УДК 621.397

СУБПОЛОСНЫЙ МЕТОД СКРЫТНОГО ВНЕДРЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИЗОБРАЖЕНИЯ

Е.Г. ЖИЛЯКОВ
А.А. ЧЕРНОМОРЕЦ

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

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

В данной работе предлагается встраивать скрываемую информацию в компоненты изображения-контейнера с заданными свойствами, соответствующими отдельным собственным векторам субполосных матриц различных частотных интервалов.

Ключевые слова: стеганография, внедрение изображений, частотный интервал, собственный вектор субполосной матрицы

Введение.

Одним из важных направлений развития современных систем обработки цифровой информации является разработка методов защиты информации, в том числе, конфиденциальной, от несанкционированного доступа. В отдельных специальных случаях существует проблема скрытия факта использования криптографических средств защиты, которая может быть решена на основе методов стеганографии [1]. В стеганографии обычно рассматривается постановка задачи в виде «проблемы заключенных» [2]: двое заключенных, желают конфиденциально обмениваться сообщениями, при условии, что их контролирует охранник. Задача заключенных состоит в разработке устойчивых методов скрытия информации, задача охранника – обнаружение скрытых сообщений, их разрушение и модификация. Во многих случаях скрытие информации производится на основе стеганографических методов встраивания (внедрения) информации в общедоступные изображения за счет наличия в изображениях некоторой психовизуальной избыточности. Данные методы широко используются при внедрении полезной информации с целью ее скрытой передачи, при внедрении цифровых водяных знаков, идентификационных номеров, заголовков и др. Многие методы внедрения информации в изображения не обладают устойчивостью [2] к различного рода воздействиям на изображение-контейнер.

Для повышения устойчивости внедренной информации к внешним воздействиям в данной работе предлагается встраивать скрываемую информацию в компоненты изображения-контейнера с заданными свойствами, соответствующие отдельным собственным векторам субполосных матриц различных частотных интервалов. Поскольку в работе полезная информация внедряется в контейнеры-изображения, то внедряемую информацию целесообразно также представить в виде некоторого изображения. Разработанные методы позволяют более детально учитывать частотные свойства изображения-контейнера, величины, влияющие на формирование значений долей энергии контейнера в заданном частотном субинтервале, что обеспечивает снижение погрешности представления контейнера, содержащего внедренную информацию.

Предлагаемые в данной работе методы стеганографического внедрения изображений базируются на положениях теории обработки изображений на основе субполосного анализа-синтеза [3].

1. Теоретические основы формирования частотных компонент изображений с заданными частотными свойствами.

Для описания предлагаемых методов предварительно приведем теоретические основы фильтрации изображений на основе субполосного анализа-синтеза [4].

Изображение описывается матрицей $\Phi=(f_{ik})$, $i=1,2,\ldots,N_1$, $k=1,2,\ldots,N_2$, значения элементов которой совпадают со значениями яркостей соответствующих пикселей рассматриваемого изображения.

Область D определения трансформант Фурье изображения Φ,

$$D=\{(u,v)\,|\,-\pi\le u\le\pi,\ -\pi\le v\le\pi\},$$

представляется в виде объединения частотных интервалов Ω следующего вида:

$$\begin{aligned}\Omega:\{(u,v)\,|\,&(u\in[\alpha_1,\alpha_2],v\in[\beta_1,\beta_2])\cup(u\in[\alpha_1,\alpha_2],v\in[-\beta_2,-\beta_1])\cup\\ &\cup(u\in[-\alpha_2,-\alpha_1],v\in[-\beta_2,-\beta_1])\cup(u\in[-\alpha_2,-\alpha_1],v\in[\beta_1,\beta_2])\},\end{aligned}\qquad(1)$$

$$\text{где } 0\le\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2\le\pi.$$

В работе [4] показано, что для получения частотной компоненты Φ_Ω – результата фильтрации изображения Φ в частотном интервале Ω, оптимального в смысле евклидовой нормы отклонения трансформанты Фурье результата фильтрации Φ_Ω в заданном интервале Ω от трансформанты Фурье исходного изображения Φ и от нуля – вне данного интервала, следует выполнить следующее преобразование матриц,

$$\Phi_\Omega = A^T \Phi B\,, \tag{2}$$

где символ «T» обозначает операцию транспонирования матрицы, матрицы $A=(a_{i_1i_2})$ и $B=(b_{k_1k_2})$ – субполосные матрицы [5], размерности $N_1 x N_1$. и $N_2 x N_2$, соответствующие частотному интервалу Ω, значения элементов которых определяются на основании следующих выражений:

$$a_{i_1i_2} = \begin{cases} \dfrac{Sin(\alpha_2(i_1-i_2)) - Sin(\alpha_1(i_1-i_2))}{\pi(i_1-i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \dfrac{\alpha_2-\alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases} \qquad b_{k_1k_2} = \begin{cases} \dfrac{Sin(\beta_2(k_1-k_2)) - Sin(\beta_1(k_1-k_2))}{\pi(k_1-k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \dfrac{\beta_2-\beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases} \tag{3}$$

