

## СИСТЕМА ВСТРАИВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ НА ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ СЕТКЕ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЯ

Веричев А.В., Федосеев В.А.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

### Аннотация

Представлена схема встраивания цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в изображения, использующая триангуляционную сетку опорных точек для обеспечения стойкости ЦВЗ к геометрическим искажениям. Рассмотрены способы построения множества опорных точек, выбран наиболее подходящий вариант. Описаны алгоритмы встраивания и извлечения информации. Особое внимание уделено методам модуляции встраиваемого ЦВЗ, основанным на особенностях визуального восприятия человека. Проведены экспериментальные исследования стойкости встраиваемого ЦВЗ к геометрическим искажениям.

**Ключевые слова:** цифровой водяной знак (ЦВЗ), стойкий ЦВЗ, геометрические искажения, триангуляция Делоне, особые точки, характеристические точки, детектор Харриса, SIFT.

### Введение

Одной из наиболее важных задач в области защиты мультимедийной информации является разработка систем встраивания стойких ЦВЗ. Подобные системы могут применяться для защиты авторских прав, защиты от копирования, для встраивания метаданных. Ключевым требованием к такого рода системам (а следовательно, и к алгоритмам встраивания информации) является стойкость как к непреднамеренным искажениям защищённого носителя информации, так и к преднамеренным атакам, ставящим цель удалить встроенную информацию или сделать её необнаруживаемой (неизвлекаемой) [1].

При разработке стойких ЦВЗ-систем для изображений одной из наиболее сложных задач является обеспечение стойкости к геометрическим искажениям. Известны два основных подхода, позволяющих решить эту задачу: встраивание ЦВЗ в области преобразования, инвариантного к геометрическим искажениям, или использование при встраивании и извлечении информации стойких опорных точек изображения.

В первом подходе, как правило, используется преобразование Фурье–Меллина, спектральные компоненты которого являются инвариантными к тройке преобразований: сдвигу, повороту и изотропному масштабированию, зачастую обозначаемых аббревиатурой RST (*rotation, scale and translation*) [1]. Алгоритмы встраивания ЦВЗ в области данного преобразования предложены в работах [2, 3, 4].

При использовании второго подхода стойкость ЦВЗ определяется двумя факторами: способом формирования множества опорных точек (а именно инвариантностью их набора к ряду преобразований изображения) и способом привязки отсчётов встраиваемого ЦВЗ к этому множеству. Оба способа можно совершенствовать независимо, если при привязке ЦВЗ не используются *дескрипторы* опорных точек – информация, позволяющая отличать одни точки от других и используемая главным образом при стереосопоставлении. Потенциально второй подход может позволить добиться стойкости к более широкому кругу преобразований, нежели RST.

В различных алгоритмах встраивания ЦВЗ для формирования множества точек использовались многие из известных методов обнаружения особых точек: детектор Харриса, детектор Харриса–Лапласа, SIFT, SURF, MSER и др. [5, 6, 7, 8, 9]. В большинстве алгоритмов встраивание информации осуществляется в эллиптические области с центрами в выбранных опорных точках, причём направления и длины полуосей вычисляются на основе дескрипторов. Очевидно, точное извлечение информации из таких областей возможно лишь при правильной реконструкции эллипсов на принятом искажённом изображении, то есть, помимо требований к алгоритму построения набора особых точек, возникают требования и к дескриптору их окрестностей.

Альтернативный подход, вовсе не требующий расчёта дескрипторов, был впервые предложен в работе Баса и коллег [10]. Множество опорных точек использовалось в нём для построения триангуляционной сетки Делоне, и в полученные треугольники производилось встраивание треугольного шаблона ЦВЗ. При точном обнаружении всех опорных точек и отсутствии неаффинных искажений такой подход гарантирует точное определение границ областей ЦВЗ. Однако предложенная Басом система имеет и свои недостатки:

1) для встраивания в треугольные области вместо прямоугольного шаблона ЦВЗ приходится использовать треугольный, полученный из квадратной матрицы отсеканием элементов выше главной диагонали. В результате одна из границ является ступенчатой, что приводит к сложностям при встраивании и ошибкам при извлечении ЦВЗ;

2) для приведения шаблона ЦВЗ к форме каждого из треугольников используется аффинное преобразование, а значит, ещё до встраивания происходит искажение встраиваемой информации, что может ухудшить качество извлечения ЦВЗ;

3) для построения набора особых точек в статье [10] использовался детектор Харриса, один из лучших на тот момент. Однако в настоящее время известны многие другие детекторы опорных точек, спо-

собные (по утверждению авторов) обеспечить лучшую воспроизводимость.

Настоящая работа посвящена разработке системы встраивания стойких ЦВЗ в изображения с использованием опорных точек. Почерпнув из работы [10] основную идею – построение триангуляционной сетки, мы исследовали различные альтернативные использованным Басом решения на других этапах встраивания и извлечения информации. Так, исследовались различные детекторы особых точек, методы извлечения информации, методы маскирования ЦВЗ; кроме того, предложен новый способ формирования и размещения на сетке шаблонов ЦВЗ.

Результаты работы изложены в настоящей статье, организованной следующим образом. В первом разделе описаны методы нахождения опорных точек изображения, а также методика и результаты их сравнительного исследования. Во втором разделе предложена процедура построения областей встраивания ЦВЗ на основе найденного набора особых точек. Третий раздел посвящён изложению алгоритмов встраивания и извлечения ЦВЗ, а в четвёртом описаны методы уменьшения видимости встроенного ЦВЗ и результаты их сравнительного исследования. В пятом, заключительном, разделе представлены результаты экспериментального исследования стойкости разработанной ЦВЗ-системы.

