

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

## DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 004.056

DOI: 10.17587/it.25.405-413

**А. Н. Шниперов**, канд. техн. наук, доц., e-mail: ashniperov@sfu-kras.ru,  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск,  
**М. С. Сосновский**, инженер-программист, e-mail: maximsosnovskiy@gmail.com,  
**П. М. Шипулин**, инженер-программист, e-mail: pshipulin@gmail.com,  
Акционерное общество "Информационные спутниковые системы"  
имени академика М. Ф. Решетнева", г. Железногорск

### Робастный метод маркирования изображений цифровым водяным знаком, основанный на ортогональных моментах Цернике

*Рассмотрена проблема защиты авторских прав на цифровые изображения посредством их маркировки невидимым цифровым водяным знаком. Предложен новый способ маркирования полноцветных изображений, основанный на использовании моментов изображения Цернике в особых точках на маркируемом изображении, что позволило получить приемлемую скорость встраивания и извлечения цифрового водяного знака (ЦВЗ). Приведены базовые алгоритмы, а также полученные экспериментальные результаты оценки робастности к основным видам атак и временной сложности внедрения и извлечения ЦВЗ, подтверждающие эффективность предлагаемого метода.*

**Ключевые слова:** цифровые водяные знаки, стеганография, маркирование изображений, защита информации, защита авторских прав, моменты изображений, моменты Цернике

#### Введение

В последнее десятилетие наблюдается устойчивый темп роста производства и оборота цифрового контента, специфика которого накладывает значительные трудности в обеспечении защиты и охраны авторского права на этот контент. Изображения, включая фотографии, картографическую информацию, фонды электронных архивов и т. д., как разновидность цифрового контента занимают серьезную долю этого оборота. В силу простоты распространения такого контента у ее правообладателей очень часто возникает задача защиты своих авторских прав, однако на настоящий момент эта задача по-прежнему полностью не решена. Традиционно для защиты авторского права в таких изображениях применяются видимые водяные знаки, наносимые поверх всего изображения или его части. Однако такой подход во многих случаях не является приемлемым, а в некоторых и вовсе не решает задачу защиты авторского права. Это обстоятельство уже достаточно давно обозначило научно-техническую задачу по созданию различных подходов к быстрому маркированию изображений прозрачным (невидимым для че-

ловеческого глаза) цифровым водяным знаком (ЦВЗ), устойчивым к различным воздействиям на цифровое изображение в целях его деструкции. Концепция маркирования изображения ЦВЗ, как правило, лежит в области методов стеганографии. Однако требование к робастности для систем маркирования ЦВЗ существенно затрудняет использование многих известных методов стеганографии и ставит серьезную научно-техническую задачу перед исследователями. В данной статье для решения данной задачи предлагается метод маркирования ЦВЗ полноцветных изображений, который базируется на использовании моментов Цернике [1] в особых точках на маркируемом изображении [2], что позволяет работать с изображениями любых размеров, сохраняя робастные свойства метода и приемлемую скорость как внедрения ЦВЗ в изображение, так и его извлечения.

#### 1. Обзор подходов к маркированию изображений ЦВЗ и постановка задачи

Маркирование изображений посредством ЦВЗ в общем виде рассматривается как проблема передачи информационного сигнала

малой мощности в широкополосном сигнале. При этом выдвигаются несколько ключевых условий к системам маркирования изображений посредством ЦВЗ:

- вносимые ЦВЗ искажения в информационный широкополосный сигнал (изображение-контейнер) должны быть неразличимы для человеческого глаза;
- ЦВЗ, внедренный в изображение, должен обладать высокими показателями робастности, т. е. быть устойчивым к различным искажениям изображения-контейнера, как не преднамеренными, так и преднамеренными;
- приемлемая вычислительная сложность внедрения и извлечения ЦВЗ.

За последнее десятилетие различными исследователями было предложено множество различных методов маркирования статичных изображений, более того уже предложены подходы к их классификации [3, 4]. Так, по области встраивания методы маркирования обычно классифицируют на пространственные, частотные и моментные.

Пространственные методы встраивания ЦВЗ основаны на манипулировании цветовыми составляющими изображения или его яркостью в пространственной области. В этом случае изображение  $C_{M \times N}$  определяется как упорядоченное множество пикселей  $C_{M \times N} = \langle c(x, y) \rangle$ , для каждого из которого определен вектор цветовой составляющей каналов цветности модели *RGB* и яркости. Общий принцип всех пространственных методов заключается в замене избыточной информации об изображении, малозаметной человеческому глазу, битами ЦВЗ. Как правило, осуществляется манипуляция наименее значимыми битами (*Least Significant Bit, LSB*) каналов цветности и/или яркости пикселей изображения по какому-то определенному алгоритму, линейному или нелинейному. Однако в силу того, что пространственные методы встраивания обладают низкой устойчивостью к воздействиям на изображения, а также ограниченностью применимости к графическим форматам, для маркирования ЦВЗ они практически не рассматриваются.

