

Theoretical Foundations of Digital Content Integrity Expertise

Bobok I.I.¹, Kobozeva A.A.²

¹Odesa Polytechnic National University

²Odesa National Maritime University
Odesa, Ukraine

Abstract. In the context of the rapid development of information technologies, their implementation in the process of functioning of critical infrastructure, in particular energy, of any state is extremely relevant. At the same time, the continuity and quality of functioning of any automated system in the digital space critically depends on ensuring the integrity of the information used. The effectiveness of digital content integrity expertise methods is determined by their theoretical foundations. Existing theoretical approaches do not allow obtaining a final solution to this problem. The aim of this work is to develop a general approach to the analysis of the state of information systems, based on the theory of matrices, for its use in the examination of the integrity of digital content. The objective was achieved by investigating the perturbation properties of singular values and singular vectors of the image (or video frame) matrix as a result of perturbation for original and non-original contents. The most important results of the work are: substantiation for non-original content of the destruction of the monotony of the trend of the function of dependence of the disturbance of the singular number on its number, which takes place for original content; substantiation of the fundamental possibility of estimating the magnitude of the perturbing effect. The significance of the obtained results lies in their subsequent use for the development of universal methods for examining the integrity of digital images, video, in particular steganoanalytical methods, which make it possible not only to identify the fact of integrity violation, but also to assess the magnitude of the perturbing effect, which is extremely important in steganoanalysis, where this value characterizes the throughput of a hidden communication channel.

Keywords: general approach to analyzing the state of information systems, singular vector, singular number, digital content integrity expertise, steganoanalysis.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.08>

UDC: 004.056

Bazele teoretice ale expertizei integrității conținutului digital

Bobok I.I.¹, Kobozeva A.A.²

¹ Universitatea Națională Politehnică Odesă

² Universitatea Națională Maritimă Odesa
Odesa, Ucraina

Rezumat. În contextul dezvoltării rapide a tehnologiilor informaționale, implementarea acestora în procesul de funcționare a infrastructurii critice, în special a energiei, a oricărui stat este extrem de relevantă. În același timp, continuitatea și calitatea funcționării oricărui sistem automatizat din spațiul digital depinde în mod critic de asigurarea integrității informațiilor utilizate. Eficacitatea metodelor de expertiză a integrității conținutului digital este determinată de bazele lor teoretice. Abordările teoretice existente nu permit obținerea unei soluții finale la această problemă. Scopul lucrării este de a dezvolta o abordare generală a analizei stării sistemelor de informare, bazată pe teoria matricelor, pentru utilizarea acesteia în examinarea integrității conținutului digital. Obiectivul a fost atins prin investigarea proprietăților de perturbare ale valorilor singulare și ale vectorilor singulari ai matricei imaginii (sau cadrul video) ca rezultat al perturbării conținutului original și neoriginal. Cele mai importante rezultate ale lucrării sunt: justificarea conținutului neoriginal pentru ruperea monotonității funcției de tendință a dependenței perturbării unui număr singular de numărul său, care apare pentru conținutul original; fundamentarea posibilității fundamentale de estimare a mărimii influenței perturbatoare. Semnificația rezultatelor obținute constă în utilizarea lor ulterioară pentru dezvoltarea metodelor universale de examinare a integrității imaginilor și videoclipurilor digitale, în special metodele steganoanalitice, care fac posibilă nu numai identificarea faptului de încălcare a integrității, ci și estimarea magnitudinea impactului perturbator, care este extrem de importantă în steganaliza, unde această valoare caracterizează lățimea de bandă a canalului de comunicație ascuns este cheia la decodificarea informațiilor secrete.

Cuvinte-cheie: abordare generală a analizei stării sistemelor informaționale, vector singular, număr singular, expertiză integrității conținutului digital, steganaliza.

© Бобок И.И.,
Кобозева А.А., 2025

Теоретические основы экспертизы целостности цифрового контента

Бобок И.И.¹, Кобозева А.А.²

¹Национальный университет «Одесская политехника», Одесса, Украина

²Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина

Аннотация. В условиях стремительного развития информационных технологий чрезвычайно актуальным является их внедрение в процесс функционирования критической инфраструктуры, в частности энергетической, любого государства. Однако все возможности, удобства, преимущества, предоставляемые современными информационными технологиями, повсеместной цифровизацией общества могут быть перечеркнуты недостаточным вниманием к проблемам информационной и кибербезопасности. Непрерывность и качество функционирования любой автоматизированной системы в цифровом пространстве критически зависит от обеспечения целостности используемой информации, защиты ее от несанкционированного доступа. Эффективность методов экспертизы целостности цифровых контентов определяется их теоретическим базисом. Существующие теоретические подходы не позволяют получить окончательное решение задачи выявления несанкционированных изменений цифровых изображений и видео, которые рассматриваются в работе. Хорошо зарекомендовал себя для решения различных задач кибербезопасности общий подход к анализу состояния информационных систем, основанный на теории матриц. Целью настоящей работы является дальнейшее развитие упомянутого подхода для его использования при экспертизе целостности цифровых контентов. Цель была достигнута путем детального исследования свойств функций зависимости возмущений сингулярных чисел и сингулярных векторов матрицы изображения/кадра видео от их номера в результате возмущающего воздействия для оригинальных и неоригинальных контентов. Наиболее важными результатами работы являются: обоснование для неоригинального контента разрушения монотонности тренда функции зависимости возмущения сингулярного числа от его номера, имеющей место для оригинального контента; обоснование принципиальной возможности оценки величины возмущающего воздействия. Значимость полученных результатов заключается в их последующем использовании для разработки универсальных методов экспертизы целостности цифровых изображений, видео, в частности стеганоаналитических методов, дающих возможность не только выявления факта нарушения целостности, но и оценки величины возмущающего воздействия, что крайне важно при стеганоанализе, где эта величина характеризует пропускную способность скрытого канала связи и является ключевой при декодировании секретной информации.

Ключевые слова: общий подход к анализу состояния информационных систем, экспертиза целостности цифрового контента, сингулярный вектор, сингулярное число, стеганоанализ.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного развития информационных технологий чрезвычайно актуальным является их внедрение в процесс функционирования критической инфраструктуры, в частности энергетической, любого государства. Принципиально критическую инфраструктуру можно назвать «структурой быстрого реагирования», поскольку от непрерывности процесса ее функционирования, возможности его быстрого восстановления после сбоев или атак, быстрого «ответа» на возникающие вызовы, инновации зависят жизнеспособность государства и качество жизнеобеспечения населения в целом. Однако все преимущества, возможности, предоставляемые информационными технологиями, цифровизацией современного общества в целом и критической, в том числе энергетической, инфраструктуры в частности, могут быть перечеркнуты недостаточным вниманием здесь к про-

блемам информационной и кибербезопасности [1-3]. Анализ Forescout Research/Vedere Labs показал [4], что за 2023 год динамика кибератак на мировую критическую инфраструктуру выросла на 30% по сравнению с 2022 годом и продолжает расти. Результаты кибератак безусловно различаются по своим последствиям, однако для составных критической инфраструктуры, в частности энергетической, могут привести к негативным последствиям колоссального масштаба, в том числе, для государства в целом. Сегодня эта проблема и ее непосредственная связь с высоким уровнем развития информационных технологий понимается, как одна из актуальнейших, специалистами всего мира. Так в [5], где проводится анализ киберугроз и уязвимостей энергетического сектора США, подчеркивается, что внедряемые здесь информационные технологии продолжают расширять многообразие и широту применения кибератак, а киберуязвимости в электросети США продолжают

использоваться различными террористическими группами и недружественными государствами, образуя прямую угрозу национальной безопасности. Одной из инициатив в области безопасности энергетической инфраструктуры США стал документ [6], в котором большое внимание уделено вопросам защиты энергетики от кибератак. Пристальное внимание уделяется кибербезопасности энергосистем на государственном уровне в Европе. Например, в Великобритании их актуальность нашла свое отражение в принятой в 2021 году Стратегии цифровизации энергосистемы и плана мер по ее реализации [7].

С учетом того, что кибератаки могут быть направлены как на объекты генерации энергоресурсов, так и на объекты транспортировки и потребления, трудно сегодня переоценить значение энергетического сектора и его киберзащиты для Украины, где также наблюдается рост киберугроз, что приводит к повышению актуальности информационной безопасности, в частности системы управления, играющей важную роль в функционировании всего энергетического комплекса [8]. Функционирование автоматизированной системы управления в цифровом пространстве критически зависит от возможности эффективного обеспечения целостности используемой цифровой информации, защиты ее от несанкционированных изменений, а если такое изменение все же произошло, то критически важным является его своевременное выявление.