В работе [6] было показано, что для внедрения некоторого изображения $Y=(y_{mn})$, $m=1,2,\ldots,J_A$, $n=1,2,\ldots,J_B$, в частотную компоненту $W_{\Omega_{AB}}=(w_{jl}^{\Omega})$, $j=1,2,\ldots,N_1$, $l=1,2,\ldots,N_2$, изображения-контейнера W_0, соответствующую заданному частотному интервалу Ω_{AB}, первоначально следует выполнить следующее преобразование

$$W_Y = Q_{J_A} Y Q_{J_A}^T\,, \tag{4}$$

где столбцы матриц Q_{J_A} и Q_{J_B} являются собственными векторами $\vec{q}_i^{\,A}$, $i=1,2,\ldots,J_A$, и $\vec{q}_k^{\,B}$, $k=1,2,\ldots,J_B$, соответствующими J_A и J_B единичным собственным числам некоторых субполосных матриц A и B, элементы которых определяются для указанного интервала Ω_{AB} на основании выражения (3). Затем, результат внедрения W получают в следующем виде

$$W = W_0 - W_{\Omega_{AB}} + k_0 W_Y\,,$$

где $W_{\Omega_{AB}}$ – результат фильтрации (2) изображения W_0 в частотном интервале Ω_{AB},

$$W_{\Omega_{AB}} = A^T W_0 B\,, \tag{5}$$

k_0 – некоторый коэффициент, согласующий доли энергии частотных компонент $W_{\Omega_{AB}}$ и W_Y.

Для восстановления изображения Y, внедренного в частотную компоненту $W_{\Omega_{AB}}$ контейнера W, соответствующую частотному интервалу Ω_{AB}, следует выполнить следующее преобразование [7],

$$Y = Q_{J_A}^T W Q_{J_A}\,. \tag{6}$$

2. Методы синтеза частотных компонент изображений на основе отдельных собственных векторов субполосных матриц.

На основании соотношения (4) можно записать выражение, определяющее результат внедрения (некоторую компоненту изображения)) в контейнер отдельного числа с помощью пары собственных векторов $\vec{q}_i^{\,A}$ и $\vec{q}_k^{\,B}$ субполосных матриц A и B, соответствующих заданному частотному интервалу Ω_{AB}. Матрицы Q_{J_A} и Q_{J_B} собственных векторов, соответствующими J_A и J_B единичным собственным числам субполосных матриц A и B, можно записать в следующем виде,

$$Q_{J_A} = (\vec{q}_1^{\,A} \vec{q}_2^{\,A} \ldots \vec{q}_{J_A}^{\,A})\,, \tag{7}$$

$$Q_{J_B} = (\vec{q}_1^{\,B} \vec{q}_2^{\,B} \ldots \vec{q}_{J_B}^{\,B})\,, \tag{8}$$

где J_A, J_B – количество единичных собственных чисел матриц A и B.

Используя представления (7), (8), выражение (4) будет иметь следующий вид (при условии $Y=(y_{ik})$, $i=1,2,\ldots,J_A$, $k=1,2,\ldots,J_B$),

$$W_Y = (\vec{q}_1^A \vec{q}_2^A \ldots \vec{q}_{J_A}^A)\begin{pmatrix} y_{11}y_{12}\ldots y_{1J_B} \\ y_{21}y_{22}\ldots y_{2J_B} \\ \ldots \\ y_{J_A1}y_{J_A2}\ldots y_{J_AJ_B}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}(\vec{q}_1^B)^T \\ (\vec{q}_2^B)^T \\ \ldots \\ (\vec{q}_{J_B}^B)^T\end{pmatrix} = (\bar{s}_1 \bar{s}_2 \ldots \bar{s}_{J_2})\begin{pmatrix}(\vec{q}_1^B)^T \\ (\vec{q}_2^B)^T \\ \ldots \\ (\vec{q}_{J_B}^B)^T\end{pmatrix},$$

