



Электронное научное издание
«Ученые заметки ТОГУ»
2015, Том 6, № 2, С. 271 – 281

Свидетельство
Эл № ФС 77-39676 от 05.05.2010
[http://pnu.edu.ru/ru/ejournal/about/
ejournal@pnu.edu.ru](http://pnu.edu.ru/ru/ejournal/about/ejournal@pnu.edu.ru)

УДК 681.323(075)

© 2015 г. Г. И. Бахрушина, канд. физ.-мат. наук,
Д. С. Огиенко

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВНЕДРЕНИЯ ДАННЫХ В ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО МОМЕНТЫ ЦЕРНИКЕ

В статье рассматриваются вопросы программной реализации алгоритма внедрения данных в цифровое изображение, использующего моменты Цернике, и его исследования на устойчивость. Приводятся результаты экспериментальных исследований, позволяющие сравнить по ряду параметров указанный алгоритм с другими алгоритмами.

Ключевые слова: цифровой водяной знак, маркирование изображений, моменты Цернике, геометрические атаки, JPEG-сжатие, аффинные преобразования.

G. I. Bahrushina, D. S. Ogienko

REALIZATION AND RESEARCH THE DATA EMBEDDING ALGORITHM INTO THE DIGITAL IMAGE USING ZERNIKE MOMENTS

The problems of the programming realization of the data embedding algorithm into the digital image using Zernike moments, and its researching for robustness are considered in this paper.

Keywords: digital watermark, digital image watermarking, Zernike moments, geometric attacks, JPEG-compression, affine transformation.

Введение

Информация представляет собой огромную ценность. В настоящее время наблюдается быстрый рост ее объемов. С появлением Интернета доступ к цифровой информации значительно упростился, что привело к повышению угрозы нарушения безопасности данных. Поэтому защита интеллектуальной собственности на сегодняшний день не только не теряет своей актуальности, но становится ещё более востребованной.

Существует различное множество методов для аутентификации и маркировки информации с целью защиты авторских прав. Нарушение авторского права - это правонарушение, суть которого составляет использование произведений науки, литературы и искусства, охраняемых авторским правом, без разрешения авторов или правообладателей или с нарушением условий договора об использовании таких произведений. К числу основных способов нарушения авторских прав относится незаконное копирование и распространение произведения, а также плагиат. Чтобы предотвратить возможность плагиата, на цифровой продукт наносится специальная метка, которая незаметна человеческому глазу, но может быть распознана специальными программами. Эта метка содержит информацию, подтверждающую авторство. В науке подобного рода метки называются цифровыми водяными знаками (ЦВЗ), а их встраивание в объект защиты (контейнер) – цифровым маркированием.

После того как ЦВЗ были предложены для защиты авторства, на них стали обращать внимание многие исследователи в области стеганографии. Многие виды ЦВЗ чувствительны к геометрическим преобразованиям: масштабированию, повороту и смещению, поэтому проблема устойчивости водяного знака остается открытой. Для достижения лучших результатов используются инвариантные свойства цифровой информации, такие как моменты.

В данной статье рассматривается один из алгоритмов внедрения цифрового водяного знака в изображения с использованием инвариантных моментов Цернике.

Программная реализация алгоритма и его исследование на устойчивость к различного рода атакам выполнены в рамках выпускной квалификационной работы студенткой группы ПО(б) – 11 Огиенко Д.С. (научный руководитель Бахрушина Г.И.).

Моменты Цернике

Моменты Цернике [4] порядка p и степени q изображения $f(r, \theta)$, представленного на круге единичного радиуса, определяются по формуле:

$$A_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \sum_r \sum_{\theta} f(r, \theta) V_{pq}(x, \theta), \quad (1)$$

где $V_{pq}(x, \theta)$ – полином Цернике, который формирует ортогональную систему на единичном круге $x^2 + y^2 \leq 1$.

