

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ОБЩЕГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ЦИФРОВЫХ КОНТЕНТОВ, ОСНОВАННОГО НА АНАЛИЗЕ ПОЛНОГО НАБОРА ИХ ФОРМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

И.И. Бобок

Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: werter666@ukr.net

Целостность информации является одним из основных критериев ее безопасности. Сегодня информационные объекты все чаще имеют цифровое представление: изображения, аудио, цифровое видео. Использование таких объектов с целью, отличной от развлекательной (в медицине, прессе, науке, судебных расследованиях и т.д.), возможно лишь при отсутствии их несанкционированных изменений. Это делает проблему проверки их целостности, задачу разработки новых подходов и методов для такой проверки чрезвычайно актуальной. В работе получил дальнейшее теоретическое развитие новый общий подход к решению проблемы обнаружения несанкционированных изменений цифровых контентов, основанный на анализе сингулярных чисел и сингулярных векторов блоков их матриц, полученных путем стандартного разбиения, одним из разработчиков которого является автор. Предложенное усовершенствование обеспечит повышение чувствительности разрабатываемых на его основе для экспертизы цифровых изображений, видео методов и реализующих их алгоритмов к (малым) возмущающим воздействиям за счет повышения чувствительности формальных параметров, используемых для анализа целостности контента.

**Ключевые слова:** нарушение целостности, сингулярные числа, сингулярные векторы, цифровое изображение, цифровое видео,  $n$ -оптимальный вектор

## Введение

Целостность информации является одним из основных критериев ее безопасности. Спецификой сегодняшнего дня является повсеместное использование цифровых контентов, в частности, цифровых изображений (ЦИ), видео (ЦВ), цифрового аудио. При использовании таких объектов в прессе, медицине, науке, судебных расследованиях и т.д. необходимо быть уверенным в отсутствии их несанкционированных изменений. Это делает проблему проверки их целостности чрезвычайно актуальной.

Современный уровень развития IT-технологий привел к тому, что разного рода фальсификации цифровых контентов, в частности ЦИ, средствами графических редакторов, таких как Adobe Photoshop, Corel Draw и другие, стали чрезвычайно распространенными, а существующие современные способы выявления таких нарушений целостности ЦИ по тем или иным причинам не являются удовлетворительными [1-3].

Основа принципіально нового загального підходу до організації перевірки цілостності ЦІ, ЦВ нещодавно були розроблені в [4,5], де були виявлені, теоретично обґрунтовані і практично перевірені нові властивості повного набору формальних параметрів, що визначають зображення, кадри ЦВ. Отримані характеристики взаємного розташування лівого і правого сингулярних векторів, що відповідають найбільшому сингулярному числу матриці (блоку матриці) зображення, кадра ЦВ, і вектора, складеного з сингулярних чисел. Показано, що для більшості  $l \times l$ -блоків оригінального зображення, отриманих в результаті стандартного розбиття його матриці (незалежно від формату збереження – з втратами, без втрат) кут між лівим (правим) згаданим сингулярним вектором і вектором, складеним з сингулярних чисел, визначається кутом між  $n$ -оптимальним вектором  $n^o = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l$  і вектором стандартного базису простору  $R^l$  відповідної розмірності, при цьому встановлена особливість порушується для згаданих формальних параметрів в неоригінальному зображенні, що є показником порушення його цілостності, а значить може бути використано як основа для розробки методів і алгоритмів виявлення такого порушення. Один з таких методів для виявлення порушення цілостності ЦІ, являючогося наслідком стеганообробки, який принципіально може бути адаптований для експертизи ЦВ і аудіо, був запропонований в [5]. Алгоритмічна реалізація запропонованого методу перевершує по ефективності сучасні стеганоаналітичні алгоритми, що говорить про перспективність нового підходу, однак залишається недостатньо чутливою до малих збурюючих впливів, відмінних від стеганообробки, зокрема, до накладення шуму: можливі помилки як першого (в разі мультиплікативного шуму з малою дисперсією), коли модифіковане ЦІ сприймається як оригінальне, так і другого роду, коли оригінальне зображення трактується як таке, для якого порушена цілостність.

Таким чином, новий підхід до вирішення проблеми виявлення порушень цілостності цифрових контентів, очевидно являючись перспективним, потребує подальшого розвитку.