Сегодня большая часть информации в любой области человеческой деятельности, в частности, при организации функционирования критической (энергетической) инфраструктуры, является визуальной, представляется в виде цифровых изображений (ЦИ) и видео (ЦВ) [3]. Часто именно такие информационные контенты, при условии их подлинности, дают наиболее полное интегральное представление о ситуации [9], имеющей место, а потому нуждаются в эффективной защите от несанкционированного доступа и изменений. На сегодня вопросами выявления несанкционированных изменений ЦИ, ЦВ занимаются представители научного сообщества во всем мире [3,10,11], используя для этого различные математические инструменты. Однако, учитывая сложность рассматриваемой задачи, которая возрастает с каждым днем, благодаря внедрению все более современных информационных

технологий, упрощающих процесс фальсификации ЦК и делающих подделки все более качественными, окончательного решения она не имеет.

Решение практических вопросов в любой сфере человеческой деятельности, в частности, сфере информационной безопасности, невозможно без теоретического базиса для разработки соответствующих методов [12,13]. Наполненность и качество теоретической области кибербезопасности до настоящего момента остаются такими, которые не в состоянии устранить в полной мере существующие проблемы, обеспечить своевременные ответы на возникающие вызовы. В статье, опубликованной в данном научном издании в 2024 году, авторами данной работы был развит общий подход к анализу состояния информационных систем (ОПАИС), основанный на теории возмущений и матричном анализе, хорошо зарекомендовавший себя при решении задач информационной безопасности, и намечены различные пути его дальнейшего практического использования, однако проблема выявления нарушения целостности цифрового контента (ЦК) там не затрагивалась. Учитывая универсальность математического фундамента ОПАИС, целью настоящей работы является его дальнейшее развитие для использования в качестве теоретической основы при экспертизе целостности ЦК. Иначе говоря, полученные теоретические результаты должны стать основой принципиально новых эффективных экспертных методов.

Все экспертные методы можно разделить на универсальные и направленные. Первые рассчитаны на работу в условиях произвольного возмущающего воздействия (ВВ), вторые ориентированы на конкретные ВВ. Эффективность универсального метода может уступать эффективности направленного при работе в условиях, на которые рассчитан второй. Однако очень часто на практике эксперт не владеет информацией о конкретике ВВ, которое могло быть применено к анализируемому ЦК, а использование здесь направленного метода может оказаться неэффективным в случае, если эксперт не «угадал» ВВ. В такой ситуации актуальность универсальных методов, создающих «первую линию обороны», трудно переоценить. В силу этого внимание в данной работе сосредоточено на теоретических исследованиях, результаты которых смогут

быть использованы при разработке универсальных экспертных методов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Обосновать выбор набора формальных параметров, определяющих ЦК, для отделения оригинального контента от неоригинального независимо от конкретики использованного ВВ;
2. Определить характеристику выбранного набора формальных параметров, которая качественно отличается для оригинальных и неоригинальных ЦК независимо от конкретики использованного ВВ;
3. Обеспечить возможность оценки силы использованного ВВ в рамках рассматриваемого подхода.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве ЦК в работе рассматриваются ЦИ и ЦВ. ЦВ формально представляются как последовательность ЦИ-кадров, в силу этого везде далее при упоминании ЦИ оно трактуется и как отдельный объект, и как кадр ЦВ.

Все ВВ, которым подвергается ЦК и которые являются причиной нарушения его целостности, можно разделить на два типа: применяемые к ЦИ/кадру ЦВ целиком [14-16] (стеганообразование (СПр), наложение шума, фильтрация, сжатие, коррекция цвета, яркости и т.д.), и локальные ВВ, которые затрагивают лишь часть ЦИ/кадра ЦВ [17,18] (клонирование, фотомонтаж и т.д.). В данной работе в качестве ВВ рассматриваются воздействия первого типа, однако это практически не ограничивает область применимости полученных результатов, поскольку при проведении локальных изменений в ЦК для «маскировки» их применения на практике, как правило, используются дополнительно наложение незначительного шума, сжатие, незначительная коррекция яркости и т.д., т.е. ВВ первого типа, выявление которых укажет на нарушение целостности контента. Наибольшее внимание при демонстрации получаемых результатов в работе уделяется СПр с учетом все возрастающей актуальности задач стеганоанализа, основными из которых являются выявление факта наличия скрытой информации в ЦК, а также оценка пропускной способности скрытого (стеганографического) канала связи (ПССК) [19], что никак не ограничивает общность получаемых

результатов в силу универсальности используемого математического аппарата. Для ВВ-стеганообразования задействуется стеганометод модификации наименьшего значащего бита (LSB-метод) [20] с учетом его частого использования и широкого распространения, а также с учетом того, что возмущения, вносимые в ЦИ-контейнер при погружении скрываемой информации этим методом очень незначительны. С большой вероятностью способ эффективного выявления настолько незначительных изменений ЦК (при его успешной разработке) окажется дееспособным и в более простых для выявления условиях значительных ВВ.

Пусть F – $n \times n$ -матрица ЦИ. Любые изменения, вносимые в ЦИ, могут быть представлены в виде:

$$\overline{F} = F + \Delta F, \quad (1)$$

где \overline{F} – матрица возмущенного ЦИ, а ΔF – матрица, являющаяся формальным представлением ВВ. Количественно величина ВВ везде ниже оценивается $\|\Delta F\|$, где $\|\cdot\|$ – матричная норма. Известно, что для матрицы F , не имеющей кратных сингулярных чисел (СНЧ), существует однозначно определяемое нормальное сингулярное разложение (НСР) [21]: $F = U\Sigma V^T$, где U, V – ортогональные $n \times n$ -матрицы, столбцы которых $u_i, v_i, i = \overline{1, n}$, являются левыми и правыми сингулярными векторами (СНВ) соответственно, $u_i, i = \overline{1, n}$, – лексикографически положительные, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1(F), \dots, \sigma_n(F))$,

$$\sigma_1(F) \geq \dots \geq \sigma_n(F) \geq 0 \quad (2)$$

– СНЧ F . Матрицы оригинальных ЦИ, как правило, не имеют кратных СНЧ. С учетом этого в соответствии с ОПАИС любые изменения ЦИ формально могут быть представлены в виде совокупности возмущений СНЧ и

СНВ его матрицы: $\Delta \sigma_i = \left| \sigma_i(F) - \sigma_i(\overline{F}) \right|$,
 $\Delta u_i = \left\| u_i(F) - u_i(\overline{F}) \right\|$, $\Delta v_i = \left\| v_i(F) - v_i(\overline{F}) \right\|$,
 $i = \overline{1, n}$, где $\|\cdot\|$ – векторная норма, полученных при помощи НСР, а результат любого ВВ,

свойства возмущенного ЦИ могут быть формально оценены по свойствам совокупности множеств $\{\Delta\sigma_i\}$, $\{\Delta u_i\}$, $\{\Delta v_i\}$, $i = \overline{1, n}$. Характеристики левых и правых СНВ в границах рассматриваемых в работе задач являются сравнимыми, поэтому ниже часто рассматриваются только левые СНВ. Поскольку сингулярное разложение может быть записано в форме внешних произведений

[22]:
$$F = \sum_{i=1}^n \sigma_i(F) u_i(F) v_i^T(F)$$
, каждое ЦИ однозначно определяется совокупностью сингулярных троек $(\sigma_i(F), u_i(F), v_i(F))$, $i = \overline{1, n}$, полученных при помощи НСР.

В статье, опубликованной в данном научном издании в 2024 году, обосновано и практически подтверждено, что для оригинального ЦИ при его возмущении, начиная с некоторого номера, функция $y(\sigma_i, \Delta F) = \Delta \sigma_i$ зависимости возмущения $\Delta \sigma_i$ СНЧ σ_i от его номера i становится монотонно убывающей (в смысле тренда), определяя область стабилизации СНЧ, а возмущения СНВ находятся в окрестности 90 градусов незначительного радиуса, определяя область стабилизации СНВ, при этом чем больше величина ВВ для конкретного ЦИ, тем раньше наступает стабилизация, что указывает на принципиальную возможность для определения/количественной оценки величины ВВ. Если в качестве ВВ использовать СПр, то теоретически данное свойство позволяет оценить величину ПССК, что имеет ключевое значение в стеганоанализе. Назовем точкой входа в область стабилизации (ТВ) условно наименьший из номеров СНЧ (СНВ), возмущения которых в ней присутствуют. На рис. 1 частично проиллюстрирована зависимость значения ТВ, обозначенной красным цветом (размера области стабилизации), от величины ПССК, формируемого при помощи LSB-метода: чем меньше $\|\Delta F\|$, тем больше значение ТВ, что полностью отвечает теоретическим выводам. Таким образом, величина ТВ в область стабилизации принципиально может служить тем параметром, который позволит оценивать силу ВВ.

Здесь и далее для демонстрации результатов используются ЦИ из баз [23,24], традиционных при работе с изображениями.

