЦИ мультипликативного шума ($D=0.000005$).¹

На первый взгляд, для решения поставленной задачи необходимо основываться на анализе нечувствительных параметров, т.е. тех, которые адекватно реагируют на ВВ, их реакция сравнима с силой ВВ, что и было реализовано в [8], где анализу подвергались СНЧ и наименее чувствительные к ВВ первые СНВ u_1, v_1 блоков матрицы. Однако, как следует из вышесказанного, такой анализ не дает окончательного решения рассматриваемой проблемы, что является ожидаемым, поскольку из рассмотрения и анализа исключается большая часть параметров ЦИ, которая однозначно определяет его вместе с СНЧ и векторами u_1, v_1 , кроме того, здесь нечувствительность некоторых анализируемых параметров, а именно u_1, v_1 , реакция которых при $\|\Delta F\| \approx 0$ может практически отсутствовать, оказывает негативное влияние на результат решения рассматриваемой проблемы. Это нельзя назвать принципиальным недостатком метода [8], поскольку, как известно, направленные на конкретное ВВ методы, как правило, являются более эффективными при выявлении результатов того действия, на которое они «настроены», чем универсальные в тех самых условиях применения, однако это не делает невозможным поиски путей повышения эффективности универсальных подходов.

С учетом вышесказанного, в работе решается задача поиска параметра, который

¹ Appendix 1

бы систематически контролировался для всех СНВ, дал возможность учета поведения всех СНВ ЦИ при экспертизе его целостности, вел себя относительно стабильно при последовательном переходе от одного СНВ к следующему, а также с точки зрения реакции на ВВ для всех СНВ матрицы. При этом величина такого параметра для $u_i(v_i)$ должна коррелировать с частотой, информация о которой содержится в соответствующей сингулярной тройке (σ_i, u_i, v_i) , т.к. именно класс частотного показателя (высокочастотный, низкочастотный, среднечастотный) является указателем на необходимые ориентиры для регистрации изменения ЦИ, если таковое имеет место.

Для решения упомянутой задачи посмотрим на произвольный СНВ $u_i(v_i)$ ЦИ как на результат дискретизации некоторой функции $f_i(x)$ на промежутке $[1, n]$. Исходя из требований, накладываемых на искомый параметр, в качестве него рассмотрим частоту [22] дискретной функции, еще никогда не рассматриваемую в качестве количественной характеристики СНВ, которая в случае гармонической функции просто совпадает с частотой, а для в нашем случае негармонической определяется как [22]:

$$\bar{\eta} = \begin{cases} \frac{\eta}{2}, & \text{если } \eta - \text{четное} \\ \frac{\eta+1}{2}, & \text{если } \eta - \text{нечетное} \end{cases} \quad (6)$$

где η - число изменений знака функции на рассматриваемом промежутке. И хотя СНВ при их рассмотрении в качестве дискретных функций не имеют такого природного соответствия гармоникам, как, например, функции Уолша [22], что, видимо, и является причиной того, что до настоящего времени в научном поле для них не вводилась характеристика (6), можно предположить, что частота СНВ $u_i(v_i)$ ведет себя для ЦИ соответственно частоте, отвечающей сингулярной тройке (σ_i, u_i, v_i) : возрастая (относительно монотонно, что уточняется ниже) на всех участках с увеличением номера СНВ, что подтверждается результатами вычислительного эксперимента, типичный

вид которых для конкретного ЦИ размером 800×800 пикселей приведен на рис.2.

