

УДК 004.056

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ЧАСТОТНЫХ АЛГОРИТМАХ МАРКИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.А. Батура<sup>а</sup>, А.Ю. Тропченко<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, batu-vladimir@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается эффективность использования ортогональных преобразований в частотных алгоритмах цифрового маркирования неподвижных изображений. Выбраны дискретное преобразование Адамара, дискретное косинусное преобразование и дискретное преобразование Хаара. Их эффективность определяется незаметностью встроенного с их помощью в изображение цифрового водяного знака, его стойкостью к наиболее распространенным операциям обработки изображения: JPEG-сжатию, зашумлению, изменению яркости и размера, эквализации гистограммы изображения. При использовании указанных ортогональных преобразований алгоритм цифрового маркирования его параметры встраивания остаются неизменными. Незаметность встраивания определяется величиной пикового отношения сигнала к шуму, стойкость водяного знака – коэффициентом корреляции Пирсона. Встраивание считается незаметным, если величина пикового отношения сигнала к шуму не ниже 43 дБ. Встроенный водяной знак считается устойчивым к определенной атаке, если коэффициент корреляции Пирсона не ниже 0,5. Для вычислительного эксперимента выбран алгоритм Elham, основанный на энтропии изображения. Вычислительный эксперимент проводится по следующему алгоритму: встраивание цифрового водяного знака при помощи алгоритма Elham в низкочастотную область изображения (контейнера), применение вредоносного воздействия на защищаемом изображении (стеганоконтейнере), извлечение цифрового водяного знака. Данные действия сопровождаются оценкой качества стеганоконтейнера и водяного знака, на основе которых и определяется эффективность ортогонального преобразования. В результате вычислительного эксперимента было установлено, что выбор указанных ортогональных преобразований при одинаковом алгоритме и параметрах встраивания не влияет на степень незаметности водяного знака. Основываясь на показателях корреляции, была установлена эффективность дискретного преобразования Адамара и дискретного косинусного преобразования по отношению к выбранным для эксперимента атакам. При этом использование дискретного преобразования Адамара повышает устойчивость встроенного водяного знака к изменению яркости и эквализации гистограммы стеганоконтейнера. Использование преобразования Хаара показало наименьшую эффективность. Полученные результаты будут полезны при разработке частотного алгоритма встраивания цифрового водяного знака в изображение.

**Ключевые слова:** преобразование Адамара, сжатие JPEG, стеганография, цифровое маркирование, цифровой водяной знак.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF APPLICATION EFFICIENCY OF ORTHOGONAL TRANSFORMATIONS IN FREQUENCY ALGORITHMS FOR DIGITAL IMAGE WATERMARKING

V.A. Batura<sup>а</sup>, A.Yu. Tropchenko<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, batu-vladimir@yandex.ru

**Abstract.** The efficiency of orthogonal transformations application in the frequency algorithms of the digital watermarking of still images is examined. Discrete Hadamard transform, discrete cosine transform and discrete Haar transform are selected. Their effectiveness is determined by the invisibility of embedded in digital image watermark and its resistance to the most common image processing operations: JPEG-compression, noising, changing of the brightness and image size, histogram equalization. The algorithm for digital watermarking and its embedding parameters remain unchanged at these orthogonal transformations. Imperceptibility of embedding is defined by the peak signal to noise ratio, watermark stability – by Pearson's correlation coefficient. Embedding is considered to be invisible, if the value of the peak signal to noise ratio is not less than 43 dB. Embedded watermark is considered to be resistant to a specific attack, if the Pearson's correlation coefficient is not less than 0.5. Elham algorithm based on the image entropy is chosen for computing experiment. Computing experiment is carried out according to the following algorithm: embedding of a digital watermark in low-frequency area of the image (container) by Elham algorithm, exposure to a harmful influence on the protected image (cover image), extraction of a digital watermark. These actions are followed by quality assessment of cover image and watermark on the basis of which efficiency of orthogonal transformation is defined. As a result of computing experiment it was determined that the choice of the specified orthogonal transformations at identical algorithm and parameters of embedding doesn't influence the degree of imperceptibility for a watermark. Efficiency of discrete Hadamard transform and discrete cosine transformation in relation to the attacks chosen for experiment was established based on the correlation indicators. Application of discrete Hadamard transform increases stability of embedded watermark to the brightness changing and histogram equalization of the cover image. Haar transform application showed the lowest efficiency. These results will be useful in creation of frequency algorithm for embedding a digital watermark into an image.