Частотные методы, являющиеся подклассом методов преобразования области изображения (*Transform domain methods*), основаны на "подмешивании" ЦВЗ в некоторые области исходного изображения. При этом процесс встраивания происходит в частотной (спектральной) области изображения посредством модификации конечного набора спектральных коэффициентов разложения изображения посредством

различных дискретных ортогональных преобразований, используемых в алгоритмах сжатия изображений с потерями. Этими преобразованиями могут выступать дискретное косинусное преобразование, дискретное вейвлет-преобразование, дискретное преобразование Фурье и другие. Данное направление развития систем маркирования изображений цифровым водяным знаком является весьма популярным, а также позволяет достигнуть высоких показателей робастности [5–9]. Однако частотные методы имеют довольно высокую чувствительность к исходному изображению, так как внедрение осуществляется, как правило, преимущественно в низкочастотную область в целях обеспечения робастности ЦВЗ. Неоптимальное внедрение ЦВЗ может привести к значительному искажению промаркированного изображения, при этом критерии оптимальности весьма зависимы от исходного изображения. Кроме того, частотные методы обладают низкими показателями устойчивости к атакам с использованием фильтрации, а также атакам на основе аффинных преобразований.

Моментные методы маркирования ЦВЗ являются сравнительно новым подходом к проблематике и основаны на встраивании ЦВЗ в моменты изображений, которые представляют собой дескрипторы особенностей изображений. При этом выделяют следующие виды моментов: геометрические и ортогональные [10]. В работе [11] впервые были представлены геометрические моменты, которые обладали свойствами устойчивости к вращению, масштабированию и смещению изображения. Данные свойства впоследствии были использованы в различных методах классификации и распознавания изображений, однако их неортогональность существенно усложняла задачу восстановления изображения и, как следствие, применимость геометрических моментов в задаче маркирования ЦВЗ. Основанные на теории ортогональных полиномов дальнейшие исследования показали, что изображения могут быть достаточно просто восстановлены рядом ортогональных моментов, таких как моменты Цернике, Чебышева, Лежандре и др. Это стало толчком для исследования применимости их в методах маркирования ЦВЗ, описанных в работах [12, 13, 14] и в ряде других работ. Данные моменты, по сравнению с геометрическими, также менее чувствительны к шуму и инвариантны к линейным преобразованиям (геометрическим атакам). Однако общим системным и весьма существенным недостатком

использования ортогональных моментов в методах маркирования изображений ЦВЗ являются большие вычислительные затраты на их вычисление, экспоненциально возрастающие по мере увеличения размера маркируемого изображения. Вследствие этого авторы данных работ в ходе проведения экспериментов и оценки эффективности в основном ограничиваются небольшими размерами маркируемых изображений, к тому же в градациях серого.

В данной работе предлагается новый **метод маркирования изображений любых размеров цифровым водяным знаком в особых точках на основе моментов изображений Цернике**, обладающий приемлемой вычислительной сложностью и устойчивый к различным атакам, в том числе к шумовым и геометрическим атакам на основе сжатия, фильтрации и аффинных преобразований.

## 2. Вычисление моментов Цернике и реконструкция изображения по ним

Вычисление двумерных моментов изображений Цернике может быть произведено с использованием полной системы ортогональных комплексных функций [12]:

$$v_{nm}(x, y) = v_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho)e^{jm\theta},$$

где  $x, y$  и  $\rho, \theta$  представлены в декартовой и полярной системах координат соответственно;  $R_{nm}(\rho)$  — радиальный полином Цернике;

$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\theta = \arctg\left(\frac{y}{x}\right)$ ,  $|r| \leq 1$ ,  $n \geq 0$  — радиальный порядок момента,  $m$  — азимутальный порядок момента, причем  $|m| \leq n$ .

В работе [15] радиальный полином Цернике определяется как

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n+|m|}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s}. \quad (1)$$

Значения комплексных ортогональных моментов Цернике для изображения размером  $N \times N$  определяются как

$$z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) v_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy,$$

где функция  $v_{nm}^*(\rho, \theta)$  комплексно сопряжена с  $v_{nm}(\rho, \theta)$ . Функция  $f(x, y)$  представляет исходное изображение фиксированного размера.

Моменты Цернике являются комплексными функциями и поэтому могут быть представлены в виде амплитудно-частотного (АЧС) и фазочастотного спектров (ФЧС). Однако необходимо отметить, что вычисляемые таким образом моменты Цернике в строгом смысле слова не являются точными. В данном случае возможны два вида ошибок, получивших название геометрической ошибки аппроксимации и численной ошибки аппроксимации [12]. Эти ошибки ведут к некоторым искажениям при последующей реконструкции изображения в пространственной области (рис. 1).

Для вычисления моментов Цернике цифровое изображение должно быть отображено в пределах единичной окружности с началом в центре изображения. Например, если нам необходимо вычислить моменты для изображения с размером  $N \times N$  пикселя, то оно должно быть нормировано в единичном круге с фиксированным радиусом  $N/2$  пикселя. Пиксели вне единичного круга будут отбрасываться при вычислении, тем самым это создает геометрическую ошибку при вычислении моментов. Увеличение до  $N\sqrt{2}$  радиуса окружности, охватывающей все изображение, приводит к нивелированию геометрической ошибки, но увеличивает область вычислений.

По известным моментам Цернике  $z_{nm}$  можно реконструировать исходное изображение, используя функцию реконструкции, которая в общем виде имеет вид

$$\tilde{f}(x, y) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m z_{nm} v_{nm}(\rho, \theta). \quad (2)$$

Заметим, что чем больше порядок используемых моментов  $n$ , тем ближе функция реконструкции  $\tilde{f}(x, y)$  к функции изображения  $f(x, y)$ , однако тем больше объем требуемых вычислений. На рис. 1 показаны исходное изображение



Рис. 1. Реконструирование изображения по моментам Цернике: а — исходное изображение; б — реконструированное изображение

бражение и реконструированное изображение с использованием моментов изображения Цернике  $n_{\max} = 36$  порядка.

