

## О МЕТОДЕ ЗАЩИТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

### Введение

Существующая в наше время простота получения, хранения и распределения цифровых копий, идентичных оригиналу, повлекла за собой интенсивный поиск методов защиты цифровой интеллектуальной собственности, в частности авторских изображений. С целью защиты авторских прав на изображение, размещаемое в открытом доступе, к его исходным данным добавляют дополнительную информацию – цифровой водяной знак (ЦВЗ), как правило, визуально неразличимый и неотделимый от изображения без существенной потери его качества. Описанный процесс часто называют маркировкой или внедрением ЦВЗ в контейнер-изображение.

При условии невозможности организации жесткого контроля над хранением и распространением оригинальных немаркированных изображений любые прикладные задачи защиты авторских прав на них подразумевают отсутствие доступа к оригиналу при детектировании или извлечении ЦВЗ, т.е. использование только слепых методов защиты с водяными знаками. Естественные искажения и злоумышленные атаки могут модифицировать контейнер-изображение по двум направлениям:

- точечные преобразования, т.е. изменение значений (уровня яркости) пикселей;
- геометрические преобразования, т.е. изменение местоположений (координат) пикселей.

Недостатком большинства существующих слепых методов является их неустойчивость ко второму виду модификаций, что носит название проблемы синхронизации ЦВЗ в контейнере. То есть в процессе маркировки некоторого изображения  $f(x,y)$  размером  $N \times L$  ЦВЗ или его элемент внедряются в данные, местоположение которых  $(x_k, y_k)$ . А на этапе детектирования или извлечения ЦВЗ вследствие пространственного движения пикселей при геометрических преобразованиях данным, сохраненным ранее в местоположении  $(x_k, y_k)$ , будут соответствовать данные в новом, неизвестном местоположении  $(x'_k, y'_k)$ . Синхронизировать ЦВЗ в контейнере – это значит правильно определить  $(x'_k, y'_k)$  перед обнаружением водяного знака.

На сегодняшний день оформилось два основных подхода к решению проблемы синхронизации. Первый подход – компенсация геометрических искажений перед обнаружением водяного знака. В этом случае система с ЦВЗ может использовать шаблоны [1–3], структурные водяные знаки [4–5], точечные особенности [6–7], преобразования Радона [8–9] и др. Второй подход – это внедрение ЦВЗ в инвариантную к геометрическим преобразованиям область. Методы выделения таких инвариантов, как правило, строятся на основе свойств преобразования Фурье-Меллина [10–12].

### Геометрические искажения изображения

В целом любые геометрические преобразования цифрового изображения выполняются в два этапа – пространственное преобразование сетки изображения и интерполяция значений яркости. На практике в подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело с представителями такого класса геометрических преобразований, как аффинные, на которых мы и сосредоточим свое внимание.

#### Пространственное преобразование

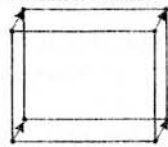
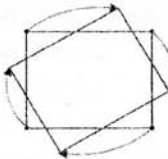
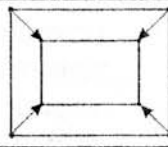

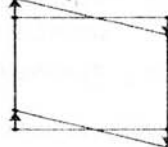
Пусть изображение  $f(x,y)$  было подвергнуто аффинному искажению, в результате чего было получено новое изображение  $f'(x',y')$ . Матричная форма произошедшего при этом

пространственного преобразования в общепринятых для компьютерной графики однородных координатах [13] имеет вид:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Соответствующим образом задавая элементы матрицы A можно выделить различные типы аффинных преобразований (табл. 1).

Таблица 1  
Типы аффинных преобразований

Тип	Матрица A	Координатное уравнение	Схема
Перемещение	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta_x \\ 0 & 1 & \delta_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} x' = x + \delta_x \\ y' = y + \delta_y \end{cases}$	
Поворот	$\begin{bmatrix} \cos \varpi & -\sin \varpi & 0 \\ \sin \varpi & \cos \varpi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} x' = x \cos \varpi - y \sin \varpi \\ y' = x \sin \varpi + y \cos \varpi \end{cases}$	
Масштабирование	$\begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} x' = \sigma_x \cdot x \\ y' = \sigma_y \cdot y \end{cases}$	
Горизонтальный сдвиг	$\begin{bmatrix} 1 & s_\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} x' = x + s_\alpha \cdot y \\ y' = y \end{cases}$	
Вертикальный сдвиг	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ s_\beta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} x' = x \\ y' = s_\beta \cdot x + y \end{cases}$	

### Интерполяция значений яркости

После выполнения пространственного преобразования некоторым координатам  $(x', y')$  нового изображения будут соответствовать координаты  $(x, y)$  исходного, которые не всегда целочисленные. А поскольку функция  $f(x, y)$ , задающая исходное изображение, дискретна, то ее значения для не целочисленных координат не определены, что влечет за собой необходимость их вычисления с помощью интерполяции.