**Keywords:** Hadamard transformation, JPEG compression, steganography, digital watermarking, digital watermark.

### Введение

В последние годы для защиты авторских прав на мультимедийную продукцию активно применяются средства цифровой стеганографии, одним из которых является цифровое маркирование, при котором в объект защиты (контейнер) внедряется невидимый человеческому глазу цифровой водяной знак (ЦВЗ), представляющий собой двоичный код [1]. В настоящей работе для удобства восприятия ЦВЗ

представлен в виде бинарного изображения – логотипа. В качестве контейнера используем неподвижное (статическое) цифровое изображение.

Существует большое разнообразие методов цифрового маркирования, подразделяющихся на пространственные и частотные [1]. Пространственные методы основаны на изменении параметров пикселей изображения, как например, в работе [2]. Однако по сравнению с частотными пространственные методы не способны извлечь встроенный водяной знак из изображения после разных вредоносных воздействий, сильно искажающих изображение, например, зашумления, изменения размера, фильтрация. Данного недостатка лишены частотные методы, при которых ЦВЗ внедряется в частотные коэффициенты контейнера, полученные путем его разложения определенным ортогональным преобразованием. Однако из-за использования ортогональных преобразований частотные методы характеризуются высокой вычислительной сложностью [1]. Соответственно при разработке частотного метода цифрового маркирования неподвижных изображений возникает проблема выбора преобразования, обеспечивающего высокую скрытность внедрения ЦВЗ и его стойкость к вредоносным воздействиям.

На сегодняшний день существует относительно мало исследований, посвященных сравнению эффективности ортогональных преобразований разной вычислительной сложности в алгоритмах цифрового маркирования неподвижных изображений. Эффективность подобных алгоритмов определяется их способностью извлекать идентичный внедренному ЦВЗ или максимально похожий на него знак после вредоносных воздействий различного типа на защищаемое изображение (стеганоcontainer). Как правило, сравнению подлежит использование дискретного косинусного преобразования (ДКП) и дискретного вейвлет-преобразования (ДВП). В подобных работах мало внимания уделяется эффективности алгоритмов, основанных на использовании ортогональных преобразований с малой вычислительной сложностью, что привело к необходимости проведения данного исследования. Целью работы является оценка эффективности использования ортогональных преобразований с малой вычислительной сложностью по сравнению с ДКП и ДВП в алгоритмах цифрового маркирования неподвижных изображений.

### Выбор ортогональных преобразований

В качестве ортогональных преобразований в алгоритмах цифрового маркирования наиболее часто применяют дискретное косинусное преобразование [3, 4] и дискретное вейвлет-преобразование [5, 6] (в частности, дискретное преобразование Хаара (ДПХ) [7]), что связано с их использованием в форматах JPEG и JPEG 2000 соответственно.

Однако в ряде работ [8–16] для цифрового маркирования неподвижных изображений используется дискретное преобразование Адамара (ДПА). В некоторых исследованиях [9, 11, 12, 15, 16] для уменьшения вычислительной сложности используется двухмерное преобразование Адамара, которое реализуется строчно-столбцовым способом. При данном подходе к строкам матрицы исходных данных, а затем и к столбцам полученной матрицы применяются одномерные преобразования:

$$F_N = \frac{1}{N} A_N [X_N A_N],$$

где  $X_N$  – исходное изображение;  $F_N$  – преобразованное в набор коэффициентов изображение;  $N$  – размер изображения;  $A_N$  – матрица Адамара (ядро преобразования Адамара).

