

УДК 004.932.72

Е.Г. ЖИЛЯКОВ, д-р техн. наук, зав. каф., НИУ "БелГУ", Россия, Белгород,

А.А. ЧЕРНОМОРЕЦ, канд. техн. наук, зав. каф., НИУ "БелГУ", Россия, Белгород,

Е.В. БОЛГОВА, асп., НИУ "БелГУ", Россия, Белгород

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СКРЫТНОГО СУБПОЛОСНОГО ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИЗОБРАЖЕНИЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ШУМА

В работе показано преимущество скрытного субполосного внедрения информации в подобласти пространственных частот изображения-контейнера в устойчивости (а также по объему внедряемой информации) к воздействию аддитивного шума различной интенсивности по сравнению с методом относительной замены коэффициентов дискретного косинусного преобразования. Ил.: 1. Табл.: 2. Библиогр.: 8 назв..

Ключевые слова: субполосное внедрение, устойчивость, аддитивный шум, коэффициенты дискретного косинусного преобразования.

Постановка проблемы и анализ литературы. При выпуске мультимедийной продукции одной из проблем является защита авторских прав. Для ее решения, а также защиты информации от несанкционированного доступа в настоящее время широко используются методы скрытного стеганографического внедрения цифровых водяных знаков (ЦВЗ) (специальных изображений) в объекты защиты – в изображения. В данной группе методов используется психовизуальная избыточность информации, содержащейся в изображении, что позволяет осуществлять ее значительное изменение без существенной потери визуального качества [1 – 4].

Большинство методов скрытного внедрения изображений в графические данные подразделяются на методы стеганографии в пространственной и частотной областях, при этом методы второй группы более устойчивы к внешнему воздействию на изображение-контейнер, содержащий ЦВЗ [2]. Наиболее распространенным из второй группы методов при условии, что при извлечении отсутствует информация о ЦВЗ, является метод относительной замены коэффициентов ДКП [2].

Авторами в работе [5] был предложен метод субполосного скрытного внедрения информации в изображениях, который основан на применении ортонормированного базиса, составленного из собственных векторов субполосной матрицы [6 – 8].

Основные положения исследуемых методов. В методе [2] относительной замены коэффициентов (ОЗК) дискретного косинусного преобразования (ДКП) изображение-контейнер разбивается на блоки размером $N_{B1} \times N_{B2}$, в каждый из которых внедряется один бит b_m скрываемой информации следующим образом. К выделенному блоку (фрагменту) контейнера применяется ДКП. В полученной матрице $Y_m = (y_{n_1 n_2})$, $n_1 = 1, 2, \dots, N_{B1}$, $n_2 = 1, 2, \dots, N_{B2}$, коэффициенты ДКП с предварительно заданными индексами (u_1, v_1) и (u_2, v_2) изменяются таким образом, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\left| y_{u_1 v_1} \right| - \left| y_{u_2 v_2} \right| < -P, \text{ при } b_m = 0, \quad \left| y_{u_1 v_1} \right| - \left| y_{u_2 v_2} \right| > P, \text{ при } b_m = 1, \quad (1)$$

где P – заданное пороговое значение.

К модифицированной указанным выше способом матрице Y_m применяется обратное ДКП и, затем, формируется контейнер с внедренной информацией.

При реализации метода субполосного внедрения (СВ) информации изображение-контейнер W_0 задается с помощью матрицы яркости $W_0 = (w_{ik}^0)$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$. В работе [4] показано, что обработка изображения-контейнера и внедряемой информации, представленной в виде матрицы Y_0 , выполняется в центрально-симметричных подобластях пространственных частот (ППЧ), образуемых при разбиении области пространственных частот (ПЧ) $D_{2\pi}^2 = \{(u, v) \mid -\pi \leq u, v < \pi\}$, на $R_1 R_2$ равновеликих ППЧ $\Omega_{r_1 r_2}$, $r_1 = 1, 2, \dots, R_1$, $r_2 = 1, 2, \dots, R_2$, с помощью соответствующих субполосных матриц A_{r_1} и A_{r_2} .