Полином Цернике $V_{pq}(x, y)$ – это функция, определенная на круге единичного радиуса $x^2 + y^2 \leq 1$. Общий вид этой функции:

$$V_{pq}(x, y) = R_{pq}(r) s^{-lq\theta}, \quad (2)$$

где $l = \sqrt{-1}$;

p – целое положительное число или ноль;

q – любое целое число, такое что $q \leq p$, $p - |q|$ – четное;

r – длина вектора от начала координат до (x, y) , $r = \sqrt{x^2 + y^2}$;

θ – угол между вектором r и осью x , $\theta = \arctan(y/x)$, $\theta \in [0, 2\pi]$;
 $R_{pq}(r)$ – радиальный полином.

$$R_{pq}(r) = \sum_{s=0}^{(p+q)/2} \frac{(-1)^s (p-s)! r^{p-2s}}{s! \left(\frac{p-q}{2}-s\right)! \left(\frac{p+q}{2}-s\right)!} . \quad (3)$$

Полиномы Цернике должны быть рассчитаны для каждого пикселя изображения с учетом того, что моменты Цернике определяются в полярных координатах. При использовании полярной системы координат необходимо вычислять новые координаты пикселя, т.к. положение смещается относительно центра окружности [5]. На рис.1 показано, как изображение в декартовой системе координат трансформируется в полярную систему.

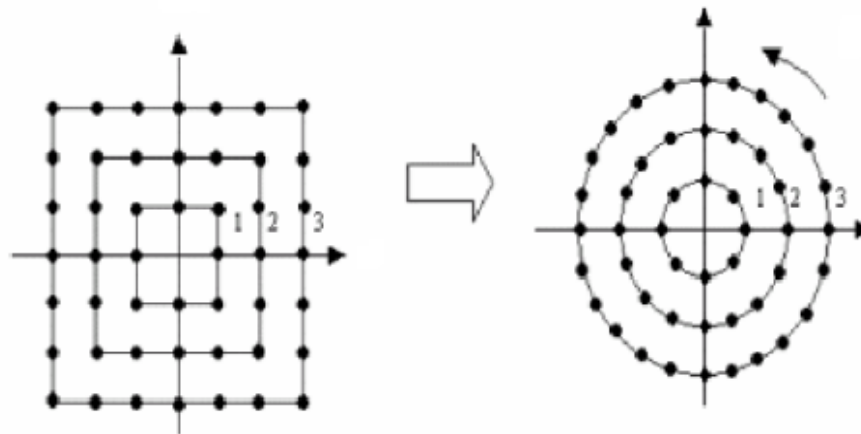


Рис.1. Трансформация квадрат-в-круг

Пиксели в полярной системе координат могут быть представлены следующим образом:

$$x_k = \frac{2i-N+1}{N}, y_k = \frac{2k-N+1}{N}, i, k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4)$$

Метод Кинтнера для быстрого вычисления полиномов

Моменты Цернике очень сложны для вычисления по сравнению, например, с геометрическими моментами. Это связано с тем, что вычисление радиального полинома зависит от факториальной функции, что ведет к большой вычислительной сложности. Расчет производится для одного момента и должен повторяться для каждого набора (p, q) . Время и сложность вычисления существенно возрастают с ростом порядка p . В связи с этими проблемами было предложено множество алгоритмов быстрого вычисления полиномов. Для вычисления полинома был использован рекурсивный алгоритм Кинтнера (Kintner) [1].

Кинтнер предложил следующее рекуррентное соотношение, которое использует полиномы более низких порядков p с постоянным q для вычисления радиального полинома $R_{pq}(r)$:

$$R_{pq}(r) = \frac{(K_2 r^2 + K_3) R_{(p-2)q}(r) + K_4 R_{(p-4)q}(r)}{K_1} , \quad (5)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$K_1 = \frac{(p+q)(p-q)(p-2)}{2}, \quad (6)$$

$$K_2 = 2p(p-1)(p-2), \quad (7)$$

$$K_3 = -q^2(p-1) - p(p-1)(p-2), \quad (8)$$

$$K_4 = \frac{-p(p+q-2)(p-q-2)}{2}. \quad (9)$$

Из этих формул следует, что метод Кинтнера не применяется в случаях, когда $p=q$ и $p-q=2$. Для этих случаев справедливы отношения:

$$R_{qq}(r) = r^q, \text{ если } p = q, \quad (10)$$

$$R_{(q+2)q}(r) = (q+2)R_{(q+2)(q+2)}(r) - (q+1)R_{qq}(r), \text{ если } p - q = 2. \quad (11)$$

Описание алгоритма внедрения ЦВЗ

На основе метода, представленного выше, был разработан быстрый и эффективный алгоритм, устойчивый ко многим атакам. Алгоритм включает следующие этапы:

- 1) генерация последовательности бит водяного знака;
- 2) выбор моментов Цернике;
- 3) квантование моментов;
- 4) маркировка изображения.

