

of catalysts based on HPCM]. *Uspekhi v khimii i khimicheskikh tekhnologiyakh* [Advances in chemistry and chemical technology], 2007, vol. XXI, no. 2 (70), pp. 79–84.

4. Rybak, V. A., Akhmad Shokr. Analiticheskiy obzor i sravneniye tekhnologiy podderzhki prinyatiya resheniy [Analytical review and comparison of existing decision support technologies]. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [Systems Analysis and Applied Informatics], 2016, no. 3, pp. 12–18.

5. Sulman, M. G. Vliyaniye ultrazvuka na kataliticheskiye protsessy [Influence of ultrasound on catalytic processes]. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 2000, vol. 69, no. 2, pp. 178–191.

6. Tsareva, S. Yu., Zharikov, Ye. V., Kovalenko, A. N. Issledovaniya vliyaniya prirody i chastits katalizatora na obrazovaniye nanotrubok v metode kataliticheskogo piroliza uglevodorodov [Investigation of the influence of the nature and size of catalyst particles on the formation of nanotubes in the method of catalytic pyrolysis of hydrocarbons]. *Naukoyemkiye tekhnologii* [Science-Intensive Technologies], 2004, no. 6, pp. 38–42.

7. Shelimov, B. N. Netraditsionnyye metody aktivatsii oksidnykh katalizatorov s nanesennymi ionami perekhodnykh metallov [Unconventional Methods for Activating Oxide Catalysts with Supported Transition Metal Ions]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2000, vol. 44, no. 1, pp. 57–70.

8. Ali, J. Ali, Tugolukov, E. N., Habeeb, L. J. Thermophysical Properties of Nanomodified Liquids. *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 1 (17), pp. 18–26.

9. Burakova, E. A., Galunin, E. V., Rukhov, A. V., Memetov, N. R., Tkachev, A. G. Effect of Ultrasound on a Mixed Oxide-Based Catalyst in the Synthesis of Carbon Nanostructured Materials. *Research on Chemical Intermediates*, 2016, no. 42 (9), pp. 7045–7055.

10. Burakova, E. A., Dyachkova, T. P., Rukhov, A. V., Tugolukov, E. N., Galunin, E. V., Tkachev, A. G., Basheer, A. A., Imran, Al. Novel and Economic Method of Carbon Nanotubes Synthesis on a Nickel Magnesium Oxide Catalyst Using Microwave Radiation. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, no. 253, pp. 340–346.

11. Cheung, C. L., Hafner, J. H., Lieber, C. M. Carbon Nanotube Atomic Force Microscopy Tips: Direct Growth by Chemical Vapor Deposition and Application to High-Resolution Imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, no. 97 (8), pp. 3809–3813.

12. Ding F., Rosen A., Bolton K. Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth. *Journal of Chemical Physics*, 2004, no. 121 (6), pp. 2775–2779.

13. Dyachkova, T. P., Melezhyk, A. V., Morozova, Zh. G., Shuklinov, A. V., Tkachev, A. G. Effects of the Nature of Oxidant and Synthesis Conditions on Properties of Nanocomposites Ppolyaniline/Carbon Nanotubes. *Transactions TSTU*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 718–730.

14. Nasraoui, M., Litovka, Yu. V., Dolmatov, V. Yu. The Effect of Combinations of Carbon Nanomaterials on the Microhardness of the Chromium Galvanic Coating. *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 3 (19), pp. 56–63.

УДК 621.397

О ПОГРЕШНОСТИ СКРЫТНОГО СУБПОЛОСНОГО ВНЕДРЕНИЯ ДАННЫХ В ЦВЕТОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 16.06.2021, в окончательном варианте – 18.06.2021.

Черноморец Дарья Андреевна, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85, аспирант, ORCID: 0000-0002-9626-9455, e-mail: daria013ch@yandex.ru

Работа посвящена исследованию проблемы скрытного внедрения данных в цветные цифровые изображения, актуальность которой обусловлена необходимостью организации контроля за распространением и использованием, например, авторских цифровых фотографий. В работе приведены основные положения метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования, основанного на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленного в оттенках серого, на собственные векторы субполосных матриц косинус преобразования. Данный метод предложено применять для внедрения данных в цветное изображение на основании внедрения данных в его отдельную цветовую компоненту широко используемых при обработке изображений цветных пространств RGB, HSV и YCbCr. В работе предложены соотношения для оценивания погрешности цветного изображения, содержащего внедренные данные. Проведены вычислительные эксперименты, которые продемонстрировали, что скрытное субполосное внедрение данных в различные цветовые компоненты может вызывать существенно отличающиеся значения погрешностей изображений-контейнеров, а также, что учет частотных субполосных свойств изображений при скрытном внедрении данных на основе рассмотренного метода в цветовые компоненты изображений, представленных в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr, позволяет достигнуть незначительных искажений (погрешности) цветных изображений-контейнеров.

Ключевые слова: скрытное внедрение, цветное изображение-контейнер, субполосные матрицы, собственные векторы, проекция изображения, погрешность