В работе [3] показано, что соотношение

$$\tilde{W}_1 = W_0 - Y_{r_1 r_2} + K_{r_1 r_2} W_{r_1 r_2} \quad (2)$$

определяет изображение \tilde{W}_1 , являющееся результатом внедрения матрицы Y_0 в контейнер W_0 , при котором энергия внедряемой в виде изображения информации сосредоточена в заданной подобласти ПЧ $\Omega_{r_1 r_2}$. В выражении (2) использованы следующие величины [7 – 8]:

$$Y_{r_1 r_2} = A_{r_1} W_0 A_{r_2}; \quad W_{r_1 r_2} = Q_1^n Y_0 (Q_1^{r_2})^T; \quad (3)$$

$$K_{r_1 r_2} = K_{\text{общ}} \frac{E_{r_1 r_2}(W_0)}{E(W_{r_1 r_2})}; \quad (4)$$

$$E_{\eta_{r2}}(W_0) = \text{tr}(A_{r1}^T \cdot W_0 \cdot A_{r2} \cdot W_0^T); \quad E(W_{\eta_{r2}}) = \text{tr}(W_{\eta_{r2}}(W_{\eta_{r2}})^T),$$

где Q_1^{r1} и Q_1^{r2} – матрицы, столбцы которых составлены из собственных векторов субполосных матриц A_{r1} и A_{r2} , соответствующих единичным собственным числам данных субполосных матриц; $K_{\text{общ}}$ – общий коэффициент внедрения (коэффициент, обеспечивающий равномерность изменения энергии внедряемого изображения в различных ППЧ).

Для получения результата \tilde{Y}_1 восстановления матрицы Y_0 , внедренной в ППЧ Ω_{r1r2} изображения \tilde{W}_1 , следует выполнить преобразование [4]

$$\tilde{Y}_1 = (Q_1^n)^T \tilde{W}_1 Q_1^{r2}. \quad (5)$$

Представляет интерес получение сравнительной оценки устойчивости скрытного субполосного внедрения информации в отдельной подобласти пространственных частот изображения-контейнера к воздействию шума различной интенсивности (отношение шум-сигнал) в сравнении с методом относительной замены коэффициентов ДКП на основе вычислительных экспериментов.

Целью данной работы является исследование одной из основных характеристик указанных методов стеганографии – оценка их робастности, то есть устойчивости внедренной на основе указанных выше методов информации к внешним воздействиям.

План вычислительных экспериментов. В ходе вычислительных экспериментов погрешность представления некоторого изображения (матрицы) $\tilde{W} = (\tilde{w}_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, относительно другого изображения (матрицы) $W = (w_{ik})$ той же размерности определяется на основании среднеквадратического отклонения

$$MSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} (w_{ik} - \tilde{w}_{ik})^2 / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} w_{ik}^2}. \quad (6)$$

В качестве изображения-контейнера использовано изображение размерностью 256×256 пикселей. Внедряемая информация задана в виде матрицы 32×32 однобитовых элементов (значения 0 и 1).

При внедрении информации на основе метода относительной замены коэффициентов (ОЗК) ДКП были использованы следующие рекомендуемые в литературных источниках параметры: размеры блоков,

на которые разбивается изображение-контейнер, – 8 пикселей, координаты изменяемых коэффициентов ДКП: $(u_1, v_1) = (4, 5)$ и $(u_2, v_2) = (5, 4)$, выбрано несколько значений порога P : $\{5, 25\}$.

При субполосном внедрении (СВ) использовано разбиение области ПЧ $D^2_{2\pi}$ на 4×4 равновеликих ППЧ ($R_1 = R_2 = 4$). В качестве подобласти ПЧ, используемой для внедрения, была выбрана неинформационная [5] ППЧ Ω_{13} (энергия которой не входит в 99% суммарной энергии изображения-контейнера).

Результаты вычислительных экспериментов. В табл. 1 приведены значения погрешности изображения-контейнера после внедрения информации на основе анализируемых методов при наложении аддитивного белого шума с различным отношением шум-сигнал, а также соответствующая погрешность восстановления информации.

