

На правах рукописи



Коваленко Михаил Павлович

**ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ГРАФИЧЕСКИЕ
ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

Специальность 05.13.19 «Методы и системы защиты информации,
информационная безопасность»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Серпухов – 2012

Работа выполнена в Межрегиональном общественном учреждении «Институт инженерной физики» (МОУ «ИИФ») в отделе специального программно-математического обеспечения.

Научный руководитель: кандидат технических наук Рязанцев Алексей Михайлович – начальник отдела специального программно-математического обеспечения МОУ «ИИФ».

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук Грибунин Вадим Геннадиевич – ведущий научный сотрудник отдела специальных средств и систем защиты информации МОУ «ИИФ».

2. Кандидат технических наук, доцент полковник Боровков Александр Владимирович – начальник кафедры программно-аппаратного обеспечения специализированных вычислительных комплексов автоматизированных систем боевого применения стратегических ракет филиала Военной академии РВСН им. Петра Великого.

Ведущая организация: Научно-исследовательский центр (г.Курск) ФГУП «18 ЦНИИ» Министерства обороны Российской Федерации.

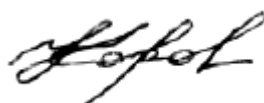
Защита состоится 12 декабря в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 520.033.01 в Межрегиональном общественном учреждении «Институт инженерной физики» (МОУ «ИИФ») по адресу: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.

Отзывы на автореферат в 2-х экз. просьба направлять по адресу: 142210, г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а, Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (МОУ «ИИФ»), ученому секретарю диссертационного совета Д 520.033.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Межрегионального общественного учреждения «Институт инженерной физики» по адресу: г. Серпухов, Большой Ударный пер., д.1а и сайте <http://www.iifrf.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 520.033.01
кандидат технических наук, доцент



О.В. Коровин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Быстрое развитие глобальной сети Интернет в последнее время обеспечило наличие единой среды передачи информации, доступной практически в любой точке мира. На базе Интернет можно организовать эффективный поиск и доставку электронных документов пользователям, объединять разнородные удаленные информационные ресурсы. Однако, учитывая высокую степень анонимности, простоту распространения информации, значительную аудиторию, при этом остро встает проблема защиты авторского права на электронные документы.

Авторское право на произведение возникает по факту его создания. Автор или другой обладатель авторских прав оповещает о них, используя знак охраны авторских прав, имя правообладателя и год первого опубликования. В случае нанесения на цифровое изображение видимого логотипа держателя прав, его, как правило, располагают в таком месте, где он не сможет быть помехой для зрительного восприятия иллюстрации. Следовательно, и его умышленное удаление не повлечет за собой особых нарушений ее структурной целостности. В связи с этим в настоящее время для защиты авторских прав на цифровые изображения все чаще используется технология цифровых водяных знаков, заключающаяся во внедрении в защищаемые графические произведения специальных идентифицирующих правообладателей меток, которые остаются незаметными для человека, но распознаются специализированным программным обеспечением.

Широкое применение нашли подходы к внедрению цифровых водяных знаков (ЦВЗ), основанные на использовании дискретного косинусного преобразования (ДКП), разработанные E. Koch, J. Zhao, D. Benham, N. Memon, B.-L. Yeo, M. Yeung, C. Podilchuk, W. Zeng, C.-T. Hsu, J.-L. Wu, B. Tao, B. Dickinson, I. Cox, J. Kilian, T. Leighton, T. Shamoon, M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, A. Piva, J. Fridrich. Однако, их реализация не позволяет достичь незаметности внедренных ЦВЗ, особенно в условиях необходимости обеспечения высокой степени их стойкости к различным преобразованиям изображения.

Сложившаяся **проблемная ситуация** обусловлена противоречием между необходимостью повышения степени стойкости ЦВЗ к различным трансформациям изображения, требующей вносить большие искажения в защищаемое изображение, и необходимостью повышения незаметности факта его внедрения, требующей обеспечить наименьшие искажения по сравнению с исходным изображением.

С учетом изложенного **целью диссертационного исследования** является повышение незаметности цифровых водяных знаков за счет использования при их внедрении аппарата искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Исходя из сформулированных противоречия и цели исследования, решаемая **научная задача** сформулирована следующим образом: на основе исследования существующего научно-методического аппарата внедрения цифровых водяных знаков, а также наиболее распространенных атак на них, разрабо-

тать методику внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Методы исследований. Поставленная научная задача решена на основе применения методов теории вероятностей, математической статистики, аппарата теории искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, компьютерной стеганографии.