ON THE ERROR OF HIDDEN SUBBAND DATA EMBEDDING INTO COLOR COMPONENTS OF IMAGES

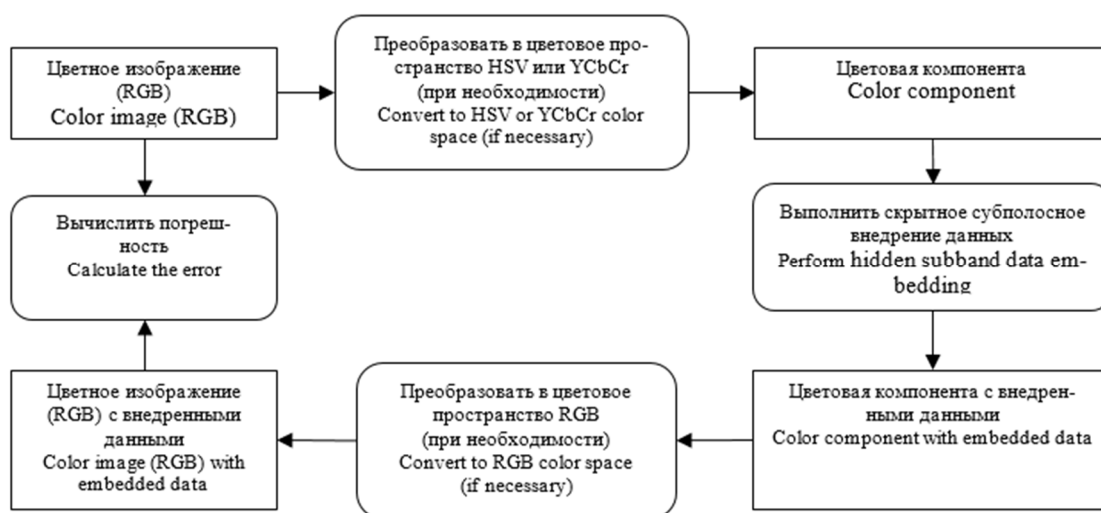
The article was received by the editorial board on 16.06.2021, in the final version – 18.06.2021.

Chernomorets Daria A., Belgorod National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russian Federation,
post-graduate student, ORCID: 0000-0002-9626-9455, e-mail: daria013ch@yandex.ru.

The work is devoted to the study of the problem of hidden data embedding into color digital images, the relevance of which is due to the need to organize control over the distribution and use of, for example, author's copyright digital photos. The paper presents the main ideas of the method of hidden subband data embedding into images within the cosine transform, based on the relative change (taking into account the values of the embedded data) of the projections of the container-image, represented in grayscale, on the cosine transform subband matrices eigenvectors. This method is proposed to be used for data embedding in a color image based on data embedding in its separate color component of the RGB, HSV, and YCbCr color spaces widely used in image processing. In this paper, we propose relations for estimating the error of a color image containing embedded data. Computational experiments have been carried out to demonstrate that hidden subband embedding of data in different color components can cause significantly different values of errors in container-images, and that taking into account the frequency subband image properties during the hidden data embedding (based on the considered method) into the color components of images represented in the RGB, HSV, and YCbCr color spaces allows achieving insignificant distortions (errors) of the color container-images.

Keywords: hidden embedding, color container-image, subband matrices, eigenvectors, image projection, error

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Цветные изображения представляют значительную часть цифровых изображений, регистрируемых, обрабатываемых и распространяемых в информационных системах. Цифровые изображения, зачастую, содержат информацию, использование и распространение которой необходимо контролировать, например, во многих случаях необходимо организовывать контроль за распространением или использованием авторских цифровых фотографий, созданных средствами компьютерной графики цифровых картин, изображений земной поверхности, электронных карт, схем, чертежей, фото и видео материалов и других мультимедийных данных. В настоящее время один из подходов к организации такого контроля основан на применении цифровых «водяных знаков», то есть данных, скрытно внедряемых в изображения, при этом искажения изображений с внедренными данными визуально не обнаруживаются. Под скрытным внедрением понимают такое изменение элементов изображения на основе скрываемой информации, которое не вызывает существенных искажений исходного изображения и обеспечивает восстановление внедренных данных [1–4].

Значительное количество методов скрытного внедрения (стеганографических методов) основано на скрытии информации в изображениях, представленных в оттенках серого (значения пикселей изменяются в диапазоне от 0 до 255) [1–3, 5–7]. Данные методы также могут быть применены для скрытного внедрения в цветные изображения путем внедрения данных в отдельные цветовые компоненты цветных изображений, например, в компоненты R, G и B, содержащих информацию

соответственно о красном, зеленом и синем цветах цветного изображения, представленного в цветовом пространстве RGB [2, 3, 8].

В данной работе проведены исследования по оцениванию влияния на искажение (погрешность) цветного изображения результатов скрытного внедрения данных в отдельные цветовые компоненты широко используемых цветовых пространств RGB, HSV и YCbCr [8]. При этом скрытное внедрение данных осуществлено на основе достаточно эффективного метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках преобразования косинус преобразования, являющимся развитием метода субполосного внедрения в рамках преобразования Фурье [9–12]. В данном методе учитываются частотные свойства изображений, в которые осуществляется внедрение, что позволяет получать незначительные искажения исходных изображений в результате внедрения данных.

Основные положения метода скрытного субполосного внедрения. Метод скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования основан на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленное в оттенках серого, на собственные векторы так называемых субполосных матриц косинус преобразования, соответствующих заданной подобласти пространственных частот, на которые разбивается область определения косинус преобразования.

Обозначим, $\Phi = (f_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, – изображение-контейнер, представленное в оттенках серого, в которое предполагается осуществлять внедрение данных, представленных в битовой форме. Представим область определения косинус преобразования в виде объединения $R_1 \times R_2$ непересекающихся подобластей пространственных частот $V_{r_1 r_2}$, $r_1 = 1, 2, \dots, R_1$, $r_2 = 1, 2, \dots, R_2$:

$$V_{r_1 r_2} = \{(u, v) \mid u_{r_1,1} \leq u < u_{r_1,2}, \quad v_{r_2,1} \leq v < v_{r_2,2}\}, \quad (1)$$

$$u_{1,1} = 0, \quad u_{1,2} = \frac{\pi}{R_1}, \quad u_{r_1,1} = u_{r_1-1,2}, \quad u_{r_1,2} = u_{r_1,1} + \frac{\pi}{R_1}, \quad r_1 = 2, \dots, R_1, \quad (2)$$

$$v_{1,1} = 0, \quad v_{1,2} = \frac{\pi}{R_2}, \quad v_{r_2,1} = v_{r_2-1,2}, \quad v_{r_2,2} = v_{r_2,1} + \frac{\pi}{R_2}, \quad r_2 = 2, \dots, R_2. \quad (3)$$

