

*Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры для инновационной России» на 2009-2013 годы, гос. контракт № 14.740.11.0390*

### Литература

1. Жилияков Е.Г. Вариационные методы анализа и построения функций по эмпирическим данным на основе частотных представлений. Белгород, БелГУ, 2007. 160 с.
2. Жилияков Е.Г. и Заливин А.Н. Повышение четкости контуров и фильтрация космоснимков земной поверхности. - «Вопросы радиоэлектроники», сер. ЭВТ, 2010, вып. 1, с. 66-72.
3. Рис У. Основы дистанционного зондирования. М., Техносфера, 2006. 346 с.
4. Чандра А.М. и Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М., Техносфера, 2008. 312 с.
5. Гонсалес Р. и Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М., Техносфера, 2006. 1072 с.
6. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В.А. Сойфера. М., Физматлит, 2003. 784 с.
7. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. Учеб. пособ М., Аспект Пресс, 2004. 184 с.

*Статья поступила 12 10 2010*

**Д.т.н., проф. Е.Г. Жилияков, к.т.н., доц. А.А. Черноморец,  
В.А. Голощапова (Белгородский ГУ)**

**E.G. Zhilyakov, A.A.Chernomorets , V.A Goloscyarova**

**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВНЕДРЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕИНФОРМАЦИОННЫХ  
ЧАСТОТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ-КОНТЕЙНЕРА**

**COMPUTER IMPLEMENTATION OF THE IMAGE EMBEDDING  
ALGORITHM BASED ON NON-INFORMATIVE FREQUENCY  
INTERVALS OF CONTAINER IMAGE**

*Описан алгоритм, позволяющий внедрять в одно изображение-контейнер несколько различных изображений и восстанавливать их с низкой погрешностью. Алгоритм основан*

на использовании частотных свойств изображения-контейнера. Приведены результаты вычислительных экспериментов, демонстрирующие работоспособность алгоритма

Keyword: image embedding, frequency intervals, image reconstruction, reconstruction error

При разработке систем защиты информации от копирования на основе использования цифровых водяных знаков широко применяются различные алгоритмы внедрения изображений в изображение-контейнер. Большинство известных методов создания цифровых водяных знаков не обладают одновременно надежностью и незаметностью [1]. В статье изложен алгоритм, который позволяет на основе использования частотных характеристик изображения-контейнера обеспечивать его несущественное искажение при внедрении различных изображений, а также гарантировать высокое качество их восстановления.

Для описания предлагаемого подхода введем некоторые понятия. Изображение-контейнер  $\Phi$ , размерности  $N_1 \times N_2$ , будем задавать с помощью матрицы яркости  $\Phi = (f_{km})$ ,  $k=1,2,\dots,N_1$ ,  $m=1,2,\dots,N_2$ . В [2] показано, что обработку изображений на основе частотных представлений следует выполнять в симметричной двумерной частотной области  $\Omega$  (субинтервале),

$$\Omega: \{(u, v) | (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [\beta_1, \beta_2]) \cup (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [\beta_1, \beta_2])\},$$

где

$$0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \leq \pi,$$

используя субполосные матрицы  $A = (a_{i_1 i_2})$  и  $B = (b_{k_1 k_2})$  [3], размерности  $N_1 \times N_1$  и  $N_2 \times N_2$ , значения элементов которых определяются на основании следующих выражений,

$$a_{i_1 i_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2(i_1 - i_2)) - \sin(\alpha_1(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases}$$

$$b_{k_1 k_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\beta_2(k_1 - k_2)) - \sin(\beta_1(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \frac{\beta_2 - \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases}$$

Известно [2], что если субинтервалы образуются при разбиении частотной области на  $R_a \times R_b$  равновеликих частотных интервалов

$$\Omega_{ij}, i=1,2,\dots, R_a, j=1,2,\dots, R_b,$$

то субполосные матрицы  $A$  и  $B$ , соответствующие некоторому субинтервалу  $\Omega$  из данного разбиения частотной области, имеют соответственно  $J_{1A}$  и  $J_{1B}$  единичных собственных чисел,

$$J_{1A} \approx 2 \left\lceil \frac{N_1}{2R_a} \right\rceil + 2, \quad J_{1B} \approx 2 \left\lceil \frac{N_2}{2R_b} \right\rceil + 2.$$

