



ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕГАНОГРАФИИ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Е.Г. ЖИЛЯКОВ
А.А. ЧЕРНОМОРЕЦ
Е.В. БОЛГОВА
Н.Н. ГАХОВА

*Белгородский государственный
 национальный исследовательский
 университет*

e-mail:
zhilyakov@bsu.edu.ru

В работе проведен сравнительный анализ влияния внешних воздействий в виде «белого» аддитивного шума различной интенсивности на погрешность восстановления информации, внедренной в изображения на основе метода скрытного субполосного внедрения и метода относительной замены коэффициентов ДКП.

Ключевые слова: стеганография, внедрение в изображения, субполосное внедрение, погрешность восстановления информации.

Введение

В процессе передачи сведений в информационно-телекоммуникационных системах важной задачей является защита передаваемой информации. С этой целью в настоящее время совместно с методами криптографии широко используется стеганографическое внедрение информации в изображения, обеспечивающее скрытие самого факта наличия защищаемых данных. Скрытое внедрение сведений в изображения основывается на психовизуальной избыточности графической информации, что позволяет осуществлять ее изменение без существенной потери визуального качества [1].

Большинство методов скрытного внедрения информации в графические данные подразделяются на методы стеганографии в пространственной и частотной областях. Методы, основанные на использовании результатов преобразований изображения-контейнера в частотной области, более устойчивы [2] к внешним воздействиям, направленных, как правило, на разрушение внедренной информации. Для проведения сравнительных экспериментов в данной работе из указанной группы методов выбран один из наиболее распространенных методов стеганографии в частотной области при условии, что при восстановлении отсутствует информация о внедренных сведениях, — метод относительной замены коэффициентов (ОЗК) дискретного косинусного преобразования (ДКП) [2].

Целью данной работы является сравнительный анализ влияния внешних воздействий в виде «белого» аддитивного шума различной интенсивности на погрешность восстановления информации, внедренной в изображения на основе метода скрытного субполосного внедрения, разработанного авторами [3], и метода ОЗК.

В исследуемых методах внедрение информации осуществляется в изображение-контейнер, которое задается в виде матрицы $\Phi = (f_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, значения элементов которой соответствуют яркости пикселей изображения.

Основные положения метода относительной замены коэффициентов ДКП

Исходной информацией в методе ОЗК [2] является изображение-контейнер Φ и встраиваемое (внедряемое) в него сообщение, представляемое в виде последовательности бит $B = (b_m)$, $m = 1, 2, \dots, N_B$.

Матрица изображения-контейнера разбивается на N_B непересекающихся блоков (матриц) $\Phi_m = (f_{ik}^m)$, $m = 1, 2, \dots, N_B$, $i = 1, 2, \dots, N_{B1}$, $k = 1, 2, \dots, N_{B2}$,

$$\Phi = \bigcup_{m=1}^{N_B} \Phi_m,$$



в общем случае, содержащих $N_{B1} \times N_{B2}$ элементов (в большинстве реализаций метода $N_{B1} = N_{B2} = 8$).

Отдельный бит b_m вектора $B = (b_m)$, $m = 1, 2, \dots, N_B$, внедряется в соответствующую матрицу Φ_m изображения-контейнера следующим образом.

К элементам матрицы Φ_m применяется ДКП. В результате преобразования имеем матрицу $Y_m = (y_{n_1 n_2})$, $n_1 = 1, 2, \dots, N_{B1}$, $n_2 = 1, 2, \dots, N_{B2}$, значения элементов которой определяются следующим выражением [2]

$$y_{n_1 n_2} = \alpha_{n_1} \alpha_{n_2} \sum_{i=1}^{N_{B1}} \sum_{k=1}^{N_{B2}} f_{ik}^m \cos\left(\frac{\pi n_1}{N_2} \left(i - \frac{1}{2}\right)\right) \cos\left(\frac{\pi n_2}{N_2} \left(k - \frac{1}{2}\right)\right), \quad (1)$$