Элементы субполосных матриц $G_{r_1} = (g_{i k_1}^{r_1})$, $i, k_1 = 1, 2, \dots, N_1$, и $H_{r_2} = (h_{i_2 k_2}^{r_2})$, $i_2, k_2 = 1, 2, \dots, N_2$, применяемых в рассматриваемом методе скрытного субполосного внедрения данных в изображения и соответствующих заданной подобласти пространственных частот $V_{r_1 r_2}$, вычисляются на основании следующих соотношений [13, 14]:

$$g_m^{r_1} = a_m^{r_1} + \tilde{g}_m^{r_1}. \quad (4)$$

$$a_m^{r_1} = \begin{cases} \frac{\sin(u_{r_1,2}(i-n)) - \sin(u_{r_1,1}(i-n))}{\pi(i-n)}, & i \neq n, \\ \frac{u_{r_1,2} - u_{r_1,1}}{\pi}, & i = n, \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{g}_m^{r_1} = \frac{\sin(u_{r_1,2}(i+n-1)) - \sin(u_{r_1,1}(i+n-1))}{\pi(i+n-1)}. \quad (6)$$

Элементы матрицы $H_{r_2} = (h_{i_2 k_2}^{r_2})$, $i_2, k_2 = 1, 2, \dots, N_2$, вычисляются аналогично элементам матрицы G_{r_1} при подстановке значений частот $v_{r_2,1}$ и $v_{r_2,2}$ (3) в соотношения (4)–(6).

Проекция $\gamma_{ik}^{r_1 r_2}$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, изображения Φ на собственные вектора $q_i^{r_1}$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, и $u_k^{r_2}$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, субполосных матриц косинус преобразования G_{r_1} и H_{r_2} вычисляются следующим образом:

$$\gamma_{ik}^{r_1 r_2} = (\vec{q}_i^{r_1})^T \Phi \vec{u}_k^{r_2}, \quad (7)$$

и затем разбиваются на подмножества проекций $\Psi_{s_1 s_2}$, $s_1 = 1, 2, \dots, S_1$, $s_2 = 1, 2, \dots, S_2$, следующего вида:

$$\Psi_{s_1 s_2} = \{\gamma_{ik}^{r_1 r_2} \mid (s_1 - 1)N_1 / S_1 + 1 \leq i \leq s_1 N_1 / S_1, (s_2 - 1)N_2 / S_2 + 1 \leq k \leq s_2 N_2 / S_2\}. \quad (8)$$

Для скрытного внедрения выбираются неинформативные подмножества проекций, для которых выполняется неравенство:

$$\delta_{s_1 s_2} < T_0, \quad (9)$$

где T_0 – пороговое значение, вычисляемое на основании задаваемой (интерактивно или на основе применения интеллектуальных технологий) величины доли T_p суммы квадратов проекций (доли квадрата нормы матрицы изображения-контейнера), входящих в информативные подмножества проекций, не рекомендуемых для изменения при внедрении,

$$0 < T_p < 1, \quad (10)$$

$\delta_{s_1 s_2}$ – доля суммы квадратов проекций, входящих в подмножество $\Psi_{s_1 s_2}$:

$$\delta_{s_1 s_2} = \frac{\sum_{i=(s_1-1)N_1/S_1+1}^{s_1 N_1/S_1} \sum_{k=(s_2-1)N_2/S_2+1}^{s_2 N_2/S_2} (\gamma_{ik}^{n_1 n_2})^2}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} (\gamma_{ik}^{n_1 n_2})^2}. \quad (11)$$

В рассматриваемом методе относительное изменение значений заданной пары неинформативных проекций $\gamma_{ik}^{n_1 n_2}$ и $\gamma_{i,k+1}^{n_1 n_2}$ при внедрении «0» или «1» осуществляется таким образом, чтобы для измененных значений проекций $\tilde{\gamma}_{ik}^{n_1 n_2}$ и $\tilde{\gamma}_{i,k+1}^{n_1 n_2}$ выполнялись соответственно следующие неравенства:

$$\left| \tilde{\gamma}_{ik}^{n_1 n_2} \right| \geq \left| \gamma_{i,k+1}^{n_1 n_2} \right| + T_\gamma^{s_1 s_2} \quad (\text{при внедрении «0»}), \quad (12)$$

$$\left| \tilde{\gamma}_{ik}^{n_1 n_2} \right| \leq \left| \gamma_{i,k+1}^{n_1 n_2} \right| - T_\gamma^{s_1 s_2} \quad (\text{при внедрении «1»}), \quad (13)$$

где $T_\gamma^{s_1 s_2}$ – пороговое значение отличия проекций,

$$T_\gamma^{s_1 s_2} = t_\gamma \gamma_{cp}^{s_1 s_2}, \quad (14)$$

$$\gamma_{cp}^{s_1 s_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=(s_1-1)N_1/S_1+1}^{s_1 N_1/S_1} \sum_{k=(s_2-1)N_2/S_2+1}^{s_2 N_2/S_2} (\gamma_{ik}^{n_1 n_2})^2}{\left(\frac{N_1}{S_1} \frac{N_2}{S_2} \right)}}, \quad (15)$$

t_γ – коэффициент относительного изменения проекций, задаваемый интерактивно или на основе применения интеллектуальных технологий и позволяющий уточнять пороговое значение $T_\gamma^{n_1 n_2}$,

$$t_\gamma \geq 0. \quad (16)$$

Изменение изображения-контейнера Φ на основе значений пары измененных проекций выполняется следующим образом:

$$\tilde{\Phi} = \Phi + (T_S \tilde{\gamma}_{ik}^{n_1 n_2} - \gamma_{ik}^{n_1 n_2}) \vec{q}_i (\vec{u}_k^{n_2})^T + (T_S \tilde{\gamma}_{i,k+1}^{n_1 n_2} - \gamma_{i,k+1}^{n_1 n_2}) \vec{q}_i (\vec{u}_{k+1}^{n_2})^T, \quad (17)$$