## 1. Построение множества опорных точек

### 1.1. Рассмотренные методы отыскания особых точек изображения

В качестве опорных точек было принято решение использовать так называемые характеристические, или особые, точки (англ.: *feature points*). Характеристическими называются такие точки изображения, локальные окрестности которых обладают некоторыми отличительными особенностями в сравнении с окрестностями большинства других точек изображения [9]. Характеристические точки применяются при решении целого ряда задач, от создания панорамных снимков до распознавания и отслеживания движущихся образов [11]. Важнейшим свойством характеристических точек, обуславливающим их применимость в системах встраивания ЦВЗ, является высокая *воспроизводимость*: точки находятся на том же месте, несмотря на изменение угла обзора или освещения наблюдаемой сцены. Благодаря этому свойству они являются основой стойкости разрабатываемой системы ЦВЗ.

В литературе описано большое количество методов отыскания хорошо воспроизводимых точек. В рамках нашей работы рассматривались три: Harris [5], Achard-Rouquet [6] и Scale Invariant Feature Transform (SIFT) [7].

### 1.2. Методика и результаты сравнения детекторов особых точек

С целью выбора наиболее подходящего детектора для системы встраивания ЦВЗ было произведено сравнительное исследование, включающее следующие шаги:

- на исходном изображении находится набор характеристических точек  $P_{orig}$ ;
- изображение подвергается одному из искажений (см. ниже);
- на искажённом изображении находится набор характеристических точек  $P_{dist,i}$ ;
- по набору  $P_{dist,i}$  строится триангуляция  $Tri_{dist,i}$ ;
- для каждого искажения вычисляется величина, равная отношению количества треугольников в  $Tri_{dist,i}$ , целиком состоящих из точек, сохранившихся после искажения, к общему числу треугольников:

$$S_{dist,i} = \frac{TP}{TP + FA},$$

где  $TP$  – количество треугольников в триангуляции  $Tri_{dist,i}$ , все вершины которых – точки, содержащиеся также и в исходном наборе  $P_{orig}$ ,  $FP$  – остальные треугольники в  $Tri_{dist,i}$ ;

– формальный показатель качества  $S$  определяется как среднее значений  $S_{dist,i}$ :

$$S = \frac{1}{N} \sum_i S_{dist,i},$$

где  $N$  – количество искажений  $S_{dist,i}$ .

В качестве тестовых искажений, как и в работе [10], использовались:

- поворот (на угол от 20° до 220° с шагом 20°);
- масштабирование (с коэффициентом от 0,9 до 0,5);
- JPEG-сжатие (с параметром качества от 90 до 50);
- наложение шума (равномерный шум с пиковым значением от 50 до 10 уровней яркости).

Стоит отметить, что точки из наборов  $P_{orig}$  и  $P_{dist,i}$  считаются одинаковыми только в том случае, если обе их координаты совпадают, в то время как иногда в результате искажения точка «переселяется» на соседний пиксель, и хотя при этом триангуляция точно не восстанавливается, в большинстве случаев ЦВЗ всё же удаётся детектировать.

Для этого и последующих исследований в данной работе использовались семь изображений из известного тестового набора Университета Ватерлоо [12] (рис. 1).

Результаты проведённого тестирования представлены на рис. 2, на котором видно, что на большей части тестовых изображений наилучшие результаты показал детектор SIFT, при этом на тех изображениях, где его значения меньше, разница между значением SIFT и наилучшим невелика. Это означает, что в исследуемой системе встраивания ЦВЗ целесообразно использовать именно этот детектор.

## 2. Формирование примитивов для встраивания ЦВЗ

Наличие набора хорошо воспроизводимых опорных точек позволяет определить на их основе области, в которые будет произведено встраивание ЦВЗ – *примитивы встраивания*.

Как отмечалось во введении, в первую очередь на основе множества опорных точек строится триангуляция Делоне. Она обладает рядом несомненных плю-

сов для встраивания ЦВЗ ввиду того, что почти всегда единственна и максимизирует сумму минимальных углов всех треугольников (а значит, состоит преимущественно из треугольников, близких к равносторонним) [13]. Ещё одним преимуществом использования триангуляции Делоне является существование эффективных алгоритмов её построения.



Рис. 1. Использованные тестовые изображения из набора Университета Ватерлоо: barb, boat, bridge, golhill, lena, mandrill, peppers

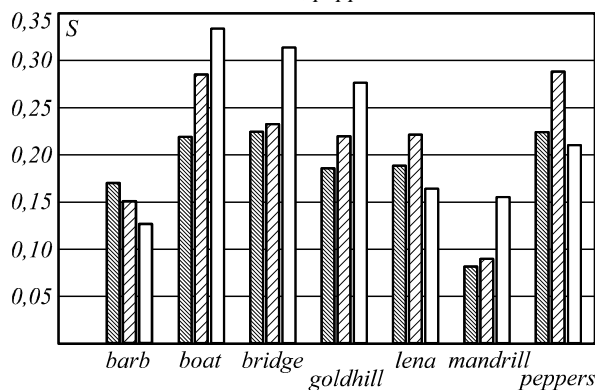


Рис. 2. Результаты сравнительного исследования детекторов особых точек: значения показателя  $S$  для разных изображений. Обозначения столбцов:  $H$  – Harris,  $AR$  – Acharh-Rouquet,  $S$  – SIFT

Построенная триангуляционная сетка предоставляет в наше распоряжение возможные примитивы встраивания – треугольники. Однако их использование при встраивании ЦВЗ сопряжено с возможными проблемами, связанными с отображением шаблона ЦВЗ на треугольные области. В работе [10] предложено строить отображение, основываясь на величине углов, при этом прямой угол шаблона отображается на наибольший угол треугольника (рис. 3).