$$\alpha_{n_1} = \begin{cases} 1/\sqrt{N_1}, n_1 = 0, \\ \sqrt{2/N_1}, n_1 = 1, 2, \dots, N_1 - 1, \end{cases} \quad \alpha_{n_2} = \begin{cases} 1/\sqrt{N_2}, n_2 = 0, \\ \sqrt{2/N_2}, n_2 = 1, 2, \dots, N_2 - 1, \end{cases}$$

$$n_1 = 1, 2, \dots, N_{B1}, \quad n_2 = 1, 2, \dots, N_{B2}.$$

Вычисленная матрица преобразуется в матрицу \tilde{Y}_m ,

$$\tilde{Y}_m = Y_m,$$

элементы которой (коэффициенты ДКП) с предварительно заданными индексами (u_1, v_1) и (u_2, v_2) изменяются таким образом, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\begin{aligned} |\tilde{y}_{u_1 v_1}| - |\tilde{y}_{u_2 v_2}| &< -P_1, \text{ при } b_m = 0, \\ |\tilde{y}_{u_1 v_1}| - |\tilde{y}_{u_2 v_2}| &> P_1, \text{ при } b_m = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где P_1 – заданное пороговое значение.

Значения элементов модифицированной матрицы $\tilde{\Phi}_m = (\tilde{f}_{ik}^m)$, $i = 1, 2, \dots, N_{B1}$, $k = 1, 2, \dots, N_{B2}$, определяются на основе применения обратного ДКП к измененной матрице \tilde{Y}_m :

$$\tilde{f}_{ik}^m = \frac{1}{2N} \sum_{n_1=1}^{N_{B1}} \sum_{n_2=1}^{N_{B2}} \alpha_{n_1} \alpha_{n_2} \tilde{y}_{n_1 n_2} \cos\left(\frac{\pi n_1}{N_2} \left(i - \frac{1}{2}\right)\right) \cos\left(\frac{\pi n_2}{N_2} \left(k - \frac{1}{2}\right)\right),$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{B1}, \quad k = 1, 2, \dots, N_{B2}.$$

Контейнер с внедренной информацией представляется в виде объединения модифицированных матриц $\tilde{\Phi}_m$, $m = 1, 2, \dots, N_B$,

$$\tilde{\Phi} = \bigcup_{m=1}^{N_B} \tilde{\Phi}_m.$$

Восстановление информации осуществляется в обратном порядке.

Основные положения метода субполосного внедрения

При реализации метода субполосного внедрения информации изображение-контейнер W_0 , размерности $N_1 \times N_2$, будем задавать с помощью матрицы яркости $W_0 = (w^0_{ik})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$. В работе [3] показано, что обработка изображения-контейнера и внедряемой информации, представленной в виде матрицы Y_0 , на основе субполосного анализа-синтеза выполняется в центрально-симметричных подобластях пространственных частот (ППЧ), образуемых при разбиении области пространственных частот (ПЧ) $D^2_{2\pi}$,

$$D^2_{2\pi} = \{(u, v) | -\pi \leq u, v < \pi\}, \quad (3)$$

на $R_1 R_2$ равновеликих ППЧ $\Omega_{r_1 r_2}$, $r_1 = 1, 2, \dots, R_1$, $r_2 = 1, 2, \dots, R_2$,



$$\Omega_{r_1 r_2} : \{(u, v) | (u \in [u_1^{r_1}, u_2^{r_1}], v \in [v_1^{r_2}, v_2^{r_2}]) \cup (u \in [-u_1^{r_1}, -u_2^{r_1}], v \in [-v_1^{r_2}, -v_2^{r_2}]) \cup (u \in [-u_2^{r_1}, -u_1^{r_1}], v \in [-v_2^{r_2}, -v_1^{r_2}]) \cup (u \in [u_2^{r_1}, u_1^{r_1}], v \in [v_2^{r_2}, v_1^{r_2}])\}, \quad (4)$$

$$u_1^{r_1} = (r_1 - 1) \frac{\pi}{R_1}, \quad u_2^{r_1} = r_1 \frac{\pi}{R_1}, \quad r_1 = 1, 2, \dots, R_1,$$

$$v_1^{r_2} = (r_2 - 1) \frac{\pi}{R_2}, \quad v_2^{r_2} = r_2 \frac{\pi}{R_2}, \quad r_2 = 1, 2, \dots, R_2.$$