Основные результаты исследования, выносимые на защиту:

- 1) модель нейросетевого предсказателя значений среднечастотных коэффициентов ДКП матрицы;
- 2) алгоритм выбора способа изменения ДКП коэффициентов при внедрении цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов;
- 3) методика внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается непротиворечивостью полученных результатов, строгостью применения методов теории вероятностей, математической статистики, аппарата теории искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, компьютерной стеганографии, а также экспериментальных исследований, выполненных с использованием среды программирования Microsoft Visual Studio 2008 на базе технологии NVIDIA CUDA.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) разработана модель предсказателя значений среднечастотных коэффициентов ДКП матрицы, отличающаяся использованием аппарата искусственных нейронных сетей, позволяющая оценить искажения изображения в процессе внедрения в него ЦВЗ с учетом нелинейности зависимости значений ДКП коэффициентов;
- 2) разработан алгоритм выбора способа изменения ДКП коэффициентов при внедрении цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, отличающийся изменением при внедрении бита ЦВЗ всех ДКП коэффициентов, расположенных в пределах одной диагонали ДКП матрицы отобранного для этого блока изображения, и учетом при этом значений остальных ДКП коэффициентов, позволяющий осуществить выбор субоптимального способа изменения ДКП коэффициентов;
- 3) разработана методика внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения, позволяющая априори задать степень стойкости внедренного ЦВЗ к различным трансформациям изображения.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена тем, что полученные результаты позволяют на 56.02%-95.42% уменьшить среднее значение квадрата коэффициента линейной корреляции вносимых внедрением ЦВЗ искажений изображения (как по горизонтали, так и по вертикали), тем самым, повышая их незаметность.

Апробация. Основные научные результаты диссертационной работы докладывались на 5 международных конференциях:

1) Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки: теоретические и прикладные аспекты», г. Новосибирск, 2012.

2) IX Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки - от теории к практике», г. Новосибирск, 2012

3) VIII Международной научно-практической конференции «Эффективные инструменты современных наук», г. Прага, 2012.

4) VIII Международной научно-практической конференции «Научный прогресс на рубеже тысячелетий», г. Прага, 2012.

5) VIII Международной научно-практической конференции «Наука и инновации», г. Перемишль, 2012.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, из них 1 – в рецензируемом научном издании, входящем в перечень рекомендованных ВАК.

Ряд представленных работ написан в соавторстве. В диссертацию включены только результаты, полученные лично автором.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников информации из 67 наименований. Общий объем работы составляет 118 страниц, в том числе 49 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования.

Первая глава посвящена исследованию существующих методов внедрения цифровых водяных знаков и наиболее распространенных атак на них (воздействие случайного шума, медианного фильтра, JPEG-сжатия).

К настоящему времени реализовано большое количество методов внедрения информации в изображения, которые могут быть разделены на следующие две группы:

1) прямые методы модификации изображения в пространственной области;

2) методы, модифицирующие изображение, предварительно преобразованное в иную форму.

Прямые методы встраивают информацию непосредственно в подмножество пикселей изображения. Она внедряется за счёт манипуляций яркостью и цветовыми составляющими без вычислительно громоздких линейных преобразований изображения. Наиболее известными представителями прямых методов являются:

– LSB-методы (Least Significant Bits). Эти методы можно использовать в задачах, которые не предъявляют высоких требований к робастности, поскольку они неустойчивы к таким воздействиям, как фильтрация и сжатие с потерями;

– методы модификации палитры. Недостатком данных методов является ограниченность объёма информации, которая может быть внедрена в изображение.

В методах, использующих предварительное преобразование, информация внедряется за счёт декомпозиции исходного изображения. Как правило, такие методы имеют хорошие характеристики робастности.

В этой группе используются достаточно разнообразные трансформации:

- дискретное преобразование Фурье;
- дискретное косинусное преобразование;
- вейвлет-преобразование;
- преобразование Карунена-Лоева;
- сингулярное разложение.

Согласно работам J. Bloom, R. Alonso, J. Fridrich, M. Goljan методы встраивания, которые вызывают изменения изображения, подчиненные Гауссовому закону распределения, обнаружить сложнее всего, поскольку в процессе получения исходного изображения обычно присутствует множество независимых источников Гауссового шума с различными амплитудами (например, шумы в электрических цепях и сенсорах из-за недостатка освещения и/или высокой температуры), и отделить одно от другого тем сложнее, чем меньшие изменения были вызваны. К таковым, согласно J. Harmsena и W. Pearlmana, относятся методы, использующие дискретное косинусное преобразование.

Дискретное косинусное преобразование (ДКП, англ. – DCT) представляет собой разновидность преобразования Фурье и, так же как и оно, имеет обратное преобразование. Графическое изображение можно рассматривать как совокупность пространственных волн, причем оси X и Y совпадают с шириной и высотой картинки, а по оси Z откладывается значение цвета соответствующего пикселя изображения. ДКП позволяет преобразовывать матрицу пикселей размером $N \times N$ в матрицу частотных коэффициентов соответствующего размера и обратно. Формулы прямого и обратного дискретного косинусного преобразования представлены ниже.

$$DCT_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} Pixel_{x,y} \cdot A(i,x) \cdot A(j,y); \quad (1)$$

$$Pixel_{x,y} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} DCT_{i,j} \cdot A(i,x) \cdot A(j,y); \quad (2)$$

$$A(a,b) = C(a) \cdot \cos \left[\frac{(2b+1) \cdot a \cdot \pi}{2N} \right]; \quad (3)$$

$$C(a) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{при } a = 0; \\ 1, & \text{при } a \neq 0 \end{cases}; \quad (4)$$

где $Pixel$ – матрица пикселей, DCT – матрица частотных коэффициентов.