Матрица Адамара – квадратная двухуровневая матрица  $Nn$  порядка  $n$ , кратного 4, состоящая из элементов из множества  $\{1, -1\}$ , столбцы которой ортогональны [17].

В большинстве стеганографических исследований, как правило, применяется матрица порядка  $N = 2^n$ , где  $n$  – целое число. Подобные матрицы формируются на основе кронекеровского умножения матриц по формуле

$$A_{2N} = A_N \otimes A_2 = \begin{bmatrix} A_N & A_N \\ A_N & -A_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$  является матрицей Адамара наименьшего порядка.

В цифровом маркировании неподвижных изображений наиболее часто применяется матрица Адамара порядка 8 (рис. 1), что связано с используемыми при JPEG-компрессии блоками размером  $8 \times 8$ .

Одно из главных свойств матрицы Адамара – симметричность:

$$A_2 = A_2^T.$$

Число изменений знака строк матрицы аналогично частотной концепции преобразования Фурье [9]. Чем больше в строке матрицы Адамара перемен знака, тем более высокочастотными будут являться коэффициенты преобразования. Хотя стоит отметить, что в случае преобразования Адамара полученные коэффициенты считаются частотными условно. Коэффициент, находящийся в верхнем левом углу матрицы, содержит наибольшую энергию изображения (DC-коэффициент), остальные – AC-коэффициенты.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Матрица Адамара 8×8

По сравнению с ДКП и ДВП преимуществами ДПА являются [10] более низкая вычислительная сложность, простота аппаратной реализации, а также более низкий уровень искажения контейнера при условии учета особенностей зрительной системы человека. В настоящей работе произведена сравнительная оценка эффективности применения ДПА, ДКП и ДПХ в системах цифрового маркирования неподвижных цифровых изображений. Выбор ДКП и ДПХ для сравнения с ДПА обусловлен огромной распространенностью формата JPEG и большой перспективой формата JPEG 2000, показывающего лучшие результаты, особенно на больших коэффициентах сжатия [18].

### Методика оценки эффективности

Оценка эффективности основана на выявлении отличий в устойчивости внедренного ЦВЗ к атакам на защищенное изображение (стеганоконтейнер) при использовании в выбранном алгоритме цифрового маркирования различных ортогональных преобразований. При этом параметры алгоритма, например, сила встраивания, тип ЦВЗ и контейнера, частотная область встраивания, должны оставаться неизменными. Кроме устойчивости, оценке подлежит уровень искажений, вносимых ЦВЗ в стеганоконтейнер.

Тип контейнера и ЦВЗ выбираем исходя из того, для каких изображений предназначен алгоритм цифрового маркирования. В качестве атак на стеганоконтейнер используем наиболее часто встречающиеся при обработке изображения операции:

- JPEG-сжатие с различным коэффициентом качества;
- зашумление (гауссов и спекл-шум с различным уровнем дисперсии, шум «соль и перец» с разной плотностью);
- среднечастотная фильтрация;
- изменение яркости и размера;
- эквализация гистограммы, приводящая к изменению контраста изображения.

Среди перечисленных атак JPEG-сжатие – самое распространенное вредоносное воздействие. В связи с этим ЦВЗ встраиваем в низкочастотную область контейнера, обеспечивающую наибольшую устойчивость к сжатию с потерями.

Существует достаточно большое количество метрик оценки качества изображения, большинство составляют разностные и корреляционные [19]. Пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR) – одна из наиболее распространенных разностных характеристик определения качества изображения. PSNR определяется по формуле

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2 \cdot M \cdot N}{\sum_{x,y} (f(x,y) - \hat{f}(x,y))^2}, \quad (2)$$

где  $f(x,y)$  – контейнер;  $\hat{f}(x,y)$  – стеганоконтейнер;  $x, y$  – координаты пикселей;  $M$  и  $N$  – высота и ширина изображения. PSNR измеряется в децибелах (дБ). Считается, что искажения незаметны для системы человеческого зрения в случае, если  $PSNR > 43$  дБ.