### Цель статьи и постановка заданий

*Целью* роботи є подальше теоретичне розв'язання загального підходу до проблеми виявлення порушень цілостності цифрових контентів, заснованого на аналізі СНЧ і СНВ (блоків) матриці контентів, що забезпечить підвищення чутливості використовуваних для експертизи ЦІ і ЦВ їх формальних параметрів до збурюючих впливів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні *задачі*:

1. Визначення такого перетворення матриці блоку ЦІ (кадра ЦВ), в результаті якого складові повного набору параметрів відповідної матриці будуть більш чутливими до (малих) збурюючих впливів, які претерпеває цифровий контент;

2. Використовуючи результат рішення задачі 1, уточнити базові положення розглянутого загального підходу до проблеми виявлення порушень цілостності цифрових контентів.

### Основная часть

Нехай  $F$  –  $n \times n$ -матриця ЦІ, розбита стандартним чином [6] на непересекаючі  $l \times l$ -блоки. Аналізуються при експертизі ЦІ формальними

параметрами в [4,5] являлись сингулярные числа (СНЧ) и сингулярные векторы (СНВ) блоков матрицы  $F$ , образующие полный набор формальных параметров, определяющий контент, получаемые при помощи нормального сингулярного разложения, которое для блока  $B$  выглядит следующим образом:

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

где  $U, V$  - ортогональные  $l \times l$ -матрицы, столбцы которых  $u_1, \dots, u_l$  и  $v_1, \dots, v_l$  - соответственно левые и правые СНВ  $B$ ,  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_l)$ ,  $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$  - СНЧ  $B$ .

СНВ  $u_1$  и  $v_1$  блока  $B$  оригинального ЦИ, а также вектор  $\bar{\sigma} = \sigma / \|\sigma\|$ , где  $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)^T \in R^l$ , являются нечувствительными, sign-нечувствительными, неотрицательными, геометрически располагаются в первом координатном ортанте пространства  $R^l$  [4,5], что говорит о существовании связи между  $u_1$ ,  $v_1$ ,  $\bar{\sigma}$  в блоках оригинального ЦИ.

Нечувствительность вектора  $\bar{\sigma}$  очевидно вытекает из имеющего место для СНЧ матрицы  $B$  соотношения [7]:

$$\max_{1 \leq i \leq l} |\sigma_i(B) - \sigma_i(B + \Delta B)| \leq \|\Delta B\|_2, \quad (2)$$

где  $\Delta B$  матрица возмущения блока  $B$ ,  $\|\bullet\|_2$  — спектральная матричная норма;

Основой подхода, предложенного в [4,5], являлось установленное для оригинального ЦИ соотношение

$$\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^o, e_1), \quad (3)$$

показывающее, что угол между векторами  $u_1$  и  $\bar{\sigma}$  ( $\angle(u_1, \bar{\sigma})$ ),  $v_1$  и  $\bar{\sigma}$  ( $\angle(v_1, \bar{\sigma})$ ) для большинства  $l \times l$ -блоков оригинального ЦИ близок к углу между  $n$ -оптимальным вектором  $n^o = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l$  пространства  $R^l$  и вектором стандартного базиса  $e_1 = (1, 0, \dots, 0) \in R^l$  ( $\angle(n^o, e_1)$ ). Для достижения цели работы соотношение (3) нуждается в уточнении.

Для симметричной неотрицательной матрицы  $BB^T$  с учетом (1) имеет место соотношение:  $BB^T = (U\Sigma V^T)(U\Sigma V^T)^T = U\Sigma^2 U^T$ , которое представляет собой нормальное спектральное разложение  $BB^T$ , совпадающее в силу свойств матрицы  $BB^T$  с ее нормальным сингулярным разложением, определяемое однозначно. При этом собственные значения матрицы  $BB^T$ , равны ее сингулярным числам и определяются квадратами СНЧ  $B$ , а левые СНВ  $B$  - ортонормированные лексикографически положительные собственные векторы  $BB^T$ , совпадающие с ее левыми, правыми СНВ.

Рассмотрим подробно свойства СНЧ  $\sigma_i(BB^T)$ ,  $i = \overline{1, l}$ , матрицы  $BB^T$ . Как и для любой матрицы, СНЧ  $BB^T$  являются нечувствительными к возмущающим воздействиям, т.е. для них выполняется соотношение (2):

$$\max_{1 \leq i \leq l} |\sigma_i(BB^T) - \sigma_i(BB^T + \Delta(BB^T))| \leq \|\Delta(BB^T)\|_2, \quad (4)$$

где  $\Delta(BB^T)$  - возмущение матрицы  $BB^T$  в результате возмущающего воздействия на матрицу ЦИ, при котором возмущение самого блока  $B$  равно  $\Delta B$ .