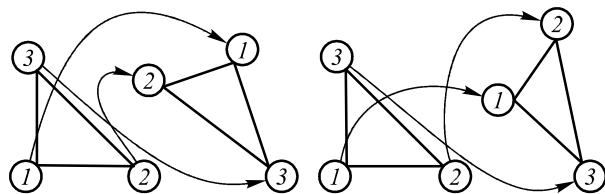


Рис. 3. Способ отображения шаблона ЦВЗ (прямоугольного треугольника) на произвольный треугольник, предложенный в [10]

Однако такой подход может приводить к большому числу ошибок при отображении на треугольники, близкие к равносторонним, а кроме того, возникает упомянутая выше проблема аппроксимации ступен-

чатой границы. Поэтому в настоящей работе в качестве примитивов встраивания предлагается использовать четырёхугольники, получаемые из треугольников путём разбиения точкой пересечения медиан, как показано на рис. 4.

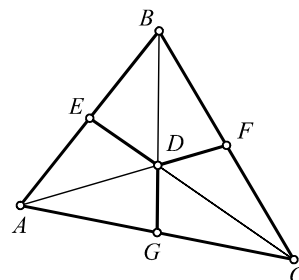


Рис. 4. Разбиение треугольника  $ABC$  на три четырёхугольника:  $AEDG$ ,  $BEDF$ ,  $CGDF$

Шаблон ЦВЗ в этом случае будет являться квадратной матрицей со значениями  $\pm 1$ , которая преобразуется в каждый из четырёхугольников путём геометрической трансформации. Результатом этого процесса является изображение  $w(n_1, n_2)$ , называемое в дальнейшем *встраиваемым сигналом*, размер которого равен изображению-контейнеру, а значения равны  $\pm 1$  и определяются путём отображений шаблонов ЦВЗ на четырёхугольники (рис. 5).

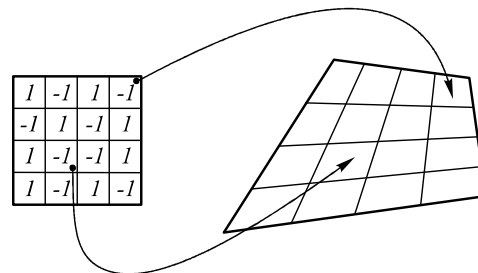


Рис. 5. Разбиение четырёхугольника на сетку и отображение значений шаблона ЦВЗ на ячейки построенной сетки

На рис. 6 показан пример  $w(n_1, n_2)$  для шаблона ЦВЗ размерами  $8 \times 8$ . В дальнейшем осуществляется встраивание  $w(n_1, n_2)$  в исходный контейнер.

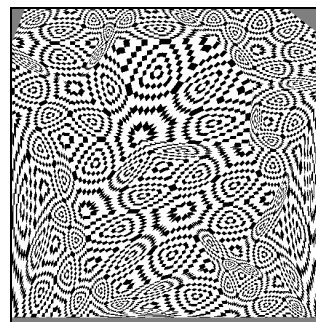


Рис. 6. Пример встраиваемого сигнала  $w(n_1, n_2)$

### 3. Алгоритмы встраивания и детектирования ЦВЗ

В исследуемой системе ЦВЗ представляется в виде квадратной матрицы, элементы которой равны  $\pm 1$ . Встраивание производится аддитивно. Извлечение заключается в определении факта наличия (или отсутствия) встроенного ЦВЗ, иными словами, система

детектирует ЦВЗ, причём для этого не требуется исходный контейнер. Таким образом, исследуемая система принадлежит к классу слепых с детектором.

### 3.1. Алгоритм встраивания ЦВЗ

Встраивание ЦВЗ осуществляется в каждый из четырёхугольных примитивов. Таким образом, встраивание является избыточным, что повышает надёжность системы. Встраивание реализуется в соответствии с аддитивной моделью:

$$C^w(n_1, n_2) = C(n_1, n_2) + \alpha(n_1, n_2) \cdot w(n_1, n_2), \quad (1)$$

где  $C^w(n_1, n_2)$  – изображение с ЦВЗ (носитель информации),  $C(n_1, n_2)$  – исходное изображение – контейнер,  $w(n_1, n_2)$  – встраиваемый сигнал,  $\alpha(n_1, n_2)$  – масштабирующий коэффициент, модулирующий значение ЦВЗ в соответствии с особенностями зрительного восприятия человека, подробно рассматриваемый в разделе 4.

### 3.2. Алгоритм детектирования ЦВЗ

В исследуемой схеме встраивания ЦВЗ для детектирования используется линейная корреляция. Из изображения извлекаются примитивы встраивания, которые коррелируются с соответствующими им частями встроенного сигнала, после чего значения корреляции сравниваются с некоторым порогом. ЦВЗ детектируется в тех примитивах, значение корреляции у которых выше этого порога.

Предположим, что в тестируемое изображение  $C^w$  был встроен шаблон ЦВЗ  $W$ . Далее в этом разделе, говоря о том, что  $W$  был встроен, будем подразумевать то, что ЦВЗ *мог быть* встроен в данное изображение. Детектированию предшествуют шаги по нахождению опорных точек, построению триангуляции и примитивов встраивания  $Q_i$ . Далее по набору четырёхугольников  $Q_i$  формируются сигналы  $w_i(n_1, n_2)$  – части встроенного сигнала, соответствующие данному примитиву и шаблону ЦВЗ. Многочисленные эксперименты, проведённые как авторами работы [10], так и авторами настоящей работы, свидетельствуют о том, что перед вычислением корреляции следует произвести фильтрацию  $C^w$ . Для этого производится оценка масштабирующих множителей, использованных при встраивании, далее обозначаемая  $\hat{\alpha}(n_1, n_2)$ . Это позволяет получить оценку сигнала, непосредственно встроенного в каждый из примитивов:

$$\tilde{w}_i(n_1, n_2) = \hat{\alpha}(n_1, n_2) \cdot w_i(n_1, n_2). \quad (2)$$

Располагая данной оценкой, мы можем использовать фильтр Винера и получить отфильтрованное изображение, соответствующее  $i$ -му примитиву:

$$C_i^w(n_1, n_2) = \frac{\sigma_{\tilde{w}_i}^2(n_1, n_2)}{\sigma_{\tilde{w}_i}^2(n_1, n_2) + \sigma_{C^w}^2(n_1, n_2)} \times (C^w(n_1, n_2) - E_{C^w}(n_1, n_2)), \quad (3)$$

где  $\sigma_{\tilde{w}_i}^2(n_1, n_2)$  – локальная выборочная дисперсия встроенного сигнала,  $\sigma_{C^w}^2(n_1, n_2)$  – локальная диспер-

сия изображения с ЦВЗ,  $E_{C^w}(n_1, n_2)$  – локальное выборочное среднее изображения  $C^w$ . Все выборочные моменты вычисляются в прямоугольной области  $9 \times 9$ .