### Описание метода маркирования изображений ЦВЗ и алгоритмов

Как уже было отмечено, предлагаемый метод маркирования изображений ЦВЗ базируется на применении ортогональных моментов Цернике, которые обладают необходимыми свойствами в задаче обеспечения робастности ЦВЗ: помехоустойчивости, независимости от контекста исходного изображения и инвариантности ко многим преобразованиям. Однако, как уже было отмечено, вычисление моментов изображений, в том числе и моментов Цернике, является весьма сложной вычислительной задачей. Так, временная сложность вычисления моментов Цернике для изображения размером  $N \times N$  максимального порядка  $n_{\max}$  при использовании базового метода вычисления (1) составляет  $O(N^2 n_{\max}^3)$ . Применение более современных подходов к вычислению моментов Цернике, например, приводимых в работах [16, 17], дает весьма значительный прирост в скорости. Так, например, метод вычисления Кинтера [18] имеет временную сложность  $O(N^2 n_{\max}^2)$ , однако для изображений больших размеров она все еще очень высокая.

Предлагаемый в статье метод маркирования ЦВЗ базируется на подходе, в котором для вычисления моментов изображения Цернике используется не все изображение целиком, а его особые локальные фрагменты. Данный подход достаточно часто применяется исследователями, например в работе [19]. При этом для определения этих локальных областей используются окрестности особых точек, которые, в свою очередь, являются некоторыми локальными инвариантными особенностями изображения. Такой подход позволяет существенно уменьшить объем вычислений, сделав временную сложность маркирования изображения ЦВЗ приемлемой. При этом использование нескольких особых окрестностей особых точек изображения позволяет сохранять робастность метода маркирования на приемлемом уровне, а сам алгоритм внедрения вносит минимальные визуальные искажения в оригинальное изображение.

### ■ Алгоритм внедрения ЦВЗ в изображение

Предлагаемый метод маркирования изображения ЦВЗ предполагает последовательное внедрение копии ЦВЗ в окрестность каждой  $s$ -й выбранной особой точки на изображении. Таким образом, в целом процесс внедрения ЦВЗ происходит многократно для каждой выбранной особой точки и ее окрестности. Общая структурная схема процесса внедрения ЦВЗ в изображение представлена на рис. 2.

**Шаг 1.** Цифровой водяной знак представляется в виде бинарной последовательности  $B = \{b_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, L\}$ .

**Шаг 2 (прекодирование ЦВЗ).** Осуществляется кодирование  $B$  с использованием алгоритма корректирующего кодирования. Выбор того или иного алгоритма, в первую очередь, связан с объемом ЦВЗ, а также с числом используемых особых точек на изображении. В рамках данной работы нами использовался код Хэмминга.

**Шаг 3 (нормализация изображения).** Изображение разбивается на каналы цветовой модели RGB, и для дальнейшей работы алгоритма берется только синий ( $B$ -канал), поскольку искажения в синем канале наименее заметны человеческому глазу. Для выбранного канала выполняется нормализация. Нормализация изображения выполняется для достижения наилучших показателей внедрения и извлечения ЦВЗ. Канал изображения рассматривается как функция  $f(x, y)$ , для которой находят минимальные и максимальные значения  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  соответственно. Далее  $f(x, y)$  может быть нормализована трансформацией в функцию 
$$g(x, y) = \frac{f(x, y) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \cdot 255.$$

**Шаг 4 (нахождение особых точек).** Для нахождения области встраивания ЦВЗ необходимо определение дескриптора особой точки посредством ее детектирования. Для этой

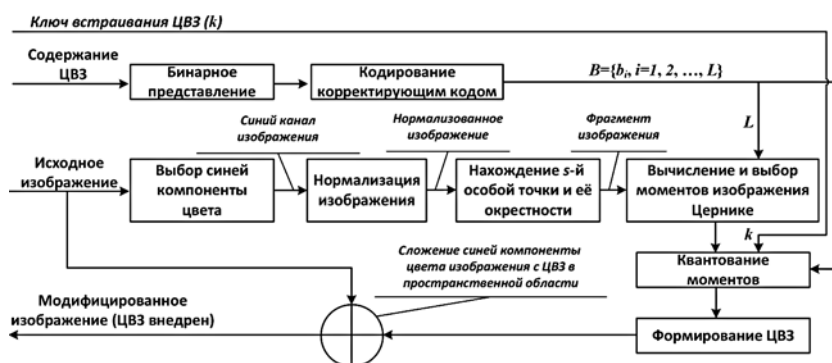


Рис. 2. Общая структурная схема внедрения копии ЦВЗ в изображение

цели в алгоритме используется детектор углов Ши-Томаси [20], который позволяет достаточно эффективно находить инвариантные к аффинным преобразованиям точки на изображении. Эти особые точки формируются из двух или более граней, которые, в свою очередь, обычно определяют границу между различными объектами и/или частями одного и того же объекта. Посредством детектора Ши-Томаси проводится поиск особых точек и выбирается самая стабильная из тех, которые еще не участвовали в процессе внедрения ЦВЗ. Вокруг выбранной особой точки вычисляются координаты окрестности области встраивания ЦВЗ размером  $256 \times 256$  пикселей.