Самым простым из известных способов интерполяции значений яркости является интерполяция «по ближайшему соседу», когда точке с координатами  $(x', y')$  присваивается значение яркости ближайшей к ее прообразу  $(x, y)$  соседней точки с целочисленными координатами. Этот способ прост в реализации, однако часто приводит к появлению нежелательных артефактов, например, зубчатости контуров. Улучшить результат можно с помощью билинейной интерполяции, которая формирует значение яркости для точки  $(x', y')$  на основе анализа 4-х ближайших к  $(x, y)$  целочисленных точек, или бикубической интерполяции, осуществляемой на основе анализа 16 точек. Как альтернативу отметим интерполяцию сплайн-функциями, в частности наиболее употребительна на сегодня интерполяция кубическими B-сплайнами, когда через сетку узлов проводится поверхность,

составленная из кубических полиномов, так, что первые и вторые частные производные являются непрерывными в каждом узле сетки [13].

**Метод маркировки на основе точечных особенностей изображения, стойкий к геометрическим искажениям**

Метод, который будет рассмотрен в работе, является слепым и включает в себя автоматическую синхронизацию ЦВЗ в контейнере после возможных геометрических искажений. В отличие от таких альтернативных методов синхронизации, как использование шаблона или пиков автокорреляции структурного ЦВЗ, которые возможно удалить без изменения визуального качества контейнера-изображения, в данном методе локализация ЦВЗ кодируется с помощью содержимого изображения и не может быть уничтожена без его существенного искажения. Еще одно достоинство метода состоит в том, что автоматическая синхронизация ЦВЗ достигается без привнесения в изображение дополнительных шумов.

Пошаговый план метода имеет следующий вид:

**Алгоритм внедрения**

1. Фиксация точечных особенностей изображения:
  - сглаживание изображения;
  - обработка изображения с помощью детектора углов Харриса;
  - выбор однородно распределенных устойчивых точечных особенностей.
2. Сегментация изображения:
  - генерация триангуляции Делоне на основе отобранных на предыдущем шаге точечных особенностей;
  - анализ отобранных треугольных сегментов, отбраковка малых и однородных сегментов.
3. Маркировка изображения:
  - генерация по ключу псевдослучайного водяного знака в виде треугольника фиксированной формы;
  - последовательное преобразование формы ЦВЗ к форме каждого из отобранных сегментов;
  - поточечное аддитивное внедрение ЦВЗ в каждый сегмент.

**Алгоритм детектирования**

1. Фиксация точечных особенностей изображения (аналогично внедрению).
2. Сегментация изображения (аналогично внедрению).
3. Предобработка сегментов:
  - нормировка каждого отобранного треугольного сегмента, заключающаяся в приведении его формы к форме ЦВЗ;
  - разделение компонентов изображения и компонентов ЦВЗ при помощи фильтра Винера.
4. Обнаружение ЦВЗ:
  - анализ корреляции между внедренным и извлеченным ЦВЗ для каждого отобранного сегмента изображения;
  - накопление корреляции для результирующего обнаружения водяного знака во всем изображении.

## Алгоритм внедрения ЦВЗ

### 1. Фиксация точечных особенностей

Точечной особенностью  $f_p$  называется точка, чья окрестность отличается от окрестностей близлежащих точек по выбранной мере, т.е.  $\{ \forall f: |f_p - f| < r \rightarrow \tau(\Omega_f, \Omega_{f_p}) > \varepsilon \}$ , где  $\Omega_f$  – окрестность точки  $f$ , называемая окном поиска, а  $\tau(\Omega_f, \Omega_{f_p})$  – функция близости окрестностей по некоторой мере.

Нахождение точечных особенностей является важной начальной операцией для дальнейшей обработки изображения. Так точечные особенности используются для согласования изображений, трехмерной реконструкции, отслеживания движения, распознавания образов, индексирования и поиска в базах данных, навигации роботов и другого. Вместе с тем возможно их эффективное использование для защиты авторских прав с помощью ЦВЗ.

Для нахождения точечных особенностей используют функции-детекторы разных видов. Один из самых распространенных типов детекторов – детекторы на основе компонентов градиента яркости, среди которых в свою очередь выделяют детекторы контрастных перепадов [14], углов [15] и окружностей [16]. Для защиты интеллектуальной собственности в работах [6, 7] предлагается использовать детекторы углов, в частности в работе [6] показано, что стойкость детектора зависит от содержимого изображения и в целом самым стойким детектором углов является детектор Харриса.

#### Детектор Харриса

В 1980 году Моравеком [17] был предложен один из самых первых детекторов углов. Этот детектор анализирует небольшие локальные окна в изображении и определяет в них среднее изменение яркости, являющееся результатом небольших сдвигов окна в различных направлениях. Результатом обработки области изображения может стать один из трех вариантов:

- 1). Если область изображения, обрабатываемая при помощи окна, является однородной (т.е. ее яркость можно аппроксимировать константой), то изменение яркости для всех сдвигов окна незначительно.
- 2). Если окно захватывает грань изображения, то результатом сдвигов вдоль грани будет незначительное изменение яркости, а результатом сдвигов перпендикулярно грани – ее существенное изменение.
- 3). Если часть изображения, обрабатываемая при помощи окна, – угол или изолированная точка, то результатом всех сдвигов будет существенное изменение яркости.

Таким образом, угол может быть обнаружен, находя и оценивая минимальное изменение из всех.

Математически изменение яркости при некотором сдвиге  $[u, v]$  описывается как:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2,$$

где  $w(x, y)$  – весовая функция окна,  $I(x+u, y+v)$  – яркость после сдвига,  $I(x, y)$  – яркость до сдвига.