где

$$\vec{S}_k = \sum_{i=1}^{J_1} \vec{q}_i^A y_{ik}.$$

Тогда,

$$W_Y = \sum_{k=1}^{J_B}\sum_{i=1}^{J_A} y_{ik}\vec{q}_i^A (\vec{q}_k^B)^T.$$

Следовательно, изображение W_Y можно представить в виде суммы некоторых компонент (изображений) X_{ik}, $i = 1,2,\ldots,J_A$, $k = 1,2,\ldots,J_B$, с множителями, значения которых равны элементам внедряемого изображения (матрицы) *Y*,

$$W_Y = \sum_{k=1}^{J_B}\sum_{i=1}^{J_A} y_{ik} X_{ik}, \tag{9}$$

$$X_{ik} = \vec{q}_i^A (\vec{q}_k^B)^T, \tag{10}$$

Компоненты X_{ik}, $i = 1,2,\ldots,J_A$, $k = 1,2,\ldots,J_B$, будем называть базисными изображениями при разложении изображения *Y*, размерности $J_1 \times J_2$ пикселей по собственным векторам $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$ в частотном интервале Ω_{AB}.

Соотношения (9), (10) определяют метод внедрения некоторого изображения $Z = (z_{ik})$, $1 \le i \le J_A$, $1 \le k \le J_B$, на основании различных подмножеств собственных векторов, содержащихся в матрицах Q_{J_A} и Q_{J_B}.

Как частный случай, укажем, что для внедрения отдельного числа z_1 в некоторую компоненту изображения-контейнера на основании собственных векторов $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$ субполосных матриц *A* и *B*, соответствующих заданному частотному интервалу Ω_{AB}, может быть использовано следующее соотношение,

$$W_{z_1} = z_1 \vec{q}_i^A \cdot \vec{q}_k^{B^T}. \tag{11}$$

Соотношение (11) определяет метод внедрения в некоторую компоненту изображения-контейнера отдельного числа на основании выбранных собственных векторов субполосных матриц, соответствующих заданному частотному интервалу.

Получим далее соотношение, определяющее восстановление информации, внедренной (11) в частотный интервал Ω_{AB} на основании отдельной пары собственных векторов.

На основании соотношений (6), (7) и (8) получим, что восстановление внедренного изображения $Y = (y_{ik})$, $1 \le i \le J_A$, $1 \le k \le J_B$ из контейнера $W = (w_{lm})$, $l = 1,2,\ldots N_1$, $m = 1,2,\ldots N_2$, с помощью матриц собственных векторов Q_{J_A} и Q_{J_B} может быть выполнено на основании следующего выражения,

$$Y = \begin{pmatrix}(\vec{q}_1^A)^T \\ (\vec{q}_2^A)^T \\ \ldots \\ (\vec{q}_{J_A}^A)^T\end{pmatrix}\begin{pmatrix} w_{11}w_{12}\ldots w_{1N_2} \\ w_{21}w_{22}\ldots w_{2N_2} \\ \ldots \\ w_{N_11}w_{N_12}\ldots w_{N_1N_2}\end{pmatrix}(\vec{q}_1^B \vec{q}_2^B \ldots \vec{q}_{J_B}^B).$$

Тогда, элементы изображения $Y = (y_{ik}), i = 1,2,...,J_A$, $k = 1,2,...,J_B$ можно вычислить на основании следующего выражения

$$y_{ik} = (\vec{q}_i^A)^T W \vec{q}_k^B . \quad (12)$$

Соотношение (12) определяет метод восстановления (извлечения) некоторого числа из изображения-контейнера на основании выбранных собственных векторов субполосных матриц, соответствующих заданному частотному интервалу.

Процесс внедрения информации в изображение на основании выражения (11) неразрывно связан с удалением из контейнера в частотном интервале внедрения Ω_{AB} соответствующих ему данных контейнера, что возможно осуществить с помощью фильтрации по паре указанных собственных векторов $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$ в выбранном частотном интервале. Сформулируем метод получения данных результатов фильтрации.

Обозначим, W_0 – исходное изображение-контейнер.