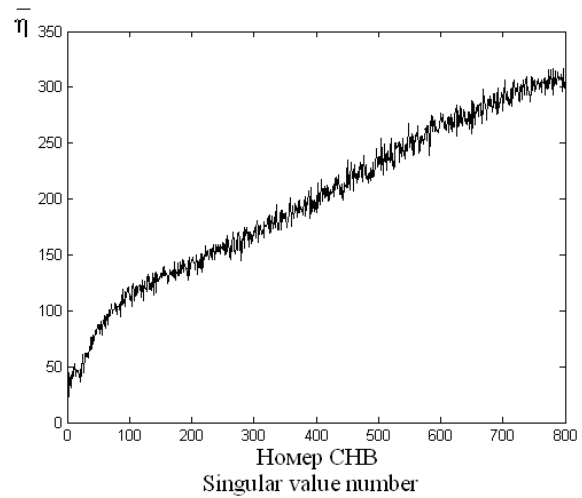


Рис.2. Зависимость частоты СНВ от его номера для оригинального ЦИ.²

Рассмотрим подробно свойства дискретной функции $fr(i), i = \overline{1, n}$, отражающей зависимость частоты СНВ $u_i(v_i)$ от его номера i для оригинального ЦИ. Как показано авторами ранее, первый СНВ матрицы ЦИ $u_1(v_1)$, полученный нормальным сингулярным разложением (4), имеет все положительные координаты и условно близок к n -оптимальному вектору (2) соответствующего пространства R^n , т.е. находится в первом координатном ортанте R^n , имея нулевую частоту. Второй СНВ не может остаться в этом же координатном ортанте, поскольку ортогонален первому, что приводит к появлению у u_2 координат разных знаков, т.е. к увеличению частоты для u_2 по сравнению с u_1 . Эта частота, в силу изменения направления СНВ u_2 , по сравнению с u_1 , на 90 градусов, возрастет, но незначительно, что обеспечивается геометрическим расположением u_2 в координатном ортанте, расположенном в близости от первого ортанта. Ортогональность u_3 с u_1 исключит из возможных для его расположения первый координатный ортант, а ортогональность u_3 с u_2 исключит для u_3 ортант, в котором расположен u_2 , и т.д. Парная ортогональность СНВ приводит к тому, что каждый координатный ортант пространства

² Appendix 1

R^n может содержать не более одного СНВ, т.к. в пределах одного координатного ортанта геометрически невозможно обеспечить ортогональность векторов (с учетом, что первый СНВ $u_1(v_1)$ геометрически далек от каждой из координатных плоскостей). Этот вывод подтверждается так же и следующим образом. Пусть векторы $u_i = (u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ni})^T$, $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{nj})^T$ - различные СНВ F . Если предположить, что векторы принадлежат одному координатному ортанту, то

$$\text{sign}(u_{ki}) = \text{sign}(u_{kj}), k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

из чего вытекает, что их скалярное произведение $(u_i, u_j) = \sum_{k=1}^n u_{ki} u_{kj} \geq 0$, а в силу (7) может быть равно нулю только в случае, когда $u_{ki} u_{kj} = 0$ для $\forall k = \overline{1, n}$. Это, в свою очередь требует того, чтобы в каждой паре u_{ki}, u_{kj} хотя бы один элемент был равен 0, т.е. в двух векторах u_i, u_j , имеющих по n координат, в совокупности n компонент, как минимум, на два вектора были равны 0 (и это для каждой пары СНВ, которые предположительно окажутся в одном координатном ортанте), т.е. совокупное количество нулевых элементов в $n \times n$ -матрице U (V) должно быть не меньше n (в предположении существования хотя бы одной пары таких СНВ, которые удовлетворяют (7)), что не соответствует наблюдаемому на практике, судя по результатам вычислительного эксперимента, в котором было установлено, что нулевые элементы практически отсутствуют в матрицах U (V) – для ЦИ размером 800×800 их количество максимально не превосходило 350 элементов по всей матрице, что исключает возможность $(u_i, u_j) = 0$, тем самым определяя для каждого СНВ свою уникальную последовательность положительных и отрицательных координат. Это не зависит от формата ЦИ (с/без потерь), не зависит от величины коэффициента качества для ЦИ в формате с потерями. В данном случае это является следствием теоремы Фробениуса, указывающего на близость $u_1(v_1)$ к n -оптимальному вектору

(2), и свойств нормального сингулярного разложения, а именно, ортогональности матриц U, V , которые остаются неизменными независимо от оригинальности/неоригинальности ЦИ, его формата, размера.

Практическим подтверждением полученного вывода явились результаты вычислительного эксперимента, в котором было задействовано 450 ЦИ из базы NRCS [23], 700 ЦИ из базы img_Nikon_D70s [24], 500 ЦИ, полученных непрофессиональными видеокамерами.

По мере удаления от первого координатного ортанта, которое будет происходить для СНВ по мере возрастания их номера, будет не уменьшаться и их частость. Это неумножение нельзя назвать строго монотонным, т.е. происходящим при каждом переходе от u_i к u_{i+1} (рис.2).