где $\tilde{\Phi}$ – изображение-контейнер, содержащее внедренные данные; T_S – коэффициент внедрения, задаваемый с целью адаптивного уменьшения искажений изображения-контейнера,

$$T_S > 0. \quad (18)$$

Восстановление (извлечение) значения отдельного бита данных \tilde{b}_m , скрытно внедренного в изображение-контейнер $\tilde{\Phi}$ на основании значений измененных проекций $\tilde{\gamma}_{ik}^{n_1 n_2}$ и $\tilde{\gamma}_{i,k+1}^{n_1 n_2}$, выполняется следующим образом:

$$\tilde{b}_m = \begin{cases} 0, & \left| \tilde{\gamma}_{ik}^{n_1 n_2} \right| \geq \left| \tilde{\gamma}_{i,k+1}^{n_1 n_2} \right|, \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (19)$$

Рассмотренный выше метод скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования может быть применен для внедрения информации в цветное изображение на основании изменения его отдельной цветовой компоненты. Большинство цветных изображений, распространяемых и обрабатываемых в информационно-телекоммуникационных системах, представлены в цветовом пространстве RGB. В данной работе, наряду с результатами внедрения в цветные компоненты цветового пространства RGB, исследуются результаты скрытного внедрения данных в цветные компоненты цветовых пространств HSV и YCbCr, достаточно широко используемых при обработке изображений.

Для осуществления скрытного внедрения в цветное изображение задается цветовое пространство и компонента, в которую осуществляется внедрение данных. Формирование компонент в анализируемых цветовых пространствах выполняется следующим образом:

1. В цветном изображении, представленном в цветовом пространстве RGB (в данном цветовом пространстве обычно представляют цветные изображения в различных информационных системах), для описания цвета применяют три цветные компоненты, соответствующих интенсивности трех основных цветов: красный, зеленый и синий. Цветное изображение, размерности $N_1 \times N_2$ пикселей, в цветовом пространстве RGB, обычно, представляют в виде трехмерной матрицы $X = (x_{ijk})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, $k = 1, 2, \dots, 3$, где цветовой компоненте R, определяющей

интенсивность красного цвета, соответствует двумерная матрица $R=(x_{y1})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$; цветовой компоненте G (зеленый цвет) соответствует двумерная матрица $G=(x_{y2})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$; цветовой компоненте B (синий цвет) соответствует двумерная матрица $B=(x_{y3})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$.

2. Для получения отдельных цветовых компонент H (цветовой тон), S (насыщенность) и V (значение цвета) в цветовом пространстве HSV (данное цветовое пространство, зачастую, предпочитают использовать художники, так как считается, что представление цвета в цветовом пространстве HSV ближе к восприятию цветов человеком) выполняется нелинейное преобразование изображения-контейнера из цветового пространства RGB, основанное на применении функции `rgb2hsv`, реализованной в среде инженерных вычислений Matlab [15].

3. Для получения отдельных цветовых компонент Y (яркость), Cb (синяя цветоразностная компонента) и Cr (красная цветоразностная компонента) в цветовом пространстве YCbCr на основании значений цветовых компонент R, G и B изображения-контейнера в цветовом пространстве RGB применяется преобразование, основанное на применении функции `rgb2ycbcr` среды Matlab [15].

После внедрения в заданную цветовую компоненту цветового пространства RGB, HSV или YCbCr на основании метода скрытого субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования выполняется (в случае необходимости) преобразование цветовой информации в заданном цветовом пространстве в цветовое пространство RGB:

- для преобразования изображения-контейнера из цветового пространства HSV в цветовое пространство RGB выполняется нелинейное преобразование, основанное на применении функции `hsv2rgb` среды Matlab;
- для преобразования изображения-контейнера из цветового пространства YCbCr в цветовое пространство RGB применяется преобразование, основанное на применении функции `ycbcr2rgb` среды Matlab.

В дальнейшем выполняется оценивание искажения (погрешности) цветного изображения в цветовом пространстве RGB на основании следующих значений:

- погрешность σ_1 отдельной цветовой компоненты изображения-контейнера в заданном цветовом пространстве, в которую скрытно внедрены данные,
- погрешность σ_2 цветного изображения, представленного в виде трехмерной матрицы в пространстве RGB,
- погрешность σ_3 яркостной составляющей цветного изображения, что позволяет оценить искажения изображения-контейнера с учетом особенностей зрительной системы человека, которая более чувствительна к изменениям яркости.

Оценивание погрешности отдельной цветовой компоненты изображения-контейнера в заданном цветовом пространстве в результате скрытного внедрения в нее данных предлагается выполнять на основании следующего соотношения:

$$\sigma_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (\tilde{f}_{ij} - f_{ij})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f_{ij}^2}, \quad (20)$$

где $\Phi = (f_{ij})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, – заданная цветовая компонента исходного цветного изображения; $\tilde{\Phi} = (\tilde{f}_{ij})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, – цветовая компонента, содержащая внедренные данные.

Оценивание погрешности цветного изображения-контейнера (представленного в виде трехмерной матрицы в пространстве RGB) в результате скрытного внедрения данных предлагается выполнять следующим образом: после внедрения данных в отдельную цветовую компоненту заданного цветового пространства осуществляется переход (в случае необходимости) в цветовое пространство RGB, затем и вычисляется следующее значение погрешности:

$$\sigma_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^3 (\tilde{x}_{ijk} - x_{ijk})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^3 x_{ijk}^2}, \quad (21)$$

где $X = (x_{ijk})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, $k=1,2,\dots,3$, – исходное цветное изображение-контейнер, представленное в виде трехмерной матрицы в пространстве RGB; $\tilde{X} = (\tilde{x}_{ijk})$, $i=1,2,\dots,N_1$, $j=1,2,\dots,N_2$, $k=1,2,\dots,3$, – содержащее внедренные данные цветное изображение-контейнер, представленное в цветовом пространстве RGB.