Использованию напрямую полученного заключения для решения задачи оценки величины ВВ, примененного к ЦИ, на практике мешает следующий факт. Для разных ЦИ точки входа при одном и том же ВВ могут значительно отличаться. Действительно, как показано ранее, область стабилизации для СНЧ, СНВ ЦИ является следствием их математических свойств и особенностей НСР, эти области взаимосвязаны. Так величина возмущения СНЧ σ_i определяется его отделенностью [22]

$$svdgap(i, F) = \min_{i \neq j} |\sigma_i - \sigma_j| \quad (3)$$

Если ЦИ является фоновым, т.е. таким, в котором значения яркости пикселей на большей его части незначительно отличаются друг от друга (рис. 2(б)), то высокочастотная (возможно, и среднечастотная) составляющая такого ЦИ будет незначительной. Учитывая связь между частотными составляющими и сингулярными тройками его матрицы, можно утверждать, что основная информация о нем будет содержаться в нескольких сингулярных тройках $(\sigma_i(F), u_i(F), v_i(F))$, или, точнее, в нескольких матрицах $F_i = \sigma_i(F) u_i(F) v_i^T(F)$, ранг которых $rank(F_i) = 1$, Остальные СНЧ будут незначительными по величине, сравнимыми между собой, имея относительно малые отделенности (3) уже для относительно малых порядковых номеров i . Отделенности таких СНЧ будут ограничивать их возможные возмущения при ВВ, что приведет к тому, что ТВ в область стабилизации для такого ЦИ будет даже при малом ВВ иметь относительно малое значение, по сравнению с ЦИ, содержащим многочисленные области со значительными перепадами значений яркости (рис. 2 – ТВ отмечены красным цветом). Это приводит к выводу о невозможности получения единых пороговых значений ТВ для использования при оценке величины ВВ, хотя не исключает целесообразность получения совокупности ТВ после предварительной классификации ЦИ, что не является задачей данной работы.

Однако использование полученных результатов для оценки величины ВВ здесь

пока возможно лишь в случае наличия соответствующего оригинального ЦИ, что часто не имеет места при экспертизе целостности изображения.

Однозначность определения множеств СНЧ и СНВ при помощи НСР для любого ЦИ приводит к тому, что при любом возмущении ЦИ определенным образом возмущаются и его формальные параметры, изменяются их

свойства. Учитывая это, можно предположить, что поведение возмущений СНЧ и СНВ при применении одинакового ВВ к неоригинальному/оригинальному ЦИ будет отличаться, в частности, характеристики областей стабилизации для возмущений СНЧ и СНВ. Проведем сравнение этих характеристик, начиная с множества СНЧ.

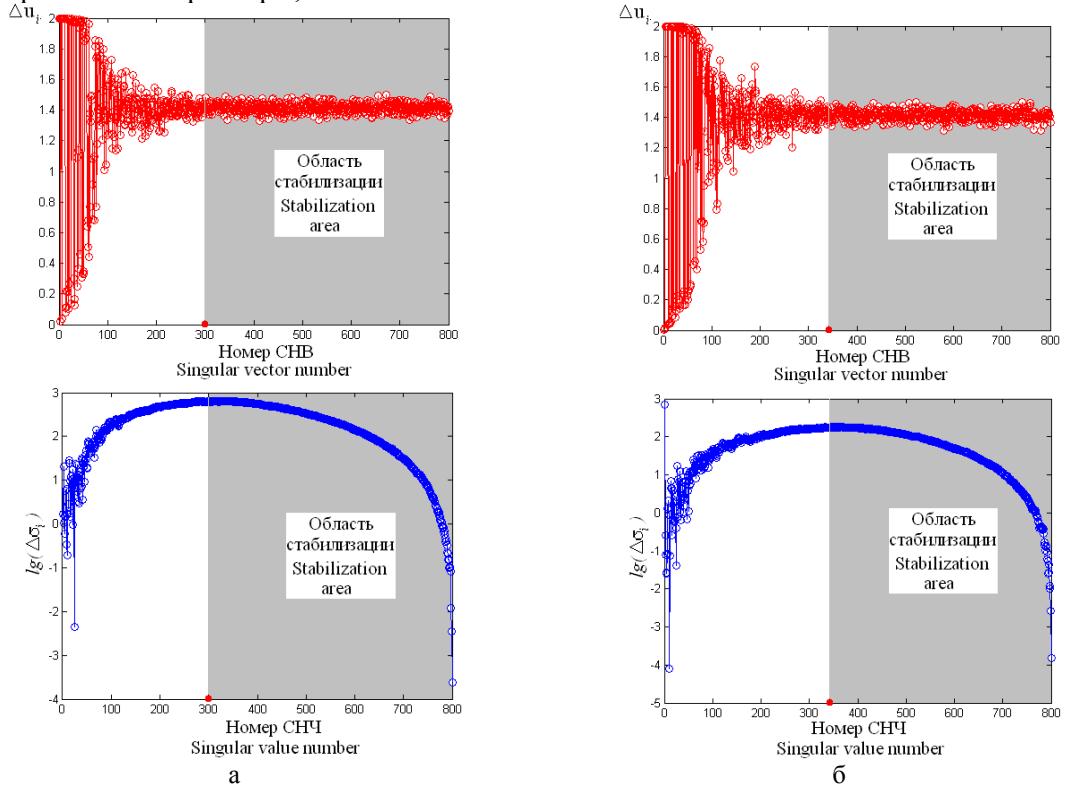


Рис. 1. Иллюстрация зависимости размера области стабилизации от величины ПССК: а – ПССК=1 бит/пиксель; б – 0.5 бит/пиксель.¹

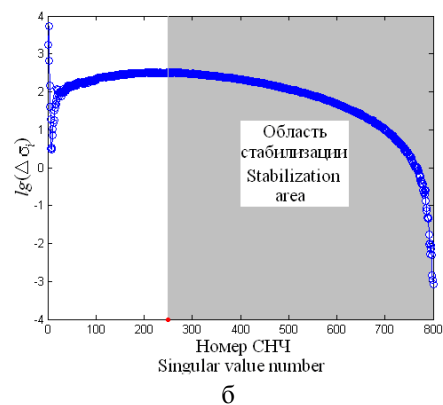
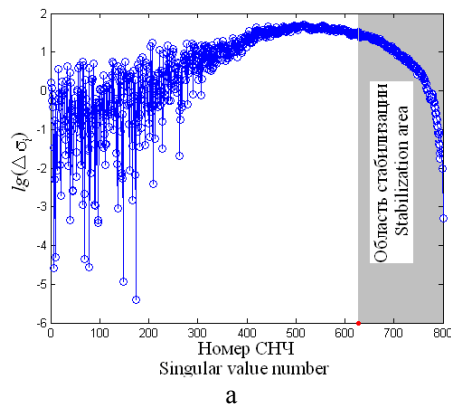
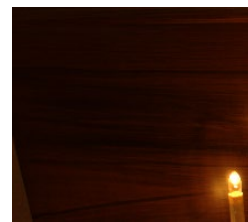


Рис. 2. Иллюстрация зависимости величины ТВ для области стабилизации от свойств ЦИ при одном и том же ВВ (гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и $D=0.00001$): а – ЦИ, имеющее многочисленные значительные перепады значений яркости пикселей; б – ЦИ, основная часть которого не имеет перепадов значений яркости.²

^{1,2} Appendix 1 эе, область стабилизации CI их свойствами: хорошей обусловленностью в соответствии с формулой [22]:

$$\max_i |\sigma_i(F) - \sigma_i(F + \Delta F)| \leq \|\Delta F\|_2, \quad (4)$$

где $\|\cdot\|_2$ – спектральная матричная норма, а также величинами их отделенностей (3). При любом первичном ВВ на оригинальное ЦИ даже с учетом хорошей обусловленности СНЧ изменят свои значения, соответственно изменятся и их отделенности. Для оригинального ЦИ с ростом номера СНЧ его отделенность, которая по сути своей для СНЧ из области стабилизации определяет область, ограничивающую его возмущения, падает практически монотонно. При возмущении ЦИ в общем случае происходит увеличение одних СНЧ, уменьшение других, что приведет к увеличению отделенностей одних СНЧ и уменьшению отделенности других в области стабилизации и в общем случае ухудшит картину относительного монотонного убывания отделенности в зависимости от номера СНЧ: отклонения в одну и другую сторону от условно монотонно убывающей аппроксимирующей функции возрастут (рис. 3). Увеличение/уменьшение отделенности СНЧ математически расширяет/сужает его потенциальные возможности для возмущения. Если вторичное ВВ по величине меньше первого, то расширенной области возмущения СНЧ ничего не помешает, возмущение может как уменьшится, так и увеличиться, а возмущение СНЧ, для которых произошло уменьшение отделенности – уменьшится. Заметим, что возможность увеличения возмущения СНЧ в первом случае при использовании вторичного ВВ меньшей силы не противоречит формуле (4), как может показаться на первый взгляд. Дело в том, что на практике, как правило, имеет место соотношение $\max_i |\sigma_i(F) - \sigma_i(F + \Delta F)| \ll \|\Delta F\|_2$, поэтому, уменьшение величины вторичного ВВ по сравнению с первичным для СНЧ из области стабилизации оригинального ЦИ не уменьшит их потенциально возможную область допустимых изменений, которая по-прежнему

будет определяться отделенностью СНЧ. Характер поведения возмущений СНЧ в области стабилизации теперь с большой вероятностью будет сравним качественно с характером возмущений СНЧ, номера которых меньше ТВ (см. статью авторов 2024 г.), хотя количественно будет отличаться меньшей амплитудой колебаний значений возмущений, что очевидно приведет к нарушению монотонности тренда возмущений СНЧ. Такое нарушение монотонности тренда при использовании повторного ВВ, величина которого меньше первичного, находится в полном соответствии с полученным ранее авторами выводом о том, что при малом ВВ стабилизация СНЧ может вообще отсутствовать.