С помощью полученных отфильтрованных изображений  $C_i^w(n_1, n_2)$  и оценок встроенных сигналов  $\tilde{w}_i(n_1, n_2)$  вычисляется набор величин корреляций:

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_N)^T, \quad (4)$$

$$z_i = \frac{1}{\mu(Q_i)} \sum_{n_1, n_2 \in Q_i} C_i^w(n_1, n_2) \cdot \tilde{w}_i(n_1, n_2), \quad (5)$$

где  $\mu(Q_i)$  – площадь  $i$ -го четырёхугольника.

Получив в распоряжение набор  $z$ , принятие решения о наличии ЦВЗ во всём изображении может быть произведено двумя способами [10]. Первый заключается в том, что каждое из них сравнивается с некоторым пороговым значением  $\tau_{local}$ , и если

$$z_i \geq \tau_{local}, \quad (6)$$

то ЦВЗ детектируется в  $i$ -м примитиве. Окончательное решение о наличии ЦВЗ во всём изображении принимается методом голосования большинства. Этот способ называется *локальным детектированием*: название отражает тот факт, что значения корреляции сравниваются с порогом независимо для каждого примитива встраивания – локально.

Другой способ, называемый *глобальным детектированием*, предполагает вычисление выборочного среднего значений корреляции по всем  $N$  примитивам:

$$Z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i. \quad (7)$$

При этом ЦВЗ детектируется во всём изображении, если:

$$Z \geq \frac{\tau_{local}}{\sqrt{N_Q}}. \quad (8)$$

Важнейшей задачей является определение порогового значения  $\tau_{local}$ . Допустим, что в изображение  $C^w$  встроен шаблон  $W$ . Допустим также, что по изображению найден набор примитивов  $Q_i$ . Для определения порогового значения  $\tau_{local}$  генерируются 1000 равномерно распределённых шаблонов ЦВЗ  $W_j$ , отличных от  $W$ . Для каждого шаблона  $W_j$  и каждого четырёхугольника  $Q_i$  с помощью процедуры, описанной выше, находятся значения  $z_i$ , которые являются реализациями случайной величины  $X = z(C^w, \tilde{w}_{ij})$ , где  $\tilde{w}_{ij}$  – оценка части встроенного сигнала, соответствующей  $i$ -му примитиву и  $j$ -му шаблону ЦВЗ. Случайная величина  $X$  является значением корреляции, то есть суммой независимых случайных величин, соответствующих компонентам детектируемого сигнала, а значит, имеет нормальное распределение (что подтверждается гистограммой значений  $X$  для изображения *peppers*, представленной на рис. 7). По найденным значениям  $z_i$  оцениваются параметры распределения  $m$  и  $s^2$ .

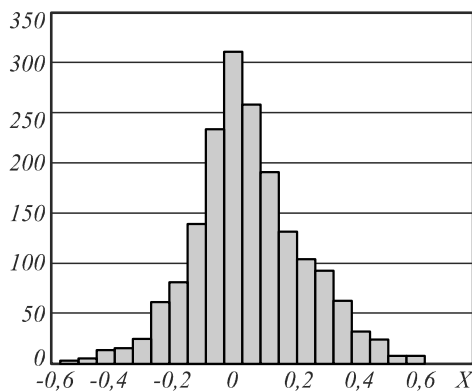


Рис. 7. Гистограмма значений корреляции  $X$  для изображения *peppers*

Событие  $\{X \geq \tau_{local}\}$  означает ложное срабатывание. Фиксируя вероятность ложного срабатывания  $P_{fa}$ , имеем тождество

$$P_{fa} = P(X \geq \tau_{local}) = \int_{\tau_{local}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (9)$$

откуда легко находится значение порога.

#### 4. Усиление компоненты ЦВЗ при встраивании

Важнейшее влияние на стойкость и визуальную заметность ЦВЗ оказывает компонента  $\alpha(n_1, n_2)$  в формуле (1), для каждого пикселя изображения  $(n_1, n_2)$  задающая коэффициент усиления составляющей встраиваемой информации  $w(n_1, n_2)$ . В целом повышение значений  $\alpha(n_1, n_2)$  влечёт увеличение стойкости ЦВЗ, но ценой ухудшения качества изображения-носителя ЦВЗ. Поэтому задача выбора  $\alpha(n_1, n_2)$  может быть поставлена следующим образом: отыскать такую  $\alpha(n_1, n_2)$ , которая обеспечивала бы наибольшую стойкость при фиксированном уровне визуального качества изображения.

Поскольку зрительная система человека обладает неоднородной восприимчивостью к изменениям яркости, к примеру, она выше в однородных и тёмных областях и ниже в областях текстур и на границах объектов, то объективные меры вносимых при встраивании искажений (MSE, PSNR, средняя абсолютная ошибка) не могут в данном случае являться подходящими мерами качества изображения. Более подходящим показателем является SSIM (*Structural Similarity Index*), являющийся не мерой ошибки, а мерой структурного сходства двух изображений и лучше согласующийся со свойствами человеческого зрения [14].