Действительно, незначительные перераспределения количеств положительных и отрицательных элементов в u_{i+1} по сравнению с u_i может привести как к увеличению, так и к незначительному уменьшению или неизменности частости вектора, что продемонстрировано на рис.3, после предварительного ввода следующих обозначений для наглядности: $u_i^{\text{sign}} = (\text{sign}(u_{1i}), \text{sign}(u_{2i}), \dots, \text{sign}(u_{ni}))^T$ - вектор, отвечающий СНВ $u_i = (u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ni})^T$ и очевидно имеющий ту же частость, что и u_i . Для вектора u_i (u_i^{sign}) частость $\bar{\eta} = 2$ (рис.3(a)), которая в случае изменения знака лишь одной компоненты может стать равной для u_{i+1} (u_{i+1}^{sign}) $\bar{\eta} = 3, 1, 2$ (рис.3(б,в,г) соответственно), что позволяет вернуться к гипотезе о монотонном неубывании для тренда $fr(i), i = \overline{1, n}$ (везде ниже – гипотеза А), которое будет иметь место как для оригинальных, так и для ЦИ, которые были подвержены возмущающему воздействию.

Однако характер этой монотонности для оригинальных и неоригинальных изображений, как показано ниже, будет различен.

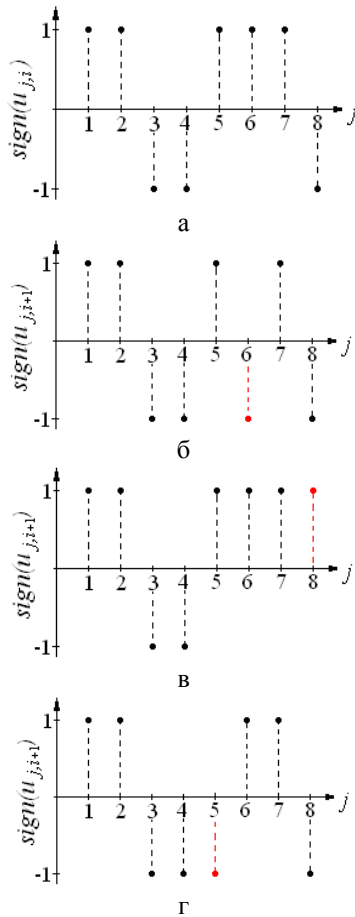


Рис.3. Иллюстрация возможных вариантов изменения частоты СНВ ($n=8$) с возрастанием его номера: а – вектор u_i^{sign} ; б, в, г – вектор u_{i+1}^{sign} .

К гипотезе А можно также прийти, используя подход, аналогичный предложенному Кобозевой А.А. и соавторами в статье, опубликованной в 2022 году в настоящем научном журнале. Из (4) вытекает:

$$\Sigma = U^T F V. \tag{8}$$

Для упрощения понимания принципиальной связи частоты СНВ с частотными составляющими ЦИ предположим, что F - диагональная матрица с элементами $f_{ij}, i, j = \overline{1, n}$. Соотношение (8) представим в виде:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} u_1^T \\ u_2^T \\ \dots \\ u_n^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} u_{11}f_{11} & u_{21}f_{22} & \dots & u_{n1}f_{nn} \\ u_{12}f_{11} & u_{22}f_{22} & \dots & u_{n2}f_{nn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{1n}f_{11} & u_{2n}f_{22} & \dots & u_{nn}f_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{pmatrix}$$

Частота вектора $u_k, k = \overline{1, n}$, не изменится в результате умножения $U^T F$, т.е. при преобразовании его к виду $(u_{1k}f_{11} \dots u_{nk}f_{nn})$, что определяется k -ой строкой $U^T F$, т.к. каждый его элемент умножается на неотрицательное число – диагональный элемент F . Таким образом:

$$\sigma_k = ((u_{1k}f_{11} \dots u_{nk}f_{nn}), v_k), k = \overline{1, n}, \tag{9}$$

т.е. СНЧ σ_k определяется скалярным произведением вектора, частота которого равна частоте u_k , и вектора v_k . Поскольку, как показано авторами ранее, СНВ v_1 близок к n -оптимальному вектору пространства R^n , а матрица V имеет те же свойства, что и матрица U , то частоты векторов u_k и v_k будут сравнимы между собой, как и частоты соответствующих им гармонических функций, что подтверждается вычислительным экспериментом, иллюстрацией типичных результатов которого для конкретного ЦИ (формат Tif) размером 800×800 является рис.4.