**Шаг 5 (вычисление моментов и их выбор).** Вычисление и выбор моментов изображения Цернике. Для выбранной окрестности особой точки выполняется вычисление комплексных ортогональных моментов Цернике, а также значений радиального полинома, рассчитанного посредством метода Кинтера. Однако, как показывают исследования, в том числе в работах [12, 16, 17, 21], не все моменты могут быть задействованы для встраивания ЦВЗ. Так, моменты Цернике степени  $m$ -кратной четным, не могут быть вычислены точно, поэтому они не используются в дальнейших операциях и отбрасываются.

**Шаг 6 (квантование моментов).** Из отобранных моментов формируется вектор значений моментов Цернике  $Z_{nm} = \{z_{n_1m_1}, z_{n_2m_2}, \dots, z_{n_Lm_L}\}$  длиной  $L$  не менее объема внедряемого ЦВЗ. Каждый бит ЦВЗ  $b_i \in B$  встраивается в соответствующий элемент  $z_{n_i m_i} \in Z_{nm}$  с помощью функции модуляции, которая осуществляет псевдослучайное изменение моментов Цернике на некоторую величину, которую будем называть "шумом". Для этого сначала вычисляется значение "шума", на которое необходимо изменить текущий момент изображения:

$$|\tilde{z}_{n_i m_i}| = \left| \frac{|z_{n_i m_i}| - d(b_i)}{\Delta} \right| \Delta + d(b_i), \quad (3)$$

где  $\Delta$  — шаг квантования, от которого зависит соотношение видимости и устойчивости ЦВЗ, а  $d(b_i)$  — функция дизеринга. Шаг квантования является настраиваемым параметром алгоритма. Значение функции дизеринга  $d(b)$  зависит от значения внедряемого бита. Для определения вектора всех ее значений сначала необходимо сформировать вектор значений

$$D_0 = \{d_1(0), d_2(0), \dots, d_L(0)\},$$

где  $d_i(0) \leftarrow random(k)$  и  $d_i(0) \in \left[0, \frac{\Delta}{2}\right]$ . Формирование значений  $d_i(0)$  осуществляется функцией  $random(k)$ , являющейся реализацией генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ), инициализированного ключом  $k$ . Затем формируется итоговый вектор значений  $D = \{d_i(b_i): i = 0, 1, \dots, L\}$ , в котором для формирования значений  $d_i(1)$  используется выражение  $d_i(1) = d_i(0) + \frac{\Delta}{2}$ .

Модификация исходных моментов Цернике осуществляется посредством внесения в них

"шума":  $\tilde{z}_{n_i m_i} = \frac{|\tilde{z}_{n_i m_i}|}{|z_{n_i m_i}|} z_{n_i m_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ .

**Шаг 7 (формирование ЦВЗ).** После модификации выбранных моментов Цернике формируется сигнал водяного знака с использованием функции реконструкции изображения (2):

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^L (\varepsilon_{n_i m_i} V_{n_i m_i} + \varepsilon_{n_i(-m_i)} V_{n_i(-m_i)}),$$

где  $\varepsilon_{n_i m_i} = \tilde{z}_{n_i m_i} - z_{n_i m_i}$ ,  $\varepsilon_{n_i(-m_i)} = \tilde{z}_{n_i(-m_i)} - z_{n_i(-m_i)}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ .

Итоговое изображение формируется путем сложения фрагмента исходного изображения в окрестности особой  $s$ -й точки и ЦВЗ в пространственной области:

$$\tilde{f}_s(x, y) = f_s(x, y) + w(x, y),$$

где  $f_s(x, y)$  — функция изображения в окрестности области встраивания ЦВЗ,  $w(x, y)$  — функция изображения ЦВЗ.

#### ■ Алгоритм извлечения ЦВЗ из изображения

Алгоритм извлечения ЦВЗ из изображения практически аналогичен алгоритму встраивания и предполагает последовательное извлечение копии ЦВЗ из окрестности каждой  $s$ -й выбранной особой точки на изображении. Общая структурная схема процесса извлечения копии ЦВЗ из изображения представлена на рис. 3. После извлечения всех копий ЦВЗ осуществляется проверка их корректности (с заранее заданным порогом) и принимается решение об идентификации или неидентификации ЦВЗ в изображении.

**Шаг 1.** Осуществляется инициализация параметров извлечения (ключ извлечения —  $k$ , шаг квантования —  $\Delta$ , длина бинарной последовательности ЦВЗ —  $L$ ), предполагается, что цифровой водяной знак представлен в виде



Рис. 3. Общая структурная схема извлечения копии ЦВЗ из изображения

бинарной последовательности  $B = \{b_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, L\}$ , внедренной в окрестность  $s$ -й особой точки с использованием ключа  $k$ .