В свою очередь стойкость носителя информации во многом определяется совокупной долей компоненты ЦВЗ, входящей в его состав (если алгоритм встраивания фиксирован и справедлива формула (1)), поэтому при выборе маски  $\alpha(n_1, n_2)$  в качестве неявной меры стойкости можно использовать PSNR-носитель информации.

##### 4.1. Методы маскирования ЦВЗ

В ходе исследований нами были рассмотрены 4 варианта построения масок  $\alpha(n_1, n_2)$ :

1. Постоянный множитель:  $\alpha(n_1, n_2) = \text{const}$ .
2. «Маска Барни», предложенная в работе [15]:

$$\alpha(n_1, n_2) = D \cdot \frac{\sigma_{R \times R}^2(n_1, n_2)}{\max_{n_1, n_2} \sigma_{R \times R}^2(n_1, n_2)}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{R \times R}^2(n_1, n_2)$  – поле локальной дисперсии, рассчитанной в окне  $R \times R$ , а  $D$  – постоянный множитель.

3. «Функция видимости ошибки» (Noise Visibility Function, NVF) [16]:

$$\alpha(n_1, n_2) = (1 - NVF(n_1, n_2)) \cdot S_1 + NVF(n_1, n_2) \cdot S_2, \quad (11)$$

где

$$NVF(n_1, n_2) = \frac{1}{1 + \theta \frac{\sigma_{R \times R}^2(n_1, n_2)}{\max_{n_1, n_2} \sigma_{R \times R}^2(n_1, n_2)}}, \quad (12)$$

$\theta, S_1, S_2$  – параметры.

4. Маска «едва различимых искажений» (*Just Noticeable Distortion, JND*), рассчитываемая по методу Ву и коллег [17] путём применения многошаговой процедуры, включающей расчёт функций структурной неоднородности и адаптации к изменению яркости и использующей локальные градиенты, локальные бинарные шаблоны (LBP) и модель зрительной системы человека (*Human Visual System, HVS*).

##### 4.2. Сравнительное исследование различных способов маскирования

Для выбора маски было проведено моделирование встраивания ЦВЗ: по формуле (1) к контейнеру добавлялось псевдослучайное поле  $w(n_1, n_2)$ , состоящее из мелких многоугольников различной формы, заполненных значениями  $\pm 1$ . Далее происходила автоматическая настройка параметров, используемых при расчёте  $\alpha(n_1, n_2)$ , таким образом, чтобы результат имел фиксированное значение PSNR, после чего осуществлялся расчёт SSIM для того же изображения. Аналогичным образом был построен и второй набор данных – значения PSNR при фиксированных SSIM.

Усреднённые по семи изображениям используемого набора результаты представлены в виде графиков на рис. 8а, б. На первом из них лучшей является маска, обеспечивающая большее значение SSIM при фиксированном PSNR, на втором – напротив, лучшей является маска, достигающая заданного уровня SSIM при меньшем PSNR. Другими словами, в обоих случаях наилучшей признавалась маска, обеспечивающая наибольшее значение отношения SSIM/PSNR, где SSIM отражает визуальное качество изображения, а PSNR – стойкость ЦВЗ. На обоих графиках наилучшие результаты показала маска Барни, на втором месте – JND. NVF существенно проигрывает им. Как и ожидалось, худшей оказалась постоянная маска.

Полученные результаты подтвердились и собственно при анализе результатов встраивания ЦВЗ. На рис. 9 показаны результаты встраивания сигнала, изображённого на рис. 6, в изображение *mandrill* из рас-

сматриваемого набора с умышленно заниженным значением PSNR, равным 25. На изображениях, полученных с использованием постоянного множителя и маски NVF, весьма заметна структура ЦВЗ, практически неразличимая при использовании маски JND и особенно маски Барни. Эта визуальная оценка согласуется и со значениями SSIM, отмеченными в подписи к данному рисунку. Для справки на рис. 10 показаны поля  $\alpha(n_1, n_2)$  для рассмотренного изображения. Таким образом, в ходе данного исследования наилучшим образом показала себя маска Барни, поэтому она и была использована в последующих экспериментах при проверке работоспособности всей системы.

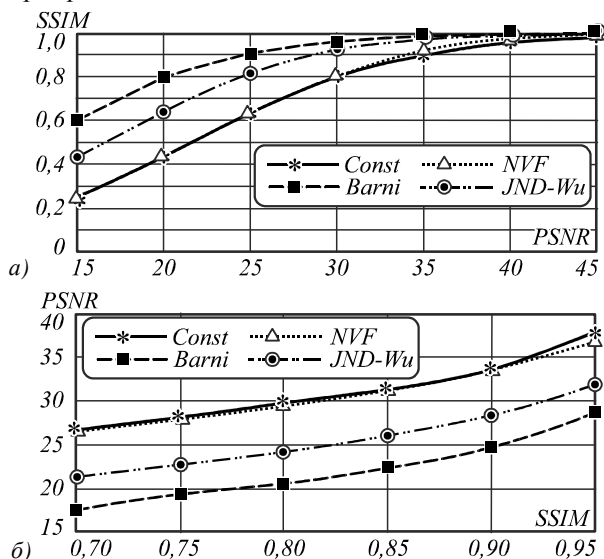


Рис. 8. Графики значений SSIM при различных PSNR (а) и PSNR при различных SSIM (б), полученных в результате моделирования встраивания ЦВЗ с разными масками  $\alpha(n_1, n_2)$ : Const – постоянный множитель, Barni – маска Барни (10), NVF – функция видимости ошибки (11), JND-Wu – маска едва различимых искажений по методу Wu

## 5. Экспериментальные исследования работоспособности предложенной системы

### 5.1. Определение встроенного ЦВЗ среди набора вариантов

Для начала остановимся на отдельном исследовании, призванном показать, что предложенная система позволяет не только детектировать встраиваемые ЦВЗ, но и отличать разные ЦВЗ друг от друга. Для этого было выбрано 100 тестовых ЦВЗ в виде строк матрицы Адамара размером  $256 \times 256$ , и один из них (под номером 40) был встроено в изображение “перс” из рассматриваемого набора. После этого вычислялись значения линейной корреляции полученного изображения со всеми 100 ЦВЗ по формуле (7).