Учитывая выше упомянутое, а именно, связь между сингулярными тройками и частотными составляющими ЦИ, соответствие между СНВ и гармоническими функциями, соответствие между частотой СНВ $u_i (v_i)$ и частотой частотной составляющей изображения, отвечающей (σ_i, u_i, v_i) , из соотношения (9) можно сделать вывод, что обеспечение повышения частоты в частотной составляющей ЦИ может быть обеспечено увеличением частоты соответствующих СНВ вместе с увеличением их номера.

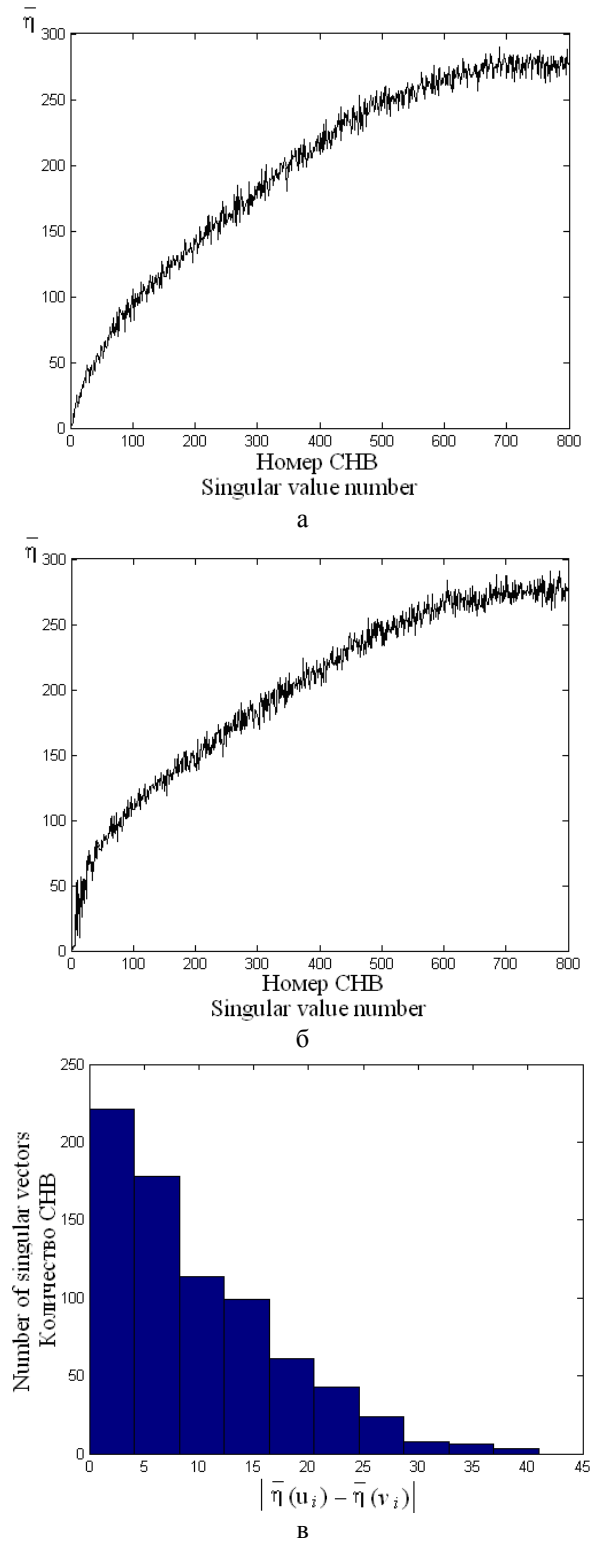


Рис.4. Зависимость частоты СНВ от его номера для конкретного ЦИ: а – левые СНВ; б – правые СНВ; в – гистограмма абсолютных значений разности частот соответствующих левых и правых СНВ.⁴

Выдвинутая гипотеза А нашла свое подтверждение на практике.