Детектор использует 4 сдвига –  $(u, v) = (1, 0), (1, 1), (0, 1), (0, 0)$ , а также весовую функцию равную 1 в окне, и 0 вне окна (рис. 1а). Он находит локальные максимумы для вычисленных минимальных изменений яркости, и в качестве углов определяет те из них, которые превышают некоторое заданное пороговое значение.

Детектор Моравека обладает рядом недостатков, которые в 1988 году скорректировали Харрис и Стефенс [18]:

1) Поскольку детектор Моравека использует бинарную прямоугольную весовую функцию окна, его ответ получается шумным. Для уменьшения шума Харрис и Стефенс предложили использовать гладкую круглую функцию окна, например, функцию Гаусса (рис. 1б):

$$w(x, y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

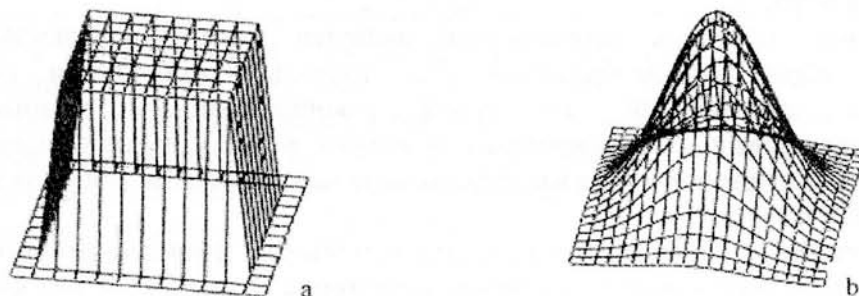


Рис. 1. Весовая функция окна  $w(x, y)$   
а) для детектора Моравека; б) для детектора Харриса

2) Детектор Моравека рассматривает только дискретный набор сдвигов через каждые 45 градусов, т.е. его ответ является анизотропным. В работе Харриса было предложено охватить все возможные маленькие сдвиги выполнив для этого аналитическое расширение исходных (расширение Тейлора):

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [(x+u, y+v) - I(x, y)]^2 = \sum_{x, y} w(x, y) [I_x u + I_y v + O(u^2, v^2)]^2,$$

где значения  $I_x$ ,  $I_y$  аппроксимируются частными производными  $\frac{\partial I}{\partial x}$  и  $\frac{\partial I}{\partial y}$  соответственно [18]. Для малых сдвигов  $E$  можно переписать как

$$E(u, v) = Au^2 + 2Cuv + Bv^2,$$

где

$$A = \sum_{x, y} w(x, y) I_x^2(x, y), \quad B = \sum_{x, y} w(x, y) I_y^2(x, y), \quad C = \sum_{x, y} w(x, y) I_x(x, y) I_y(x, y).$$

3) Так как в детекторе Моравека принят во внимание только минимум  $E$ , для граней ответ получается слишком сильный, т.е. некоторые точки расположенные на гранях изображения распознаются как точечные особенности (углы) не являясь таковыми.

Харрис переформулировал определение угла рассмотрев изменения в  $E$  с учетом направления сдвига. Для небольших сдвигов среднее изменение яркости в направлении  $[u, v]$  может быть записано как:

$$E(u, v) = [u, v] \cdot M [u, v]^T,$$

где матрица  $M$  – симметричная матрица  $2 \times 2$  частных производных изображения:

$$M = \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix}.$$

Харрис также использовал близкую связь  $E$  с локальной функцией автокорреляции. Он предложил ставить в соответствие каждой точке изображения два числа –  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  являющиеся собственными значениями матрицы  $M$ , которые пропорциональны максимальной и минимальной кривизне локальной функции автокорреляции. Если оба собственных значения велики, то даже небольшое смещение точки  $(x, y)$  в сторону вызывает значительные изменения яркости. Такой случай соответствует искомой точечной особенности изображения.

Чтобы избежать вычисления собственных значений в явном виде в рассмотрение вводится новый критерий – функция отклика, базирующаяся на следе и детерминанте матрицы:

$$R = \text{Det}(M) - k \cdot \text{Trace}^2(M),$$

где  $\text{Trace}(M) = \lambda_1 + \lambda_2 = A + B$ ,  $\text{Det}(M) = \lambda_1 \lambda_2 = AB - C^2$ ,  $k$  – эмпирическая константа, которая обычно выбирается из диапазона 0.04 – 0.06.

Таким образом, детектор Харриса классифицирует все пиксели изображения, относя их к одной из трех возможных областей:

1) *Однородная область*: в любом направлении изменения яркости нет, т.е. для такого пикселя  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  близки к нулю, а значит и  $|R| \approx 0$ .

2) *Грань*: вдоль грани изменений нет, т.е. для такого пикселя  $\lambda_1 \gg \lambda_2$  или  $\lambda_2 \gg \lambda_1$ , а значит  $R < 0$ .

3) *Угол*: существенные изменения при перемещении в любом направлении, т.е. для такого пикселя  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – большие,  $\lambda_1 \approx \lambda_2$ , а значит  $R > 0$  (большое положительное значение).