На рис. 11 приведены результаты данного эксперимента. По оси абсцисс отмечены номера шаблонов ЦВЗ, а по оси ординат – значения линейной корреляции без использования и с использованием фильтра Винера. На обоих графиках значение, соответствующее 40-му шаблону ЦВЗ, обведено кружком.

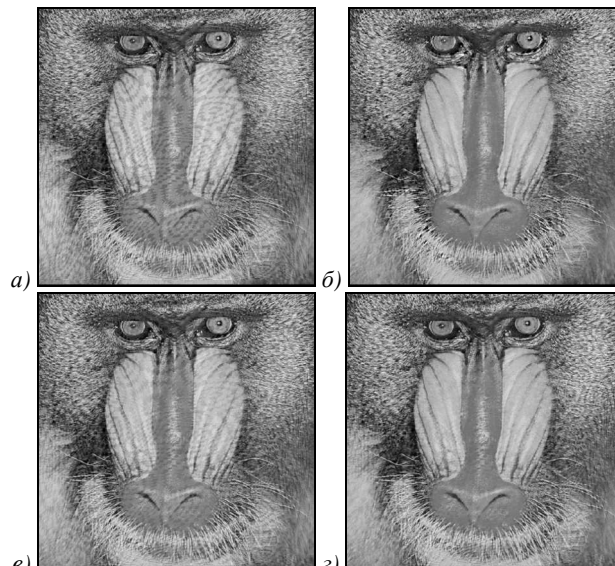


Рис. 9. Результаты встраивания сигнала с рис. 6 в изображение “mandrill” с PSNR=25 и маской: постоянной – SSIM=0,786 (а), Барни – SSIM=0,922 (б), NVF – SSIM=0,822 (в), JND – SSIM=0,875 (г)

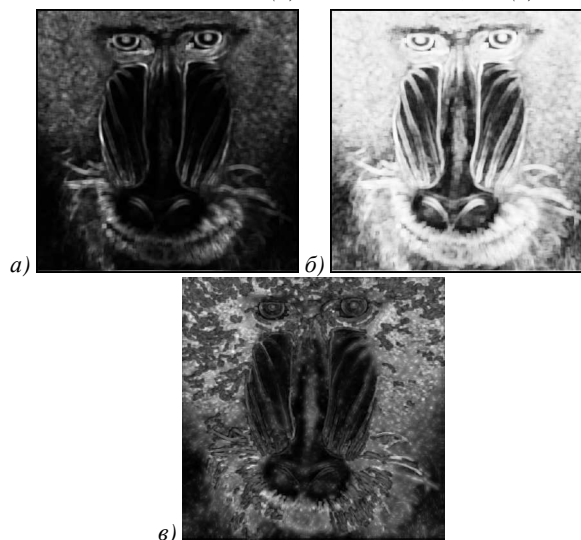


Рис. 10. Маски Барни (а), NVF (б) и JND (в) для изображения “mandrill”

На основании приведённых графиков можно сделать вывод, что система позволяет эффективно различать ЦВЗ при использовании фильтра Винера.

### 5.2. Стойкость к повороту и масштабированию

Для проверки стойкости предложенной системы к геометрическим искажениям производилась серия экспериментов. Сначала в каждое из тестовых изображений встраивался ЦВЗ.

Шаблон ЦВЗ генерировался случайным образом. Для визуальной модуляции встраиваемого сигнала использовалась маска Барни с коэффициентом  $D=40$ ; средние по всем тестовым изображениям значения PSNR и SSIM в данном случае были равны соответственно 25 и 0,899. Далее носитель информации подвергался искажению: повороту на один из углов от  $5^\circ$  до  $40^\circ$  с шагом  $5^\circ$  или масштабированию с коэффициентом от 0,5 до 1,7 с шагом 0,2. После искажения

осуществлялось детектирование ЦВЗ из каждого полученного изображения, для вычисления адаптивных пороговых значений по формуле (9) использовалось значение вероятности ложного срабатывания, равное  $10^{-6}$ .

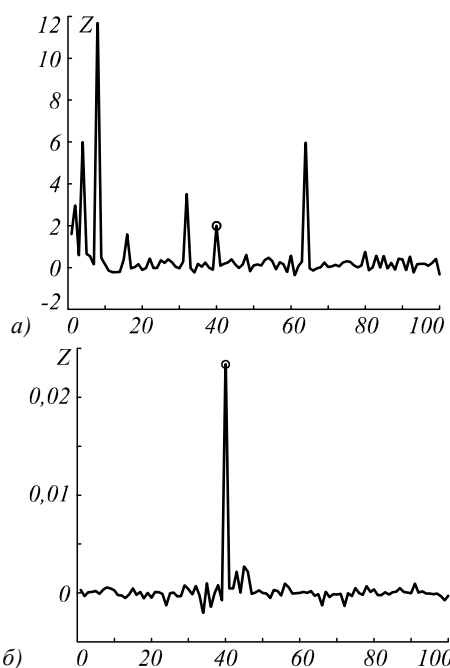


Рис. 11. Значения линейной корреляции носителя информации с разными шаблонами ЦВЗ без использования (а) и с использованием (б) фильтра Винера. Пик значений соответствует встроенному ЦВЗ

Результаты исследования по каждому из двух искажений при разных способах детектирования отражены в табл. 1–4. Эти результаты позволяют отдать предпочтение глобальному способу детектирования перед локальным и сделать вывод о стойкости системы даже при значительных углах поворота. Также можно сделать вывод о том, что при глобальном детектировании обеспечивается приемлемая стойкость к масштабированию, причём искажения, связанные с потерей информации (т.е. с коэффициентом меньше 1), в большей степени влияют на качество детектирования ЦВЗ.