Если величина повторного ВВ будет значимо больше первичного, то, очевидно, такое ВВ просто «сотрет» то, что было до него. Таким образом, при использовании ВВ для отделения оригинального ЦИ от такого, целостность которого нарушена, необходимо, чтобы его величина была меньше, чем величина предполагаемого первичного ВВ.

К выводу о нарушении монотонности тренда возмущений СНЧ при возмущении неоригинального ЦИ (повторном ВВ на ЦИ) можно прийти и более формально. Назовем функцию $f(x)$ одной переменной, $x \in D$, sign-чувствительной к ВВ на области определения D , если даже незначительные по величине ВВ (погрешности входных данных) в состоянии изменить знак ее значения в какой-либо точке $\bar{x} \in D$, и sign-нечувствительной в противном случае. Для произвольной непрерывной функции $f(x)$ достаточным условием ее монотонности на $x \in [a, b]$ является сохранение знака производной $f'(x)$. Тогда формальным условием сохранения монотонности функции на $[a, b]$ в результате ВВ будет sign-нечувствительность $f'(x)$ на этом сегменте.

Пусть функция $f(x)$ является дискретной, $x \in D$. В этом случае

$$f'(x_i) \approx f(x_i; x_{i+1}), \quad x_i, x_{i+1} \in D, \quad (5)$$

где $f(x_i; x_{i+1})$ – разделенная разность первого порядка, построенная по точкам x_i, x_{i+1} [25]. Формальным условием монотонности $f(x)$ на D будет совпадение знаков $f(x_i; x_{i+1})$ во всех точках области определения:

$$\text{sign}(f(x_i; x_{i+1})) = \text{sign}(f(x_j; x_{j+1})) \quad (6)$$

для $\forall x_i, x_{i+1}, x_j, x_{j+1} \in D$,

а формальным условием сохранения монотонности $f(x)$ будет sign-нечувствительность разделенной разности первого порядка $f(x_i; x_{i+1})$ на D .

Пусть дискретная функция $f(x)$ определена на конечном множестве $D = \{x_1, x_2, \dots, x_{m+1}\}$. В каждой точке $x_i, i = \overline{1, m}$, определим приближение к производной $f'(x_i)$ в виде (5) и составим вектор:

$$\begin{aligned} \bar{f} &= (f(x_1; x_2), f(x_2; x_3), \dots, f(x_m; x_{m+1}))^T = \\ &= (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_m)^T. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда sign-чувствительность/нечувствительность функции производной для дискретной $f(x)$, определенной на конечном множестве, с учетом (6) будет равносильна sign-чувствительности/нечувствительности вектора (7). Ранее одним из авторов было показано, что достаточным условием sign-чувствительности произвольного вектора $\bar{f} \in R^m$ является малость $\|\bar{f}\|_1$, где $\|\cdot\|_1$ – векторная 1-норма [22]. Чем меньше $\|\bar{f}\|_1$, тем более sign-чувствительным будет \bar{f} . Если предположить, что $\bar{f} \in R^1$, т.е. имеет одну компоненту, то sign-чувствительность этой компоненты, как и всего вектора, будет определяться величиной $|\bar{f}_1|$.

Монотонное убывание тренда функции $y(\sigma_i, \Delta F) = \Delta\sigma_i$ зависимости возмущений СНЧ от номера, представляющего из себя дискретную функцию, определим формально следующим образом. Для каждого i это выполнение одного из условий:

$$\Delta\sigma_i > \Delta\sigma_{i+1}, \quad (8)$$

или

$$(\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_{i+1}) \& (\left| \Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{i+1} \right| < \varepsilon), \quad (9)$$

где $\varepsilon > 0$ – малое вещественное число. Второй вариант (9) является менее вероятным, чем (8), но возможным и имеющим место на практике, как показывают вычислительные эксперименты.

С условием (9) все очевидно. Действительно, с учетом малости значения ε , здесь в ³ Appendix 1 гь того, что после второго варианта разница $|\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{i+1}|$ выйдет за границы ε даже при очень незначительных изменениях $\Delta\sigma_i, \Delta\sigma_{i+1}$, разрушая монотонность тренда $y(\sigma_i, \Delta F) = \Delta\sigma_i$.

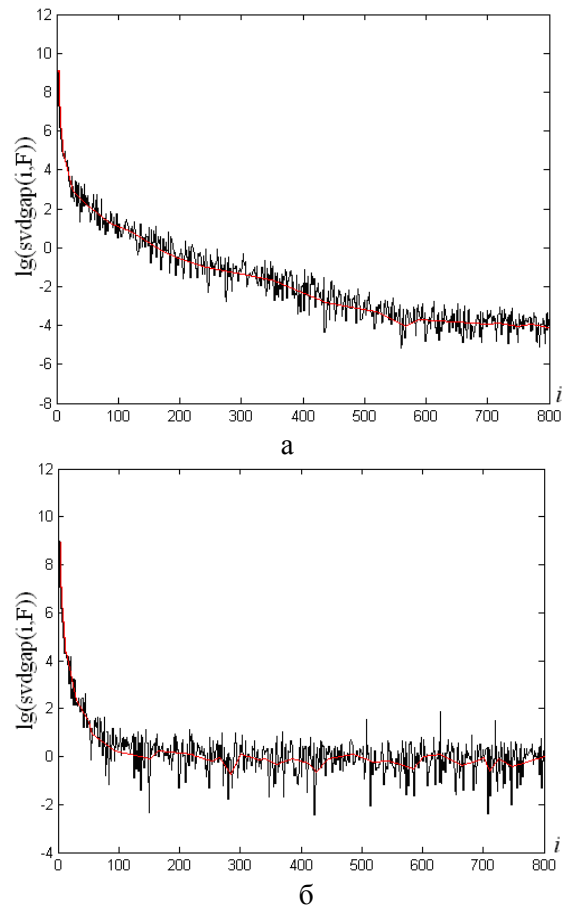


Рис. 3. Графики зависимости отдаленности СНЧ от его номера и аппроксимирующей функции (красным цветом) для конкретного ЦИ в формате JPEG: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ после наложения гауссовского шума с $D=0.001^3$

Рассмотрим условие (8) для конкретного i . Для дискретной функции $y(\sigma_i, \Delta F) = \Delta\sigma_i$ в соответствии с (5):

$$\begin{aligned} y'(\sigma_i, \Delta F) &\approx y(i; i+1) = \\ &= \Delta\sigma_{i+1} - \Delta\sigma_i < 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $y(i; i + 1)$ – разделенная разность первого порядка для $y(\sigma_i, \Delta F)$.

В соответствии с вышесказанным, формально сохранение характера монотонности для $y(\sigma_i, \Delta F)$ в области стабилизации после повторного ВВ можно определить, как требование sign-нечувствительности функции (10) в точке i , которое, как отмечено выше, будет обеспечиваться при значительной величине $|\Delta\sigma_{i+1} - \Delta\sigma_i|$, т.е. когда $\Delta\sigma_{i+1}$ значительно отличается от $\Delta\sigma_i$. Однако область стабилизации, как правило, захватывает среднюю и правую часть сингулярного спектра, т.е. такую, которая соответствует не большому СНЧ, при этом для ЦИ соотношение (2) имеет более конкретный вид: $\sigma_1(F) \gg \sigma_2(F) \geq \dots \geq \sigma_n(F) \geq 0$. Учитывая это, а также характер изменения отделенности СНЧ по мере роста номера, иллюстрация чего представлена на рис. 3, можно утверждать, что скорость убывания их значений является максимальной для наибольших СНЧ, уменьшаясь практически до 0 для наименьших. Это приводит к тому, что значения наименьших СНЧ окажутся сравнимыми друг с другом (и с нулем), «коридоры» для их возможных возмущений окажутся «узкими», а условие значительного отличия $\Delta\sigma_{i+1}$ от $\Delta\sigma_i$ маловероятным, что, в свою очередь приведет к чувствительности значений $y(i; i + 1)$ при $i \rightarrow n$ и разрушению монотонности (условия (8)) при вторичном ВВ.