Рассмотрим более детально процесс внедрения водяного знака в изображение, представленное в градациях серого.

Этап 1. Генерация последовательности бит водяного сигнала

Водяной знак $B = \{b_1, b_2, \dots, b_L\}$ представляет собой последовательность бит длины L , где $b_l \in \{0, 1\}$, $l = \overline{1, L}$.

Этап 2. Выбор моментов Цернике

Как показывают исследования, не все моменты могут быть использованы для встраивания водяного знака. Все моменты степени q кратной четырем не могут быть вычислены точно, поэтому они не подходят для маркировки. Набор подходящих моментов может быть обозначен $S = \{Z_{pq}, p \leq p_{\max}, q \geq 0, q \neq 4i\}$, а его длина определяется следующим образом:

$$|S| = \begin{cases} \frac{p_{\max}^2 + 3p_{\max}}{4} & \text{если } p_{\max} = 4i \\ \frac{p_{\max}^2 + 10p_{\max} + 3}{4} & \text{если } p_{\max} = 4i + 1 \\ \frac{p_{\max}^2 + 8p_{\max} + 4}{4} & \text{если } p_{\max} = 4i + 2 \\ \frac{p_{\max}^2 + 10p_{\max} + 7}{4} & \text{если } p_{\max} = 4i + 3 \end{cases}, \quad (12)$$

где i – любое целое неотрицательно число, p_{\max} – максимальный порядок момента, определенный объемом встраиваемого сигнала.

Этап 3. Квантование моментов

Далее из отобранных моментов формируется массив $Z = \{Z_{p_1q_1}, Z_{p_2q_2}, \dots, Z_{p_{|S|}q_{|S|}}\}$ для дальнейшего квантования. Каждый бит b_i из B вставляется в соответствующий элемент $Z_{p_iq_i}$ из Z с использованием функции модуляции (ditherfunction). Функция моду-

ляции в данном случае представляет собой дизеринг, то есть подмешивание в первичный сигнал псевдослучайного шума со специально подобранным спектром. Применяется при обработке цифрового звука, видео и графической информации для уменьшения негативного эффекта от квантования. Функция дизеринга $d_i(b_i)$ зависит от значения внедряемого бита

$$d_i(1) = d_i(0) + \Delta/2,$$

где $d_i(0) \in [0, \Delta/2]$, Δ - шаг квантования.

Шаг квантования представляет собой величину определяющую соотношение видимости и надежности водяного знака. Большие показатели Δ делают водяной знак более устойчивым, но более заметным человеческому глазу. Значение шага квантования может быть определено на основе требуемого качества изображения со встроенным сигналом. Для этого используется показатель уровня искажений PSNR. Шаг квантования можно определить по формуле:

$$\Delta = 255 \left[10^{\frac{PSNR}{10} - \frac{\pi}{24} \sum_{i=1}^L (p_i + 1)^{-1}} \right]^{-0.5}. \quad (13)$$

Далее используется шаг квантования $\Delta = 1$.

Таким образом, момент с подмешанным шумом вычисляется по формуле:

$$|\tilde{Z}_{pt,qt}| = \left[\frac{|Z_{pt,qt}| - d_i(b_i)}{\Delta} \right] \Delta + d_i(b_i), \quad i = 1, 2, \dots, L, \quad (14)$$

где $[...]$ – операция округления.

Модифицированные моменты Цернике:

$$\tilde{Z}_{pt,qt} = \frac{|\tilde{Z}_{pt,qt}|}{|Z_{pt,qt}|} Z_{pt,qt}, \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (15)$$

В процессе квантования момент $\tilde{Z}_{pt,qt}$, если $q_i \neq 0$, и комплексно сопряженное $\tilde{Z}_{pt,-qt}$ обрабатываются параллельно, т.к. они имеют одинаковую величину.

Этап 4. Маркировка изображения

После модификации выбранных моментов Цернике, сигнал водяного знака $w(x, y)$ формируется с помощью формулы:

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^L [\varepsilon_{pt,qt} V_{pt,qt} + \varepsilon_{pt,-qt} V_{pt,-qt}], \quad (16)$$

где $\varepsilon_{pt,qt} = \tilde{Z}_{pt,qt} - Z_{pt,qt}$ и $\varepsilon_{pt,-qt} = \tilde{Z}_{pt,-qt} - Z_{pt,-qt}$, $l = 1, 2, \dots, L$.