Обозначим $\bar{\eta}(u_i)$ - частоту СНВ u_i , $\Delta(u_i)$ - изменение частоты СНВ при переходе $(i-1) \rightarrow i$, т.е.

$$\Delta(u_i) = \bar{\eta}(u_i) - \bar{\eta}(u_{i-1}), i = \overline{2, n}. \quad (10)$$

С учетом вышесказанного, для оригинального ЦИ изменение частоты СНВ с увеличением номера будет происходить на некоторую «условную константу» (в пределах незначительно отличающихся границ (как показывает вычислительный эксперимент, в подавляющем большинстве эти границы составляют $[-20, 20]$) (типичный пример приведен на рис.5(б) для ЦИ (рис.5(а)) в формате Tif (красным выделена линейная аппроксимация $\Delta(u_i)$ с практически нулевым угловым коэффициентом -0.0002 и свободным членом 0.6927). Это говорит о практически постоянной скорости возрастания для тренда функции зависимости $\bar{\eta}(u_i)$ от i , т.е. о том, что функция $fr(i), i = \overline{1, n}$, должна хорошо аппроксимироваться линейной функцией для оригинального ЦИ без потерь, что и наблюдается на практике (рис.5(в) – красным выделена линейная аппроксимация $fr(i)$). Назовем это свойство **линейностью частоты СНВ**.

Введем понятие относительного изменения частоты $\delta(u_i)$ при переходе от предыдущего СНВ к последующему $((i-1) \rightarrow i)$ с учетом (10) в соответствии с формулой:

$$\delta(u_i) = |\Delta(u_i)| / \bar{\eta}(u_{i-1}). \quad (11)$$

Относительное изменение частоты будет максимальным для СНВ с начальными номерами: для u_1 частота в любом ЦИ равна нулю, ее незначительное увеличение по сравнению с нулем для u_2 , далее – для u_3 и т.д. (для СНВ с малыми номерами) в относительном смысле будет максимальным, поскольку малой будет сама их частота, но с ростом номера СНВ это относительное изменение должно (трендово) монотонно замедлять свою скорость, т.к. абсолютное возрастание частоты остается в пределах незначительно отличающихся границ, как

⁴ Appendix 1

показано выше, а сама частота увеличивает свое значение (рис.5(г)) - не представлено $\delta(u_i) = +\infty$ в соответствии с (11)).

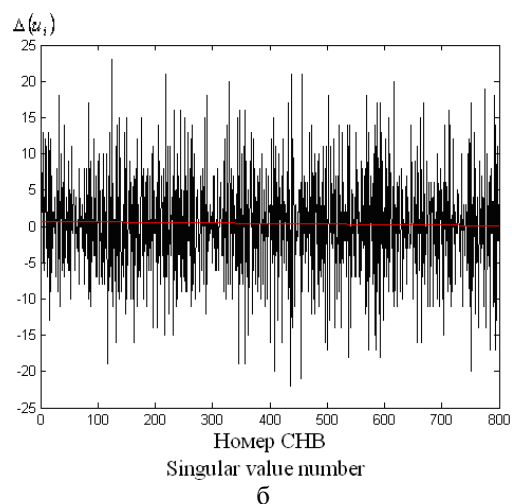
Все рассмотренные выше свойства частоты СНВ присущи оригинальному ЦИ в формате без потерь. Ожидаемым является изменение этих свойств для ЦИ, подвергнутого ВВ. В частности очень специфической и ожидаемо чувствительной характеристикой оригинального ЦИ является установленная выше линейность частоты СНВ. Действительно, СНВ ЦИ, исключая несколько первых, являются чувствительными к любым ВВ, причем контроль этой чувствительности в соответствии с формулой (5) принципиально может быть осуществлен лишь для нескольких первых. Для большинства же

СНВ матрицы ЦИ угол их поворота при ВВ может быть вплоть до развернутого, причем, что особенно важно, это происходит и при очень незначительном ВВ (рис.1), что очевидно значительно изменяет их частоту вследствие перехода не в близлежащий координатный ортант, следствием чего является нарушение линейности частоты СНВ неоригинального ЦИ, потенциально обеспечивая возможность отделения оригинального ЦИ от неоригинального при помощи учета линейности частоты, в частности в условиях малых ВВ.