Заметим, что в (2), (4) спектральную матричную норму можно заменить на норму Фробениуса  $\|\bullet\|_F$  в силу соотношения [7]:  $\|A\|_2 \leq \|A\|_F$ , имеющего место для любой квадратной матрицы  $A$ .

Если блок  $B$  получил возмущение  $\Delta B$ , то возмущение для  $BB^T$  определим из соотношения:

$$(B + \Delta B)(B + \Delta B)^T = BB^T + B \cdot (\Delta B)^T + \Delta B \cdot B^T + \Delta B \cdot (\Delta B)^T = BB^T + \Delta(BB^T),$$

где

$$\Delta(BB^T) = B \cdot (\Delta B)^T + \Delta B \cdot B^T + \Delta B \cdot (\Delta B)^T.$$

Тогда

$$\|\Delta(BB^T)\|_F = \|B \cdot (\Delta B)^T + \Delta B \cdot B^T + \Delta B \cdot (\Delta B)^T\|_F.$$

В силу свойств матричной нормы Фробениуса [7], имеем:

$$\begin{aligned} & \|\Delta(BB^T)\|_F \leq \\ & \leq \|B \cdot (\Delta B)^T\|_F + \|\Delta B \cdot B^T\|_F + \|\Delta B \cdot (\Delta B)^T\|_F \leq \|B\|_F \|(\Delta B)^T\|_F + \|\Delta B\|_F \|B^T\|_F + \|\Delta B\|_F \|(\Delta B)^T\|_F. \end{aligned}$$

Из определения нормы Фробениуса очевидно, что:

$$\|B\|_F = \|B^T\|_F; \quad \|\Delta B\|_F = \|(\Delta B)^T\|_F.$$

Тогда последнее неравенство принимает вид:

$$\|\Delta(BB^T)\|_F \leq 2 \cdot \|B\|_F \|\Delta B\|_F + \|\Delta B\|_F^2. \quad (5)$$

Для ЦИ, как правило,  $\|B\|_F > 1$ , а  $\|\Delta B\|_F > 0$ , тогда правая часть (5) удовлетворяет соотношению:

$$2 \cdot \|B\|_F \|\Delta B\|_F + \|\Delta B\|_F^2 > 2\|\Delta B\|_F + \|\Delta B\|_F^2 > \|\Delta B\|_F. \quad (6)$$

Соотношение (6) означает, что верхняя граница для значений  $\|\Delta(BB^T)\|_F$  больше, чем  $\|\Delta B\|_F$ , что, в свою очередь, приводит к тому, что возмущения СНЧ матрицы  $BB^T$  в общем случае могут оказаться больше, чем возмущения СНЧ  $B$  в результате возмущения блока  $B$  на  $\Delta B$ , т.е. СНЧ  $BB^T$ , оставаясь нечувствительными к возмущающим воздействиям, значительно реагируют на (малое) возмущающее воздействие  $\Delta B$ , чем СНЧ самого блока  $B$ , а значит для достижения цели работы вектор

$$\bar{\sigma} = \sigma_{BB^T} / \|\sigma_{BB^T}\|,$$

где

$$\sigma_{BB^T} = (\sigma_1(BB^T), \sigma_2(BB^T), \dots, \sigma_l(BB^T))^T = (\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_l^2)^T \in R^l,$$

является более предпочтительным, чем вектор  $\bar{\sigma}$ .

Аналогичные рассуждения будут иметь место и для симметричной неотрицательной матрицы  $B^T B$ , для которой с учетом (1) имеем:

$$B^T B = V \Sigma^2 V^T.$$

. Последнее равенство представляет нормальное спектральное разложение  $B^T B$ , совпадающее с ее нормальным сингулярным разложением. Собственные значения матрицы  $B^T B$  равны ее сингулярным числам  $\sigma_i(B^T B)$ ,  $i = \overline{1, l}$  и, как и в случае матрицы  $BB^T$ , определяются квадратами СНЧ  $B$ , т.е. вектор

$$\sigma_{B^T B} = (\sigma_1(B^T B), \sigma_2(B^T B), \dots, \sigma_l(B^T B))^T = (\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_l^2)^T = \sigma_{BB^T},$$

а при его нормировании получим:

$$\bar{\bar{\sigma}} = \sigma_{B^T B} / \|\sigma_{B^T B}\| = \bar{\sigma}.$$

Правые СНВ  $B$  - ортонормированные лексикографически положительные собственные векторы  $B^T B$ , совпадающие с ее правыми и левыми сингулярными векторами.