Итоговое нахождение точечных особенностей выполняется в 2 этапа:

- задается некоторый порог  $\xi$ , и выбираются все точки изображения со значениями функции отклика превышающими данный порог:  $R_p = \{(i, j) : R(i, j) > \xi\}$ ;
- для всех отобранных на предыдущем этапе точек находятся локальные максимумы:  $\forall (x, y) \in U_{ij} : R_p(i, j) \geq R_p(x, y)$ .

### Свойства детектора Харриса

#### 1) Инвариантность к повороту

Известно, что собственные значения матрицы  $M$  связаны простыми соотношениями с длинами полуосей эллипса  $d_1$  и  $d_2$ :  $d_1 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}$ ,  $d_2 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}$ . При вращении эллипса, длины его полуосей остаются неизменными, следовательно, не изменяются и собственные значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а значит, не изменяется и функция отклика угла  $R$ .

#### 2) Инвариантность к сдвигу

При вычислении матрицы  $M$  используются только производные. Очевидно, что  $f'(x) = f'(x+b)$ ,  $\forall b = \text{const}$ . Следовательно, собственные значения матрицы  $M$  и функция отклика угла остаются неизменными при любом сдвиге изображения.

#### 3) Не инвариантность к масштабированию

Результат работы детектора Харриса зависит от масштаба изображения. Так, например, пиксель, классифицированный как угол, при увеличении масштаба изображения может быть классифицирован как край.

Для того, чтобы добиться инвариантности к масштабированию окрестность  $U_{ij}$  целесообразно сделать не фиксированной, а зависящей от размеров изображения. Пусть в дальнейшем под  $U_{ij}$  понимается круг радиусом  $r_U = \frac{H+L}{q}$ , где  $H$  и  $L$  соответственно высота и ширина изображения, а размер окрестности квантуется значением  $q$ .

Если размер окрестности выбирается слишком маленьким, то найденные точечные особенности будут сконцентрированы на текстурированных областях. Если слишком большим – точечные особенности будут изолированными. Так на рис. 2 количество выделяемых точечных особенностей для изображения «Автомобиль» задано равным 20. Для изображения слева размер окрестности  $U_{ij}$  меньше, нежели для изображения справа при равенстве всех остальных параметров детектора Харриса.

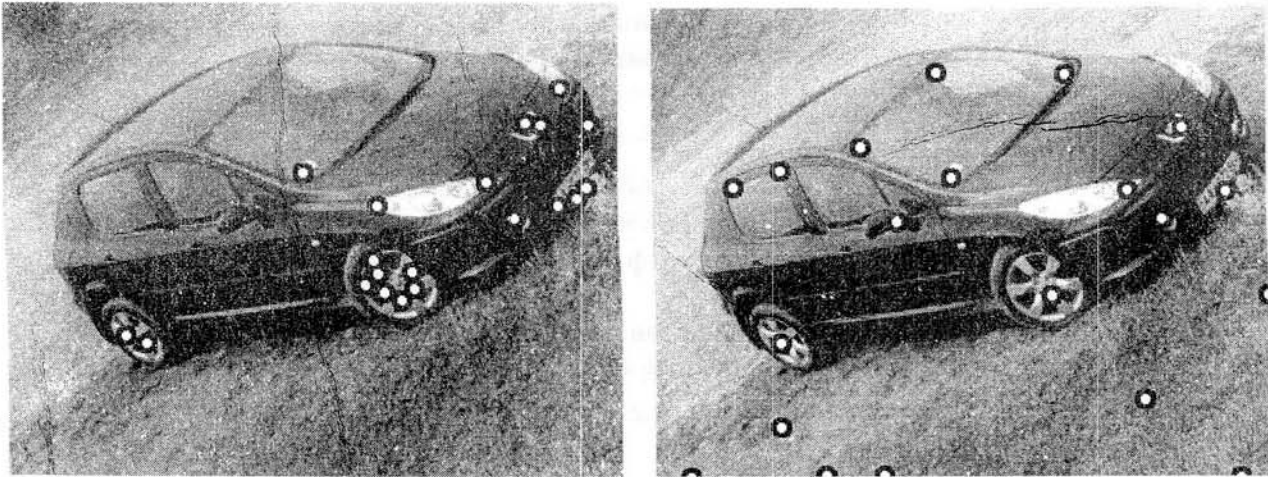


Рис. 2. Результат работы детектора Харриса в зависимости от размера окрестности  $U_{i,j}$

Списываемый алгоритм внедрения ЦВЗ предполагает однородное распределение выделяемых точечных особенностей. Для получения такового предлагается использовать следующую модификацию детектора Харриса:

1) Изображение разбивают на непересекающиеся прямоугольные блоки одинакового размера.

2) Точечные особенности находятся индивидуально в каждом блоке.

3) Для каждого блока используется свой адаптивный к содержимому порог обнаружения. Такая модификация детектора делает его более стойким к искажениям и атакам, нежели использование глобального порога  $\xi$ .