Необходимо отметить, что нарушение монотонности тренда $y(\sigma_i, \Delta F)$ может по описанным причинам происходить не только в области, когда $i \rightarrow n$, но дополнительно и в других областях, для которых $i \ll n$. Тут все будет зависеть от специфики самого ЦИ. Например, если ЦИ является фоновым (рис. 2(б)), то, как уже отмечалось, у него не только последние СНЧ будут сравнимы по значению и малы по величине, а, возможно, и те, что входят в среднюю часть спектра. Это приведет к тому, что чувствительность $y(i; i + 1)$ возникнет здесь гораздо раньше, что приведет к разрушению монотонности тренда уже в средней части сингулярного спектра. А вот разрушение монотонности

тренда $y(\sigma_i, \Delta F)$ при $i \rightarrow n$ не будет зависеть от специфики ЦИ и будет самым очевидным в случае неоригинального ЦИ.

Таким образом, одной из качественных характеристик, отличающих оригинальные ЦИ от тех, целостность которых была нарушена, является характер поведения функции $y(\sigma_i, \Delta F)$: для первых, подвергнутых первичному ВВ, начиная с некоторого i эта функция является монотонно убывающей (в смысле тренда), определяя область стабилизации СНЧ; для вторых, подвергаемых вторичному ВВ, происходит разрушение монотонности тренда.

Установленный теоретический результат самостоятельно или среди других очевидно может быть использован при проведении экспертизы целостности ЦИ, составляющими которой могут быть следующие шаги:

- данное ЦИ с матрицей F искусственно подвергается ВВ ΔF незначительной силы $\|\Delta F\|$, результатом чего будет изображение с матрицей \bar{F} ;
- для F и \bar{F} строится функция $y(\sigma_i, \Delta F)$;
- для $y(\sigma_i, \Delta F)$ определяется наличие/отсутствие области стабилизации, что и будет основой для окончательного вывода об оригинальности/неоригинальности анализируемого ЦИ.

Область стабилизации СНВ содержательно определяется иначе, чем для СНЧ: это связная область, где возмущения СНВ находятся в малой окрестности 90 градусов. Поскольку, как показано ранее, область стабилизации СНВ определяется областью стабилизации СНЧ, то «разрушение» последней приведет к нарушению в первой, но именно «нарушению», а не разрушению, которое выразится в увеличении радиуса окрестности 90 градусов для возмущений СНВ. Данный вывод является следствием следующих рассуждений. Как было показано авторами в статье 2024 г., возмущение сингулярного вектора, получаемого при помощи НСР (в данной статье как источник получения СНВ везде предполагается именно НСР, поскольку только оно гарантирует его единственность для каждого СНЧ), несет в себе две составляющие: непосредственно возмущение от ВВ на ЦИ, а также возмущение, возникающее за счет удовлетворения математических требований к СНВ в НСР, а

именно: попарной ортогональности и лексикографической положительности левых СНВ [21]. Именно требование попарной ортогональности и является «рычагом», обеспечивающим область стабилизации СНВ оригинального ЦИ. Это требование никуда не исчезает для неоригинального изображения при построении его НСР, поэтому 90 градусов как центр окрестности, в которую попадают возмущения СНВ, начиная с некоторого номера, останется и здесь. Однако первая составляющая суммарного возмущения СНВ, определяемая непосредственно ВВ, внесет корректировку в характеристики области стабилизации для неоригинального ЦИ. Само по себе ВВ может вывести СНВ из его первоначального координатного ортанта (как показано ранее, каждый координатный ортант пространства R^n может содержать не более 1 СНВ, при этом количество ортантов превышает количество СНВ, оставляя математические возможности для перехода СНВ из одного ортанта в другой). СНВ, возмущения которых попадают в область стабилизации, как уже отмечалось авторами, не подчиняются формулам оценки угла их поворота под действием ВВ [22]:

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

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

где θ_i – угол поворота u_i (v_i) в результате возмущающего воздействия ΔF . Если в ходе построения НСР для такого вектора будет необходим переход в первоначальный координатный ортант для обеспечения попарной ортогональности, то угол его поворота с большой вероятностью увеличится, по сравнению с результатом первичного ВВ, если же такой переход не потребуется (с учетом того, что количество координатных ортантов R^n превышает количество СНВ $n \times n$ -матрицы и для обеспечения попарной ортогональности возможна ситуация неизменности ортанта вектором), то угол θ_i в общем случае может как увеличиться, так и уменьшиться. Все это приведет к увеличению радиуса окрестности 90 градусов в области стабилизации для ЦИ, которое подверглось вторичному ВВ, по сравнению с однократным ВВ.

Проиллюстрируем все вышесказанное на примере (рис. 4). Для оригинального ЦИ в формате без потерь первичное ВВ – СПр методом LSB с относительно малой

ПССК=0.1 бит/пиксель. Это же ВВ используется как вторичное для неоригинальных ЦИ – стеганообщений (СС), полученных на основе первого оригинального ЦИ с разной ПССК, превышающей 0.1 бит/пиксель. Как видно из представленных результатов, при СПр оригинального ЦИ область стабилизации для СНЧ достаточно гладкая, радиус окрестности 1.4 для возмущений СНВ относительно мал (рис. 4(а)). Если же СПр проводить для ЦИ, которое уже является СС, то область стабилизации разрушается для СНЧ (разрушение тренда монотонного убывания, что наиболее ярко, как и показано выше, видно в правой части сингулярного спектра), изменяется для СНВ, для которых происходит расширение радиуса окрестности 1.4.

Аналогичная качественная картина имеет место и для оригинальных ЦИ в формате с потерями. Заметим, что при рассмотрении соответствующих ЦИ (т.е. таких, которые отличаются только форматом хранения (с/без потерь), отвечая одной сцене), стабилизация для изображения в формате с потерями будет наступать раньше (сравн. рис. 5 и 4(а)). Это происходит в силу следующих причин. При сжатии ЦИ происходит обнуление его высокочастотных (а возможно, и среднечастотных) коэффициентов. Это, в силу соответствия между частотными коэффициентами ЦИ и его сингулярными тройками, приводит к уменьшению СНЧ правой части спектра (вплоть до обнуления (в зависимости от коэффициента качества QF, использованного при сжатии)), а потому к уменьшению их отделенностей. Следствием этого является «сужение» области их возможного возмущения раньше (для меньших значений номера i), чем для соответствующего ЦИ в формате без потерь, что, в свою очередь, приводит к более быстрому наступлению стабилизации.

Иллюстрация картины практически полного «уничтожения следов» первичного ВВ, в случае, когда сила первичного меньше силы вторичного ВВ, продемонстрирована на рис. 6, где повторное СПр делается с ПССК=1 бит/пиксель, при том, как первичные ВВ выступает СПр с ПССК=0.5, 0.25, 0.1 бит/пиксель.

Заметим, что хотя иллюстрация полученных теоретических выводов происходила для ВВ-стеганопреобразования, общность рассуждений, универсальность используемого математического аппарата, в частности

ОПАИС, независимость теоретических рассуждений от специфики ВВ, где его результат в любом случае рассматривается в виде (1), гарантирует качественно аналогичные картины представленным на предыдущих рисунках графикам зависимости возмущений СНЧ и

СНВ ЦИ от их номера при использовании ВВ, отличных от СПр, что было проверено авторами путем вычислительного эксперимента для различных шумов, фильтрации. Результаты этих экспериментов не выложены в статье ввиду ограниченности ее объема.