Итоговое изображение с внедренным водяным знаком можно представить следующим образом:

$$f_{wat} = f(x, y) + w(x, y). \quad (17)$$

Алгоритм извлечения водяного знака

В процессе извлечения водяного знака производится попытка получить встроенную последовательность $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_L)$ из полученного изображения $f'_{wat}(x, y)$, которое может быть искаженной версией $f_{wat}(x, y)$ с небольшим процентом ошибок. Процесс извлечения ЦВЗ аналогичен процессу внедрения. Во-первых, вычисляется вектор мо-

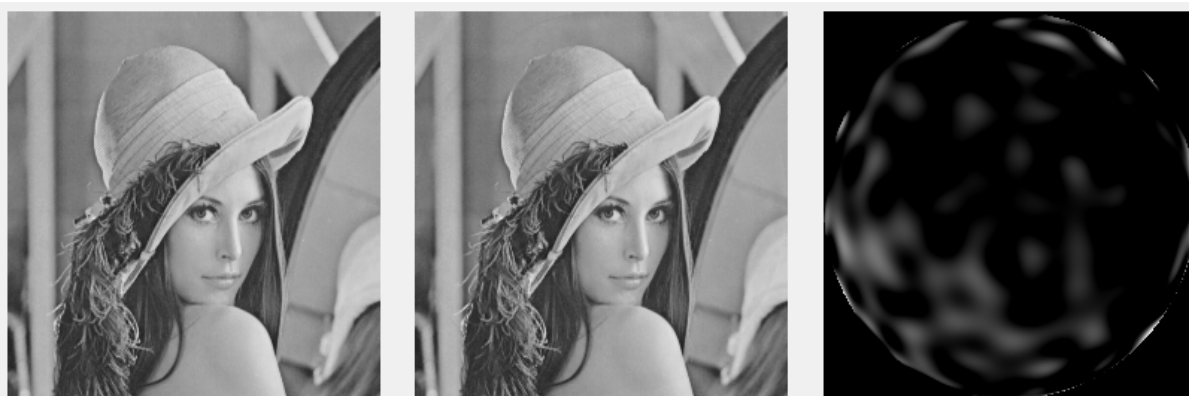
ментов Цернике в полученном изображении $Z^l = \{Z^l_{p1,q1}, Z^l_{p2,q2}, \dots, Z^l_{pL,qL}\}$. Величина каждого момента реквантуется с помощью функции модуляции $d_l(0)$ и $d_l(1)$: $|Z^l_{p1,q1}|_0$ и $|Z^l_{p1,q1}|_1$.

Минимальный интервал между вычисленным моментом и модифицированным используется для нахождения бита, встроенного в текущий момент Цернике:

$$b_l = \operatorname{argmin}_{j \in \{0,1\}} (|Z^l_{p1,q1}|_j - |Z^l_{p1,q1}|)^2, \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (18)$$

Численные оценки устойчивости алгоритма

Численные эксперименты проводились с использованием полутонового изображения “Лена” размером 250×250 , к которому применялись различные типы атак. Изображение, содержащее метку, подвергалось атакам перед извлечением битов водяного знака и вычислением коэффициента битовых ошибок (BER). На рис.2 приведены результаты встраивания 128 бит сигнала. Как видно, вносимые искажения незаметны для человеческого глаза (PSNR = 53.82 дБ, коэффициент корреляции = 0.9997).



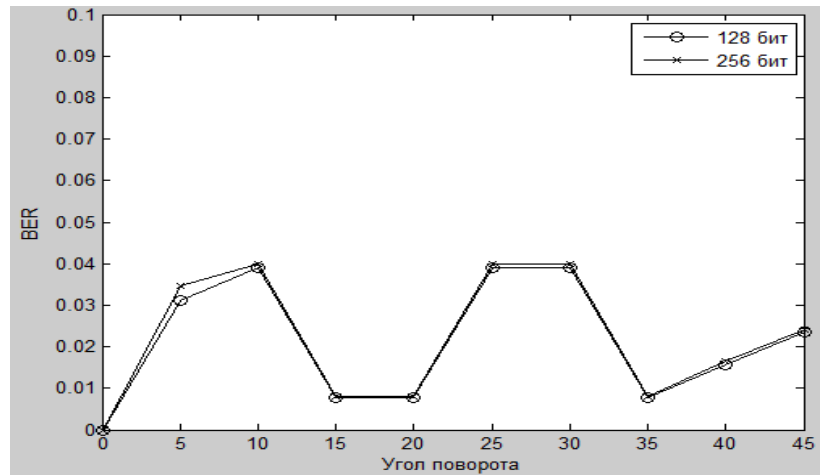
а – оригинальное изображение; б – маркированное изображение; в – водяной сигнал