Оценивание погрешности яркостной составляющей цветного изображения в результате скрытного внедрения данных предлагается выполнять следующим образом: после завершения скрытного внедрения данных в отдельную цветовую компоненту заданного цветового пространства осуществляется преобразование изображения-контейнера (в случае необходимости) в цветовое пространство RGB; для вычисления яркостной составляющей Y цветного изображения применяется функция `rgb2gray` среды Matlab; погрешность яркостной составляющей Y цветного изображения вычисляется на основании следующего соотношения:

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (\tilde{y}_{ij} - y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} y_{ij}^2}}, \quad (22)$$

где $Y = (y_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, – яркостная составляющая исходного цветного изображения-контейнера; $\tilde{Y} = (\tilde{y}_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $j = 1, 2, \dots, N_2$, – яркостная составляющая цветного изображения-контейнера, содержащего внедренные данные.

Вычислительные эксперименты. Целью проведенных в работе вычислительных экспериментов является оценивание погрешности цветного изображения-контейнера при внедрении данных на основании метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования в его отдельную цветовую компоненту в заданном цветовом пространстве RGB, HSV или YCbCr, используя величины (20)–(22). Вычислительные эксперименты проведены в среде инженерных вычислений Matlab на основании применения рассматриваемого метода скрытного внедрения в цветные изображения и функций среды Matlab по преобразованию цветовых пространств.

Для скрытного внедрения в качестве изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4 были использованы изображения, размерности 512×512 пикселей, размещенные в открытом доступе в информационно-телекоммуникационной системе Интернет. На рисунке 1 приведены яркостные составляющие (получены при применении функции `rgb2gray` среды Matlab) рассматриваемых цветных изображений-контейнеров.

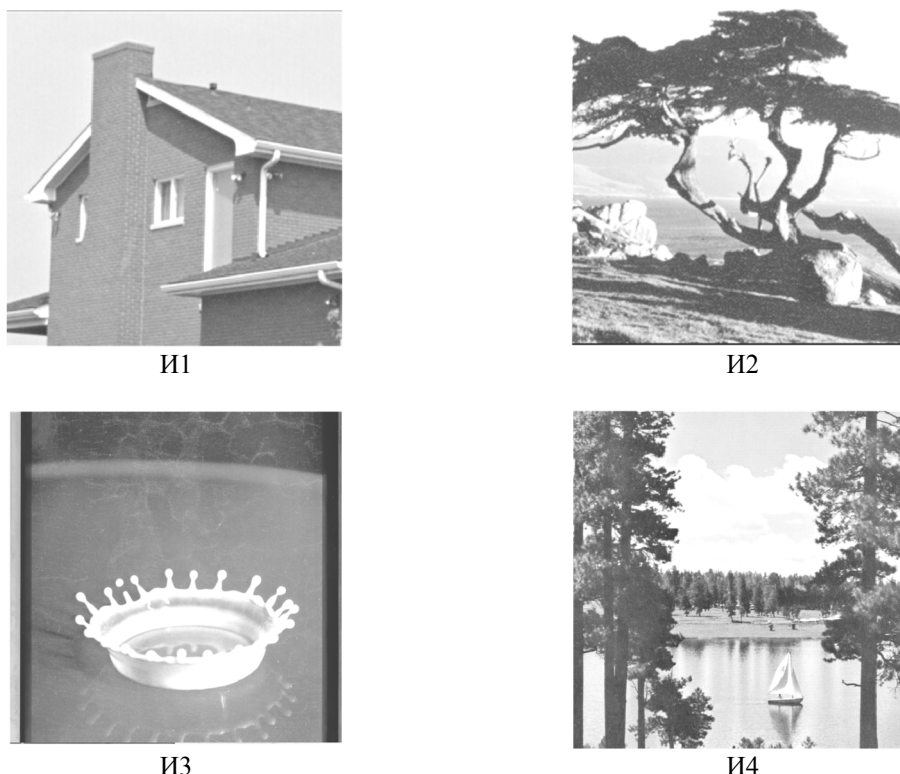


Рисунок 1 – Яркостные составляющие изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4

Внедряемые в ходе вычислительных экспериментов данные сформированы на основании фрагмента изображения, приведенного на рисунке 2. Объем скрытно внедряемых данных в цветовую компоненту, размерности 512×512 пикселей, составил 8192 бит.



Рисунок 2 – Внедряемые данные: слева – в виде фрагмента изображения, справа – в бинарной форме

Параметр T_p (10) и коэффициенты T_s (18), t_γ (16), применяемые в методе скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования для учета частотных свойств изображений-контейнеров, выбирались таким образом, чтобы получить незначительные величины погрешности цветовых компонент в результате скрытного внедрения 8192 бит данных и обеспечить восстановление (извлечение) внедренных данных без искажений.

Для скрытного внедрения использована подобласть пространственных частот $V_{16,16}$ при разбиении области определения косинус преобразования на 16×16 подобластей, так как предварительные исследования показали, что при использовании данной частотной подобласти имеется возможность внедрить заданное количество бит данных при незначительных искажениях изображений-контейнеров.

В таблице 1 приведены значения погрешностей σ_1 (20), σ_2 (21), σ_3 (22), полученные в результате скрытного внедрения на основании рассматриваемого метода 8192 бит данных в цветовые компоненты R, G и B изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4, представленных в цветовом пространстве RGB.

Таблица 1 – Погрешность изображений-контейнеров при скрытном внедрении в их цветовые компоненты R, G и B (цветовое пространство RGB)

Параметр T_p	Коэффициент T_s	Коэффициент t_γ	Цветовая компонента	Погрешность цветовой компоненты σ_1	Погрешность цветного изображения σ_2	Погрешность яркостной составляющей σ_3
Изображение-контейнер И1						
0,9999	0,1	10	R	0,0038	0,0022	0,0021
0,9999	0,05	8	G	0,0059	0,0033	0,0041
0,9999	0,05	8	B	0,006	0,0036	0,0019
Изображение-контейнер И2						
0,9999	0,05	7	R	0,0053	0,0029	0,0026
0,9999	0,03	7	G	0,0057	0,0033	0,0041
0,9999	0,05	6	B	0,0049	0,003	0,0016
Изображение-контейнер И3						
0,9999	0,04	6	R	0,0037	0,003	0,003
0,9998	0,03	4	G	0,0716	0,0292	0,034
0,9995	0,02	5	B	0,0099	0,004	0,0023
Изображение-контейнер И4						
0,998	0,005	5	R	0,011	0,006	0,0041
0,999	0,005	4	G	0,0121	0,0073	0,0078
0,999	0,005	4	B	0,0133	0,0076	0,0028