Результат W_Ω фильтрации (2) изображения-контейнера W_0 в частотном интервале Ω_{AB} на основе субполосных преобразований определяется выражением,

$$W_\Omega = AW_0B ,$$

или, используя представление субполосных матриц *A* и *B* с помощью матриц L_A, L_B, содержащих все их собственные числа, и матриц Q_A, Q_B, содержащих все их собственные векторы, имеем

$$W_\Omega = Q_A L_A Q_A{}^T W_0 Q_B L_B Q_B{}^T . \quad (13)$$

Следовательно, для нахождения результата фильтрации по паре указанных собственных векторов $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$ в выбранном частотном интервале, необходимо вычислить компоненту $W_{q_i q_k}$ изображения W_Ω, соответствующую указанным векторам. Поскольку, в предложенных методах внедрения/восстановления применяются собственные векторы, соответствующие единичным собственным числам, то искомый результат фильтрации может быть задан следующим соотношением,

$$W_{q_i q_k} = \vec{q}_i^A (\vec{q}_i^A)^T W_0 \vec{q}_k^B (\vec{q}_k^B)^T . \quad (14)$$

Далее обратим внимание, что применив метод восстановления (12) на основании собственных векторов $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$ к исходному изображению-контейнеру, получим некоторое число z_0,

$$z_0 = \vec{q}_i^{A^T} W_0 \vec{q}_k^B , \quad (15)$$

результат внедрения которого в выбранный частотный интервал Ω_{AB} на основании собственных векторов $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$, совпадает с результатом фильтрации (14) контейнера W_0 по указанной паре векторов, то есть справедливы следующие соотношения,

$$W_{z_0} = z_o \vec{q}_i^A (\vec{q}_k^B)^T = \vec{q}_i^A \cdot z_o \cdot (\vec{q}_k^B)^T = \vec{q}_i^A (\vec{q}_i^A)^T W_0 \vec{q}_k^B (\vec{q}_k^B)^T = W_{q_i q_k} . \quad (16)$$

Таким образом, фильтрацию изображения на основании собственных векторов можно осуществлять на основании различных соотношений (16), (15).

3. Алгоритмы внедрения и восстановления изображений на основе собственных векторов субполосных матриц.

Разработанные методы внедрения и восстановления отдельного числа из изображения-контейнера на основании собственных векторов субполосных матриц позволяет сформулировать соответствующие алгоритмы внедрения и восстановления числа из изображения.

Рассмотрим алгоритм внедрения числа в изображение-контейнер на основании выбранных собственных векторов субполосных матриц, соответствующих заданному частотному интервалу.

Алгоритм внедрения отдельного числа:

1) ввести z_1 – внедряемое число;

2) ввести W_0 – изображение-контейнер, размерности $N_1 \times N_2$ пикселей;

3) выбрать $\vec{q}_i^A$, $\vec{q}_k^B$ – собственные векторы, соответствующие единичным собственным числам субполосных матриц *A* и *B* заданного частотного интервала Ω_{AB};

4) определить в контейнере W_0 число z_0, соответствующее векторам $\vec{q}_i^A$ и $\vec{q}_k^B$, на основании выражения (12):

$$z_0 = (\vec{q}_i^{A})^T W_0 \vec{q}_k^{B};$$

5) определить частотную компоненту W_{z_0} – результат фильтрации (16) контейнера W_0 по собственным векторам $\vec{q}_i^{A}$ и $\vec{q}_k^{B}$,

$$W_{z_0} = z_o \vec{q}_i^{A} (\vec{q}_k^{B})^T;$$

6) удалить информацию контейнера W_0, соответствующую собственным векторам $\vec{q}_i^{A}$ и $\vec{q}_k^{B}$, т.е. удалить частотную компоненту W_{z_0} из контейнера W_0,

$$\widetilde{W}_0 = W_0 - W_{z_0};$$

7) получить изображение W, содержащее внедренную (11) информацию о числе z_1,

$$W_{z_1} = \widetilde{W}_0 + k_0 z_1 \vec{q}_i^{A} (\vec{q}_k^{B})^T,$$

где k_0 – некоторый постоянный множитель, позволяющий согласовать величину долей энергии контейнера и значение внедряемого числа.

8) конец.

Указанный алгоритм может быть использован для внедрения в контейнер некоторого множества чисел $M_z = \{z_m\}$, $m = 1,2,\ldots,N_z$, на основании различных пар собственных векторов субполосных матриц различных частотных интервалов.

Рассмотрим алгоритм восстановления (извлечения из контейнера) значения некоторого числа, внедренного ранее в контейнер на основании собственных векторов субполосных матриц.

Алгоритм восстановления отдельного числа:

1) ввести W – изображение, содержащее внедренное число;
2) ввести $\vec{q}_i^{A}$, $\vec{q}_k^{B}$ – собственные векторы заданных субполосных матриц *A* и *B;*
3) вычислить (12) значение внедренного числа z_1,

$$z_1 = \frac{1}{k_0} (\vec{q}_i^{A})^T W \vec{q}_k^{B}.$$

4) конец.