Рис. 2. Маркирование изображения 128-битным сигналом

Основным показателем качества алгоритма встраивания ЦВЗ является устойчивость маркера к различным атакам. Самыми опасными для систем водяных знаков являются геометрические атаки и JPEG-сжатие. Далее будет рассмотрено несколько экспериментов для оценки алгоритма.

Устойчивость к повороту

Маркированное изображение поворачивали на угол $0 - 45^\circ$ с интервалом 5° . Повернутая версия изображения была получена с помощью билинейной интерполяции, а полученные черные границы обрезаны так, что размер исходного изображения остался прежним. При изменении угла поворота проводился пересчет BER. На рис.3 приведены результаты первого эксперимента. Очевидно, что ЦВЗ устойчив к повороту, так как максимальная ошибка не превосходит 5 бит.



а – изображение, повернутое на угол 15° ; б – график зависимости BER от угла поворота
Рис. 3. Устойчивость к повороту

Устойчивость к масштабированию

Размер маркированного изображения изменялся с помощью различных коэффициентов масштабирования. При изменении размера проводился пересчет BER. На рис.4 приведены результаты второго эксперимента. Операция масштабирования была выполнена с помощью билинейной интерполяции. Алгоритм показал достаточно приемлемые результаты. Стоит отметить, что сигнал восстанавливается с большей точностью при коэффициенте масштабирования больше либо равном единице, то есть при увеличении размера изображения.

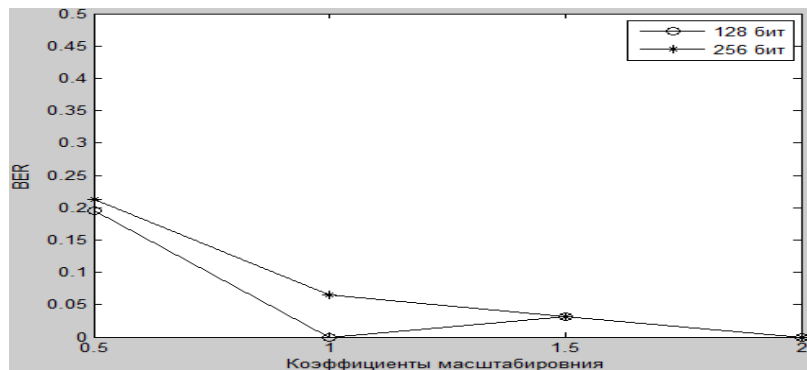
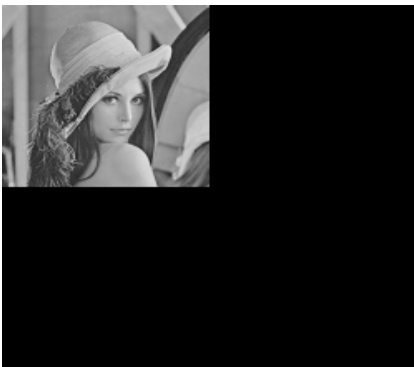


Рис.4. Устойчивость к масштабированию: а – изображение, уменьшенное в 4 раза; б – график зависимости BER от размера изображения

Устойчивость к JPEG-сжатию

JPEG-сжатие – наиболее часто используемый метод сжатия изображения. Были рассмотрены изменения BER в зависимости от различных уровней сжатия изображения от 15 до 100. Уровень сжатия определяет качество изображения. Диапазон полезных значений для категории качества – от 0 до 100. Близкое к нулю значение указанного числа соответствует низкому качеству изображения, а близкое к ста – высокое. На

рис.5 приведены результаты третьего эксперимента. По графику видно, что предложенный метод встраивания ЦВЗ обеспечивает превосходные результаты даже для низких показателей сжатия. Максимальное число ошибочных бит не больше пяти.