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают, что использование при скрытном внедрении цветовых компонент цветового пространства RGB позволяет, в случае анализируемых изображений-контейнеров, получить незначительные погрешности цветного изображения. При скрытном внедрении в цветовую компоненту G изображения-контейнера И3 значения погрешностей σ_2 и σ_3 несколько повышены, что можно объяснить преобладанием красного цвета на изображении и наличием больших областей изображения с незначительным изменением оттенков красного цвета. Результаты, приведенные в таблице 1, также показывают, что скрытное внедрение в цветовую компоненту G вызвало увеличение значений погрешности яркостной составляющей анализируемых цветных изображений-контейнеров по сравнению с результатами внедрения в другие цветовые компоненты.

Следует отметить, что в большинстве проведенных вычислительных экспериментов искажения цветных изображений-контейнеров, а также их яркостных составляющих визуально не наблюдаются.

В таблице 2 приведены значения погрешностей σ_1 (20), σ_2 (21), σ_3 (22), полученные в результате скрытного внедрения на основании рассматриваемого метода 8192 бит данных в цветовые компоненты H, S и V изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4, представленных в цветовом пространстве HSV.

Таблица 2 – Погрешность изображений-контейнеров при скрытном внедрении в их цветовые компоненты H, S и V (цветовое пространство HSV)

Параметр T_p	Коэффициент T_S	Коэффициент t_γ	Цветовая компонента	Погрешность цветовой компоненты σ_1	Погрешность цветного изображения σ_2	Погрешность яркостной составляющей σ_3
Изображение-контейнер И1						
0,993	0,01	1	H	0,1037	0,0787	0,0718
0,9995	0,1	7	S	0,0138	0,0037	0,0039
0,9999	0,1	5	V	0,0042	0,0041	0,0048
Изображение-контейнер И2						
0,992	0,01	3	H	0,0875	0,0428	0,027
0,9997	0,1	3	S	0,0133	0,0035	0,0035
0,9999	0,1	3	V	0,0044	0,0043	0,0045
Изображение-контейнер И3						
0,985	0,005	2	H	0,1867	0,4808	0,2354
0,9995	0,03	4	S	0,0279	0,0199	0,02
0,9999	0,1	3	V	0,0034	0,0035	0,0037
Изображение-контейнер И4						
0,95	0,003	0,7	H	0,2445	0,1533	0,0833
0,993	0,005	2	S	0,0298	0,0091	0,0066
0,999	0,03	1	V	0,0083	0,0075	0,0078

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что использование цветовых компонент S и V цветового пространства HSV позволяет, в случае анализируемых изображений-контейнеров, получить незначительные погрешности цветного изображения, при этом внедрение в цветовую компоненту H вызывает значительные искажения цветного изображения-контейнера.

В таблице 3 приведены значения погрешностей σ_1 (20), σ_2 (21), σ_3 (22), полученные в результате скрытного внедрения на основании рассматриваемого метода 8192 бит данных в цветовые компоненты Y, Cb и Cr изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4, представленных в цветовом пространстве YCbCr.

Таблица 3 – Погрешность изображений-контейнеров при скрытном внедрении в их цветовые компоненты Y, Cb и Cr (цветовое пространство YCbCr)

Параметр T_p	Коэффициент T_S	Коэффициент t_γ	Цветовая компонента	Погрешность цветовой компоненты σ_1	Погрешность цветного изображения σ_2	Погрешность яркостной составляющей σ_3
Изображение-контейнер И1						
0,9998	0,1	7	Y	0,0053	0,0071	0,0071
0,99985	0,5	10	Cb	0,0041	0,0059	0,0041
0,9999	0,3	10	Cr	0,0043	0,0058	0,004
Изображение-контейнер И2						
0,9999	0,05	7	Y	0,0052	0,0071	0,0069
0,9995	0,6	10	Cb	0,004	0,006	0,0039
0,9997	0,4	9	Cr	0,0039	0,0055	0,0038
Изображение-контейнер И3						
0,99978	0,03	11	Y	0,0075	0,0089	0,0098
0,999	0,06	11	Cb	0,0052	0,0073	0,0049
0,9995	0,04	11	Cr	0,0053	0,0086	0,0048
Изображение-контейнер И4						
0,9994	0,004	10	Y	0,0085	0,0105	0,0102
0,995	0,01	9	Cb	0,0065	0,0081	0,004
0,997	0,008	9	Cr	0,0067	0,0079	0,0039

Результаты, приведенные в таблице 3, показывают, что использование цветовых компонент Y, Cb и Cr цветового пространства YCbCr позволяет, в случае анализируемых изображений-контейнеров, получить незначительные погрешности цветного изображения.

Для наглядного представления значений погрешности яркостной составляющей цветных изображений при внедрении в различные цветовые компоненты изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4 в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr на рисунке 3 на основании данных, приведенных в таблицах 1–3, представлены соответствующие графики.