Реализация субполосных преобразований [4] изображений в подобласти ПЧ $\Omega_{r_1 r_2}$, $r_1=1, 2, \dots, R_1$, $r_2=1, 2, \dots, R_2$, осуществляется с помощью субполосных матриц $A_{r_1}=(a_{r_1 i_1 i_2})$, $i_1, i_2=1, 2, \dots, N_1$, и $A_{r_2}=(a_{r_2 k_1 k_2})$, $k_1, k_2=1, 2, \dots, N_2$, соответствующих выбранной для внедрения ППЧ, элементы которых вычисляются на основании следующих выражений,

$$a_{i_1 i_2}^{r_1} = \begin{cases} \frac{\sin(\sigma_1 r_1 (i_1 - i_2)) - \sin(\sigma_1 (r_1 - 1)(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 - i_2 \neq 0, \\ \frac{\sigma_1}{\pi}, & i_1 - i_2 = 0, \end{cases} \quad a_{k_1 k_2}^{r_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\sigma_2 r_2 (k_1 - k_2)) - \sin(\sigma_2 (r_2 - 1)(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 - k_2 \neq 0, \\ \frac{\sigma_2}{\pi}, & k_1 - k_2 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma_1 = \frac{\pi}{R_1}, \quad \sigma_2 = \frac{\pi}{R_2}.$$

В [5] показано, что субполосные матрицы являются симметрическими, следовательно, они обладают системой ортогональных собственных векторов. Создадим матрицы $Q_1^{r_1}$ и $Q_1^{r_2}$, столбцы которых составлены из собственных векторов субполосных матриц A_{r_1} и A_{r_2} , соответствующих единичным собственным числам рассматриваемых матриц A_{r_1} и A_{r_2} . Матрицы $Q_1^{r_1}$ и $Q_1^{r_2}$ имеют размерности (N_1, J_1) и (N_2, J_2) соответственно, где J_1 и J_2 – количество единичных собственных чисел матриц A_{r_1} и A_{r_2} .

В работе [3] показано, что выражение

$$W_{r_1 r_2} = Q_1^{r_1} Y_0 (Q_1^{r_2})^T \quad (6)$$

определяет метод преобразования матрицы Y_0 , содержащей внедряемую информацию, при котором энергия ее образа $W_{r_1 r_2}$ сосредоточена в ППЧ $\Omega_{r_1 r_2}$. Очевидно, что изображение $W_{r_1 r_2}$ имеет размерность $N_1 \times N_2$, размерность внедряемого изображения Y_0 определяется количеством J_1 и J_2 единичных собственных чисел субполосных матриц, соответствующих ППЧ внедрения.

Соотношение

$$\tilde{W}_1 = W_0 - Y_{r_1 r_2} + K_{r_1 r_2} W_{r_1 r_2} \quad (7)$$

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 частотной подобласти ПЧ $\Omega_{r_1 r_2}$. Наряду с величиной $W_{r_1 r_2}$ (6) в выражении (7) использованы следующие величины:

- $Y_{r_1 r_2}$ – результат субполосной фильтрации [6] изображения W_0 в ППЧ $\Omega_{r_1 r_2}$,

$$Y_{r_1 r_2} = A_{r_1}^T \cdot W_0 \cdot A_{r_2}, \quad (8)$$

- $K_{r_1 r_2}$ – коэффициент изменения величины энергии внедряемого изображения в выбранную подобласть, используется для регулирования погрешности восстановления внедренного изображения,

$$K_{r_1 r_2} = K_{общ} \frac{E_{r_1 r_2}(W_0)}{E(W_{r_1 r_2})}, \quad (9)$$

- $K_{общ}$ – общий коэффициент внедрения (коэффициент, обеспечивающий равномерность изменения энергии внедряемого изображения в различных ППЧ),