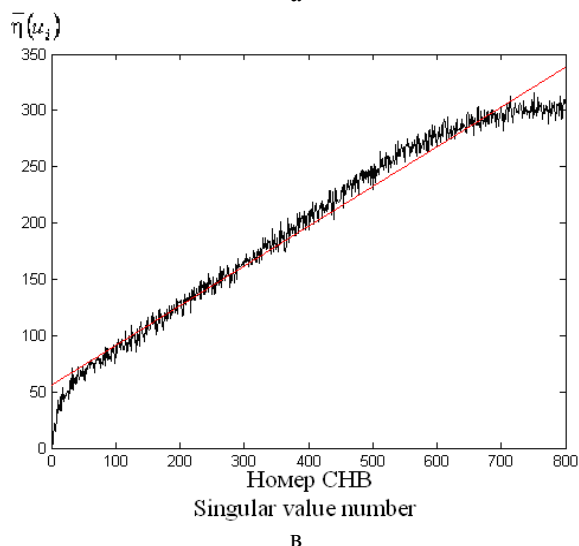
Полученный теоретически вывод нашел свое подтверждение на практике, иллюстрация чего приведена на рис.6 для ЦИ, представленного на рис.5(а).



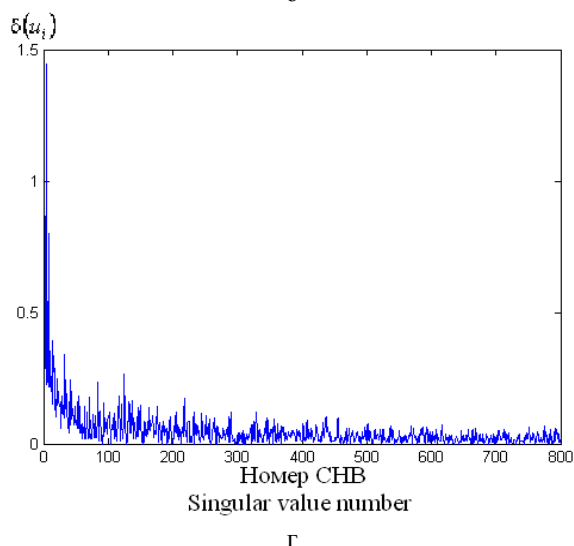
а



б



в



г

Рис.5. Свойства частоты СНВ матрицы ЦИ: а – тестовое ЦИ; б – зависимость $\Delta(u_i)$ от номера СНВ; в – зависимость частоты СНВ от его номера; г – зависимость $\delta(u_i)$ от номера СНВ.⁵