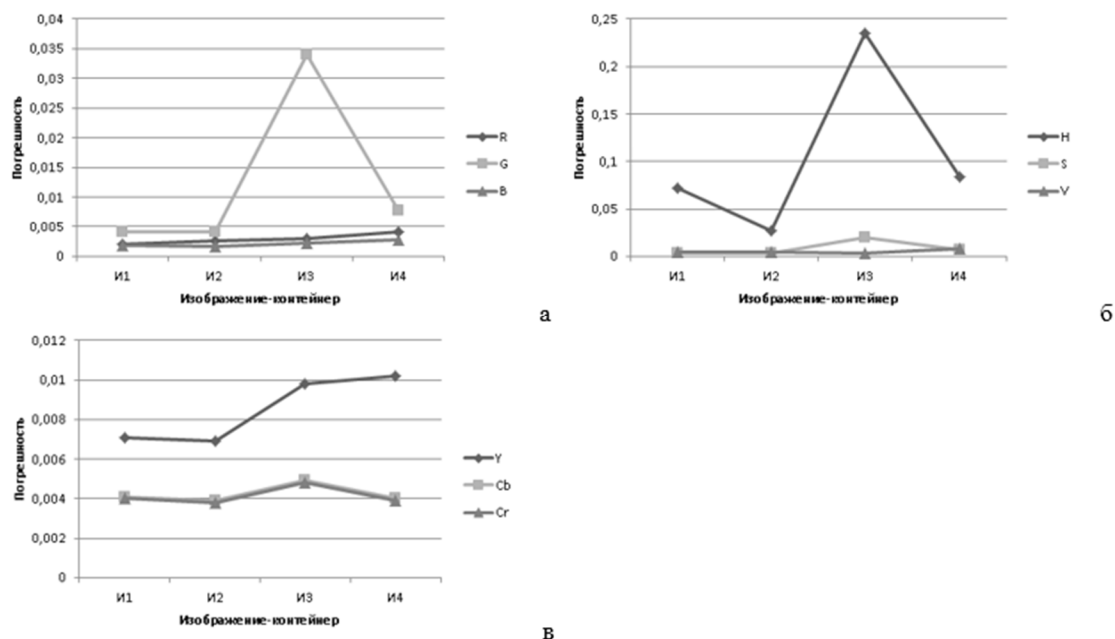


Рисунок 3 – Погрешность яркостной составляющей цветных изображений-контейнеров И1, И2, И3 и И4: а – при внедрении в цветовые компоненты в цветовом пространстве RGB, б – при внедрении в цветовые компоненты в цветовом пространстве HSV, в – при внедрении в цветовые компоненты в цветовом пространстве YCbCr

Графики, приведенные на рисунке 3, а также данные, приведенные в таблицах 1–3, демонстрируют, что при внедрении в изображения-контейнеры И1, И2, И3 и И4 наименьшая погрешность яркостной составляющей получена при скрытном внедрении в цветовую компоненту В (синий цвет) данных изображений в цветовом пространстве RGB. Как было отмечено выше, увеличение погрешности яркостной составляющей изображения-контейнера И3 можно объяснить особенностью цветов представленных на нем объектов. Увеличение погрешности яркостной составляющей наблюдается при внедрении в цветовые компоненты G, H и Y анализируемых изображений в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr соответственно.

В результате проведения большинства вычислительных экспериментов искажения цветных изображений-контейнеров, а также их яркостных составляющих визуально не наблюдаются.

Заключение. В работе рассмотрен метод скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования, основанный на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленного в оттенках серого, на собственные векторы субполосных матриц косинус преобразования, а также его применение для внедрения данных в цветные изображения. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что при скрытном внедрении данных на основе рассмотренного метода в цветовые компоненты изображений, представленных в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr, могут быть достигнуты незначительные искажения (погрешности) цветных изображений-контейнеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00657.

Библиографический список

1. Аграновский, А. В. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ / А. В. Аграновский. – Москва : Вузовская книга, 2009. – 220 с.: ил.
2. Грибунин, В. Г. Цифровая стеганография / В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, И. В. Туринцев. – Москва : Солон-пресс, 2016. – 262 с.
3. Конахович, Г. Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович., А. Ю. Пузыренко. – Киев : МК-Пресс, 2006. – 288 с.
4. Жилияков, Е. Г. Исследование устойчивости стеганографии в изображениях / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, Н. Н. Гахова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2014. – № 1 (172). – С. 168–174.
5. Cox, I. J. Digital watermarking and steganography / I. J. Cox., M. Miller, J. Bloom., J. Fridrich, T. Kalker. – Morgan Kaufmann, 2007. – 593 p.
6. Hartung, F. Multimedia. Watermarking Techniques / F Hartung, M. Kutter // Proceedings IEEE, Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information. – 1999. – № 87 (7). – P. 1079–1107.

7. Zhilyakov, E. G. Hidden data embedding method based on the image projections onto the eigenvectors of subinterval matrices / E. G. Zhilyakov, A. A. Chernomorets, E. V. Bolgova., I. I. Oleynik, D. A. Chernomorets // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – № 7 (3.19). – P. 72–80.
8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2012. – 1104 с.
9. Жилияков, Е. Г. О субполосном внедрении в цветные изображения / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, В. А. Голошчапова // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2015. – № 1 (198). – С. 158–162.
10. Жилияков, Е. Г. О субполосном внедрении информации в подобласти пространственных частот изображения-контейнера / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, Н. Н. Гахова // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2014. – № 9. – С. 85–87.
11. Болгова, Е. В. О методе субинтервального скрытного внедрения данных в изображения / Е. В. Болгова, А. А. Черноморец // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2018. – Т. 45, № 1. – С. 192–201.
12. Жилияков, Е. Г. О разложении изображений по собственным векторам субполосных матриц / Е. Г. Жилияков, А. А. Черноморец, Е. В. Болгова // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2014. – № 15 (186). – С. 185–189.
13. Черноморец, А. А. О квазисубполосных матрицах косинус-преобразования / А. А. Черноморец, Е. В. Болгова, Д. А. Черноморец // *Научный результат. Информационные технологии*. – 2019. – Т. 4, № 3. – С. 11–19.
14. Болгова, Е. В. О собственных числах субинтервальных матриц косинусного преобразования / Е. В. Болгова // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*. – 2017. – № 2 (251). – С. 92–101.
15. Документация MATLAB. – Режим доступа: <https://docs.exponenta.ru/R2019b/matlab/functionlist.html>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус (дата обращения: 26.04.2021).