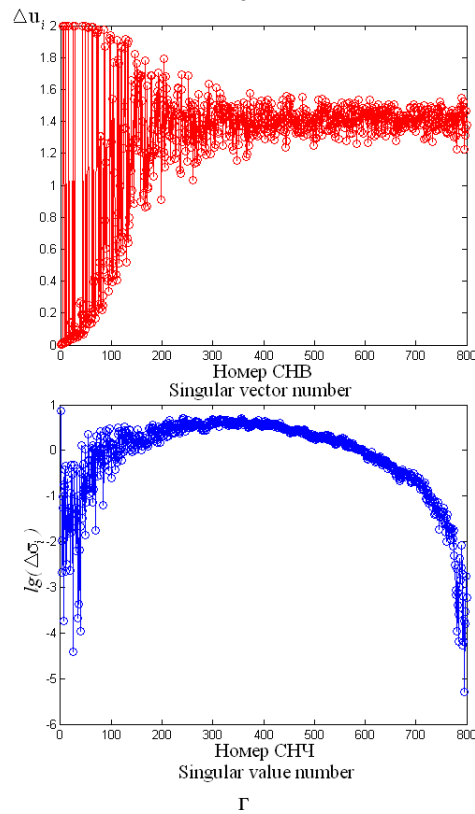
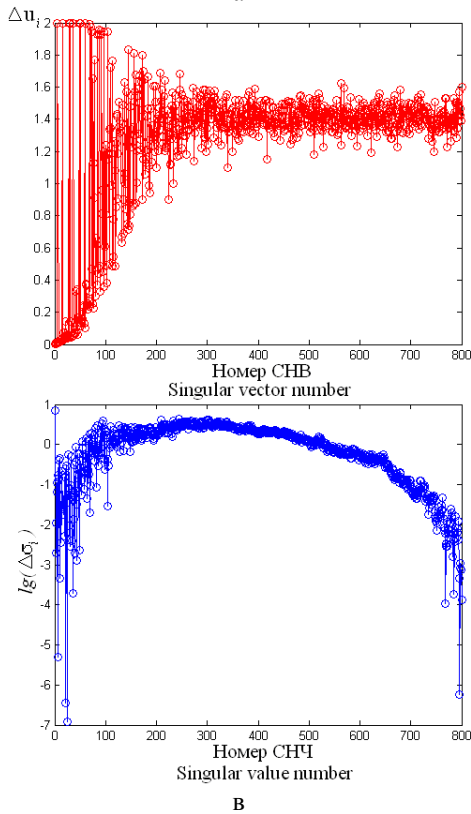
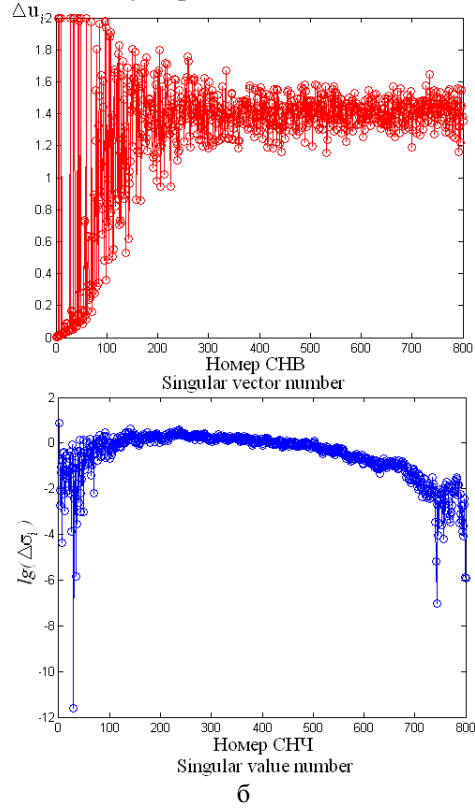
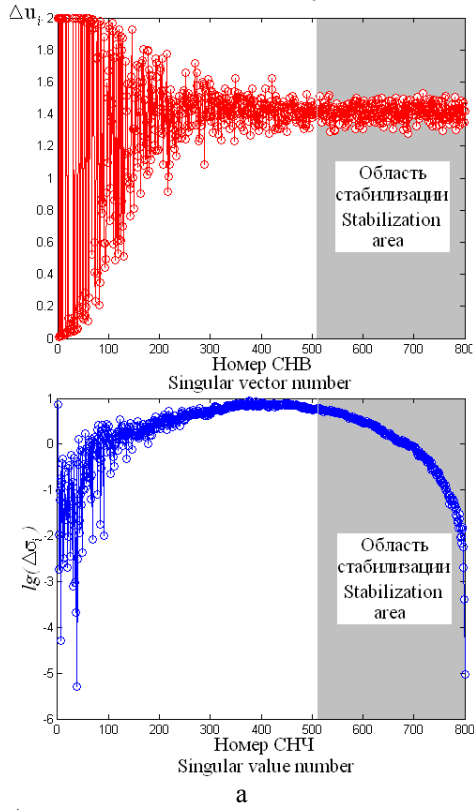


Рис. 4. Графики возмущений СНЧ и СНВ при стеганопреобразовании LSB-методом с ПССК=0.1 бит/пиксель, когда исходное ЦИ является: а – оригинальным в формате без потерь; б, в, г – СС, полученным LSB-методом с ПССК=1, 0.5, 0.25 бит/пиксель соответственно.⁴

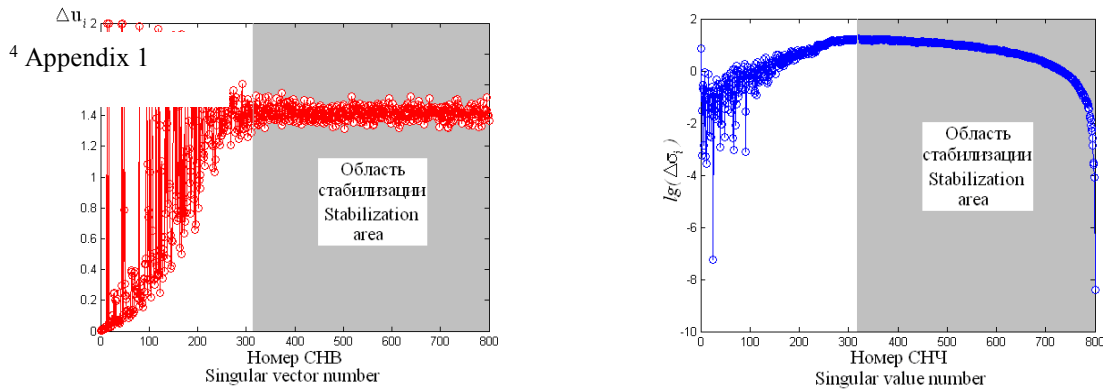


Рис. 5. Графики возмущений СНЧ и СНВ при СПр LSB-методом с ПССК=0.1 бит/пиксель оригинального ЦИ в формате с потерями (Jpeg, QF=75), соответствующего ЦИ в формате без потерь (рис.4(а)).⁵

Таким образом, для экспертизы целостности ЦК в рамках рассматриваемого подхода предпочтительным является именно набор СНЧ соответствующей матрицы, поскольку:

- СНЧ однозначно определяются не только нормальным, но и обычным сингулярным разложением матрицы, в то время, как для однозначности СНВ необходимо использовать НСР, построение которого требует дополнительных вычислений;
- при обеспечении требования ортогональности и лексикографической положительности после возмущения СНВ при построении НСР возникают дополнительные возмущения исключительно математического плана, не связанные напрямую с ВВ;
- Область стабилизации возмущений СНВ присутствует как для оригинальных, так и для неоригинальных ЦИ, изменяя лишь свои количественные характеристики;
- Показатель неоригинальности проверяемого ЦИ для СНЧ - нарушение монотонности тренда функции $y(\sigma_i, \Delta F)$ более очевиден и явно легче выявляем на практике (что важно при последующей разработке новых экспертных методов), чем для СНВ - рост радиуса окрестности 90 градусов для возмущений векторов в области стабилизации, для выявления которого необходимо определение порогового значения для радиуса окрестности оригинальных ЦК, что является вычислительно сложной задачей, поскольку требует рассмотрения множе-

ства ЦИ очень большой мощности, содержащего ЦИ всего спектра имеющихся характеристик.

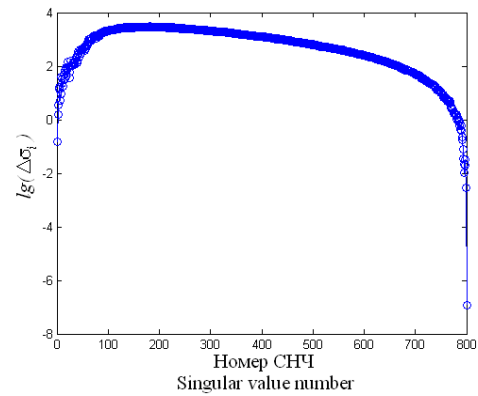
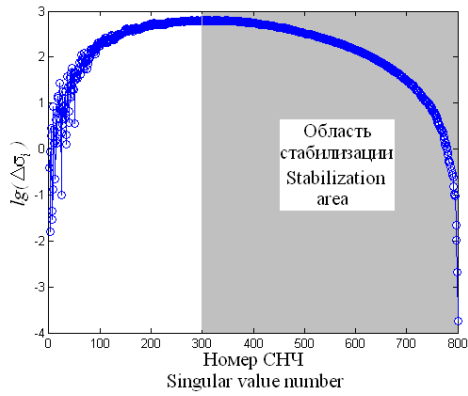
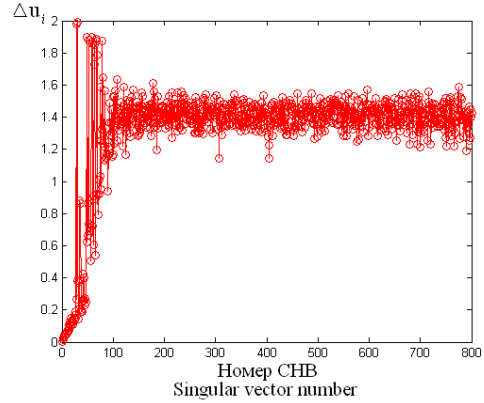
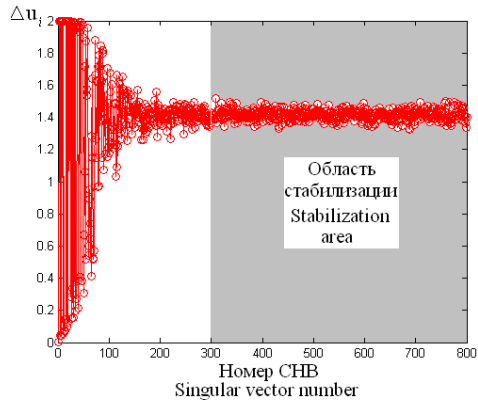
Таким образом, далее рассматриваются только возмущения СНЧ.