В качестве меры качества извлеченного ЦВЗ используем коэффициент корреляции Пирсона – одну из наиболее часто применяемых корреляционных метрик в исследованиях стойкости внедренного ЦВЗ. Данный показатель измеряется по формуле

$$k = \frac{\sum_c \sum_r (A(c,r) - A_m) \cdot (B(c,r) - B_m)}{\sqrt{\sum_c \sum_r ((A(c,r) - A_m)^2) \cdot \left( \sum_c \sum_r (B(c,r) - B_m)^2 \right)}}, \quad (3)$$

где  $c, r$  – координаты пикселя изображения;  $A(c,r)$  – исходный ЦВЗ;  $B(c,r)$  – извлеченный ЦВЗ;  $A_m, B_m$  – среднее арифметическое пикселей исходного и извлеченного ЦВЗ.

Считаем, что выбранное ортогональное преобразование эффективно к определенной атаке, если коэффициент корреляции Пирсона больше 0,5.

### Вычислительный эксперимент

За основу тестирования взят однокoeffициентный алгоритм цифрового маркирования Elham [11], встраивающий черно-белый монохромный. Данный алгоритм использует показатель энтропии для скрытия ЦВЗ в наиболее значимых областях изображения и является комбинацией двух ортогональных преобразований – ДПА и ДКП. ДПА – основное преобразование, предназначенное для перевода изображения-контейнера в частотную область после его предварительной декомпозиции на блоки размером  $8 \times 8$ . Причем ДПА подвергаются только блоки, у которых средняя энтропия пикселей превышает выбранный порог. ДКП является вспомогательным преобразованием, которое необходимо для уменьшения объема встраиваемого ЦВЗ путем сохранения лишь 15 низкочастотных коэффициентов, расположенных в порядке «зигзаг»-сканирования, начиная от DC-компонента. ЦВЗ также предварительно подвергается декомпозиции на блоки размером  $8 \times 8$ . Сохранившиеся 15 коэффициентов каждого блока ЦВЗ выстраивают в вектора с их последующим объединением в единый вектор. Каждый коэффициент вектора встраивается в блок частотных коэффициентов контейнера по формуле

$$c'_i = c_i + \alpha \cdot w_i, \quad (4)$$

где  $c_i$  – коэффициент контейнера, подлежащий изменению;  $c'_i$  – измененный коэффициент контейнера;  $w_i$  – встраиваемый элемент водяного знака;  $\alpha$  – коэффициент усиления.

Данный метод относится к стегосистеме закрытого типа, так как для извлечения ЦВЗ требуется оригинальное изображение. Процесс извлечения происходит в порядке, обратном встраиванию, с той лишь разницей, что ДПА подвергается не только стеганоконтейнер, но и изображение-оригинал для определения местоположения модифицированных блоков. Извлечение осуществляется в соответствии с выражением

$$w_i = (c'_i - c_i) / \alpha. \quad (5)$$

В качестве программного средства реализации алгоритма выбрана система MATLAB, которая на данный момент является стандартом де-факто в области инженерных расчетов и включает в себя большой набор средств для реализации цифровой обработки сигналов и изображения.

Основные параметры вычислительной машины, выбранной для эксперимента:

- процессор: Intel Core i7 2630QM @ 2,00GHz;
- оперативная память: 4,00ГБ 1-канальная DDR3 @ 665 МГц.

В качестве контейнера выбрано полутоновое 8-битное изображение размером  $512 \times 512$  пикселей (рис. 2, а), в качестве ЦВЗ – черно-белое монохромное изображение размером  $64 \times 64$  пикселей (рис. 2, б). Пороговое значение энтропии равно 4,5, коэффициент усиления равен 35. Выбор данных значений обусловлен их оптимальностью для алгоритма Elham.