**Шаг 2 (нормализация изображения).** Осуществляется аналогично шагу 3 алгоритма встраивания.

**Шаг 3 (нахождение особых точек).** Осуществляется аналогично шагу 4 алгоритма встраивания.

**Шаг 4 (вычисление моментов и их выбор).** Осуществляется аналогично шагу 5 алгоритма встраивания.

**Шаг 5 (квантование моментов).** Из отобранных моментов формируется вектор значений моментов Цернике  $Z_{nm} = \{z_{n_1 m_1}, z_{n_2 m_2}, \dots, z_{n_L m_L}\}$  длиной  $L$ . Определяются векторы значений функции дизернинга  $D_0 = \{d_1(0), d_2(0), \dots, d_L(0)\}$  и  $D_1 = \{d_1(1), d_2(1), \dots, d_L(1)\}$ , где  $d_i(0) \leftarrow \text{random}(k)$ ,  $d_i(0) \in \left[0, \frac{\Delta}{2}\right]$  и  $d_i(1) = d_i(0) + \frac{\Delta}{2}$ . Формирование значений  $d_i(0)$  осуществляется посредством ГПСЧ, инициализированного ключом извлечения  $k$ . Далее значение каждого момента изображения Цернике дважды квантуется с использованием выражения (3). При первом квантовании используются значения функции дизернинга  $d_i(0) \in D_0$  с образованием модифицированных моментов  $|\tilde{z}_{n_i m_i}|_0$ , при втором квантовании используются значения функции дизернинга  $d_i(1) \in D_1$  с образованием модифицированных моментов  $|\tilde{z}_{n_i m_i}|_1$ .

**Шаг 6 (восстановление ЦВЗ).** Минимальная разница между вычисленным моментом и квантованным (на предыдущем шаге) используется для нахождения бита, встроенного в текущий момент:

$$b'_i = \begin{cases} 1, & \text{если } (|\tilde{z}_{n_i m_i}|_1 - |z_{n_i m_i}|)^2 < (|\tilde{z}_{n_i m_i}|_0 - |z_{n_i m_i}|)^2; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $i = 1, 2, \dots, L$ .

Другими словами, обнаружение битов ЦВЗ осуществляется по пикам в разнице моментов Цернике. После восстановления всех предполагаемых битов ЦВЗ  $B' = \{b'_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, L\}$  проводится их корректировка в  $B \leftarrow h(B')$  путем декодирования кода Хемминга.

## Эксперименты, оценка устойчивости и качества ЦВЗ

Предлагаемый в статье метод был реализован в виде законченного программного продукта [22], посредством которого проводилась оценка качества ЦВЗ и его устойчивости. Для оценки качества встроенного ЦВЗ и его устойчивости использовались различные распространенные метрики, среди которых:

- коэффициент ошибочных битов — *BER* (*Bit Error Rate*);
- пиковое соотношение сигнал/шум — *PSNR* (*Peak Signal-To-Noise Ratio*);
- среднеквадратическая ошибка между исходным изображением и его искаженной версией после внедрения в него ЦВЗ — *MSE* (*Mean Square Error*);
- индекс структурного сходства — *SSIM* (*Structural SIMilarity*).

Оценка данных метрик осуществлялась как на тестовых полутоновых изображениях размером  $256 \times 256$  пикселей с единичным внедрением ЦВЗ, так и на полноцветных изображениях различного содержания размерами до  $5184 \times 3456$  пикселей с внедрением копий ЦВЗ в окрестности особых точек. На рис. 4, б (см. третью сторону обложки) показан результат встраивания ЦВЗ объемом 256 бит во все тестовое полутоновое изображение "Lena" без обнаружения особых точек с шагом квантования  $\Delta = 2$ . В табл. 1 представлена зависимость метрик *PSNR*, *MSE*, *SSIM* от шага квантования, который отвечает за робастность ЦВЗ, а также за его незаметность.

Из табл. 1 видно, что показатели *PSNR* достаточно высоки, а показатели *SSIM* незначительно отличны от единицы, что говорит о вполне удовлетворительном качестве маркированного изображения в сравнении с исходным.

Как уже было отмечено ранее, работа с полноцветными изображениями осуществляется с использованием синей компоненты *RGB*-

модели. С математической точки зрения синяя компонента представляется матрицей, как и полутоновое изображение, где пиксели принимают значения в интервале  $[0, 255]$ . Поэтому ожидаемые характеристики метрик не должны принципиально изменяться при встраивании ЦВЗ в полноцветные изображения. Для проверки данной гипотезы нами использовались 30 широкоформатных полноцветных изображений формата *JPEG* различного содержания: пейзажи с разной погодой, пейзажи с водоемами, изображение мостов, макросъемка и портреты. *Встраивание копии ЦВЗ осуществлялось в окрестностях трех особых точек.* На рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлены

Таблица 1

Зависимости метрик от шага квантования для изображения "Lena"

Шаг квантования, $\Delta$	PSNR, дБ	MSE	SSIM
0,8	46,96990	1,30644	0,99605
1	45,44226	1,85717	0,99461
1,2	43,84681	2,62059	0,99381
1,4	42,52811	3,63302	0,99057
1,6	41,74942	4,34648	0,98908
1,8	40,69659	5,53884	0,98537
2	39,36072	7,53369	0,98433

Таблица 2

Зависимость метрик PSNR, MSE и SSIM от объема ЦВЗ

Объем ЦВЗ, бит	PSNR, дБ	MSE	SSIM
64	54,48896	0,2313	0,99778
128	54,11923	0,25185	0,99764
256	53,51123	0,2897	0,99741

Таблица 3

Время работы алгоритма по встраиванию и извлечению ЦВЗ

ЦВЗ 160 бит	Область встраивания 256×256 пикселей	Время работы, с	
	Размер изображения, пиксели	Встраивание	Извлечение
	2560 × 1680	5	4,2
	4000 × 2667	6,2	4,9
	4000 × 2667	6,4	5
	5184 × 3456	7,6	5,7
	5184 × 3456	7,6	5,7
	4166 × 2343	6,8	5,7
	1024 × 1024	4,7	3,7
	4166 × 2343	6	4,6

усредненные значения метрики *PSNR* в зависимости от шага квантования  $\Delta$  для ЦВЗ различного объема. Как можно заметить, значения метрики вполне удовлетворительные, что также подтверждают сами изображения: промаркированные ЦВЗ визуально не отличимы от оригинальных.