К существующим методам внедрения ЦВЗ в графические изображения, основанным на дискретном косинусном преобразовании, относятся:

- Koch, разработанный E. Koch и J. Zhao;
- Benham, разработанный D. Benham и N. Memon;
- Podilchuk, разработанный C. Podilchuk и W. Zeng;
- Hsu-still, разработанный C.-T. Hsu и J.-L. Wu;
- Tao, разработанный B. Tao и B. Dickinson;
- Cox, разработанный I. Cox, J. Kilian, T. Leighton и T. Shamoan;
- Barni, разработанный M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini и A. Piva;
- Fridrich-2, разработанный J. Fridrich.

На основе проведенного исследования существующих методов внедрения цифровых водяных знаков и наиболее распространенных атак на них (воздействия случайного шума, медианного фильтра, JPEG-сжатия) были сделаны следующие выводы:

- 1) ЦВЗ следует внедрять в изображение путем изменений частотных коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП);
- 2) ЦВЗ следует внедрять в яркостную составляющую изображения, поскольку она наименее подвержена искажениям;
- 3) ЦВЗ следует внедрять в небольшие по размеру блоки изображения (8×8 пикселей), т.к. при этом существует возможность адаптации к локальной яркости и гладкости изображения;
- 4) у авторов различных методов внедрения ЦВЗ в изображения нет единого подхода к тому, какие именно частотные коэффициенты ДКП матрицы следует для этого использовать;
- 5) авторы различных методов внедрения ЦВЗ в изображения не дают рекомендаций по тому, на сколько и как следует изменять те или иные частотные коэффициенты ДКП матрицы для достижения желаемой степени стойкости внедренного ЦВЗ к различным искажениям изображения.

За основу разработанной методики внедрения цифровых водяных знаков из числа проанализированных методов был взят метод «Koch», поскольку:

- 1) в отличие от методов «Barni» и «Fridrich-2» ДКП в нем осуществляется не над всем изображением, а над блоками размером 8×8 пикселей, что позволяет адаптироваться к локальной яркости и гладкости изображения;
- 2) в отличие от методов «Podilchuk», «Hsu-still», «Tao» и «Cox» для извлечения ЦВЗ он не требует наличия исходного изображения.

Перечисленным выше условиям также удовлетворяет и метод «Benham», который также основан на методе «Koch», но он сложнее в реализации, и предложенный его авторами способ предварительной оценки пригодности ДКП блоков для встраивания информации зависит от используемого изображения.

На рисунке 1 представлен фрагмент изображения с внедренным в него по методу «Koch» цифровым водяным знаком.

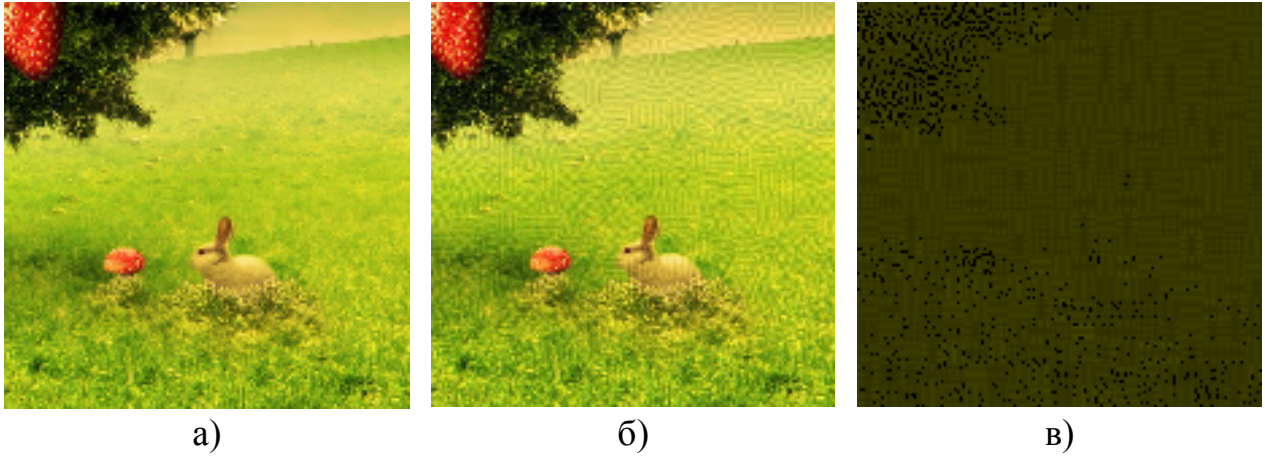


Рисунок 1 – Фрагменты изображений:
 а) исходного; б) с внедренным по методу «Koch» ЦВЗ;
 в) внесенные искажения

Таким образом, показано, что цифровые водяные знаки, внедренные по методу «Koch», могут быть легко локализованы даже визуально.

Исходя из этого, было введено следующее определение незаметности для ЦВЗ.

Незаметным будем считать цифровой водяной знак, для которого невозможно локализовать изменяемые при его внедрении области изображения без наличия исходного контейнера и/или знаний об используемом при этом методе и секретном ключе.