- $E(W_{r_1 r_2})$ – энергия внедряемого изображения в выбранную подобласть ПЧ,

$$E(W_{r_1 r_2}) = tr(W_{r_1 r_2} (W_{r_1 r_2})^T),$$

- $E_{r_1 r_2}(W_0)$ – часть энергии контейнера в выбранной ППЧ [7],

$$E_{r_1 r_2}(W_0) = \text{tr}(A_{r_1}^T \cdot W_0 \cdot A_{r_2} \cdot W_0^T), \quad (10)$$

Чтобы получить результат \tilde{Y}_1 восстановления матрицы Y_0 , внедренной в подобласть ПЧ $\Omega_{r_1 r_2}$ изображения-контейнера \tilde{W}_1 , следует выполнить преобразование [3]

$$\tilde{Y}_1 = (Q_1^{r_1})^T \tilde{W}_1 Q_1^{r_2}. \quad (11)$$

Вычислительные эксперименты

Для исследования влияния внешних воздействий на погрешность восстановления информации при ее скрытном субполосном внедрении в изображения представляет интерес получение на основе вычислительных экспериментов сравнительной оценки устойчивости скрытного субполосного внедрения информации в отдельной подобласти пространственных частот изображения-контейнера к воздействию шума различной интенсивности в сравнении с методом относительной замены коэффициентов ДКП.

Целью вычислительных экспериментов является определение погрешностей представления контейнера-изображения с внедренной информацией и погрешностей восстановления внедренного изображения при различных условиях:

- внедрение при различных значениях порога P и коэффициента внедрения $K_{общ}$,
- восстановление при различных параметрах аддитивного шума (отношение шум-сигнал).

В ходе вычислительных экспериментов погрешность представления 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 σ ,

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} (w_{ik} - \tilde{w}_{ik})^2}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} w_{ik}^2}}. \quad (12)$$

При проведении вычислительных экспериментов в качестве изображения-контейнера выбрано изображение, размером 256x256 пикселей, приведенное на рисунке 1а, на котором представлен фрагмент земной поверхности с изображением горы Богда, Турфанская низменность (Китай). Внедряемая информация, заданная в виде матрицы 32x32 однобитовых элементов (значения 0 и 1) представлена в виде изображения на рисунке 1б.



Рис. 1. Исходное изображение-контейнер (а) и внедряемая информация в виде изображения (б)

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 различных значений порога P : {5, 25, 50}.

При субполосном внедрении (СВ) использовано разбиение области ПЧ $D_{2\pi}$ на 4x4 равновеликих частотных интервалов ($R_1=R_2=4$). В качестве подобласти ПЧ, используемой для внедрения, была выбрана неинформационная [3] подобласть ПЧ Ω_{13} (энергия, соответствующая данной ППЧ, не входит в 99% суммарной энергии изображения-контейнера).

Коэффициент $K_{общ}$ выбирался таким образом, чтобы погрешность изменения контейнера после внедрения информации на основе метода субполосного внедрения без наложения шума совпадала с погрешностью контейнера после внедрения информации на основе метода ОЗК также без аддитивного шума с заранее выбранным значением порога P .

Для выбранных значений порога P и соответствующих значений коэффициента $K_{общ}$ в таблице приведены величины погрешности представления 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.

Таблица 1

Погрешность представления контейнера $MSE_{конт}$ и восстановления информации $MSE_{восст}$