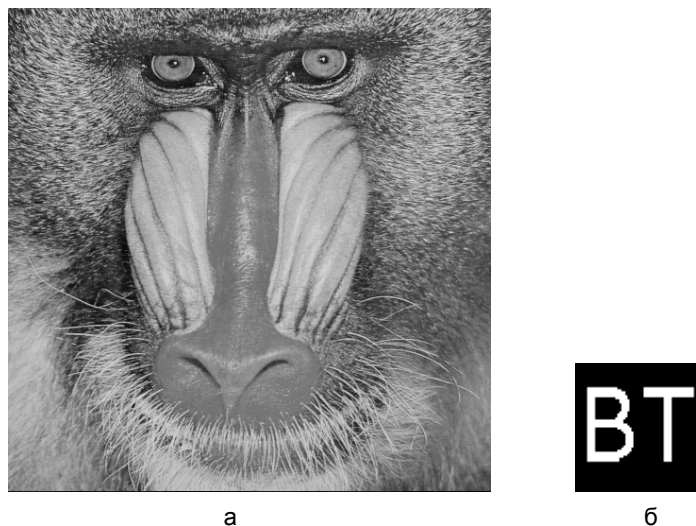


Рис. 2. Контейнер (8-битное изображение размером  $512 \times 512$  пикселей) (а); ЦВЗ (черно-белое монохромное изображение размером  $64 \times 64$  пикселей) (б)

### Результаты эксперимента

Для каждого ортогонального преобразования показатель PSNR равен 43,2104 дБ, что означает незаметность внедренного ЦВЗ. Показатель PSNR одинаков при использовании ДПА, ДКП и ДПХ первого и второго уровней, следовательно, выбор ортогонального преобразования не влияет на незаметность внедренного ЦВЗ при использовании одного и того же алгоритма внедрения.

На рис. 3 изображены графики зависимости качества ЦВЗ от различных показателей фактора качества JPEG (безразмерный коэффициент) при использовании ДПА, ДКП, ДПХ. Наилучшие показатели извлечения ЦВЗ при сжатии JPEG были достигнуты при использовании ДКП, что объясняется применением данного ортогонального преобразования в соответствующем алгоритме сжатия. При использовании ДПА были достигнуты близкие по значению показатели качества. Наихудший результат наблюдается при использовании ДПХ первого и второго уровней.

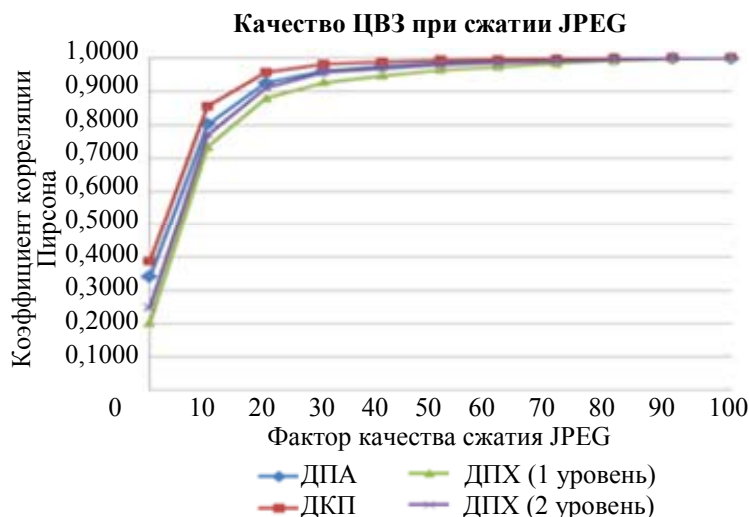


Рис. 3. Корректность извлеченного ЦВЗ в зависимости от показателя качества JPEG

Результаты сравнительного анализа эффективности ортогональных преобразований против других атак, выбранных в методике, приведены в таблице.