Как уже ранее упоминалось, в процессе получения исходного изображения присутствует множество независимых источников Гауссового шума с различными амплитудами. Соответственно локализовать изменяемые при внедрении ЦВЗ области тем сложнее, чем больше похожи вносимые изменения по своим свойствам на случайный шум. Одним из таких свойств является отсутствие корреляции между величинами искажений в соседних рядах пикселей. Исходя из этого, был предложен следующий показатель r для оценки вносимых при внедрении ЦВЗ искажений:

$$r = \frac{r_x + r_y}{2}; \quad (5)$$

$$r_x = \frac{1}{Width} \cdot \sum_{i=1}^{Width-1} \left[\frac{1}{\sigma_x^{i-1} \cdot \sigma_x^i} \cdot \sum_{j=0}^{Height-1} (Dif_{i-1,j} - m_x^{i-1}) \cdot (Dif_{i,j} - m_x^i) \right]^2; \quad (6)$$

$$r_y = \frac{1}{Height} \cdot \sum_{j=1}^{Height-1} \left[\frac{1}{\sigma_y^{j-1} \cdot \sigma_y^j} \cdot \sum_{i=0}^{Width-1} (Dif_{i,j-1} - m_y^{j-1}) \cdot (Dif_{i,j} - m_y^j) \right]^2; \quad (7)$$

$$Dif_{x,y} = |Y(Pixel'_{x,y}) - Y(Pixel_{x,y})|; \quad (8)$$

$$m_x^i = \frac{1}{Height} \cdot \sum_{j=0}^{Height-1} Dif_{i,j}; \quad (9)$$

$$m_y^j = \frac{1}{Width} \cdot \sum_{i=0}^{Width-1} Dif_{i,j}; \quad (10)$$

$$\sigma_x^i = \sqrt{\sum_{j=0}^{Height-1} (Dif_{i,j} - m_x^i)^2}; \quad (11)$$

$$\sigma_y^j = \sqrt{\sum_{i=0}^{Width-1} (Dif_{i,j} - m_y^j)^2}; \quad (12)$$

где r – показатель для оценки вносимых при внедрении ЦВЗ искажений, $r \in [0;1]$; r_x и r_y – среднее значение квадрата коэффициента линейной корреляции вносимых внедрением ЦВЗ искажений изображения по вертикали и по горизонтали соответственно; m_x^i и m_y^j – математические ожидания величины искажений в соответствующем столбце или строке матрицы пикселей; σ_x^i и σ_y^j – среднеквадратичные отклонения величины искажений в соответствующем столбце или строке матрицы пикселей; $Dif_{i,j}$ – величина искажения яркостной составляющей цвета соответствующего пикселя; $Width$ – ширина изображения в пикселях; $Height$ – высота изображения в пикселях; $Pixd'$ – матрица пикселей полученного изображения; $Pixel$ – матрица пикселей исходного изображения; Y – оператор определения яркостной составляющей цвета пикселя. По сути, значение показателя r – это среднее значение квадрата коэффициента линейной корреляции между всеми соседними рядами пикселей изображения, в котором яркость цвета каждого пикселя равна модулю разности яркостей соответствующих пикселей в полученном и исходном изображениях. Исходя из этого, ЦВЗ тем незаметнее, чем меньше для него значение данного показателя.

Вторая глава посвящена разработке методики внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

В разделе 2.1 представлена постановка задачи.

В разделе 2.2 проведен анализ однородности искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы, вносимых атаками на цифровые водяные знаки, при помощи критерия U-Манна-Уитни.

В результате анализа, выполненного при помощи пакета программ StirMark Benchmark 4.0.129 на базе 4 изображений, случайно отобранных из числа размещенных в Интернет-хранилище изображений imagesbase.com, было установлено, что частотные коэффициенты, расположенные на 7-ой, 8-ой и 9-ой побочных диагоналях ДКП матрицы (рисунок 2), подвержены статистически неоднородным искажениям.

1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	9
3	4	5	6	7	8	9	10
4	5	6	7	8	9	10	11
5	6	7	8	9	10	11	12
6	7	8	9	10	11	12	13
7	8	9	10	11	12	13	14
8	9	10	11	12	13	14	15

Рисунок 2 – Матрица частотных коэффициентов

В разделе 2.3 проведен анализ статистических свойств искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы, вносимых атаками на цифровые водяные знаки (добавлением шума, JPEG-сжатием, медианной фильтрацией), а именно на базе 82 случайно отобранных из числа размещенных в Интернет-хранилище изображений imagesbase.com определены их математические ожидания и среднеквадратические отклонения (СКО, σ), а также вероятности того, что величина искажения окажется в пределах следующих интервалов: $[-\sigma; +\sigma]$, $[-2\sigma; +2\sigma]$, $[-3\sigma; +3\sigma]$. При этом общее число анализируемых ДКП-блоков равнялось 1 124 837.

В результате анализа было установлено:

1) математические ожидания искажений частотных коэффициентов лежат в интервале от -0.11 до 0.08 ;

2) частотные коэффициенты ДКП матрицы следует изменять на величины не менее трех среднеквадратических отклонений их искажений, чтобы компенсировать их не менее чем на 94.61%, т.е. на величины от 5 (низкая степень стойкости внедрения – достигается стойкость по отношению к медианной фильтрации с единичным размером окна и JPEG-сжатию с JPEG Quality level не менее 90) до 64 (высокая степень стойкости внедрения – достигается стойкость по отношению ко всем рассмотренным атакам).