⁵ Appendix 1

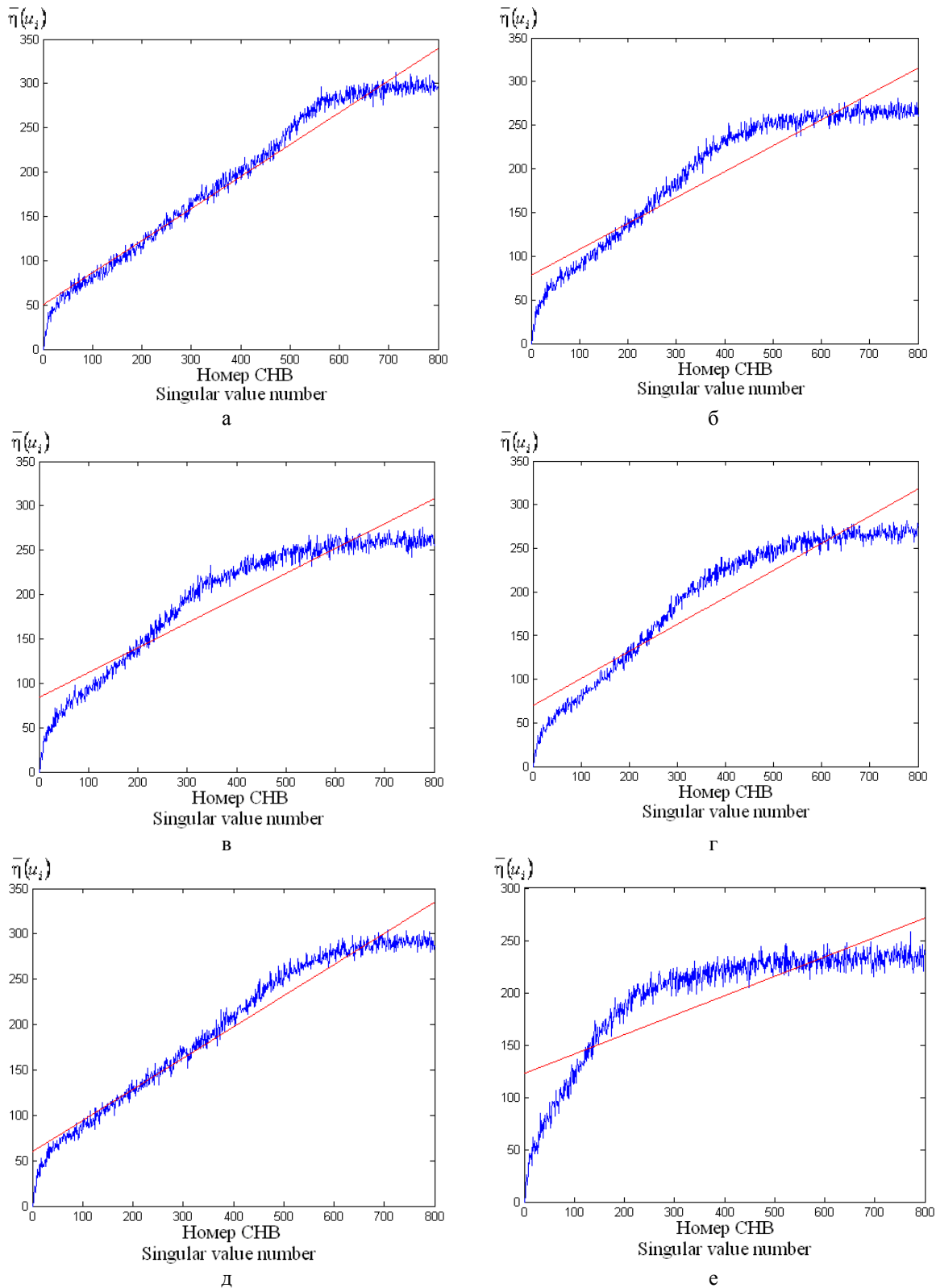


Рис.6. Нарушение линейности частоты ЧВБ для ЦИ, целостность которых нарушена в результате возмущающих воздействий: а – сжатия с потерями ($QF=75$); б – наложения гауссовского шума с нулевым матожиданием и $D=0.0001$; в – наложения мультипликативного шума с $D=0.001$; г – медианной фильтрации с маской 3×3 ; д – стеганообразования методом LSB с пропускной способностью скрытого канала 0.25 бит/пиксель; е – наложения пуассоновского шума.⁶

⁶ Appendix 1

Исследования относительного изменения частоты СНВ $\delta(u_i)$ для оригинальных ЦИ и таких, целостность которых была нарушена, не дали на данном этапе результатов, использование которых позволило бы отделять изображения независимо от силы ВВ, в частности, в условиях незначительной ΔF (3). Вследствие этого основной упор при разработке соответствующих экспертных методов авторами будет сделан на анализ линейности частоты СНВ.

ВЫВОДЫ

В работе предложены основы нового подхода к проблеме выявления нарушений целостности ЦИ. В ходе исследования:

- Для СНВ матрицы ЦИ введено понятие частоты вектора – параметра, который, в отличие от чувствительности СНВ, дает возможность использовать весь набор СНВ при экспертизе целостности ЦИ. Учет характеристик поведения всех СНВ, однозначно определяющих ЦИ, позволил расширить объем анализируемой информации о наличии/отсутствии изменений ЦИ, что должно привести к увеличению чувствительности соответствующих универсальных экспертных методов, особенно в условиях незначительных возмущающих воздействий;

- Исследованы свойства функции зависимости частоты СНВ от его номера, в ходе чего установлено, что для оригинальных ЦИ практически постоянной является скорость возрастания для тренда упомянутой функции, следствием чего является линейность частоты СНВ для ЦИ, целостность которых не нарушена;

- Линейность частоты СНВ является характеристикой, чувствительной к любым возмущающим воздействиям, в том числе незначительным. Нарушение линейности частоты для неоригинального ЦИ позволяет отделять его от изображения, целостность которого нарушена не была.