Для повышения наглядности при сравнении результатов, полученных при использовании различных методов, на основании данных, представленных в табл. 1, построены графики, приведенные на рис.

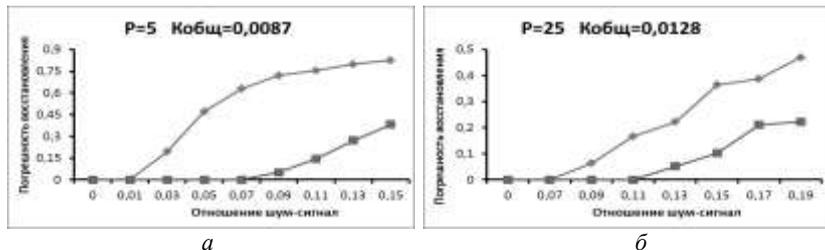


Рис. Зависимость погрешности восстановления внедренной информации от параметров аддитивного шума —●— Метод ОЗК, —■— Метод СВ
а — $P = 5$, $K_{\text{общ}} = 0.0087$; б — $P = 25$, $K_{\text{общ}} = 0.0128$

Данные, представленные в табл. 1 и на рис., демонстрируют преимущество метода субполосного внедрения при восстановлении информации.

Также были проведены эксперименты по сравнению объема внедряемой информации на основе анализируемых методов. В табл. 2 приведены значения максимального объема внедряемой однобитовой информации (значения 0 и 1) на основе методов ОЗК и СВ при указанных выше параметрах внедрения, а также соответствующие погрешности контейнера после внедрения и погрешности восстановления информации.

Таблица 1

Погрешность контейнера и восстановления информации

Отношение шум-сигнал	Метод ОЗК		Метод СВ	
	MSE _{конт}	MSE _{восст}	MSE _{конт}	MSE _{восст}
	$P = 5$		$K_{\text{общ}} = 0.0087$	
0,00	0.0314	0.0000	0.03133	0.0000
0,01	0.0330	0.0000	0.03288	0.0000
0,03	0.0434	0.1935	0.04344	0.0000
0,05	0.0590	0.4721	0.05908	0.0000
0,07	0.0766	0.6280	0.07671	0.0000
0,09	0.0952	0.7202	0.09531	0.0510
0,11	0.1144	0.7550	0.11437	0.1445
0,13	0.1337	0.7981	0.13377	0.2703
0,15	0.1533	0.8249	0.15322	0.3823
	$P = 25$		$K_{\text{общ}} = 0.0128$	
0.00	0.04145	0.0000	0.04137	0.0000
0,07	0.08132	0.0000	0.08131	0.0000
0,09	0.09929	0.0628	0.09910	0.0000
0,11	0.11761	0.1661	0.11746	0.0000
0,13	0.13647	0.2220	0.13647	0.0510
0,15	0.15571	0.3635	0.15551	0.1022
0,17	0.17505	0.3871	0.17497	0.2106
0,19	0.19451	0.4700	0.19442	0.2227

Таблица 2

Объем внедренной информации и погрешность ее восстановления

Отношение шум-сигнал δ	Количество внедренных бит		Погрешность контейнера		Погрешность восстановления	
	ОЗК	СВ	ОЗК	СВ	ОЗК	СВ
0.00	1024	3136	0.0314	0.0315	0.0000	0.000
0.03	1024	3136	0.0434	0.0435	0.1986	0.000

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что при использовании метода субполосного внедрения было внедрено значительно большее количество данных при меньшей погрешности их восстановления при наложении аддитивного шума. Также следует отметить, что алгоритм субполосного внедрения позволяет выполнять внедрение n -разрядных чисел ($n = 1, 2, \dots, 8$), что существенно увеличивает объем внедряемой информации при незначительном повышении погрешности восстановления внедренных данных.

Выводы. Таким образом, проведенные вычислительные

эксперименты продемонстрировали преимущество метода субполосного внедрения в сравнении с методом относительной замены коэффициентов ДКП при восстановлении внедренной информации, а также по объему внедряемых данных.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИУ "БелГУ" (код проекта № 358).