Вектор  $\bar{\bar{\sigma}}$  имеет еще одно значительное преимущество по сравнению с  $\bar{\sigma}$ . Одним из базисных положений рассматриваемого подхода является близость векторов  $\bar{\sigma}$  и  $e_1$ , которая определяется малым значением угла между ними:  $\angle(e_1, \bar{\sigma}) \approx 0$ . Сравним углы, образующие  $\bar{\bar{\sigma}}$  и  $\bar{\sigma}$  с вектором  $e_1$ .

Скалярное произведение  $(\bar{\sigma}, e_1)$  векторов  $\bar{\sigma}$  и  $e_1$  определяется в соответствии с формулой:

$$(\bar{\sigma}, e_1) = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_l^2}},$$

откуда с учетом нормированности вектора  $\bar{\sigma}$  получаем:

$$\cos \alpha = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_l^2}}, \quad (7)$$

где  $\alpha = \angle(e_1, \bar{\sigma})$ .

В то же время,

$$(\bar{\bar{\sigma}}, e_1) = \frac{\sigma_1(BB^T)}{\sqrt{(\sigma_1(BB^T))^2 + (\sigma_2(BB^T))^2 + \dots + (\sigma_l(BB^T))^2}} = \frac{\sigma_1^2}{\sqrt{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \dots + \sigma_l^4}},$$

откуда

$$\cos \beta = \frac{\sigma_1^2}{\sqrt{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \dots + \sigma_l^4}}, \quad (8)$$

где  $\beta = \angle(e_1, \bar{\sigma})$ .

Возведем правые части (7) и (8) в квадрат и рассмотрим значения, обратные к полученным:

$$\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_l^2}{\sigma_1^2} = 1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_1}\right)^2; \quad (9)$$

$$\frac{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \dots + \sigma_l^4}{\sigma_1^4} = 1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^4 + \dots + \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_1}\right)^4. \quad (10)$$

Учитывая, что  $\sigma_1$  - это максимальное СНЧ блока  $B$ , сравнивая правые части (9) и (10), получим:

$$1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^4 + \dots + \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_1}\right)^4 \leq 1 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_1}\right)^2,$$

т.е.

$$\frac{\sigma_1^4}{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \dots + \sigma_l^4} \geq \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_l^2},$$

что означает:

$$\cos \beta \geq \cos \alpha,$$

и соответственно

$$\beta \leq \alpha.$$

Последнее неравенство с учетом всего вышесказанного позволяет уточнить соотношение (3). Таким образом, для оригинального ЦИ, кадра ЦВ имеет место соотношение:

$$\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^o, e_1). \quad (11)$$

Очевидно, что приближенное равенство в (11) достигается с меньшей погрешностью, чем в (3), что необходимо приведет к повышению эффективности методов выявления нарушения целостности цифровых контентов, основанных на (11), по сравнению с методами, основанными на (3) [5].

## Выводы

В работе предложено дальнейшее развитие общего подхода к решению проблемы выявления нарушений целостности ЦИ, ЦВ.

В ходе работы определены преобразования двух видов матрицы  $B$  блока ЦИ (кадра ЦВ):  $B^T B$  и  $BB^T$ . Такие преобразования позволили выделить из полного набора формальных параметров  $B^T B$  и  $BB^T$  такие параметры, которые являются предпочтительными по сравнению с аналогичными параметрами  $B$  для достижения поставленной цели. А именно: СНЧ матриц  $B^T B$ ,  $BB^T$ , являясь квадратами СНЧ  $B$ , оставаясь нечувствительными к возмущающим воздействиям, сильнее реагируют на них, чем СНЧ  $B$ . Установлено, что нормированный вектор СНЧ матриц  $B^T B$ ,  $BB^T$  менее отличается от вектора  $e_1$  стандартного базиса, чем аналогичный вектор для  $B$ . Это позволило уточнить базовое соотношение связи параметров блока оригинального ЦИ, кадра ЦВ рассматриваемого общего подхода.