Детектор Харриса чувствителен к искажениям, затрагивающим углы, текстурированные или шумные части изображения. Поэтому чтобы повысить надежность его работы целесообразно перед нахождением точечных особенностей выполнить сглаживание изображения. Предлагается использовать Гауссов фильтр низких частот, поскольку он гладкий и не образует ложных контуров при подавлении высокочастотных компонент изображения. Пусть  $f(x,y)$  – исходное изображение-контейнер, а  $g(x,y)$  – изображение после фильтрации. Сглаженное изображение является результатом свертки, т.е. в частотной области справедливо следующее соотношение:

$$G(t,z) = H(t,z) \cdot F(t,z),$$

$$H(t,z) = e^{-\frac{(t-1/2)^2 + (z-1/2)^2}{2\sigma^2}}$$

где  $H(t,z)$  – передаточная функция фильтра,  $G(t,z)$  и  $F(t,z)$  – спектры Фурье сглаженного и исходного изображения соответственно.

Кроме того, желательно не использовать точечные особенности находящиеся близко к краям изображения, чтобы сохранить приемлемую стойкость метода к обрезке.

## 2. Сегментация изображения

Следующим шагом предобработки изображения является его сегментация на основе выделенных точечных особенностей. При этом целесообразно использовать триангуляцию, т.е. разбиение на треугольники, поскольку она имеет важные преимущества:

- любую область можно эффективно разбить на треугольники;
- триангуляция обладает свойством локализации (если вершина исчезает, сегментация изменяется только для связанных с ней треугольников, не затрагивая остальные);
- с каждой вершиной связана некоторая область стабильности [19], при перемещении вершины внутри этой области сегментация остается неизменной;

- вычислительная сложность алгоритмов разбиения на треугольники существенно меньше, чем при использовании других составных частей, кроме того триангуляция может быть выполнена с использованием быстрых алгоритмов.

В работе [6] для сегментации изображения предлагается использовать триангуляцию Делоне, которая была впервые предложена Б.Н. Делоне в 1934 году [20]. Триангуляция Делоне на плоскости представляет собой геометрическую конструкцию, чрезвычайно популярную в компьютерной графике, обработке и анализе изображений, геоинформационных технологиях, кристаллографии, вычислительной геометрии.

Триангуляция Делоне (рис. 3) – это выпуклая триангуляция, представляющая собой множество непересекающихся треугольников, в котором ни одна из заданного набора двумерных точек  $S$  (точечных особенностей) не попадает внутрь ни одной из описанных вокруг полученных треугольников окружностей.

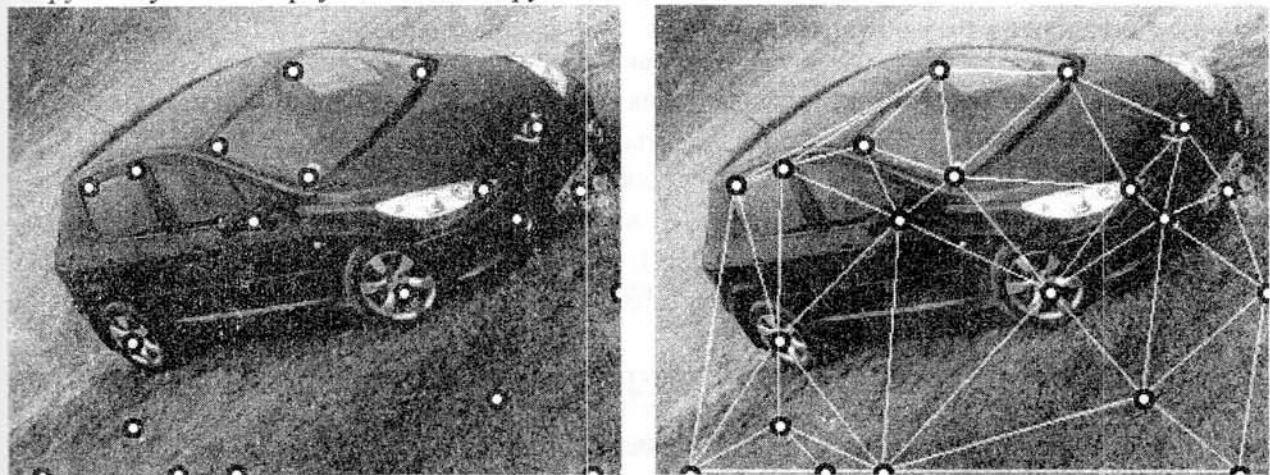


Рис. 3. Сегментация изображения «Автомобиль»: триангуляция Делоне на основе выделенных ранее точечных особенностей

На сегодня разработано множество алгоритмов построения триангуляции Делоне, например, в работе [21] приводится следующая классификация алгоритмов: алгоритмы прямого построения, алгоритмы слияния, двухпроходные и итеративные алгоритмы.

Перемещение или исчезновение одной из вершин влияет только на связанные с ней треугольники. Подобное влияние будет несущественным для треугольников с большой площадью, однако критичным для треугольников с малой. Следовательно, перед внедрением целесообразно проверить площадь каждого треугольника образованной сегментации и исключить из области внедрения треугольники с малой площадью. Кроме того, с точки зрения сохранения перцепционного качества изображения неоправданным является внедрение ЦВЗ в однородные области. А значит, имеет смысл проверить степень однородности каждого сегмента и отбраковать те из них, в которых функция яркости близка к константе.