Из вышесказанного вытекает принципиальное отличие от отделения оригинального ЦИ с использованием предложенного подхода. Рассмотрим теперь более подробно вопрос оценки величины ВВ (величины ПССК при СПр).

Как было обосновано выше, реакция неоригинального ЦК на повторное ВВ качественно будет зависеть от величины первичного ВВ, в частности, реакция СС на повторное СПр будет отличаться в зависимости от ПССК первичного СПр. Это имеет смысл использовать для оценки величины ВВ (ПССК при СПр). Пусть имеется некоторое ЦИ, для которого установлено, что его целостность нарушена, при этом имеющаяся у эксперта дополнительная информация позволяет предположить, что исследуемое ЦИ является СС, т.е. содержит секретную информацию. В рамках рассматриваемого подхода для оценки величины ВВ (ПССК) возможно многократное повторное СПр исследуемого ЦИ с разными ПССК: если используемая при экспертизе (повторном СПр) ПССК окажется меньше той, что оценивается для первичного СПр, то монотонность тренда $y(\sigma_i, \Delta F)$ в правой (а возможно, и средней) частях сингулярного спектра будет отсутствовать; по мере увеличения экспертом ПССК вторичного СПр очевидно наступит момент, когда результаты

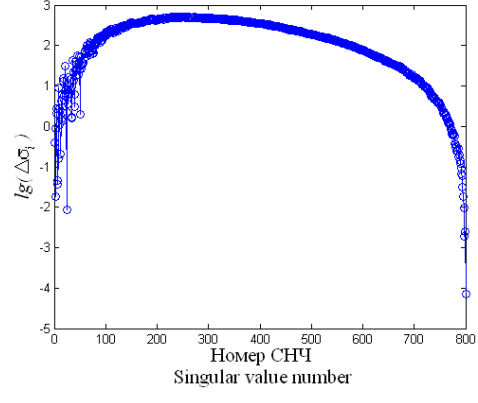
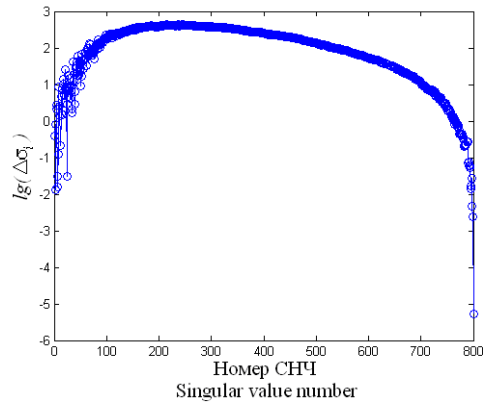
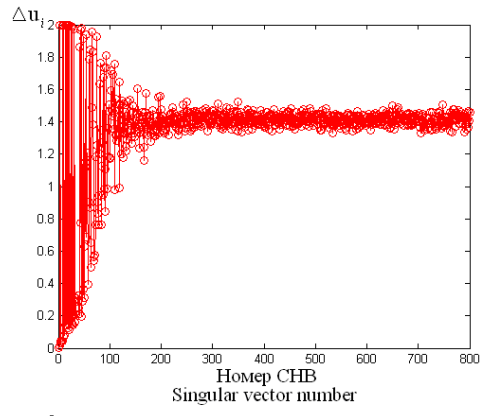
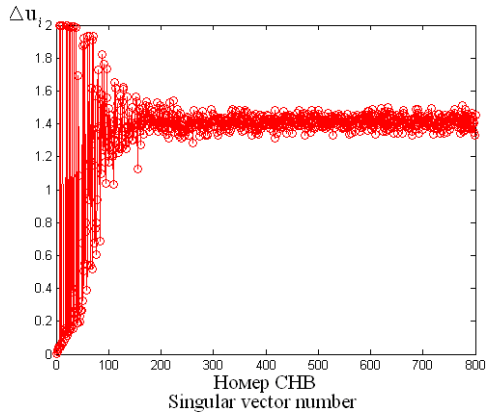
первичного СПр будут просто «вытерты», а область стабилизации будет практически восстановлена с точки зрения наличия

монотонного убывания тренда получаемой здесь функции $y(\sigma_i, \Delta F)$.



а

б



в

г

Рис. 6. Результаты возмущения СНЧ и СНВ при стеганопреобразовании LSB-методом с ПССК=1 бит/пиксель, когда исходное ЦИ является: а – оригинальным в формате без потерь; б, в, г – СС, полученным LSB-методом с ПССК=0.5, 0.25, 0.1 бит/пиксель соответственно.⁶

⁶ Appendix 1. В дальнейшем обозначим ПССК первичного СПр через k бит/пиксель, а ПССК вторичного СПр будем обозначать $k_i, i = \overline{1, l}$. Пусть при этом $k_1 < k_2 < \dots < k_l$. Если k_i бит/пиксель – это ПССК того СПр, для которого тренд $y(\sigma_i, \Delta F)$ сохраняет монотонность в средней и правой частях сингулярного спектра (как только такой факт имеет место, процесс экспертизы завершается), а $k_j, j < l$, – ПССК того СПр, где монотонность в соответствующих

областях не наблюдалась, то для ПССК первичного СПр: $k_j \leq k < k_l$. Тут необходимо заметить, что на практике не обязательно $j = l - 1$. Здесь все будет зависеть от шага, который используется для последовательных значений $k_i, i = \overline{1, l}$. Иллюстрация вышесказанному для конкретного ЦИ приведена на рис.7. Здесь экспертизе подвергается ЦИ, которое является стеганосообщением, полученным LSB-методом с ПССК=0.5 бит/пиксель.

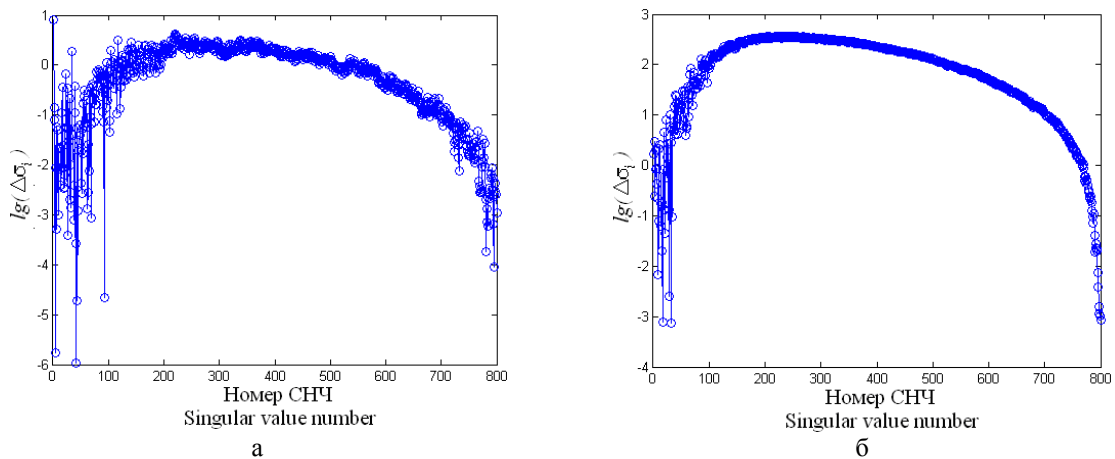


Рис. 7. Графики $y(\sigma_i, \Delta F)$ при повторном стеганопреобразовании СС с ПССК=0.5 бит/пиксель, для которого: а – ПССК=0.1 бит/пиксель; б – ПССК=1 бит/пиксель.⁷

В общем случае процесс оценки величины ВВ для неоригинального ЦК может быть разбит на следующие шаги:

1. Исследуемое ЦИ подвергается многократному повторному ВВ различной силы $\|\Delta F\|$, при этом каждый раз строится функция $y(\sigma_i, \Delta F)$;
2. Фиксируются два таких значения $\|\Delta F\|$, при одном из которых тренд $y(\sigma_i, \Delta F)$ еще не имеет области стабилизации, а при другом эта область восстановлена. Зафиксированные значения $\|\Delta F\|$ и будут нижней и верхней границами для искомой величины.

Полученные в работе теоретические результаты могут быть использованы при разработке универсальных экспертных

методов для ЦИ, ЦВ, в частности стеганоаналитических методов, позволяющих не только устанавливать факт присутствия/отсутствия секретной информации в ИК, но и производить оценку ПССК, что является чрезвычайно важным при декодировании секретной информации и делается лишь некоторыми из существующих стеганоаналитическими методами.

ВЫВОДЫ

В работе проведено дальнейшее развитие теоретического подхода к анализу состояния информационных систем для обеспечения возможности его использования при экспертизе целостности цифровых контентов, в качестве которых рассматривались ЦИ, ЦВ.