Тип атаки	ДПА	ДКП	ДПХ	ДПХ (двухуровневое)
Гауссов шум (0,001)	0,9562	0,9567	0,9535	0,9584
Гауссов шум (0,01)	0,7141	0,7166	0,6837	0,7136
Гауссов шум (0,1)	0,3258	0,2970	0,2873	0,3195
Шум «Соль и перец» (0,001)	0,9886	0,9857	0,9863	0,9882
Шум «Соль и перец» (0,01)	0,8823	0,8804	0,8738	0,8833
Шум «Соль и перец» (0,1)	0,4882	0,4692	0,4905	0,4668
Спекл-шум (0,001)	0,9877	0,9894	0,9885	0,9886
Спекл-шум (0,01)	0,9001	0,9083	0,9016	0,9026
Спекл-шум (0,1)	0,5476	0,5885	0,5207	0,5304
Изменение яркости (0,2)	0,9140	0,9018	0,5522	0,3356
Изменение яркости (0,3)	0,8510	0,8324	0,4227	0,2483
Изменение размера (256×256)	0,9214	0,9254	0,7205	0,9048
Изменение размера (128×128)	0,5375	0,5470	0,1639	0,5026
Среднечастотная фильтрация (3×3)	0,7440	0,7591	0,5077	0,6837
Эквализация гистограммы	0,5976	0,5741	0,4953	0,3120

Таблица. Показатели эффективности использования ортогональных преобразований

В таблице представлены показатели корреляции между встроенным и извлеченным ЦВЗ. Для гауссова и спекл-шумов с различным уровнем дисперсии, а также шума «соль и перец» с разной плотностью наблюдаем приблизительно одинаковую устойчивость при использовании ДПА, ДКП и преобразования Хаара первого и второго уровней.

При изменении размера стеганоконтейнера до размеров, указанных в таблице, или его среднечастотной фильтрации (фильтр размером 3×3) достигается приблизительно одинаковая устойчивость при использовании ДПА и ДКП. Наихудшие показатели при данных атаках получаем при использовании ДПХ первого уровня. ДПХ второго уровня увеличивает устойчивость ЦВЗ к данным атакам, однако при этом увеличивается и вычислительная сложность алгоритма цифрового маркирования.

При увеличении яркости стеганоконтейнера на 20% и 30%, а также при эквализации его гистограммы использование ДПА обеспечивает увеличение устойчивости ЦВЗ по сравнению с использованием ДКП и ДПХ.

### Заключение

В работе проведено исследование эффективности ортогональных преобразований в частотных алгоритмах цифрового маркирования неподвижных изображений. Результаты вычислительного эксперимента показали, что выбор использованных в эксперименте ортогональных преобразований не влияет на незаметность внедренного ЦВЗ при их использовании в одном и том же алгоритме внедрения.

Применение дискретного косинусного преобразования и дискретного преобразования Адамара для внедрения ЦВЗ обеспечивают схожую устойчивость к наиболее распространенным операциям обработки изображения (сжатие JPEG, зашумление, среднечастотная фильтрация, эквализация гистограммы, изменение размера и яркости). При этом дискретное преобразование Адамара повышает устойчивость встроенного ЦВЗ к изменению яркости и эквализации гистограммы стеганоконтейнера.

Поскольку дискретное преобразование Адамара обладает наименьшей вычислительной сложностью, по сравнению с ДКП и ДПХ, а также простотой аппаратной реализацией, оно является эффективным в качестве основы для реализации частотных алгоритмов цифрового маркирования.