В табл. 2 приведены усредненные значения основных метрик качества внедренного ЦВЗ.

На серии выбранных изображений были проведены тесты по определению зависимости коэффициента ошибок *BER* от размера ЦВЗ и области встраивания. По результатам тестов можно сделать вывод, что оптимальный размер встраиваемого ЦВЗ — 160 бит, а размер области для встраивания — 256×256 пикселей, поскольку при таком подборе параметров наблюдался минимум ошибок при извлечении ЦВЗ из маркированных изображений.

Скоростные характеристики работы алгоритмов проверялись с использованием персонального компьютера под управлением операционной системы ОС Linux Ubuntu 16.4, с процессором Intel Core i5-2410M и ОЗУ 4 ГБ. Среднее время работы алгоритмов встраивания и извлечения трех копий ЦВЗ в окрестностях особых точек для тестовых изображений отражено в табл. 3. Нормализация изображения в зависимости от его размера занимает от 0,2 до 1 с, остальное время занимает вычисление моментов Цернике и дальнейшее их внедрение или извлечение.

Для оценки робастности внедренного ЦВЗ проводили различные атаки на тестовые, маркированные полноцветные изображения, в которые записана одна копия ЦВЗ размером 160 бит с шагом квантования моментов Цернике  $\Delta = 2$ , так как использование нескольких копий ЦВЗ увеличивает вероятность извлечения ЦВЗ. В силу ограниченного объема статьи далее рассмотрим лишь такие воздействия на изображения, которые являются наиболее распространенными: *JPEG*-сжатие, отражение, масштабирование, повороты, обрезка и зашумление. Данные виды воздействий приводят к необратимым изменениям маркированного изображения и, как следствие, представляют реальную угрозу для ЦВЗ. Основным показателем качества алгоритма встраивания ЦВЗ является устойчивость к выбранным типам атак. Показатель измеряется метрикой *BER* и является усредненным по значениям, полученным для каждого изображения в эксперименте.

**Устойчивость к сжатию.** Для проверки устойчивости к *JPEG*-сжатию маркированное

изображение подвергалось сжатию в диапазоне значений коэффициента качества 100...70. Результат представлен в табл. 4.

Таблица 4

**Зависимости BER от уровня сжатия для тестового изображения**

Качество изображения	BER	Качество извлеченного ЦВЗ (160 бит), %
100	0	100
95	0	100
90	0,023	93,75
85	0,01567	93,75
80	0,046	87,5
75	0,015	93,75
70	0,117	62,25

Таблица 5

**Влияние отражения изображения на ЦВЗ**

Наименование искажения	BER	Качество извлеченного ЦВЗ (160 бит), %
Вертикальное отражение	0	100
Горизонтальное отражение	0	100

Таблица 6

**Зависимости BER от коэффициента масштабирования**

Коэффициент масштабирования	BER	Качество извлеченного ЦВЗ, %
1,5	0,03125	96,875
1,25	0,0625	93,75
1	0	100
0,87	0,09375	90,625
0,75	0,10526	86,41
0,5	0,25	81,25

Таблица 7

**Зависимости BER от угла поворота изображения**

Угол поворота, °	BER	Качество извлеченного ЦВЗ (160 бит), %
1	0,0859	62,5
2	0	100
3	0	100
4	0,007	93,75
5	0,14	43,75
6	0,039	87,5
7	0,039	87,5
8	0,0625	68,75
9	0,039	87,5
10	0,039	87,5

Таблица 8

**Зависимость BER от добавления шума в изображения**

Искажение	BER	Качество извлеченного ЦВЗ (160 бит), %
<i>Gaussian Blur</i> 1×1	0,01	90
<i>Gaussian Blur</i> 3×3	0,03	85
Шум 5 %	0,0187	95
Шум 10 %	0	100
Шум 15 %	0,0125	95
Шум 20 %	0,0125	95
Шум 25 %	0,0125	95
Шум 30 %	0,0125	95
Шум 35 %	0,0375	85
Шум 40 %	0,0375	85

**Устойчивость к отражению.** Маркированное изображение подвергалось атаке в виде отражений (табл. 5). Как показывают результаты, ЦВЗ абсолютно устойчив к данной атаке.

**Устойчивость к масштабированию.** Маркированное изображение подвергалось атаке в виде масштабирования (пропорциональное изменение размера), результат которой представлен в табл. 6, из которой видно, что ЦВЗ весьма устойчив к данной атаке.

**Устойчивость к поворотам.** Маркированное изображение подвергалось атаке в виде поворота на углы от 0 до 10°. Под поворотом здесь понимается вращение изображения относительно неподвижного холста (подложки). Результаты представлены в табл. 7 и показывают, что ЦВЗ устойчив к небольшим углам поворота.

**Устойчивость к обрезке.** Маркированные изображения подвергались атаке в виде обрезки. В случае если обрезка не затрагивает особую точку и ее окрестность, данная атака не нарушает ЦВЗ. Встраивание нескольких копий ЦВЗ в окрестности различных особых точек изображения повышает стойкость к данному виду атаки. Однако, как показали эксперименты, могут существовать такие изображения, для которых все множество особых точек может быть локализовано в одной части изображения (вне зависимости от используемого детектора), которая может быть обрезана, что, в свою очередь, будет означать удаление ЦВЗ. Справедливости ради стоит заметить, что число таких изображений существенно меньше тех, в которых данная особенность определения особых точек не наблюдается.