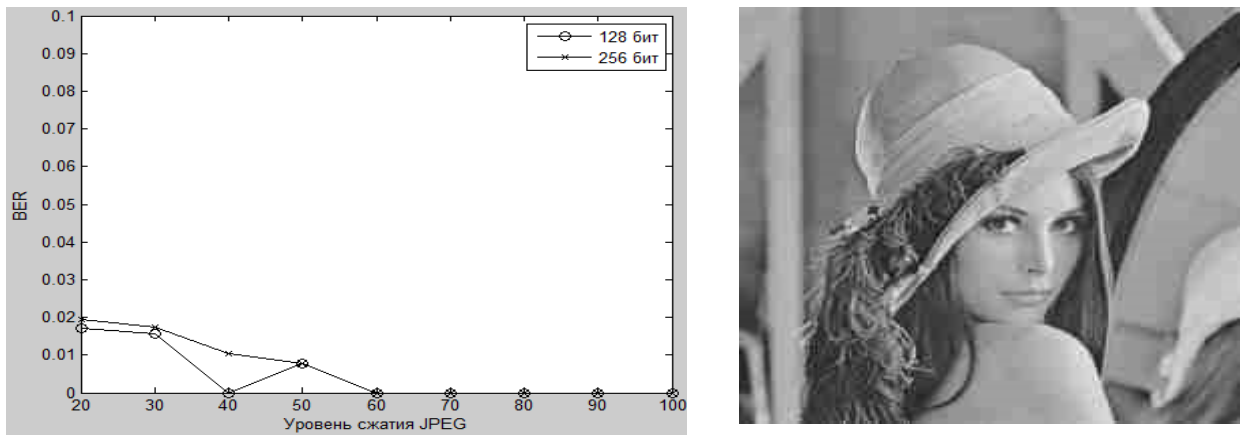


Рис. 5. Устойчивость к JPEG-сжатию: а – изображение, подверженное сжатию уровня 20; б – график зависимости BER от уровня сжатия изображения

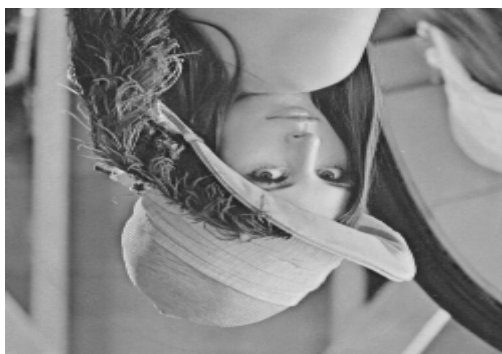
Устойчивость к отражению

Маркированное изображение было отражено вертикально и горизонтально. После отражения производился пересчет BER. На рис.6 можно представлено изображение с встроенным ЦВЗ, отраженное вертикально и горизонтально. В таблице 1 приведены результаты четвертого эксперимента. Как показывают результаты, этот тип атак абсолютно безвреден для ЦВЗ.

Таблица 1

Влияние отражения изображения на BER

Длина ЦВЗ	BER	
	Вертикальное отражение	Горизонтальное отражение
128 бит	0	0
256 бит	0	0



а – изображение, отраженное горизонтально; б – изображение, отраженное вертикально
Рис.6. Отражение изображения

Аффинные преобразования

Аффинные преобразования – это отображение множества точек, удовлетворяющих некоторому уравнению в одной системе координат, во множество точек в другой системе координат, удовлетворяющих такому же уравнению. Эксперимент проводился над изображением “Лена”, маркированным 128-битным водяным знаком, трансформированным следующими аффинными преобразованиями:

1. Изменение размера с коэффициентом масштабирования 0.6 и поворот на 10° ;
2. Изменение размера с коэффициентом масштабирования 1.5, поворот на 30° и горизонтальное отражение;
3. изменение размера с коэффициентом масштабирования 0.5, поворот на 25° и JPEG-сжатие с коэффициентом сжатия 35;
4. изменение размера с коэффициентом масштабирования 1.2, поворот на 15° , вертикальное отражение и JPEG-сжатие с коэффициентом сжатия 20;

После каждого изменения производился пересчет BER. На рис.7 представлены трансформированные версии изображения. В табл.2 приведены результаты пятого эксперимента.