В разделе 2.4 проведен анализ значений показателей визуальных искажений, вносимых в изображения изменениями частотных коэффициентов ДКП матрицы.

В результате анализа было установлено, что по показателю максимальной разности для внедрения ЦВЗ предпочтительнее использовать частотные коэффициенты 7-ой и 8-ой побочных диагоналей ДКП матрицы, а по показателям средней абсолютной разности и нормированной взаимной корреляции – коэффициенты 8-ой и 9-ой.

В разделе 2.5 разработана модель нейросетевого предсказателя значений среднечастотных коэффициентов ДКП матрицы, схема которого представлена на рисунке 3.

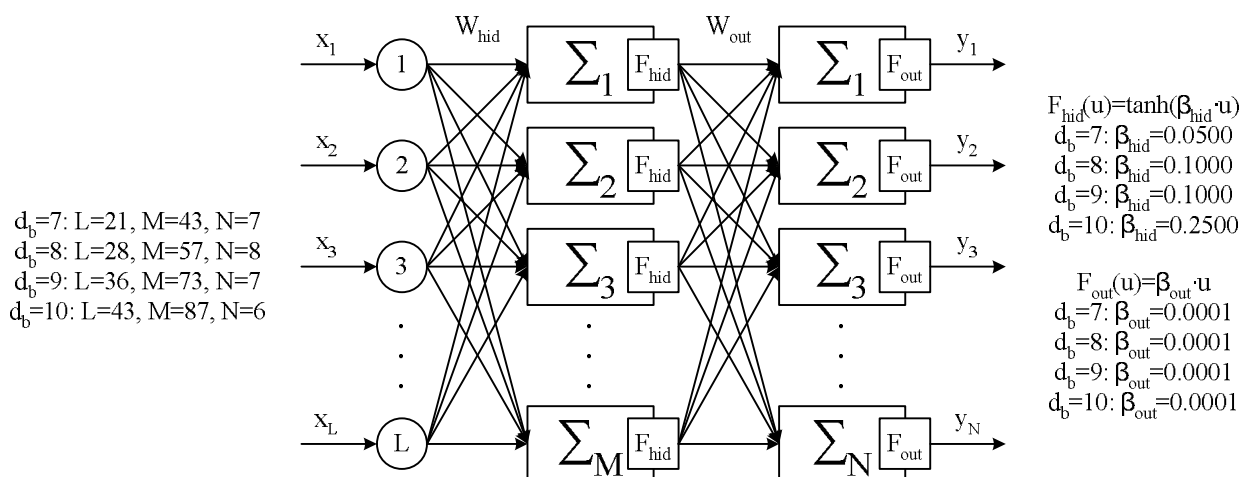


Рисунок 3 – Схема нейросетевого предсказателя значений среднечастотных коэффициентов ДКП матрицы

Здесь множество входных сигналов, обозначенных x_1, x_2, \dots, x_L поступает на искусственный нейрон. Эти входные сигналы, в совокупности обозначаемые вектором X , умножаются на соответствующие веса w_1, w_2, \dots, w_N и поступают на суммирующий блок, обозначенный Σ . Множества весов в совокупности обозначаются матрицами W_{hid} и W_{out} соответственно для искусственных нейронов скрытого и выходного слоев. Суммирующий блок складывает взвешенные входы алгебраически, создавая выход u . Далее u поступает на вход функции активации (F_{hid} или F_{out}), определяя окончательный сигнал нейрона на выходе. Размеры слоев и функции активации зависят от номера диагонали ДКП матрицы (d_b).

В разделе 2.6 разработан алгоритм выбора способа изменения ДКП коэффициентов, основу которого составляют аппарат генетических алгоритмов и метод «Koch».

Шаги алгоритма следующие.

Шаг 1. Инициализация, или выбор исходной популяции хромосом

Инициализация, т.е. формирование исходной популяции. Каждая особь популяции представляет собой решение задачи, иначе говоря, является кандидатом на решение. В рассматриваемом здесь варианте использования генетических алгоритмов хромосомой $ch_n = \{c_n^{l,m}\}$ является вариант изменения ДКП коэффициентов, т.е. значение гена $c_n^{l,m}$ – один из возможных вариантов значения ДКП коэффициента $c_b(l, m)$, где b – номер ДКП блока изображения, который используется для внедрения бита ЦВЗ s_i .

Пусть внедрение бита s_i осуществляется в коэффициенты с координатами $(j_{i,1}, k_{i,1})$ и $(j_{i,2}, k_{i,2})$, причем оба эти коэффициента принадлежат одной диагонали ДКП матрицы $d_b \in \{7; 8; 9\}$.