**Устойчивость к вносимому шуму.** Для проверки устойчивости к зашумлению в мар-



кированное изображение вносилось гауссово размытие и равномерный белый шум. Усредненные результаты теста для различных изображений представлены в табл. 8 и показывают удовлетворительные результаты.

### Заключение

В данной работе представлен метод маркирования изображений ЦВЗ, основанный на ортогональных моментах изображения Цернике, сопутствующие алгоритмы и некоторые значимые, оценочные экспериментальные результаты. В целом можно сделать вывод, что предложенный метод является применимым для маркирования ЦВЗ изображений различных форматов и характеристик, в том числе к наиболее популярному JPEG. Кроме того, метод показывает достаточно высокие показатели робастности и приемлемые вычислительные затраты на маркирование изображений ЦВЗ. Данные факты позволяют сделать выводы об эффективности предлагаемого решения для маркирования изображений невидимым ЦВЗ для решения задачи обеспечения защиты авторского права неподвижных изображений.

Однако предлагаемый в данной статье подход может быть не применим к изображениям, особые точки которого локализованы в пределах одной области на изображении таким образом, что их окрестности пересекаются. Также возможны ситуации, когда особые точки локализованы близко к краям и их окрестности выходят за пределы изображения. Данная проблема требует дальнейшего научно-технического изыскания, однако в целом не является критической в силу того, что такого рода изображений много меньше, чем тех, в которых отсутствуют такие особенности.

Предлагаемый метод маркирования изображений ЦВЗ в настоящий момент проходит опытно-промышленную эксплуатацию на специализированной цифровой платформе обмена знаниями и управления авторскими правами — IPUniversity [23], и работа над его усовершенствованием продолжается.

### Список литературы

1. Teh C. H., Chin R. T. On image analysis by the methods of moments // IEEE Trans Pattern Anal. Mach. Intell. 1988. N. 10. P. 496—513.
2. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // In Fourth Alvey Vision Conference, Manchester, UK. 1988. P. 147—151.

3. Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В. Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс, 2002. 272 с.
4. Sharma C., Prashar D. Visible and invisible watermarking methods for quality loss of data // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering. 2012. Vol. 1, N. 3, P. 57—63.
5. Wu X., Sun W. Robust copyright protection scheme for digital images using overlapping DCT and SVD // Applied Soft Computing. 2013. Vol. 67. P. 652—664.
6. Huang Y., Lu W., Sun D. Long. Improved DCT-based detection of copy-move forgery in images // Forensic Science International. 2011. Vol. 206. P. 178—184.
7. Vaishnavi D. A., Subashini T. S. Secure and robust image watermarking system using normalization and arnold scrambling // International Journal of Network Security. Vol. 18, N. 5. P. 832—841.
8. Борисова С. Н. Использование алгоритма вейвлет-преобразования для встраивания цифровых водяных знаков в файлы изображений // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 3 (25). С. 110—115.
9. Белобокова Ю. А., Булатников Е. В. Метод многократной маркировки цифровых фотографий для защиты от фальсификации // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 2. С. 33—41.
10. Flusser J., Suk T., Zitova V. Moments and moment invariants in pater recognition. John Wiley & Sons, 2009. 306 p.
11. Hu M. K. Visual pattern recognition by moment invariants // IRE Trans. Inf. Theory. 1962. Vol. 8, N. 2. P. 179—187.
12. Chen Q., Yang X., Zhao J. Robust image watermarking with Zernike moments // IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2005. P. 1340—1343.
13. Karthik P., Sathiya Priya E. Robust and High-Secured Watermarking System Using Zernike Moments // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2014. Vol. 2. P. 7074—7079.
14. Hui Zhang, Huazhong Shu, Gouenou Coatrieux, Jie Zhu, Jonathan Wu. Affine Legendre moment invariants for image watermarking robust to geometric distortions // IEEE Transactions on Image Processing, Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2011. N. 20 (8). P. 2189—99.
15. Teague, M. R. Image analysis via the general theory of moments // Journal of the Optical Society of America. 1980. N. 70 (8). P. 920—930.
16. Ismail A. Ismail, Mohamed A. Shouman, Khalid M. Hosny, Hayam M. Abdel Salam. Invariant Image Watermarking Using Accurate Zernike Moments // Journal of Computer Science. 2010. N. 6 (1). P. 52—59.
17. Chandan Singha, Ekta Waliab. Fast and numerically stable methods for the computation of Zernike moments // Pattern Recognition. 2010. Vol. 43, P. 2497—2506.
18. Kintner E. C. A Recurrence Relation for Calculating the Zernike Polynomials // Journal of Modern Optics. 1976. N. 23 (6). P. 499—500.
19. Wang Xiang-yang, Liu Yu-nan, Li Shuo, Yang Hong-ying, Niu Pan-pan, Zhang Yan. A new robust digital watermarking using local polar harmonic Transform // Computers and Electrical Engineering. 2015. N. 46. P. 403—418.
20. Shi J., Tomasi C. Good Features to Track // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1994. P. 593—600.
21. Chandan Singh, Sukhjeet K. Ranade. An Effective Image Watermarking System for High Embedding Capacity // IJCA Proceedings on International Conference on Recent Advances and Future Trends in Information Technology. 2012. P. 22—28.
22. Сосновский М. С., Шниперов А. Н. Программный инструмент для маркирования изображений цифровым водяным знаком "ZWAT" // св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017610758. Правообладатель ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет (СФУ)", 2017.
23. Специализированная цифровая платформа обмена знаниями и управления авторскими правами IPUniversity. URL: <https://ipuniversity.ru> (дата обращения: 31.01.19).