(а)



(б)



(в)



(г)

а – (1); б – (2); в – (3); г – (4)

Рис.7. Аффинные преобразования изображения “Лена”

Таблица 2

Показатель BER после аффинных преобразований изображения “Лена”

Вид аффинного преобразования	BER
Масштабирование (коэффициент 0.6), поворот (10°)	0.1328
Масштабирование (коэффициент 1.5), поворот (30°), горизонтальное отражение	0.0078
Масштабирование (коэффициент 0.5), поворот (25°), JPEG-сжатие (уровень 35)	0.2812
Масштабирование (коэффициент 1.2), поворот (15°), вертикальное отражение, JPEG-сжатие (уровень 20)	0.0078

Аналогичный эксперимент был проведен над изображением “Барбара” размера 250×250 со встроенным 128-битным сигналом. На рис.8 представлены трансформированные версии изображения. В табл.3 приведены результаты пятого эксперимента, но с изображением “Барбара”.

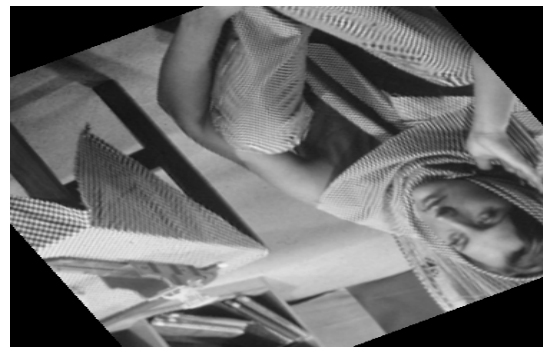
Таблица 3

Показатель BER после аффинных преобразований изображения “Барбара”

Вид аффинного преобразования	BER
Масштабирование (коэффициент 0.6), поворот (10°)	0.2734
Масштабирование (коэффициент 1.5), поворот (30°), горизонтальное отражение	0.0078
Масштабирование (коэффициент 0.5), поворот (25°), JPEG-сжатие (уровень 35)	0.2968
Масштабирование (коэффициент 1.2), поворот (15°), вертикальное отражение, JPEG-сжатие (уровень 20)	0.0703



(a)



(б)



(в)



(г)

а – (1); б – (2); в – (3); г – (4)

Рис.8. Аффинные преобразования изображения “Барбара”

По сравнению с известными алгоритмами, рассмотренный алгоритм более устойчив к геометрическим атакам, но проигрывает в длине встраиваемого сигнала. В табл.5 представлены результаты сравнения следующих алгоритмов: алгоритмы на основе дискретного вейвлет-преобразования (ДВП)[2], алгоритмы на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП) и преобразования Фурье (ДФП) [3], алгоритм на основе моментов Цернике.

Таблица 5

Сравнение алгоритмов встраивания по объему ЦВЗ и устойчивости к атакам

Алгоритм	Объем	Поворот	Масштабирование	JPEG-сжатие
ДВП	большой	только 90°	устойчив	устойчив
ДКП, ДПФ	большой	любой	не устойчив	устойчив
Моменты Цернике	малый	любой	устойчив	устойчив

Заключение

В статье был предложен алгоритм встраивания ЦВЗ на основе моментов Цернике. С помощью разработанной программы были оценены характеристики разработанного алгоритма и проведен его анализ. Исследования показали, что эффективность алгоритма оправдала ожидания и даже превзошла их. Моментный способ показал превосходные результаты относительно других известных алгоритмов. Однако вычислительная сложность остается существенным недостатком данного метода.

Список литературы

- [1] Chee-Way Chong, Raveendran P., Mukundan R. A comparative analysis of algorithm for fast computation of Zernike moments / Chee-Way Chong, P.Raveendran, R.Mukundan // The journal of the pattern recognition society. – 2002. – Pattern Recognition 36: 731-742.
- [2] Mei Jiansheng, Li Sukang, Tan Xiaomei A digital watermarking algorithm based on DCT and DWT / Mei Jiansheng, Li Sukang, Tan Xiaomei // Academy publisher. – 2009. – P. 104-107.
- [3] Md. Maklachur Rahman A DWT, DCT and SVD based watermarking technique to protect the image piracy / Md. Maklachur // IJMPCIT. – 2013. – Vol. 4, No. 2. – P. 21-33.
- [4] Chandan S., Sukhjeet R. An effective image watermarking system for high embedding capacity / S.Chandan, R.Sukhjeet // International journal of computer applications. – 2012. – P. 22-28.
- [5] Pawlak M. Image analysis by moments: reconstruction and computational aspects / MirosławPawlak. – Wrocław, 2006. – 217 с.

E-mail:

Бахрушина Г. И. - gal_bah@mail.ru

Огиенко С. Д. - rp_94@mail.ru