Отношение шум-сигнал δ	Метод ОЗК		Метод СВ	
	$MSE_{конт}$	$MSE_{восст}$	$MSE_{конт}$	$MSE_{восст}$
	$P=5$		$K_{общ}=0.0087$	
0	0.0314	0	0.0313	0
0,01	0.033	0	0.0329	0
0,03	0.0434	0.1936	0.0434	0
0,05	0.059	0.4721	0.0591	0
0,07	0.0766	0.6281	0.0767	0
0,09	0.0953	0.7202	0.0953	0.0511
0,11	0.1144	0.755	0.1144	0.1445
0,13	0.1338	0.7982	0.1338	0.2704
0,15	0.1533	0.8249	0.1532	0.3824
	$P=25$		$K_{общ}=0.0128$	
0	0.0415	0	0.0414	0
0,07	0.0813	0	0.0813	0
0,09	0.0993	0.0628	0.0991	0
0,11	0.1176	0.1662	0.1175	0
0,13	0.1365	0.2221	0.1365	0.0511
0,15	0.1557	0.3635	0.1555	0.1022
0,17	0.1751	0.3872	0.1749	0.2107
0,19	0.1945	0.47	0.1944	0.2227
	$P=50$		$K_{общ}=0.0197$	
0	0.0601	0	0.0595	0
0,19	0.1993	0.0888	0.199	0
0,2	0.2088	0.1332	0.2087	0.0511
0,21	0.2183	0.1473	0.2183	0.0885
0,22	0.228	0.1986	0.2281	0.0723
0,23	0.2377	0.2129	0.2375	0.1143
0,24	0.2475	0.235	0.2473	0.1022
0,25	0.2572	0.2265	0.2568	0.1533

Для повышения наглядности при сравнении результатов, полученных при использовании различных методов, на основании данных, представленных в таблице 1, построены приведенные на рис. 2 графики. Для наглядности графиков диапазоны значений вдоль вертикальной шкалы различных графиков (рис. 2) отличаются.