A. N. Shniperov, Assistant Professor, e-mail: ashniperov@sfu-kras.ru,  
Siberian Federal University,

M. S. Sosnovskiy, Software Development Engineer, e-mail: maximsosnovskiy@gmail.com,

P. M. Shipulin, Software Development Engineer, e-mail: pshipulin@gmail.com,  
Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems

## The Robust Image Digital Watermark Labeling Method Based on Orthogonal Zernike Moments

Nowadays visible watermarks are usually used for the copyright protection of images. But this method does not give the best result in many cases. The best practices lie in the digital steganography field. In this article authors suggest a digital watermark labeling method for full-color images based on orthogonal Zernike moments calculated for certain image points (and their neighborhoods). Using only certain points makes the method applicable for any image sizes with good robustness features and low computation time (orthogonal Zernike moments calculation for big image is quite a difficult computation task). To find certain points the Shi-Tomasi corner detector algorithm is used. These points are invariant under affine transformation. The suggested method uses only blue channel of the RGB-model, because distortions in this channel are less visible for the human eye. For performance evaluation of the method some popular metrics were used: BER (Bit Error Rate), PSNR (Peak Signal-To-Noise Ratio), MSE (Mean Square Error), SSIM (Structural SIMilarity). A series of experiments illustrates high values of these metrics not only in case of simple digital watermark embedding but in case of the most popular active attacks on the labeling method: JPEG compression, image reflexing, scaling, rotating, cropping, noise adding. The group of tests proves the labeling method immunity to the majority of popular active attacks. So the suggested method can be regarded as an effective method for labeling images by invisible watermarking for copyright protection purposes.

**Keywords:** digital watermarks, steganography, image labeling, information security, copyright protection, image moments, Zernike moments

DOI: 10.17587/it.25.405-413

### References

1. Teh C. H., Chin R. T. *IEEE Trans Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1988, no. 10, pp. 496–513.
2. Harris C., Stephens M. *In Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester, UKm 1988, pp. 147–151.
3. Gribunin V. G., Okov I. N., Turincev I. V. *Digital steganography*, Moscow, Solon-Press, 2002, 272 p. (in Russian).
4. Sharma C., Prashar D. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering*, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 57–63.
5. Wu X., Sun W. *Applied Soft Computing*, 2013, vol. 67, pp. 652–664.
6. Huang Y., Lu W., Sun D. Long. *Forensic Science International*, 2011, vol. 206, pp. 178–184.
7. Vaishnavi D. A., Subashini T. S. *International Journal of Network Security*, vol. 18, no. 5, pp. 832–841.
8. Borisova S. H. *XXI vek: itogi proshlogo i problemi nastoyashego plus*, 2015, no. 3 (25), pp. 110–115 (in Russian).
9. Belobokova Y. A., Bulatnikov E. V. *Izvestiya vishih uchebnykh zavedeniy. Problemi Poligrafii i Izdatelskogo Dela*, 2014, no. 2, pp. 33–41 (in Russian).
10. Flusser J., Suk T., Zitova B. *Moments and moment invariants in patten recognition*, John Wiley & Sons, 2009, 306 p.
11. Hu M. K. *IRE Trans. Inf. Theory*, 1962, vol. 8, no. 2, pp. 179–187.
12. Chen Q., Yang X., Zhao J. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2005, pp. 1340–1343.
13. Karthik P., Sathiya Priya E. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2014, vol. 2, pp. 7074–7079.
14. Hui Zhang, Huazhong Shu, Gouenou Coatrieux, Jie Zhu, Jonathan Wu. *IEEE Transactions on Image Processing, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2011, no. 20 (8), pp. 2189–99.
15. Teague M. R. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, no. 70 (8), pp. 920–930.
16. Ismail A. Ismail, Mohamed A. Shouman, Khalid M. Hosny and Hayam M. Abdel Salam. *Journal of Computer Science*, 2010, no. 6 (1), pp. 52–59.
17. Chandan Singha, Ekta Waliab. *Pattern Recognition*, 2010, vol. 43, pp. 2497–2506.
18. Kintner E. C. *A Journal of Modern Optics*, 1976, no. 23 (6), pp. 499–500.
19. Wang Xiang-yang, Liu Yu-nan, Li Shuo, Yang Hong-ying, Niu Pan-pan, Zhang Yan. *Computers and Electrical Engineering*, 2015, no. 46, pp. 403–418.
20. Shi J., Tomasi C. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, pp. 593–600.
21. Chandan Singh, Sukhjeet K. Ranade. *IJCA Proceedings on International Conference on Recent Advances and Future Trends in Information Technology*, 2012, pp. 22–28.
22. Sosnovskiy M. S., Shniperov A. N. Software for Image labeling with digital watermark, svidetelstvo o gos. Registracii programmi dly EVM no 2017610758. Pravoobladatel FGAOU VO "Sibirskiy federalniy universitet (SFU)", 2017 (in Russian).
23. Special digital platform for knowledge exchanging and copyright management, available at: <https://ipuniversity.ru> (date of access: 16.01.19) (in Russian).