Рассмотрим матрицы  $Q_{1A}$  и  $Q_{1B}$ , столбцы которых составлены из собственных векторов субполосных матриц  $A$  и  $B$ , соответствующих единичным собственным числам данных матриц  $A$  и  $B$ . Можно показать, что выражение

$$W_\Omega = Q_{1A} Y_\Omega Q_{1B}^T$$

определяет метод преобразования изображения  $Y_1$ , при котором энергия его образа (изображения)  $W_\Omega$  сосредоточена только в одном частотном субинтервале  $\Omega$ . Очевидно, что изображение  $W_\Omega$  имеет размерность  $N_1 \times N_2$ . Следовательно, следующая операция

$$W_1 = \Phi - Y_\Omega + W_\Omega \tag{1}$$

позволяет получить такой результат внедрения (изображение  $W_1$ ) изображения  $Y_1$  в контейнер  $\Phi$ , при котором энергия внедряемого изображения сосредоточена в заданном частотном субинтервале  $\Omega$ , при этом в выражении (1)  $Y_\Omega$  - результат оптимальной [4] фильтрации изображения  $\Phi$  в частотной области  $\Omega$ ,

$$Y_\Omega = A^T \cdot \Phi \cdot B.$$

Можно показать, что для восстановления изображения  $Y_1$  из изображения  $W_1$  следует выполнить преобразование

$$Y_1 = Q_{1A}^T W_1 Q_{1B}. \tag{2}$$

Данные операции справедливы также для некоторого множества одновременно внедряемых изображений. Так, пусть  $\{Y_{r1r2}\}$ ,  $r_1=1,2,\dots,R_1$ ,  $r_2=1,2,\dots,R_2$ , - множество некоторых изображений размерностью  $(J_{1A}, J_{1B})$  где

$$R_1 < R_a \quad \text{и} \quad R_2 < R_b.$$

Тогда следующее выражение

$$W = \Phi + \sum_{i=1}^{R_1} \sum_{k=1}^{R_2} (Q_{1A_i} Y_{ik} Q_{1B_k}^T - A_i^T \Phi B_k) \tag{3}$$

определяет операцию внедрения указанного множества изображений в контейнер  $\Phi$ , где матрицы  $Q_{1A_i}$  и  $Q_{1B_k}$  сформированы на основании субполосных матриц, соответствующих субинтервалу  $\Omega_{ik}$ .

Для восстановления некоторого исходного изображения  $Y_{r_1 r_2}$ ,  $r_1=1,2,\dots,R_1$ ,  $r_2=1,2,\dots,R_2$ , на основании выражения (2), следует выполнить следующую операцию

$$Y_{r_1 r_2} = Q_{1A_{r_1}}^T W Q_{1B_{r_2}} \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют сформулировать алгоритм внедрения изображений на основе использования неинформационных частотных интервалов контейнера, который можно представить в виде следующей последовательности шагов.

1. Разбить частотную область на  $R_a \times R_b$  равновеликих частотных интервалов  $\Omega_{ij}$ ,  $i=1,2,\dots,R_a$ ,  $j=1,2,\dots,R_b$  (рис.1).

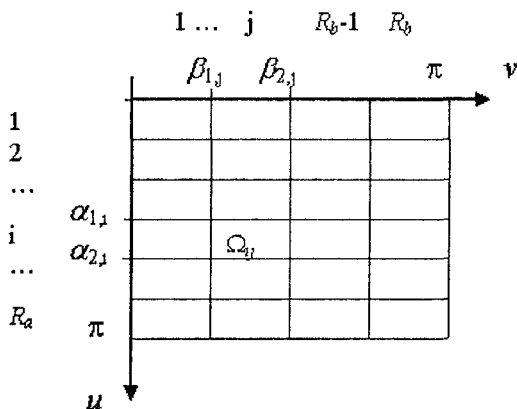


Рис. 1

Пример разбиения частотной области

2. Вычислить субполосные матрицы для всех частотных интервалов. Для каждого частотного интервала определить количество  $J_{1A}$  и  $J_{1B}$  единичных собственных чисел субполосных матриц, построить матрицы  $Q_{1A}$  и  $Q_{1B}$ , столбцы которых составлены из собственных векторов субполосных матриц  $A$  и  $B$ , соответствующих единичным собственным числам данных матриц.