Преимущество глобального детектирования перед локальным объясняется тем, что в результате искажений зачастую сохраняется меньше половины треугольников, построенных по набору характеристических точек (рис. 1), а значит, и число примитивов встраивания, сохранившихся после искажения, также меньше половины. Это приводит к пропуску ЦВЗ при локальном подходе, в то время как при глобальном способе ЦВЗ всё ещё может быть успешно детектирован.

### Заключение

В данной работе осуществлена попытка построения ЦВЗ-системы, использующей триангуляционную сетку опорных точек изображения-контейнера для обеспечения стойкости ЦВЗ к геометрическим искажениям. Для каждого из этапов обработки данных, входящих в состав системы, исследовались различные альтернативные методы и алгоритмы.

Табл. 1. Результаты глобального детектирования ЦВЗ после поворота изображения, «+» обозначает успешное детектирование

	5	10	15	20	25	30	35	40
barb	+	+	+	+	-	-	+	-
boat	+	+	+	+	+	+	+	+
bridge	+	+	+	+	+	+	+	-
goldhill	+	+	+	+	+	+	+	+
lena	+	+	+	+	-	+	-	-
mandrill	+	+	+	+	+	+	+	-
peppers	+	+	+	+	+	-	+	-

Табл. 2. Результаты локального детектирования ЦВЗ после поворота изображения, «+» обозначает успешное детектирование

	5	10	15	20	25	30	35	40
barb	-	-	-	+	+	+	+	-
boat	+	+	-	+	-	-	+	-
bridge	+	+	+	-	-	+	-	+
goldhill	-	+	-	+	+	+	+	-
lena	+	-	-	-	-	-	-	-
mandrill	-	+	-	-	+	-	+	-
peppers	-	-	+	+	+	+	+	-

Табл. 3. Результаты глобального детектирования ЦВЗ после масштабирования изображения, «+» обозначает успешное детектирование

	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7
barb	-	-	+	+	+	+	-
boat	+	+	+	+	+	+	+
bridge	+	+	+	+	+	+	+
goldhill	+	+	+	+	+	-	+
lena	-	-	+	+	+	+	+
mandrill	-	+	+	+	+	+	+
peppers	-	+	+	+	+	+	-

Табл. 4. Результаты локального детектирования ЦВЗ после масштабирования изображения, «+» обозначает успешное детектирование

	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7
barb	-	-	-	-	-	+	-
boat	-	-	+	-	+	+	+
bridge	-	-	-	-	+	+	+
goldhill	-	-	+	-	+	+	+
lena	-	-	-	-	-	-	-
mandrill	-	-	-	-	+	+	-
peppers	-	-	-	-	-	+	+

Так, осуществлены сравнительные исследования различных детекторов особых точек, а также различных способов маскирования и детектирования встроенной информации. В результате проведённых исследований наилучшим образом проявили себя детектор точек SIFT, маска Барни и глобальный способ детектирования ЦВЗ с предварительной обработкой изображения фильтром Винера. Дальнейшие экспериментальные исследования стойкости полученной системы к ложным срабатываниям и геометрическим искажениям показали хорошие результаты даже при отсутствии видимых артефактов, вызванных встраиванием ЦВЗ.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-01-00822, 12-07-00021, 12-07-31056, 13-01-12080, 13-01-97007), гранта президента РФ МК-3863.2013.9 и при поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 годы.

**Литература**

- Barni, M.** Watermarking Systems Engineering: Enabling Digital Assets Security and Other Applications / M. Barni, F. Bartolini. – Marcel Dekker, 2004.
- Zheng, D.** RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation / D. Zheng, J. Zhao, A.E. Saddik // Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on. – 2003. – Vol. 13(8). – P. 753-765.
- Glumov, N.I.** The New Blockwise Algorithm for Large-Scale Images Robust Watermarking / N.I. Glumov, V.A. Mitekin // Proceedings of ICPR-2010. – 2010. – P. 1453-1456.
- Глумов, Н.И.** Алгоритм поблочного встраивания стойких ЦВЗ в крупноформатные изображения / Н.И. Глумов, В.А. Митекин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 368-372.
- Harris, C.** A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens // In Alvey Vision Conference. – 1988. – Vol. 15. – P. 50.
- Achard-Rouquet, C.** Un détecteur de points caractéristiques sur des images multispectrales, extension vers un détecteur sub-pixellique / C. Achard-Rouquet, E. Bigorgne, J. Devars // GRETSI. – 1999. – P. 627-630.
- Lowe, D.G.** Distinctive image features from scale-invariant keypoints / D.G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60(2). – P. 91-110.
- Matas, J.** Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions / J. Matas, O. Chum, M. Urba, T. Pajdla // Proceedings of British Machine Vision Conference. – 2002. – P. 384-396.
- Tuytelaars, T.** Local invariant feature detectors: a survey / T. Tuytelaars, K. Mikolajczyk // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2008. – Vol. 3(3). – P. 177-280.
- Bas, P.** Geometrically invariant watermarking using feature points / P. Bas, J-M. Chassery, B. Macq // Image Processing, IEEE Transactions on. – 2002. – Vol. 11(9). – P. 1014-1028.
- Szeliski, R.** Computer vision: algorithms and applications / R. Szeliski. – Springer, 2010.
- Waterloo Grey Set. – University of Waterloo Fractal coding and analysis group: Mayer Gregory Image Repository, 2009. [http://links.uwaterloo.ca/Repository.html .
- Скворцов, А.В.** Триангуляция Делоне и её применение / А.В. Скворцов. – Томск: Издательство Томского университета, 2002. – 128 с.
- Wang, Z.** Image quality assessment: From error measurement to structural similarity / Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, E.P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13(1).
- Piva, A.** DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image / A. Piva, M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini // 1997 Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. – 1997. – Vol. 1. – P. 520-523.
- Voloshynovskiy, S.** A stochastic approach to content adaptive digital image watermarking / S. Voloshynovskiy, A. Herrigel, N. Baumgaertner, T. Pun // Information Hiding. – 2000. – P. 211-236.
- Wu, J.** Pattern Masking Estimation in Image With Structural Uncertainty / J. Wu, W. Lin, G. Shi, Xiaotian Wang, and Fu Li // IEEE Transaction on Image Processing. – 2013. – Vol. 22(12). – P. 4892-4904.