В результате проведенного исследования:

⁷ Appendix 1

1. Обосновано разрушение монотонности тренда функции $y(\sigma_i, \Delta F)$ зависимости возмущения СНЧ от его номера, имеющей место для оригинального ЦК, в том случае, когда целостность ЦК нарушена. Такое разрушение будет иметь место тогда, когда величина вторичного ВВ будет меньше величины первичного, в противном случае тренд $y(\sigma_i, \Delta F)$ сохранит свою монотонность.
2. Обосновано сохранение области стабилизации возмущений СНВ для неоригинального ЦК. Показано, что эта область по своим количественным характеристикам будет отличаться от соответствующей области оригинального контента;
3. Обоснован выбор формальных параметров – множество СНЧ, которые в свете рассматриваемого подхода являются наиболее перспективными для обеспечения возможности отделения оригинального ЦК от такого, целостность которого нарушена, на основе анализа их возмущений;
4. Обоснована возможность оценки силы использованного ВВ в рамках рассматриваемого подхода на основе анализа свойств функции $y(\sigma_i, \Delta F)$.

Полученные теоретические выводы являются общими, не зависят от специфики возмущающего воздействия. Результаты могут быть использованы для разработки универсальных методов экспертизы целостности ЦК, стеганоаналитических методов, дающих возможность не только для выявления факта нарушения целостности, но и для оценки величины ВВ, что крайне важно при стеганоанализе, где эта величина характеризует ПССК и является ключевой при декодировании секретной информации.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Dependence of the size of the stabilization area on the value of the throughput of the hidden communication channel (THCC): a – 1 bpp, b – 0.5 bpp.

²Fig. 2. Dependence of the value of the entry point for the stabilization region on the properties of the digital image under the same perturbing influence (Gaussian noise, $D=0.00001$): a – digital image with numerous significant differences in pixel brightness values; b – digital image, the main part of which does not have differences in brightness values.

³Fig. 3. Dependences of the singular value separation on its number and the approximating function (in red) for a specific digital image in JPEG format: a – original

digital image, b – digital image under Gaussian noise ($D=0.001$).

⁴Fig. 4. Dependencies of the disturbances of the singular values and vectors during LSB steganographic transformation with THHC=0.1 bpp, when the original digital source digital image is: a – original saved in a lossless format; b, c, d – stegano message obtained by the LSB transformation with the THHC=1, 0.5, 0.25 bpp, respectively

⁵Fig. 5. Dependencies of the disturbances of the singular values and vectors during LSB steganographic transformation with THHC=0.1 bpp of the original digital image saved in a lossy format (JPEG, QF=75), corresponding to the digital image in a lossless format (Fig. 4(a))

⁶Fig. 6. Dependencies of the disturbances of the singular values and vectors during LSB steganographic transformation with THHC=1 bpp, when the original digital source digital image is: a – original saved in a lossless format; b, c, d – stegano message obtained by the LSB transformation with the THHC=0.5, 0.25, 0.1 bpp, respectively

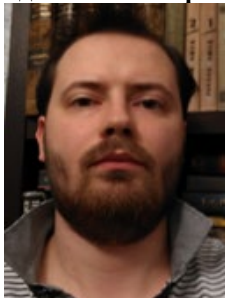
⁷Fig. 7. Dependencies for repeated steganographic transformation of a steganographic message with THHC=0.5 bpp, for which: a – THHC=0.1 bpp, b – THHC=1 bpp

Литература (References)

- [1] Song J.G., Lee J.W., Lee C.K., Kwon K.C., Lee D.Y. A Cyber Security Risk Assessment for the Design of I and C System in Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 2012, vol. 44, no. 8, pp. 919–928.
- [2] Park J., Suh Y. A Development Framework for Software Security in Nuclear Safety Systems: Integrating Secure Development and System Security Activities. *Nuclear Engineering and Technology*, 2014, vol. 46, no. 1, pp. 47–54.
- [3] Bobok I., Kobozeva A., Maksymov M., Maksymova O. Checking the Integrity of CCTV Footage in Real Time at Nuclear Facilities. *Nuclear & Radiation Safety*, 2016, no. 2, pp. 68–72.
- [4] SecurityToday. *World's Critical Infrastructure Suffered 13 Cyber Attacks Every Second in 2023*. Available at: <https://securitytoday.com/Articles/2024/01/29/World-Critical-Infrastructure-Suffered-13-Cyber-Attacks-Every-Second-in-2023.aspx> (accessed 26.12.2024).
- [5] U.S. Department of Energy. *Cyber Threat and Vulnerability Analysis of the U.S. Electric Sector*. Available at: <https://www.energy.gov/policy/articles/cyber-threat-and-vulnerability-analysis-us-electric-sector> (accessed 26.12.2024).
- [6] *Securing Energy Infrastructure Act of the USA 2021*. Available at: <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/174> (accessed 26.12.2024).
- [7] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. *Digitalising our energy system for net zero. Strategy and Action Plan 2021*. Available at:

- https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1004011/energy-digitalisation-strategy.pdf (accessed 26.12.2024).
- [8] Stezhko S.M., Fitsa V.M. Kiberbezpeka yak vazhlyviy factor zabezpechennya zhittediyal'nosti vitchiznyanoi energetychnoi galuzi [Cybersecurity as an important factor in ensuring the viability of the domestic energy industry]. *Informatsiya i Pravo*, 2021, no. 4, pp. 113–120. (in Ukrainian).
- [9] Hyla T., Wawrzyniak N. Ships Detection on Inland Waters Using Video Surveillance System. *Proceedings of the 18th International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management (CISIM 2019)*. Belgrade, Serbia, 2019. P. 39–49.
- [10] Habeeb R., Manikandan L.C. A Review: Video Tampering Attacks and Detection Techniques. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 2019, vol. 5, no. 5, pp. 158–168.
- [11] El-Shafai W., Fouda M.A., El-Rabaie E.M., El-Salam N.A. A Comprehensive Taxonomy on Multimedia Video Forgery Detection Techniques: Challenges and Novel Trends. *Multimedia Tools and Applications*, 2024, vol. 83, pp. 4241–4307.
- [12] Awad A., Fairhurst M. *Introduction to Information Security Foundations and Applications*. IET, 2018. 416 p.
- [13] Laracy J.R., Marlowe T. Systems Theory and Information Security: Foundations for a New Educational Approach. *Information Security Education Journal*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 35–48.
- [14] Michaylov K.D., Sarmah D.K. Steganography and Steganalysis for Digital Image Enhanced Forensic Analysis and Recommendations. *Journal of Cyber Security Technology*, 2024, pp. 1–27. Available at: <https://doi.org/10.1080/23742917.2024.2304441> (accessed 26.12.2024).
- [15] Julliand T., Nozick V., Talbot H. Image Noise and Digital Image Forensics. In: *Shi Y.Q., Kim H., Pérez-González F., Echizen I. (eds) Digital-Forensics and Watermarking (IWDW 2015)*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31960-5_1 (accessed 26.12.2024).
- [16] Shwetha B., Sathyanarayana S.V. Digital Image Forgery Detection Techniques: A Survey. *ACCENTS Transactions on Information Security*, 2017, vol. 2, no. 5, pp. 22–31.
- [17] Kobozeva A.A., Bobok I.I., Grygorenko S.M. Method for Detecting of Clone Areas in a Digital Image under Conditions of Additional Attacks. *Journal of Signal Processing Systems*, 2020, vol. 92, no. 1, pp. 55–69.
- [18] Hosny K.M., Mortda A.M., Lashin N.A., Fouda M.M. A New Method to Detect Splicing Image Forgery Using Convolutional Neural Network. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 3, 1272.
- [19] Hassan M., Amin M., Mahdi S. Steganalysis Techniques and Comparison of Available Softwares. *Proceedings of the 1st International Multi-Disciplinary Conference Theme: Sustainable Development and Smart Planning, IMDC-SDSP 2020*. Cyperspace, 2020. Available at: <http://dx.doi.org/10.4108/eai.28-6-2020.2297970> (accessed 26.12.2024).
- [20] Aslam M.A. et al. Image Steganography using Least Significant Bit (LSB) – A Systematic Literature Review. *Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT)*. Tabuk, Saudi Arabia, 2022. P. 32–38.
- [21] 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).
- [22] Demmel J. *Applied Numerical Linear Algebra*. SIAM, 1997. 430 p.
- [23] 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. P.1585–1591.
- [24] NRCS Photo Gallery. United States Department of Agriculture. Washington, USA. Available at: <https://www.nrcs.usda.gov/> (accessed: 26.07.2012).
- [25] Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye Metody* [Numerical Methods]. 6th Ed. Moscow, 2008. 636 p.

Сведения об авторах.



Бобок Иван Игоревич
– д.т.н., доц.,
Национальный университет «Одесская политехника». Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ, социальная инженерия.



Кобозева Алла
Анатольевна – д.т.н.,
проф., Одесский
Национальный морской университет. Область научных интересов: стеганография, стеганоанализ.
Email:
alla_kobozeva@ukr.net

E-mail:
onu_metal@ukr.net