Формирование исходной популяции хромосом осуществляется по следующим формулам:

– для генов $c_n^{j_{i,1},k_{i,1}}$ и $c_n^{j_{i,2},k_{i,2}}$:

$$v_{rnd}(l, m) = |c_b(l, m) + \text{random}(-\varepsilon, \varepsilon)|, \quad (13)$$

$$v_\varepsilon(l, m) = |c_b(l, m)| + \varepsilon, \quad (14)$$

$$c_n^{j_{i,1},k_{i,1}} = \begin{cases} \max(v_{rnd}(j_{i,1},k_{i,1}), v_\varepsilon(j_{i,2},k_{i,2})) \cdot \text{sign}(c_b(j_{i,1},k_{i,1})), & \text{если } s_i = 1 \\ v_{rnd}(j_{i,2},k_{i,2}) \cdot \text{sign}(c_b(j_{i,2},k_{i,2})), & \text{если } s_i = 0 \end{cases}, \quad (15)$$

$$c_n^{j_{i,2},k_{i,2}} = \begin{cases} v_{rnd}(j_{i,1},k_{i,1}) \cdot \text{sign}(c_b(j_{i,1},k_{i,1})), & \text{если } s_i = 1 \\ \max(v_{rnd}(j_{i,2},k_{i,2}), v_\varepsilon(j_{i,1},k_{i,1})) \cdot \text{sign}(c_b(j_{i,2},k_{i,2})), & \text{если } s_i = 0 \end{cases}, \quad (16)$$

где ε – зависящая от степени стойкости внедрения ЦВЗ положительная величина;

– для генов, соответствующих остальным ДКП коэффициентам диагонали d_b :

$$c_n^{l,m} = c_b(l, m) + \text{random}(-0.5, +0.5) \cdot \varepsilon; \quad (17)$$

– для генов, соответствующих остальным ДКП коэффициентам:

$$c_n^{l,m} = c_b(l, m). \quad (18)$$

Таким образом, в отличие от метода «Koch», при внедрении бита ЦВЗ s_i изменяются не 2 ДКП коэффициента отобранного для этого блока изображения под номером b , а все коэффициенты, расположенные на одной диагонали ДКП матрицы $d_b \in \{7; 8; 9\}$.

Шаг 2. Оценка приспособленности хромосом в популяции

Оценивание приспособленности хромосом в популяции состоит в расчете функции приспособленности для каждой хромосомы этой популяции. Чем больше значение этой функции, тем выше «качество» хромосомы.

Значение функции приспособленности для хромосомы $ch_n = \{c_n^{l,m}\}$ равно нулю в случае не соблюдения для генов $c_n^{j_{i,1},k_{i,1}}$ и $c_n^{j_{i,2},k_{i,2}}$ соотношения

$$\begin{cases} |c_n^{j_{i,2},k_{i,2}}| \geq |c_n^{j_{i,1},k_{i,1}}| + \varepsilon, & \text{если } s_i = 0 \\ |c_n^{j_{i,1},k_{i,1}}| \geq |c_n^{j_{i,2},k_{i,2}}| + \varepsilon, & \text{если } s_i = 1 \end{cases}; \quad (19)$$

в противном же случае предлагается определять его как обратное значение суммы квадратов разностей между значениями генов и выходами соответствующих им искусственных нейронных сетей:

$$F(ch_n) = \frac{1}{\sum_{d_b < \text{diag}(l,m) \leq 10} [c_n^{l,m} - ANN(ch_n)_{l,m}]^2}, \quad (20)$$

где $F(ch_n)$ – значение функции приспособленности хромосомы ch_n ; $ANN(ch_n)_{l,m}$ – значение, полученное на соответствующем гену $c_n^{l,m}$ выходе искусственной нейронной сети. При этом, в отличие от метода «Koch», при внедрении бита ЦВЗ s_i учитываются значения не только изменяемых ДКП

коэффициентов.

Если для хромосомы значение функции приспособленности оказалось равным нулю, то ее следует заменить вновь сгенерированной (согласно формулам 13-18), после чего значение функции для нее пересчитать.

Шаг 3. Проверка условия остановки

Переход к завершающему этапу выбора «наилучшей» хромосомы должен быть осуществлен после выполнения заданного количества итераций I_{GA} . В противном случае на следующем шаге выполняется селекция.

Шаг 4. Селекция хромосом

Селекция хромосом заключается в выборе (по рассчитанным на втором этапе значениям функции приспособленности) тех хромосом, которые будут участвовать в создании потомков для следующей популяции:

$$v(ch_i) = p_s(ch_i) \cdot 100\%, \quad (21)$$

$$p_s(ch_i) = \frac{F(ch_i)}{\sum_{i=1}^N F(ch_i)}, \quad (22)$$

где $p_s(ch_i)$ – вероятность селекции хромосомы ch_i . Селекция хромосомы может быть представлена как результат поворота колеса рулетки.

В результате процесса селекции создается родительская популяция с той же численностью, что и текущая популяция (N).

Шаг 5. Применение генетических операторов и формирование новой популяции

Для начала, из родительской популяции выбираются пары хромосом. Далее, к каждой такой паре применяется вероятностный оператор скрещивания (кроссовер).

Из числа существующих в настоящее время разновидностей оператора скрещивания предлагается использовать смешанный кроссовер (англ.: BLX-alpha crossover).