**References**

- Barni, M.** Watermarking Systems Engineering: Enabling Digital Assets Security and Other Applications / M. Barni, F. Bartolini. – Marcel Dekker, 2004.
- Zheng, D.** RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation / D. Zheng, J. Zhao, A.E. Saddik // Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on. – 2003. – Vol. 13(8). – P. 753-765.
- Glumov, N.I.** The New Blockwise Algorithm for Large-Scale Images Robust Watermarking / N.I. Glumov, V.A. Mitekin // Proceedings of ICPR-2010. – 2010. – P. 1453-1456.
- Glumov, N.I.** The algorithm for large-scale images robust watermarking using blockwise processing / N.I. Glumov, V.A. Mitekin // Computer Optics. – 2011. – Vol. 35(3). – P. 368-372. – (In Russian).
- Harris, C.** A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens // In Alvey Vision Conference. – 1988. – Vol. 15. – P. 50.
- Achard-Rouquet, C.** Un détecteur de points caractéristiques sur des images multispectrales, extension vers un détecteur sub-pixellique / C. Achard-Rouquet, E. Bigorgne, J. Devars // GRETSI. – 1999. – P. 627-630.
- Lowe, D.G.** Distinctive image features from scale-invariant keypoints / D.G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60(2). – P. 91-110.
- Matas, J.** Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions / J. Matas, O. Chum, M. Urba, T. Pajdla // Proceedings of British Machine Vision Conference. – 2002. – P. 384-396.
- Tuytelaars, T.** Local invariant feature detectors: a survey / T. Tuytelaars, K. Mikolajczyk // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2008. – Vol. 3(3). – P. 177-280.
- Bas, P.** Geometrically invariant watermarking using feature points / P. Bas, J-M. Chassery, B. Macq // IEEE Transactions on Image Processing. – 2002. – Vol. 11(9). – P. 1014-1028.
- Szeliski, R.** Computer vision: algorithms and applications / R. Szeliski. – Springer, 2010.
- Waterloo Grey Set. – University of Waterloo Fractal coding and analysis group: Mayer Gregory Image Repository, 2009. [http://links.uwaterloo.ca/Repository.html .
- Skvortsov, A.V.** Delaunay tessellation and its application. / A.V. Skvortsov. – Tomsk: Tomsk University Press, 2002. – 128 p. – (In Russian).
- Wang, Z.** Image quality assessment: From error measurement to structural similarity / Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, E.P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13(1).
- Piva, A.** DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image / A. Piva, M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini // 1997 Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. – 1997. – Vol. 1. – P. 520-523.
- Voloshynovskiy, S.** A stochastic approach to content adaptive digital image watermarking / S. Voloshynovskiy, A. Herrigel, N. Baumgaertner, T. Pun // Information Hiding. – 2000. – P. 211-236.
- Wu, J.** Pattern Masking Estimation in Image With Structural Uncertainty / J. Wu, W. Lin, G. Shi, Xiaotian Wang, and Fu Li // IEEE Transaction on Image Processing. – 2013. – Vol. 22(12). – P. 4892-4904.



**DIGITAL IMAGE WATERMARKING ON TRIANGLE GRID OF FEATURE POINTS**

A.V. Verichev, V.A. Fedoseev

*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,  
Samara State Aerospace University***Abstract**

The paper presents a digital watermarking scheme robust to geometric distortions of an image. The proposed scheme is based on Delaunay tessellation built on a set of feature points. Various feature points extraction methods are outlined and the best one for the watermarking scheme is chosen. Embedding and extracting algorithms are presented, emphasize being on the procedures of perceptual masking of the embedded watermark according to the human visual system. Numerical experiments are performed to demonstrate robustness of the proposed watermarking scheme to a wide range of geometric distortions.

**Key words:** digital watermarking, robust watermarking, geometric distortions, Delaunay triangulation, feature points, Harris detector, SIFT.

**Сведения об авторах**

**Веричев Александр Владимирович**, 1991 года рождения, в 2013 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем». В данный момент является аспирантом СГАУ. Стажёр-исследователь Института систем обработки изображений РАН. Области научных интересов: обработка и анализ изображений, цифровые водяные знаки, стеганография, криптография.

E-mail: [alexanderverichev@gmail.com](mailto:alexanderverichev@gmail.com).

**Alexander Vladimirovich Verichev** (b. 1991) graduated (2013) from S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2013, majoring in Information Security Integrating Support of Computer-Aided Systems, postgraduate student of SSAU. Trainee researcher of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests include image processing, digital watermarking and steganography, cryptography.



**Федосеев Виктор Андреевич**, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладная математика и информатика», кандидат физико-математических наук (2012). В настоящее время работает научным сотрудником лаборатории математических методов обработки изображений Института систем обработки изображений РАН и ассистентом кафедры геоинформатики и информационной безопасности СГАУ. Области научных интересов: обработка и анализ изображений, цифровые водяные знаки, стеганография.

E-mail: [vicanfed@gmail.com](mailto:vicanfed@gmail.com).

**Victor Andreevich Fedoseev** (b. 1986) graduated (2009) from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Computer Science. PhD in Computer Science (2012). Currently he is a research scientist in the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences and assistant professor at the Geoinformatics and Information Security department at SSAU. His current research interests include image processing and image analysis, digital watermarking and steganography.

*Поступила в редакцию 6 июня 2014 г.*