Полученные теоретические результаты дают принципиальную возможность для разработки основанных на них новых методов выявления нарушений целостности цифровых контентов, обладающих большей чувствительностью к (малым) возмущающим воздействиям, по сравнению с теми, которые основывались на первоначальных положениях рассматриваемого подхода.

### Список литературы

1. Rey, C. A survey of watermarking algorithms for image authentication / C. Rey, J.-L. Dugelay // EURASIP J. Appl. Signal Process, 2002. – №1. – С.613–621.
2. Amerini, I. Copy-move forgery detection and localization by means of robust clustering with J-linkage / I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. del Bimbo, L. del Tongo, G. Serra // Signal Processing, 2013. – Т.28, №6. – С.659–669.
3. Farid, H. Image Forgery Detection / H. Farid // IEEE Signal processing magazine, 2009. – С.16-25.
4. Кобозева, А.А. Основы общего подхода к разработке универсальных стеганоаналитических методов для цифровых изображений / А.А.Кобозева // Праці Одеського політехнічного університету, 2014. – Вип.2(44). – С.136-146.
5. Kobozeva, A.A. General Principles of Integrity Checking of Digital Images and Application for Steganalysis / A.A. Kobozeva, I.I. Bobok, A.I. Garbuz // Transport and Telecommunication. - 2016. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 128-137.
6. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. П.А. Чочиа. – М. : Техносфера, 2006. – 1070 с.
7. Деммель, Д. Вычислительная линейная алгебра [Текст]: теория и приложения / Д. Деммель; Пер. с англ. Х.Д. Икрамова. – М.: Мир, 2001. – 430 с.

**ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗВИТОК ЗАГАЛЬНОГО ПІДХОДУ ДО ПРОБЛЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВИХ КОНТЕНТІВ, ЗАСНОВАНОГО НА АНАЛІЗІ ПОВНОГО НАБОРУ ЇХ ФОРМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ**

І.І. Бобок

Одеський національний політехнічний університет,  
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: werter666@ukr.net

Цілісність інформації є одним з основних критеріїв її безпеки. Сьогодні інформаційні об'єкти все частіше мають цифрове представлення: зображення, аудіо, цифрове відео. Використання таких об'єктів з метою, що відрізняється від розважальної (в медицині, пресі, науці, судових розслідуваннях і т.і.), можливо лише за відсутності їх несанкціонованих змін. Це робить проблему перевірки їх цілісності, задачу розробки нових підходів і методів для такої перевірки надзвичайно актуальною.

В роботі отримав подальший теоретичний розвиток новий загальний підхід до вирішення проблеми виявлення несанкціонованих змін цифрових контентів, заснований на аналізі сингулярних чисел і сингулярних векторів блоків їх матриць, отриманих шляхом стандартного розбиття, одним з розробників якого є автор. Запропоноване удосконалення забезпечить підвищення чутливості до (малих) збурювальних дій методів і алгоритмів, що їх реалізують, які розробляються на його основі, для експертизи цифрових зображень, відео за рахунок підвищення чутливості формальних параметрів, використовуваних для аналізу цілісності контенту.

**Ключові слова:** порушення цілісності, сингулярні числа, сингулярні вектори, цифрове зображення, цифрове відео,  $n$ -оптимальний вектор

**THEORETICAL DEVELOPMENT OF THE GENERAL APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF DETECTING THE INTEGRITY VIOLATIONS OF DIGITAL CONTENT BASED ON THE ANALYSIS OF A COMPLETE SET OF FORMAL PARAMETERS**

I.I. Bobok

Odessa National Polytechnic University,  
1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: werter666@ukr.net

Integrity of information is one of the main criteria for its safety. Today, information objects mainly have a digital representation: images, audio, digital video. The use of such objects for purposes other than entertainment (for example, in the medicine, press, science, judicial investigations, etc.) is possible only in the absence of their unauthorized changes. It makes the problem of integrity checking, and the task of developing new approaches and methods for such verification is extremely relevant.

In this article, a new general approach to solving the problem of detecting unauthorized changes in digital content was obtained. Proposed approach is based on the analysis of singular numbers and singular vectors of blocks of their matrices, that obtained by standard partitioning. The proposed improvement will increase the sensitivity of methods and algorithms (including the small disturbance) by increasing the sensitivity of the formal parameters used to analyze the integrity of the content.

**Keywords:** integrity violation, singular value, singular vector, digital image, digital video, optimal-vector