Пусть $C_1 = (c_1^1; c_2^1; \dots; c_n^1)$ и $C_2 = (c_1^2; c_2^2; \dots; c_n^2)$ – две отобранные для скрещивания хромосомы. Тогда результатом использования смешанного кроссовера будет одна хромосома-потомок $H = (h_1; h_2; \dots; h_n)$, получаемая по следующим формулам:

$$h_i = \text{random}(c_i^{\min} - \alpha \cdot I_i; c_i^{\max} + \alpha \cdot I_i), \quad (23)$$

$$c_i^{\min} = \min(c_i^1; c_i^2), \quad (24)$$

$$c_i^{\max} = \max(c_i^1; c_i^2), \quad (25)$$

$$I_i = c_i^{\max} - c_i^{\min}, \quad (26)$$

где α – параметр оператора скрещивания.

Для каждой пары родителей с вероятностью P_{GA}^C применяется оператор скрещивания, после чего на следующую стадию переходят хромосома-потомок и «наилучшая» из выбранной родительской пары хромосома. Соответственно, с

вероятностью $1 - P_{GA}^C$ оператор скрещивания не применяется, и тогда обе отобранные родительские особи переходят на следующую стадию, на которой ко всем перешедшим в неизменном виде хромосомам применяется оператор мутации.

Оператор мутации с вероятностью P_{GA}^M изменяет значение гена в хромосоме, причем эта вероятность обычно очень мала (чаще всего $0.0 \leq P_{GA}^M \leq 0.1$), тогда как вероятность скрещивания достаточно высока (обычно $0.5 \leq P_{GA}^C \leq 1.0$). В рамках решаемой задачи изменение генов при мутации должно осуществляться согласно формулам 13-18.

На заключительной стадии шага вся предшествующая популяция хромосом замещается новой популяцией потомков.

Шаг 6. Выбор «наилучшей» хромосомы

На заключительном шаге методики фиксируется результат его работы в виде хромосомы с наибольшим значением функции приспособленности среди популяций на всех итерациях. При этом, если это значение отлично от нуля, производится соответствующее изменение ДКП коэффициентов.

Схематически данный алгоритм можно изобразить следующим образом:



Рисунок 4 – Схема алгоритма выбора способа изменения ДКП коэффициентов

На рисунке 4 пунктиром обозначены шаги, являющиеся классическими для генетических алгоритмов, а сплошными линиями выделены шаги, подвергшиеся изменению.

В разделе 2.7 разработана методика внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов.

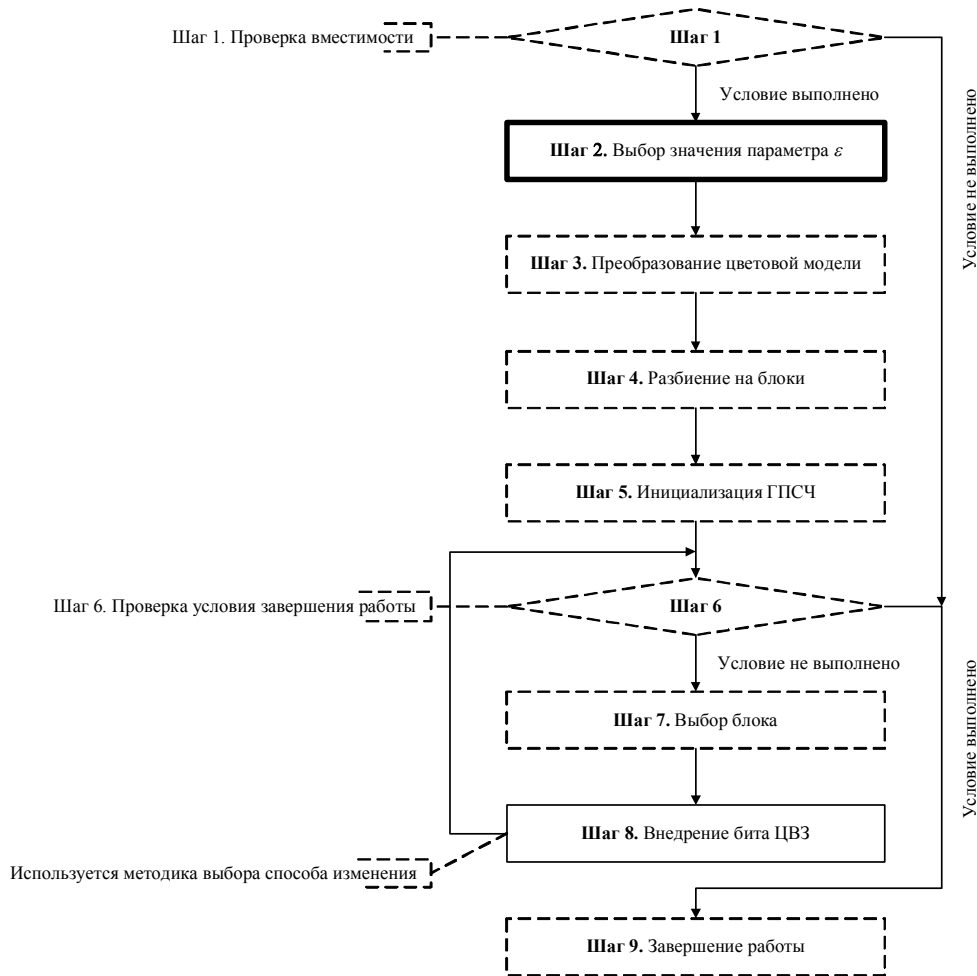


Рисунок 5 – Схема процесса внедрения ЦВЗ

На рисунке 5 пунктиром обозначены шаги, являющиеся классическими для существующих методов, методик и алгоритмов внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения, сплошными линиями выделены шаги, подвергшиеся изменению, а жирными сплошными – введенные шаги.