References

1. Agranovskiy, A. V. *Steganografiya, tsifrovyye vodyanyye znaki i steganoanaliz* [Steganography, digital watermarks and stegananalysis]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2009. 220 p.
2. Gribunin, V. G., Okov, I. N., Turintsev, I. V. *Tsifrovaya steganografiya* [Digital steganography]. Moscow, Solon-press, 2016. 262 p.
3. Konakhovich, G. F., Puzyrenko, A. Yu. *Kompyuternaya steganografiya. Teoriya i praktika* [Computer steganography. Theory and practice]. Kiev, MK-Press Publ., 2006. 288 p.
4. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Gakhova N. N. Issledovaniye ustoychivosti steganografii v izobrazheniyakh [Investigation of the steganography stability in images]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information Technologies], 2014, no. 1 (172), pp. 168–174.
5. Cox, I. J., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., Kalker, T. *Digital watermarking and steganography*. Morgan Kaufmann, 2007. 593 p.
6. Hartung, F., Kutter, M. Multimedia. Watermarking Techniques. *Proceedings IEEE, Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information*. 1999, no. 87 (7), pp. 1079–1107.
7. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova E. V., Oleynik, I. I., Chernomorets, D. A. Hidden data embedding method based on the image projections onto the eigenvectors of subinterval matrices. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no. 7 (3.19), pp. 72–80.
8. Gonzalez, R., Woods, R. *Digital image processing*. Moscow, Technosphere, 2012. 1104 p.
9. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Goloshchapova, V. A. O subpolosnom vnedrenii v tsvetnyye izobrazheniya [About subband embedding in colored images]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies], 2015, no. 1 (198), pp. 158–162.
10. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Gakhova, N. N. O subpolosnom vnedrenii informatsii v podoblasti prostranstvennykh chastot izobrazheniya-konteynera [About information subband embedding into space frequencies subareas of image-container]. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* [Journal of Neurocomputers], 2014, no. 9, pp. 85–87.
11. Bolgova, E. V., Chernomorets, A. A. About the method of subinterval covert data injection into images [On the method of subinterval data hidden embedding in images]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies], 2018, vol. 45, no. 1, pp. 192–201.
12. Zhilyakov, E. G., Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V. O razlozhenii izobrazheniy po sobstvennym vektoram subpolosnykh matrits [About decomposition of images to the eigenvectors of subband matrix]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin Economics Information technologies], 2014, no. 15 (186), pp. 185–189.
13. Chernomorets, A. A., Bolgova, E. V., Chernomorets, D. A. O kvazisubpolosnykh matritsakh kosinus-preobrazovaniya [On quasi-subband matrices of cosine transform]. *Nauchnyy rezultat. Informatsionnyye tekhnologii* [Research Result. Information Technologies], 2019, vol. 4, no. 3, pp. 11–19.

14. Bolgova, E. V. O sobstvennykh chislakh subintervalnykh matrits kosinusnogo preobrazovaniya [About the eigenvalues of cosine transform subinterval matrices]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Belgorod State University Scientific Bulletin. Series. Economics Information Technologies], 2017, no. 2 (251), pp. 92–101.

15. *Dokumentatsiya MATLAB* [MATLAB Documentation]. Available at: <https://docs.exponenta.ru/R2019b/matlab/functionlist.html> (accessed 26.04.2021).

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.025-032

УДК 004.051

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННЫХ ВИДЕОФАЙЛОВ ФОРМАТОВ AVI И MP4

Статья поступила в редакцию 22.07.2021, в окончательном варианте – 29.07.2021.

Гераськин Алексей Сергеевич, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,

кандидат педагогических наук, доцент кафедры теоретических основ компьютерной безопасности и криптографии, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-1022>, e-mail: gerascinas@mail.ru

Уколов Родион Владимирович, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,

аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1856-3541>, e-mail: trustgreen1@mail.ru

В современном мире видеофайлы занимают особую роль. Развитие алгоритмов сжатия видеоинформации и рост возможностей сети Интернет позволяет передавать видеофайлы. При передаче видеофайлов неизбежно возникают повреждения. Соответственно возникает вопрос о восстановлении поврежденного файла и получении информации из него. В статье рассматриваются наиболее часто используемые видеофайлы расширений AVI, MP4. В результате исследования было выявлено, что наиболее часто встречаются повреждения в заголовках, что приводит к ошибкам при открытии файлов проигрывателями, менее часто повреждаются данные. Повреждение данных приводит к тому, что некоторый фрагмент видеофайла либо проигрывается с ошибками, искажениями, либо пропускается. В статье рассматривается возможность восстановления повреждения видеофайла с помощью изъятия неискаженных данных и предлагается алгоритм анализа кадров с помощью нейронной сети. В рамках алгоритма нейронная сеть применяется для определения поврежденных кадров в видеоданных. Алгоритм был реализован в виде программного продукта. Для первого этапа проверки эффективности алгоритма производились умышленные искажения одного кадра для каждого исследуемого видеофайла. В результате экспериментальной проверки разработанного алгоритма было выявлено, что он обеспечивающий высокую точность обнаружения искаженных последовательностей кадров.

Ключевые слова: нейронная сеть, область данных видеофайла, повреждение видеофайла, расширение AVI, расширение MP4, алгоритм восстановления

RESEARCH ON APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR RESTORING DAMAGED VIDEO FILES OF AVI AND MP4 FORMATS

The article was received by the editorial board on 22.07.2021, in the final version – 29.07.2021.

Geraskin Aleksey S., Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation,

Cand. Sci. (Pedagocics), Associate Professor of the Department of Computer Security and Cryptography Theory, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3118-1022>, e-mail: gerascinas@mail.ru

Ukolov Rodion V., Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation,

post-graduate student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1856-3541>, e-mail: trustgreen1@mail.ru

In the modern world, video files play a special role. The development of video compression algorithms and the growth of the Internet's capabilities make it possible to transfer video files. Damage inevitably occurs when transferring video files. Accordingly, the question arises about restoring a damaged file and obtaining information from it. The article discusses the most commonly used video file extensions AVI, MP4. As a result of the study, it was revealed that the most common damage is in the headers, which leads to errors when opening files by players, data is damaged less often. Data corruption leads to the fact that a certain fragment of the video file is either played with errors, distortions, or is skipped. The article discusses the possibility of recovering damaged video file using the