#### 4. Маркировка изображения.

Пусть ЦВЗ генерируется согласно некоторому целочисленному секретному ключу и представляет собой псевдослучайную последовательность  $T_W = \{t_0, t_1, t_2 \dots t_{N-1}\}$ , где  $t_k \in \{+1, -1\}$  и среднее значение последовательности равно нулю. Последовательность фиксируется в форме прямоугольного равнобедренного треугольника с катетом  $s = \sqrt{2N}$  ( $N$  априори подбирается таким, чтобы  $s \in Z$ ).

Метод предполагает маркировку каждого из отобранных сегментов изображения. Для этого  $T_W$  с помощью аффинного преобразования предлагается последовательно привести к форме каждого из сегментов. Пусть  $T_W$  нужно преобразовать к форме некоторого сегмента



$T_V$ . Для того, чтобы определить коэффициенты преобразования, необходимо решить следующую линейную систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} x'_1 & x'_2 & x'_3 \\ y'_1 & y'_2 & y'_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ или } T_F = A \cdot T_W,$$

из которой искомые коэффициенты преобразования вычисляются как  $A = T_F \cdot T_W^{-1}$ . Тут  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  – координаты вершин водяного знака,  $(x'_1, y'_1)$ ,  $(x'_2, y'_2)$ ,  $(x'_3, y'_3)$  – координаты точечных особенностей, образующих сегмент  $T_V$ .

Так как существует 6 различных вариантов аффинного отображения треугольника в другой треугольник, то для достижения взаимно однозначного соответствия, вершины треугольников упорядочиваются, например, согласно величине соответствующих им углов. Отметим, что в процессе преобразования для сохранения высоких частот лучше использовать сплайн-кубическую интерполяцию [13].

Результатом этого этапа будет треугольник  $T_F$ , несущий в себе ЦВЗ и имеющий такую же форму, как и сегмент, куда он будет внедряться на следующем шаге (рис. 4).

Маркированный сегмент  $T_M$  получается поточечным сложением оригинального треугольника  $T_V$  с треугольником, несущим в себе водяной знак, –  $T_F$ , умноженным на некоторое значение  $\alpha$ , регулирующее силу ЦВЗ:

$$T_M = T_V + \alpha \cdot T_F.$$

Кроме того, чтобы гарантировать невидимость ЦВЗ можно выполнить психофизиологический анализ изображения-контейнера, результатом которого станет построение перцепционной маски  $\Psi$ , минимизирующей влияние вносимых в различные области изображения изменений на его полное перцепционное искажение [22]. Тогда вместо  $T_F$  в вышеуказанном равенстве следует использовать произведение  $\Psi \cdot T_F$ .

Маркированное изображение в целом образуется после замены всех содержащихся в нем оригинальных треугольников  $T_V$  на маркированные  $T_M$ .

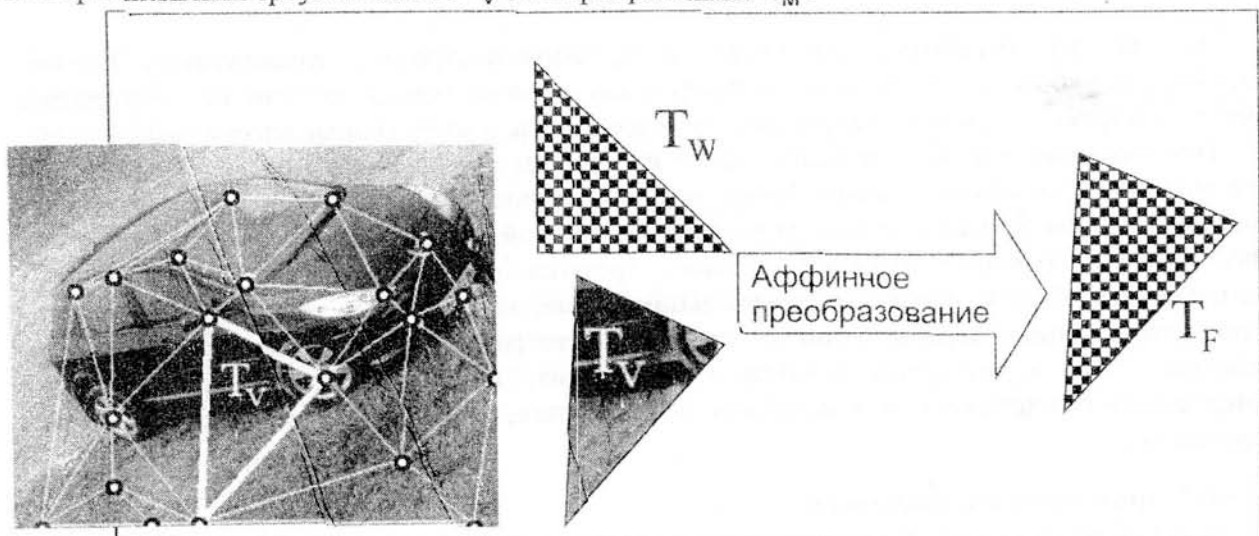


Рис. 4. Приведение формы ЦВЗ к форме маркируемого сегмента

#### Алгоритм детектирования ЦВЗ

Первые два этапа, как и при внедрении ЦВЗ, представляют собой фиксацию точечных особенностей и сегментацию изображения, в результате чего имеем набор треугольников  $T'_M$ .