3. Вычислить точные значения долей энергии  $P_{ij}$ ,  $i=1,2,\dots,R_a$ ,  $j=1,2,\dots,R_b$ , контейнера  $W_0$  в частотных интервалах  $\Omega_{ij}$ ,  $i=1,2,\dots,R_a$ ,  $j=1,2,\dots,R_b$ ,

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1R_b} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2R_b} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{R_a1} & P_{R_a2} & \dots & P_{R_aR_b} \end{pmatrix},$$

где точное значение  $P_{ij}$  доли энергии изображения  $W_0$  в области  $\Omega_{ij}$ , может быть вычислено без перехода в частотную область на основании выражения

$$P_{ij} = \frac{E_{ij}(W_0)}{E(W_0)},$$

где  $E_{ij}(W_0)$  – часть энергии изображения  $W_0$ , соответствующее частотному  $\Omega_{ij}$  [2],

$$E_{ij}(W_0) = \text{tr}(A_{ij}^T \cdot W_0 \cdot B_{ij} \cdot W_0^T),$$

$E(W_0)$  – энергия изображения  $W_0$ ,

$$E(W_0) = \|W_0\|^2 = \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{m=1}^{N_2} f_{km}^2,$$

$A_{ij}$  и  $B_{ij}$  – субполосные матрицы, соответствующие частотному интервалу  $\Omega_{ij}$ .

4. Вычислить матрицу-маску на основании соотношения

$$P_{Mask}(i, j) = \begin{cases} 1, & P_{ij} \geq T_1, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где:

$$T_1 = T_0 \cdot k_0,$$

$T_0$  – пороговое значение доли, используемой в преобразовании суммарной энергии контейнера, может принимать значения, например,  $\{1, 0.99, 0.98, 0.97, \dots\}$ ,

$k_0$  – коэффициент, определяемый на основе отношения суммы долей энергий в каждом частотном интервале  $\Omega_{ij}$ ,  $i=1,2,\dots, R_a$ ,  $j=1,2,\dots, R_b$  упорядоченных по убыванию значений, к пороговому значению доли суммарной энергии контейнера.

Далее частотный интервал  $\Omega_{ij}$  будем называть неинформационным для контейнера  $W_0$ , если

$$P_{Mask}(i, j) = 0.$$

5. Внедрить некоторое изображение  $Y_0$ , размерностью  $(J_{1A}, J_{1B})$ , в контейнер  $W_0$ , используя неинформационный частотный ин-

тервал  $\Omega_y$

$$W = W_0 - A_y^T W_0 B_y + K_y Q_{1A_y} Y_0 Q_{1B_y}^T,$$

где  $K_y$  – коэффициент усиления энергии внедряемого изображения в выбранный частотный интервал (используется для задания погрешности восстановления внедренного изображения),

$$K_y = K_0 \frac{P_y(W_0)}{P(Q_{1A_{\Omega_y}} Y_0 Q_{1B_{\Omega_y}}^T)},$$

$K_0$  – общий коэффициент внедрения (коэффициент, обеспечивающий равномерность усиления энергии внедряемых изображений).

Шаг 5 выполнить для всего множества внедряемых изображений, используя оставшиеся неинформационные частотные интервалы контейнера.

Для проверки работоспособности предложенного метода была разработана его программная реализация и проведен ряд вычислительных экспериментов по оценке погрешности восстановления нескольких одновременно внедренных изображений в неинформационные частотные интервалы контейнера, оценивалась степень отличия изображения-контейнера с внедренными изображениями от исходного изображения-контейнера.

Далее представлены результаты вычислительного эксперимента по внедрению 12 изображений размерности 56x56 пикселей в изображение-контейнер размерности 256x256 пикселей. Частотная область была разбита на 4x4 частотных интервала, для общего коэффициента внедрения  $K_0$  выбрано значение 0.1, пороговое значение  $T_0$  доли суммарной энергии контейнера, используемое для определения неинформационных интервалов выбрано равным 0.99. В ходе эксперимента получены следующие результаты.

- Количество информационных частотных интервалов у исходного изображения-контейнера равно 4, маска найденных информационных частотных интервалов представлена на рис. 2а (отмечены цифрой 1), 12 неинформационных интервалов отмечены цифрой 0 (рис.2а).

- В 12 неинформационных интервалах были внедрены изображения, с использованием описанного алгоритма. Визуально изображение контейнера практически не изменилось, среднеквадратическое отклонение (СКО) изображения контейнера после внедрения относительно его исходного изображения составило 0.0959.

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

- После восстановления внедренных изображений из контейнера были вычислены среднеквадратические отклонения восстановленных изображений относительно исходных. Значения СКО с учетом частотных интервалов, в которые были внедрены изображения, приведены на рис. 2б. Среднее СКО для восстановленных изображений равно 0.0188.