### Литература

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев В.И. Цифровая стеганография. М.: СОЛОН-Пресс, 2002. 272 с.
2. Su Q., Niu Y., Zhao Y., Pang S., Liu X. A dual color images watermarking scheme based on the optimized compensation of singular value decomposition // *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 2013. V. 67. N 8. P. 652–664.
3. Wu X., Sun W. Robust copyright protection scheme for digital images using overlapping DCT and SVD // *Applied Soft Computing Journal*. 2013. V. 67. N 2. P. 1170–1182.
4. Patra J.C., Phua J.E., Bornand C. A novel DCT domain CRT-based watermarking scheme for image authentication surviving JPEG compression // *Digital Signal Processing: A Review Journal*. 2010. V. 20. N 6. P. 1597–1611.
5. Bhatnagar G., Jonathan Wu Q.M. A new logo watermarking based on redundant fractional wavelet transform // *Mathematical and Computer Modelling*. 2013. V. 58. N 1–2. P. 204–218.
6. Bhatnagar G., Jonathan Wu Q.M., Raman B. A new robust adjustable logo watermarking scheme // *Computers and Security*. 2012. V. 31. N 1. P. 40–58.
7. Maheswari S., Rameshwaran K. A robust blind image watermarking based on double Haar wavelet transform (DHW) // *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2012. V. 71. P. 324–329.
8. Maity S.P., Kundu M.K. DHT domain digital watermarking with low loss in image informations // *AEU – International Journal of Electronics and Communications*. 2010. V. 64. N 3. P. 243–257.
9. Ho A.T.S., Shen J., Chow A.K.K., Woon J. Robust digital image-in-image watermarking algorithm using fast Hadamard transform // *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 2003. V. 3. P. III826–III829.
10. Maity S.P., Kundu M.K. Perceptually adaptive spread transform image watermarking scheme using Hadamard transform // *Information Sciences*. 2011. V. 181. N 3. P. 450–465.
11. Shabanali Fami E., Samavi S., Rezaee Kaviani H., Molaei Radani Z. Adaptive watermarking in Hadamard transform coefficients of textured image blocks // *16<sup>th</sup> International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing*. Shiraz, Iran, 2012. V. 2012. Art. 6313799. P. 503–507.
12. Saryazdi S., Nezamabadi-pour H. A blind digital watermark in Hadamard domain // *International Journal of Computer, Information, Systems and Control Engineering*. 2007. V. 1. N 3. P. 784–787.
13. Разинков Е.В., Латыпов Р.Х. Встраивание цифрового водяного знака в изображение с использованием комплексного преобразования Адамара // *Материалы II международной научной конференции по проблемам безопасности и противодействия терроризму*. М.: МЦНМО, 2007. С. 509–514.
14. Bhatnagar G., Raman B. Robust watermarking in multiresolution Walsh-Hadamard transform // *IEEE International Advance Computing Conference (IACC 2009)*. Patiala, India, 2009. Art. 4809134. P. 894–899.
15. Sarker I.H., Iqbal S. Content-based image retrieval using Haar wavelet transform and color moment // *Smart Computing Review*. 2013. V. 3. N 3. P. 155–165.
16. Ho A.T.S., Shen J., Tan S.H. A character-embedded watermarking algorithm using the fast Hadamard transform for satellite images // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2002. V. 4793. P. 156–167.
17. Балонин Ю.Н., Сергеев М.Б. Алгоритм и программа поиска и исследования М-матриц // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 3 (85). С. 82–86.

18. Востриков А.А., Чернышев С.А. Об оценке устойчивости к искажениям изображений, маскированных М-матрицами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 5 (87). С. 99–103.

19. Sayood K. Introduction to Data Compression. Morgan Kaufmann Publ., 1996. 491 p.

- Батура Владимир Александрович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, batu-vladimir@yandex.ru
- Тропченко Александр Ювенальевич** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, 197101, Российская Федерация, tau@d1.ifmo.ru
- Vladimir A. Batura** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, batu-vladimir@yandex.ru
- Alexander Yu. Tropchenko** – D.Sc., Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, tau@d1.ifmo.ru

*Принято к печати 14.05.14*

*Accepted 14.05.14*