Список литературы. 1. Грибунин В.Г. Цифровая стеганография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 265 с. **2.** Коначович Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г.Ф. Коначович, А.Ю. Пузыренко. – К.: "МК-Пресс", 2006. – 288 с. **3.** Rafael C. Gonzalez. Digital Image Processing / Rafael C. Gonzalez and Richard E. Wood. – Prentice Hall, 2008. – 954 с. **4.** Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с. **5.** Жилияков Е.Г. Реализация алгоритма внедрения изображений на основе использования неинформационных частотных интервалов изображения-контейнера / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, В.А. Голощапова // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2011. – Вып. 1. – С. 96-104. **6.** Черноморец А.А. О свойствах собственных векторов субполосных матриц / А.А. Черноморец, Е.И. Прохоренко, В.А. Голощапова // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. – 2009. – № 7 (62). – Вып. 10/1. – С. 122-128. **7.** Жилияков Е.Г. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, И.В. Лысенко // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. – 2007. – Вып. 4. – С. 115-123. **8.** Жилияков Е.Г. Оптимальная фильтрация изображений на основе частотных представлений / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып. 1. – С. 118-131.

Bibliography (transliterated). 1. Gribunin V.G. Cifrovaja steganografija / V.G. Gribunin, I.N. Okov, I.V. Turincev. – M.: SOLON-PRESS, 2009. – 265 s. **2.** Konahovich G.F. Komp'juternaja steganografija. Teorija i praktika / G.F. Konahovich, A.Ju. Puzyrenko. – K.: "MK-Press", 2006. – 288 s. **3.** Rafael C. Gonzalez. Digital Image Processing / Rafael C. Gonzalez and Richard E. Wood. – Prentice Hall, 2008. – 954 s. **4.** Gonsales R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij / R. Gonsales, R. Vuds, S. Jeddins. – M.: Tehnosfera, 2012. – 1104 s. **5.** Zhiljakov E.G. Realizacija algoritma vnedrenija izobrazhenij na osnove ispol'zovanija neinformacionnyh chastotnyh intervalov izobrazhenija-kontejnera / E.G. Zhiljakov, A.A. Chernomorec, V.A. Goloshchapova // Voprosy radioelektroniki. Ser. JeVT. – 2011. – Vyp. 1. – S. 96-104. **6.** Chernomorec A.A. O svojstvah sobstvennyh vektorov subpolosnyh matric / A.A. Chernomorec, E.I. Prohorenko, V.A. Goloshchapova // Nauchnye vedomosti BelGU. Serija: Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. – 2009. – № 7 (62). – Vyp. 10/1. – S. 122-128. **7.** Zhiljakov E.G. Metod opredelenija tochnyh znachenij dolej jenerгии izobrazhenij v zadannyh chastotnyh intervalah / E.G. Zhiljakov, A.A. Chernomorec, I.V. Lysenko // Voprosy radioelektroniki. Ser. RLT. – 2007. – Vyp. 4. – S. 115-123. **8.** Zhiljakov E.G. Optimal'naja fil'tracija izobrazhenij na osnove chastotnyh predstavlenij / E.G. Zhiljakov, A.A. Chernomorec // Voprosy radioelektroniki. Ser. JeVT. – 2008. – Vyp. 1. – S. 118-131.

Поступила (received) 25.03.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф. НИУ БелГУ Корсунов Н.И.

Zhilyakov Evgeny, Dr.Sci.Tech, Professor
Belgorod National Research University
Victory Street, 85, Belgorod, Russia, 308015
tel./phone: 8(4722) 30-13-92, e-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru
ORCID ID: 0000-0002-5614-7293

Chernomorets Andrey, Cand.Sci.Tech. docent
Belgorod National Research University
Victory Street, 85, Belgorod, Russia, 308015
tel./phone: 8(4722) 30-13-92, e-mail: chernomorets@bsu.edu.ru
ORCID ID: 0000-0002-4749-8542

Bolgova Evgeniya, Postgraduate student
Belgorod National Research University
Victory Street, 85, Belgorod, Russia, 308015
tel./phone: 8(4722) 30-13-92, e-mail: bolgova_e@bsu.edu.ru
ORCID ID: 0000-0003-1454-8635