Использование установленных свойств для функции зависимости частоты СНВ от его номера даст возможность для разработки универсальных экспертных методов, эффективных независимо от силы и вида возмущающего воздействия, повлекших нарушение целостности ЦИ.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Dependence of the perturbation value p of a singular vector on its number when superimposing multiplicative noise on a digital image ($D=0.000005$)

²**Fig. 2.** Dependence of the frequency index of singular vector on its number for the original digital image

³**Fig. 3.** Illustration of possible options for changing the frequency index of singular vector ($n=8$) with increasing number: a – vector u_i^{sign} ; b, c, d – vector

u_{i+1}^{sign}

⁴**Fig. 4.** Dependence of the frequency index of singular vector on its number for a specific digital image: a – left singular vectors; b – right singular vectors; c – histogram of the absolute values of the frequency index difference of the corresponding left and right singular vectors

⁵**Fig. 5.** Frequency index properties of singular vectors of digital image matrix: a – tested digital image; b – dependence of $\Delta(u_i)$ on singular vector number; c – dependence of the frequency index of singular vector on its number; d – dependence of $\delta(u_i)$ on singular vector number

⁶**Fig. 6.** Violation of the linearity of the frequency index of singular vectors for digital images, the integrity of which is violated as a result of disturbing influences: a – lossy compression (QF=75); b – overlaying Gaussian noise with zero mean and $D=0.0001$; c – overlaying multiplicative noise with $D=0.001$; d – median filtering (mask 3×3); e – LSB stegano transformation (0.25 bpp); f – overlaying Poisson noise

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] Hachani M., Zaid A. Digital Signature Based Control Integrity for JPEG HDR Images. *Proceedings of the 2017 International Conference on Computer Graphics and Digital Image Processing*. Prague, 2017, pp. 1–6.
- [5] 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.
- [6] Joglekar N.P., Chatur P.N. A compressive survey on active and passive methods for image forgery detection. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 10187–10190.

- [7] Shwetha B., Sathyanarayana S.V. Digital image forgery detection techniques: a survey. *ACCENTS Transactions on Information Security*, 2017, vol. 2(5), pp. 22–31.
- [8] 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.
- [9] Lerch-Hostalot, D., Megias, D. Unsupervised steganalysis based on artificial training sets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, vol. 50, pp. 45–59.
- [10] Mandal P.C., Mukherjee I., Paul G., Chatterji B.N. Digital image steganography: A literature survey. *Information Sciences*, 2022, vol. 609, pp. 1451–1488.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Al-Jarrah M.M., Al-Taie Z.H., Abuarqoub A. Steganalysis using LSB-focused statistical features. *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS'17)*. Cambridge, 2017, pp. 1–5.
- [14] Zorilo V.V., Petruk K.O., Lebedieva O.Yu. Vyyavlenyia 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).
- [15] Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. 4th Ed. Pearson, 2018. 1019 p.
- [16] Tryfonova K.O. Metod vyyavlenyia porushennya tsilisnosti tsifrovogo zobrazhennya shumom Perlina [Method of detection integrity violations of digital image by Perlin noise]. *Radiio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, no. 2, pp. 134–141. (in Ukrainian).
- [17] Zorilo V.V., Kioseva O.I., Zorilo I.V. Modifikatsiya alorytmu vyyavlenyia shtuchnogo pidvyschennya rizkosti tsifrovogo zobrazhennya [Modification of algorithm for detecting artificial improvement of sharpness of the digital image]. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 156–163. (in Ukrainian).
- [18] 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.
- [19] Duan X.T., Peng T., Li F.F., Wang J. Blind separation of tampered images based on JPEG double compression properties. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2017, vol. 31, pp. 87–96.
- [20] 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)
- [21] Demmel J. *Applied Numerical Linear Algebra*. SIAM, 1997. 430 p.
- [22] Bazhenov A.V. *Tsifrovyye metody realizatsii prostanstvenno-vremennoy obrabotki signalov v aviatsionnykh radioelektronnykh kompleksakh* [Digital methods for the implementation of space-time signal processing in aviation radio-electronic complexes]. Stavropol, 2006. 219 p.
- [23] NRCS Photo Gallery. Available at: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/newsroom/multimedia/> (accessed 23.09.2022).
- [24] 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.

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



Кобозева Алла Анатольевна – д.т.н., проф., Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ.
Email: alla_kobozeva@ukr.net