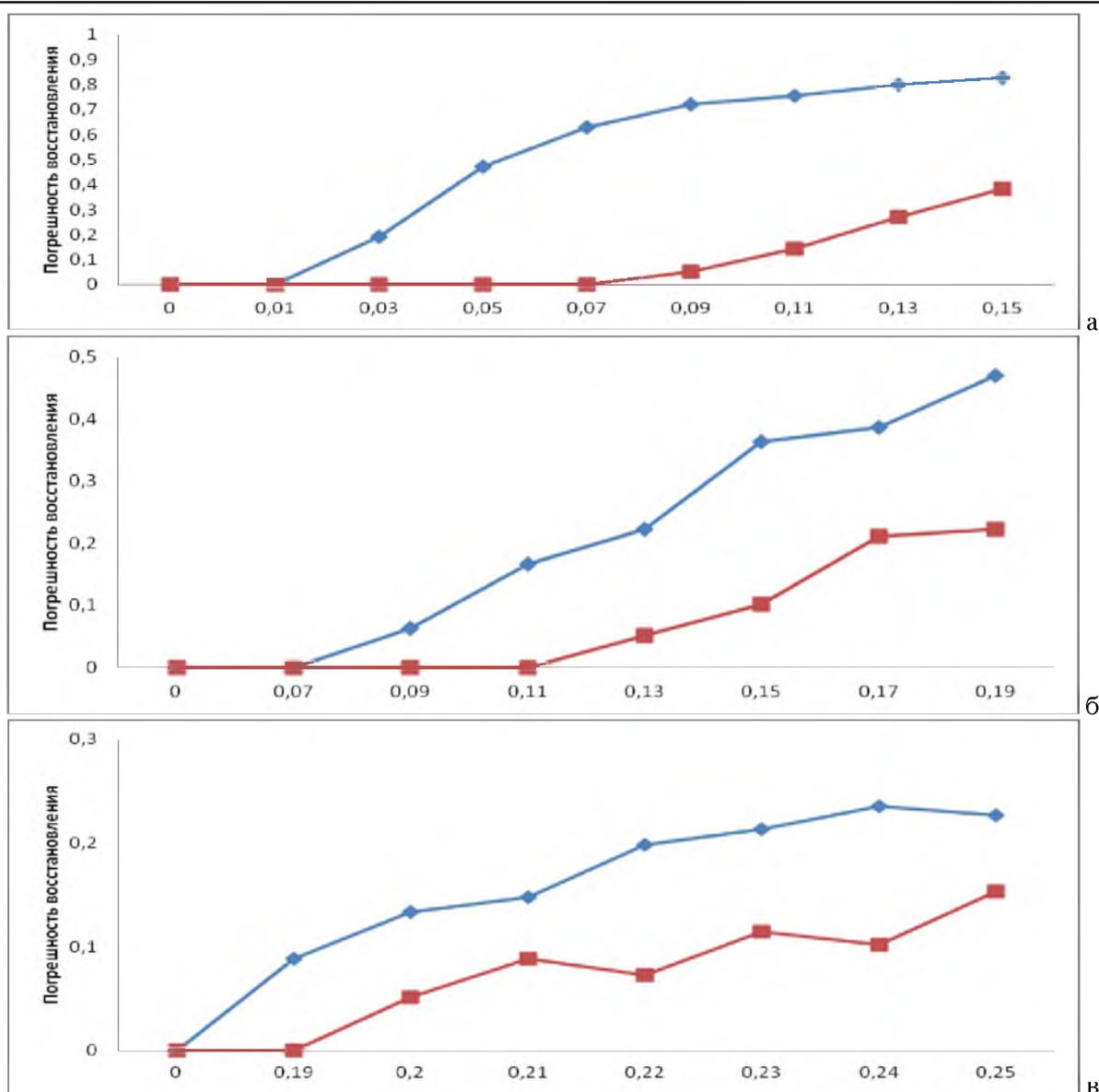


Рис. 2. Зависимость погрешности восстановления внедренной информации от параметров аддитивного шума (— метод ОЗК, — метод СВ):
а – $P=5$, $K_{общ}=0.0087$; б – $P=25$, $K_{общ}=0.0128$; в – $P=50$, $K_{общ}=0.0197$

Данные, представленные на рисунке 2, наглядно показывают, что при восстановлении информации, внедренной на основе метода субполосного внедрения, практически отсутствует погрешность постановления данных при большей величине отношения сигнал-шум применяемого аддитивного шума, чем при использовании метода ОЗК.

Данные, приведенные в таблице 1 и на рисунке 2, показывают, что погрешность восстановления информации, внедренной на основе метода субполосного внедрения, значительно меньше соответствующей погрешности восстановления информации, внедренной на основе метода ОЗК, при различных отношениях шум-сигнал и близких соответствующих значениях погрешности представления изображения-контейнера.

Выводы

Таким образом, результаты проведенных вычислительных экспериментов продемонстрировали преимущество метода субполосного внедрения в сравнении с методом относительной замены коэффициентов ДКП при восстановлении внедренной информации и показали высокую устойчивость внедренной в изображения информации



при ее скрытном субполосном внедрении к влиянию внешних воздействий в виде аддитивного шума.

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. Конахович Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г.Ф. Конахович, А.Ю. Пузыренко. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 288 с.
3. 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.
4. Черноморец А.А. О свойствах собственных векторов субполосных матриц / А.А. Черноморец, Е.И. Прохоренко, В.А. Голощапова // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2009. – № 7 (62). – Вып. 10/1. – С. 122-128.
5. Жилияков, Е.Г. Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец. – Белгород: Изд-во ООО ГИК, 2009. – 146 с.
6. Жилияков, Е.Г. Оптимальная фильтрация изображений на основе частотных представлений [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып. 1. – С. 118-131.
7. Жилияков, Е.Г. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, И.В. Лысенко // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. – 2007. – Вып. 4. – С. 115-123.

INVESTIGATION OF THE STEGANOGRAPHY STABILITY IN IMAGES

E.G. ZHILYAKOV
A.A. CHERNOMORETS
E.V. BOLGOVA
N.N. GANOVA

*Belgorod National Research
 University*

*e-mail:
 zhilyakov@bsu.edu.ru*

A comparative analysis of influence of external factors in the form of "white" additive noise of different intensity on the information recovery error embedded in images on the basis of the secretive subband embedding method and the method of relative replacement of DCT coefficients is given in this work.

Keywords: steganography, image embedding, subband embedding, information recovery error