### 3. Предобработка сегментов

Каждый треугольник  $T_M$  при помощи аффинных преобразований преобразовывается в прямоугольный равнобедренный треугольник  $T_A$  с катетом  $c \approx \sqrt{2N}$ .

Чтобы разделить компоненты изображения и компоненты ЦВЗ предлагается использовать адаптивный фильтр Винера [23], который визуально приводит к размыванию изображения. Из сегмента  $T_A$  в процессе винеровской фильтрации, использующей статистические параметры  $T_W$ , удаляются компоненты оригинального изображения. В результате получают треугольник  $\tilde{T}_W$ :

$$\tilde{T}_W(i,j) = T_A(i,j) - \tilde{T}_A(i,j) = \frac{\omega^2}{\sigma^2} (T_A(i,j) - \mu),$$

где  $\mu$  - среднее значение яркости пикселя в локальной окрестности  $\Omega$ , размером  $n \times m$ :

$\mu = \frac{1}{nm} \sum_{i,j \in \Omega} T_A(i,j)$ ;  $\sigma^2$  - локальное отклонение (дисперсия) от среднего значения:

$\sigma^2 = \frac{1}{nm} \sum_{i,j \in \Omega} T_A^2(i,j) - \mu^2$ ;  $\omega^2$  - дисперсия ЦВЗ.

### 4. Обнаружение ЦВЗ

Обнаружение ЦВЗ происходит путем вычисления корреляции между  $T_W$  и  $\tilde{T}_W$  и выполняется в два этапа.

1. Локальное обнаружение для каждого треугольника по результатам сравнения величины коэффициента корреляции  $\text{corr}(T_W, \tilde{T}_W)$  с некоторым пороговым значением.

Корреляция между исходным ЦВЗ и извлеченным из сегмента имеет вид:

$$\text{corr}(T_W, \tilde{T}_W) = \frac{E[T_W \tilde{T}_W] - E T_W \cdot E \tilde{T}_W}{\sqrt{(E[T_W^2] - (E T_W)^2) \cdot (E[\tilde{T}_W^2] - (E \tilde{T}_W)^2)}}$$

где  $E$  - математическое ожидание.

Будем считать, что ЦВЗ присутствует в треугольнике, если  $\text{corr}(T_W, \tilde{T}_W) \geq \rho(P_{fa})$ , где  $\rho(P_{fa})$  - вещественное пороговое значение, зависящее от ложно-положительной вероятности  $P_{fa}$  ( $P_{fa}$  - вероятность обнаружения ЦВЗ в сегменте, который на самом деле ЦВЗ не содержит).

Для определения порогового значения  $\rho(P_{fa})$  выполняется оценка случайной переменной  $X_k = \text{corr}(T_{W1}, \tilde{T}_{Wk})$ , где  $T_{W1}$  - некоторый внедренный ЦВЗ, сгенерированный по ключу  $W1$ ;  $\tilde{T}_{Wk}$  - извлеченный из изображения ЦВЗ, сгенерированный по ключу  $Wk$ ,  $k \neq 1$ . Распределение  $X$  хорошо аппроксимируется нормальным законом [22].

2. Глобальное обнаружение, основывающееся на сумме всех полученных на первом этапе коэффициентов корреляции:

$$C_g = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} \text{corr}_i(T_w, \tilde{T}_w),$$

где  $K$  - количество сегментов в изображении.

ЦВЗ присутствует в изображении, если  $C_g \geq \frac{\rho(P_{fa})}{\sqrt{K}}$ .

### Вычислительный эксперимент

Результаты экспериментов показали, что представленный алгоритм является стойким к:

- 1) Масштабированию с коэффициентом от 80 до 120%.
- 2) Вращению до  $12^\circ$ .

- 3) JPEG сжатію с коэффициентом качества до 10%.
- 4) Аддитивному шуму и изменению фильтра низких частот.
- 5) Локальным атакам StirMark.
- 6) Умеренной обрезке.
- 7) Печати на лазерном принтере и сканировании с разрешением 300 ppi.

#### Заклучение

В данной работе мы рассмотрели один из методов защиты интеллектуальной собственности с помощью ЦВЗ, относящийся к новому, второму поколению методов, обладающих по сравнению с методами первого поколения рядом важных особенностей и преимуществ. Метод предназначен для защиты авторских прав и аутентификации цифровых изображений. Он принадлежит к классу довольно немногочисленных на сегодня методов на основе содержимого, основная идея которых состоит в привязке месторасположения и ориентации ЦВЗ не к координатам пикселей изображения, а к его семантике. Другие методы этого класса можно найти, например в [24, 25].

Дальнейшая работа будет сосредоточена на исследовании стойкости, пропускной способности и вычислительной сложности предложенного метода в зависимости от использования различных детекторов и алгоритмов нахождения точечных особенностей, методов и алгоритмов сегментации, интерполяции, фильтрации и др.