Указанный алгоритм может быть использован для восстановления значений некоторого множества чисел, внедренных в контейнер на основании известного множества пар собственных векторов субполосных матриц различных частотных интервалов.

4. Проверка работоспособности методов.

Работоспособность разработанных методов внедрения и восстановления информации была проверена на основании многочисленных вычислительных экспериментов. Обсуждение процедуры выбора пар собственных векторов, реализующих указанные методы выходит за рамки данной работы. Проиллюстрируем работоспособность предлагаемых методов на примере отдельного вычислительного эксперимента.

В рассматриваемом вычислительном эксперименте были использованы изображение-контейнер и внедряемое изображение (рисунок), размерности 512×512 и 64×64 пикселей соответственно.


а


б

Рис. Изображение-контейнер (а) и внедряемое изображение (б)

В процессе эксперимента в контейнер (рис. 1а) было внедрено изображение (рис. 1б). Далее был наложен аддитивный «белый» шум, с различным значением отношения шум/сигнал δ. Затем выполнено восстановление изображения.

Результаты проведения вычислительного эксперимента при различных значениях отношения δ, представлены в таблице, где δ – отношение шум/сигнал, σ_Y – среднеквадратическое отклонение внедряемого изображения относительно восстановленного из контейнера, σ_W – среднеквадратическое отклонение исходного изображения-контейнера относительно контейнера с внедренным изображением и указанным аддитивным шумом.

Таблица 1

Погрешность восстановления при различных уровнях шум/сигнал

№	δ	σ_Y	σ_W
1	0	1.3e-5	0.0363
2	0,001	0.003	0.0364
3	0.002	0.006	0.0366
4	0.003	0.01	0.0366
5	0.004	0.013	0.0367
6	0.005	0.017	0.0367
7	0.006	0.021	0.0368
8	0.007	0.024	0.0374
9	0.008	0.027	0.0378
10	0.009	0.031	0.0381
11	0.01	0.034	0.0384
12	0.02	0.066	0.0412
13	0.03	0101	0.0477
14	0.04	0.134	0.0543
15	0.05	0.171	0.0621

Заключение.

Таким образом, рассмотренные методы и алгоритмы внедрения (восстановления) информации в изображение-контейнер на основании различных пар собственных векторов субполосных матриц, соответствующих некоторым частотным интервалам, являются новым эффективным инструментом внедрения информации в изображение-контейнер, имеющим устойчивость к внешним воздействиям на контейнер, например, в виде аддитивного «белого» шума.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-00257-а.

Список литературы

1. Конахович, Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г.Ф. Конахович, А.Ю. Пузыренко. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 288 с.
2. Грибунин, В. Г. Цифровая Стеганография / В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, И. В. Туринцев. – М.: Солон-Пресс, 2002. – 272 с.
3. Жиляков, Е.Г. Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений / Е.Г. Жиляков, А.А. Черноморец. – Белгород: Изд-во ООО ГиК, 2009. – 146 с.
4. Жиляков, Е.Г. Оптимальная фильтрация изображений на основе частотных представлений / Е.Г. Жиляков, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып. 1. – С. 118-131.
5. Жиляков, Е.Г. Методы анализа и построения функций по эмпирическим данным на основе частотных представлений / Е.Г. Жиляков – Белгород, Изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.
6. Черноморец, А.А. О формировании квазициклических компонент изображений с заданными частотными свойствами / А.А. Черноморец, В.В. Красильников // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2010. – № 13 (84). – Вып. 15/1. – С. 168-174.
7. Черноморец, А.А. Реализация алгоритма внедрения изображений на основе использования неинформационных частотных интервалов изображения-контейнера / Жиляков Е.Г., А.А. Черноморец, В.А. Голощапова // Вопросы радиоэлектроники, Сер. ЭВТ. - 2011. - Вып. 1. - С. 96-104.

SUBBAND METHOD OF INFORMATION SECRETIVE EMREDDING INTO IMAGES

E.G. ZHILYAKOV
A.A. CHERNOMORETS

Belgorod National Research University
e-mail:
zhilyakov@bsu.edu.ru
chernomorets@bsu.edu.ru

This work proposes the embedding of hidden information into the container image with predefined properties that correspond to the eigen vectors of sub-band matrices of different frequency intervals.

Keywords: steganography, image embedding, frequency interval, eigen vector of sub-band matrix