1	1	0	0	0	0	0.0231	0.0005
1	0	0	0	0	0.0201	0.0138	0.0095
1	0	0	0	0	0.0140	0.0231	0.0216
0	0	0	0	0.0002	0.0141	0.0265	0.0000
<b>а</b>				<b>б</b>			

Рис. 2

Результаты одновременного внедрения изображений:

- а – маска информационных частотных интервалов исходного контейнера,  
 б – значения СКО восстановленных изображений после внедрения  
 в соответствующие частотные интервалы

Вычислительные эксперименты, проведенные с другими исходными изображениями, также показали высокое качество восстановления внедряемых изображений (среднеквадратическое отклонение 1-3%), что указывает на эффективность внедрения изображений на основании предложенного алгоритма.

Также были проведены вычислительные эксперименты по определению зависимости степени искажения изображения-контейнера (среднеквадратическое отклонение) при внедрении одного изображения от величины общего коэффициента внедрения  $K_0$ .

При планировании эксперимента выбрано изображение-контейнер, размерности 256x256 пикселей. При внедрении изображения размерности 122x122 пикселей, частотная область была разбита на 2x2 частотных интервала, при внедрении изображения размерностью 56x56 пикселей, частотная область была разбита на 4x4 интервалов, пороговое значение  $T_0=0.99$ .

В ходе эксперимента для различных значений общего коэффициента внедрения  $K_0$ . вычислены среднеквадратическое отклонение контейнера, показывающее его искажение после внедрения одного изображения, и среднеквадратическое отклонение восстанов-

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

ленного из контейнера изображения, характеризующее погрешность восстановления внедренного изображения. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Искажение контейнера и качество восстановления внедренных изображений**

Кoeffици- ент $K_0$	Внедряемое изображение: 122x122 Частотных интервалов: 2x2		Внедряемое изображение: 56x56 Частотных интервалов: 4x4	
	Искажение контейнера ( $\times 10^{-2}$ )	Погрешность восстановления внедренного изображения	Искажение контейне- ра ( $\times 10^{-2}$ )	Погрешность восстановления внедренного изображения
0.01	6.641	0.51	4.078	0.0747
0.05	6.641	0.051	4.078	0.0149
0.1	6.643	5.067e-004	4.079	7.477e-003
0.15	6.644	3.378e-004	4.081	4.985e-003
0.2	6.647	2.534e-004	4.083	3.738e-003
0.5	6.672	1.013e-004	4.104	1.495e-003
1.0	6.754	5.067e-005	4.174	7.477e-004
3.0	7.533	1.689e-005	4.841	2.492e-004
5.0	8.871	1.013e-005	5.945	1.495e-004
7.0	10.558	7.239e-006	7.289	1.068e-004
8.0	11.485	6.334e-006	8.015	9.347e-005
9.0	12.451	5.631e-006	8.764	8.308e-005
10.0	13.449	5.067e-006	9.532	7.478e-005
20.0	24.247	2.5387e-006	17.673	3.739e-005
30.0	35.571	1.689e-006	26.097	2.492e-005

Результаты вычислительных экспериментов, приведенные в табл. 1, а также аналогичные расчеты, выполненные с другими исходными изображениями, демонстрируют, что при использовании описанного алгоритма достигается высокое качество восстановления внедренных изображений при несущественном искажении контейнера, общий коэффициент внедрения  $K_0$  может служить инструментом управления качеством внедрения.



*Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры для инновационной России» на 2009-2013 годы, гос. контракт № 14.740.11.0390*

### Литература

1. Конахович Г.Ф. и Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев, «МК-Пресс», 2006. 288 с.
2. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А. и Лысенко И.В. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах. – "Вопросы радиоэлектроники", сер. РЛТ, 2007, вып. 4, с. 115-123.
3. Черноморец А.А., Прохоренко Е.И. и Голощапова В.А. О свойствах собственных векторов субполосных матриц. – "Научные ведомости БелГУ". сер. История. Политология. Экономика. Информатика, 2009, № 7 (62), вып. 10/1, с. 122-128.
4. Жилияков Е.Г. и Черноморец А.А. Оптимальная фильтрация изображений на основе частотных представлений. – "Вопросы радиоэлектроники", сер. ЭВТ, 2008, вып. 1, с.118-131.

*Статья поступила 12 10 2010*