#### Список литературы

1. Solanki K., Madhoo U., Manjunath B.S., Chandrasekaran S. Estimating and undoing rotation for print-scan resilient data hiding // ICIP. – 2004. – pp. 39–42.
2. Pereira S., Pun T. Fast Robust Template Matching for Affine Resistant Image Watermarks // Proc. of the Third International Workshop on Information Hiding, Dresden, Germany. – 1999, SpringerVerlag. – pp. 199–210.
3. Piva A., Barni M., Bartolini F., Cappellini V., Rosa A.D., Orlandi M. Improving DFT watermarking robustness through optimum detection and synchronisation // Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia'99, Orlando, FL. – 1999. – GMD Report 85. – pp. 65–69.
4. Alvarez-Rodriguez M., Perez-Gonzalez F. Analysis of pilot-based synchronization algorithms for watermarking of still images // Signal Processing: Image Communication, Spain. – 2002, No. 17. – pp. 611–633.
5. Kutter M. Watermarking resisting to translation, rotation and scaling // Proceedings of the SPIE: Multimedia Systems and Applications, Boston, USA. – 1998. – Vol. 3528. – pp. 423–431.
6. Bas P., Chassery J.M., Macq B. Geometrically invariant watermarking using feature points // Image Processing, IEEE Transactions. – 2002. – Vol. 11, No. 9. – pp. 1014–1028.
7. Tone M., Hamada N. Affine Invariant Digital Image Watermarking Using Feature Points // RISP International Workshop on Nonlinear Circuit and Signal Processing, Hawaii, USA. – 2005 (NCSP'05).
8. Simitopoulos D., Koutsonanos D.E., Strintzis M.C. Robust Image Watermarking Based on Generalized Radon Transformations // CirSysVideo. – 2003. – Vol. 13, No. 8. – pp. 732–745.
9. Yao Z., Rajpoot N. Radon/Ridgelet Signature for Image Authentication // 43-46 Proc. IEEE ICIP, Singapore. – 2004.
10. O'Ruanaidh J.J.K., Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking // Signal Processing. – 1998. – Vol. 66, No. 3.
11. Lin C.-Y., Chang S.-F. Distortion Modeling and Invariant Extraction for Digital Image Print-and-Scan Process // Intl. Symp. on Multimedia Information Processing, Taipei. – 1999.
12. Zheng D., Zhao J., Saddik A. El. RST-invariant digital image watermarking based on log-polar mapping and phase correlation // CirSysVideo. – 2003. – Vol. 13, No. 8. – pp. 753–765.
13. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М: Техносфера, 2007. – 583 с.
14. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. 8, No. 6 – pp. 679–698.

15. *Trajkovich M. and Handley M.* Fast corner detection // Image and Vision Computing. – 1998, No. 16. – pp. 75–87.
16. *Rad A.A., Faez K. and Qaragozlou N.* Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors // Proc. VIIth Digital Image Computing, Sydney, Australia. – 2003. – pp. 879–887.
17. *Moravec H.* Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover // Technical Report CMU-RI-TR-3, Carnegie-Mellon University, Robotics Institute. – 1980.
18. *Harris C. J., Stephens M.* A combined corner and edge detector // Plessey Research Roke Manor, UK. - Proc. 4<sup>th</sup> Alvey Vision Conferences, Manchester. – 1988. – pp. 147–151.
19. *Bertin E., Marchand-Maillet S., Chassery J-M.* Optimization in Voronoi Diagrams // Kluwer Academic Publishers. – 1994. – pp. 209–216.
20. *Delaunay B.* Sur la sphère vide // Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk. – 1934, No. 7. – pp. 793–800.
21. *Скворцов А.В.* Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.
22. *Hernandez J. R., Perez-Gonzalez F.* Statistical analysis of watermarking schemes for copyright protection of images // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87, No. 7. – pp. 1142–1166.
23. *Wiener N.* The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. – New York: The Technology Press of MIT and J. Wiley, 1949. – 163 p.
24. *Duric Z., Johnson N.F.* Recovering watermarks from images // Information and Software Engineering Technical Report, San Diego. – 1999. – CA 92152-5000.
25. *Sun Q., Wu J., and Deng R.* Recovering modified watermarked image with reference to originale image // In Proc. SPIE. – 1999. – pp. 415–424.

УДК 004.056.5: 518: 512.624.3

Кобозева А.А.

## ПРОБЛЕМА ВЫБОРА КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ЗАДАННОГО СЕКРЕТНОГО СООБЩЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СТЕГАНОГРАФИИ

### Введение

Появление глобальных компьютерных сетей, интенсивное развитие и распространение компьютерных технологий сделало недопустимо простым получение доступа к одному из ценнейших предметов современной жизни – информации. Поэтому в настоящий момент во всем мире назрел вопрос разработки методов защиты информации, представленной в цифровом виде, среди которых важнейшее место занимают методы криптографии и стеганографии.

Целью криптографии [1] является сокрытие содержимого сообщений за счет их шифрования. Однако возникает ряд ситуаций в компьютеризированных системах хранения, обработки, приема, передачи информации, когда применение криптографических методов не решает возникающих проблем. Одним из выходов из подобных ситуаций является использование методов цифровой стеганографии [2,3]. Стеганографирование может осуществляться различными способами, однако общей чертой этих способов является то, что секретное сообщение, или дополнительная информация (ДИ), погружается в некоторый объект, или основное сообщение (ОС), не привлекающий внимания, который затем открыто пересылается по каналу связи адресату или хранится в таком виде. В настоящий момент наибольшего развития достигло практическое приложение стеганографии, которое часто не имеет под собой строгого теоретического обоснования.