Методика осуществляет внедрение ЦВЗ, представляющего собой последовательность из N бит $s_i \in \{0;1\}$, с заданным для него уровнем желаемой стойкости к наиболее распространенным атакам.

Шаги методики следующие.

Шаг 1. Проверка вместимости

Внедрение ЦВЗ осуществляется побитно. Каждый бит при этом внедряется в отдельный ДКП блок размером 8×8 . Если обозначить высоту изображения через $Height$, а его ширину – через $Width$, то общее число ДКП блоков в изображении составит

$$BlockCount = \left\lceil \frac{Height}{8} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{Width}{8} \right\rceil. \quad (27)$$

Очевидно, что для внедрения N бит ЦВЗ должно выполняться условие

$$BlockCount \geq N. \quad (28)$$

Только при его соблюдении осуществляется переход к следующему шагу методики.

Шаг 2. Выбор значения параметра ε

В результате проведенного в разделе 2.3 анализа статистических свойств искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы, вносимых атаками на цифровые водяные знаки, было установлено, что частотные коэффициенты ДКП матрицы следует изменять на величины от 5 до 64. Исходя из этого, была введена следующая градация значений параметра ε , определяющего степень стойкости внедрения ЦВЗ:

Таблица 1 – Значения ε

Степень стойкости внедрения информации	Значение ε	Допустимые атаки
Низкая	5	JPEG-сжатие с уровнем качества 90 и выше, медианная фильтрация с единичным размером окна
Ниже средней	20	JPEG-сжатие с уровнем качества 50 и выше, медианная фильтрация с единичным размером окна
Средняя	35	JPEG-сжатие с уровнем качества 10 и выше, медианная фильтрация с единичным размером окна
Выше средней	49	JPEG-сжатие, медианная фильтрация с размером окна до 5, незначительное добавление шума
Высокая	64	JPEG-сжатие, медианная фильтрация, значительное добавление шума

Шаг 3. Преобразование цветовой модели

Поскольку ЦВЗ внедряется в яркостную составляющую изображения, т.к. она наименее подвержена искажениям, необходимо перевести его в цветоразностное, яркостное представление (фактически преобразовать цветовую модель изображения в модель YCbCr).

Шаг 4. Разбиение на блоки

Матрица яркостной составляющей изображения разбивается на блоки размером 8×8 .

Шаг 5. Инициализация генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ)

На данном шаге при помощи пользовательского секретного ключа происходит инициализация генератора псевдослучайных чисел.

Шаг 6. Проверка условия завершения работы

Переход к следующему шагу методики осуществляется лишь в том случае, если не все биты ЦВЗ были внедрены в изображение. В противном случае осуществляется переход к завершающему шагу под номером 9.

Шаг 7. Выбор блока

На данном шаге для очередного бита ЦВЗ s_i выбирается при помощи ГПСЧ блок изображения, в который он будет внедрен. Выбор осуществляется среди неиспользованных ранее блоков.

Шаг 8. Внедрение бита ЦВЗ

На данном шаге отобранный для внедрения блок яркостной составляющей изображения подвергается ДКП, после чего для внедряемого бита ЦВЗ s_i согласно рассмотренному ранее алгоритму, основанному на использовании аппарата искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, выбирается способ изменения полученных ДКП коэффициентов.

Шаг 9. Завершение работы

На данном шаге выполняется преобразование цветоразностного, яркостного представления изображения в его исходную цветовую модель.

Таким образом, в отличие от существующих аналогов, при внедрении ЦВЗ было предложено использовать аппарат нейронных сетей и генетических алгоритмов, а также установлены границы значений параметра ε и введена градация его значений в зависимости от степени стойкости внедрения ЦВЗ.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию разработанной методики внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов. Для его проведения из Интернет-хранилища www.hdwallpapers.net было случайным образом отобрано 200 изображений. Данные изображения были полностью заполнены псевдослучайными последовательностями битов с разными степенями стойкости внедрения, после чего для разработанной методики ($I_{GA} = 10$, $N_{GA} = 20$, $P_{GA}^C = 0.7$, $P_{GA}^M = 0.1$, обучающая выборка сформирована на основе 2072 изображений разной тематики, взятых из Интернет-хранилища imagesbase.com, общее количество блоков размером 8×8 равнялось 34 485 865, выполнено 10000 циклов обучения) и метода «Koch» были определены средние значения показателя r . Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 6.

Таблица 2 – Средние значения показателя r

Диаг.	ε	Метод «Koch»	Разработанная методика
7	5	0.357	0.157
7	35	0.179	0.015
7	64	0.138	0.010
8	5	0.359	0.129
8	35	0.168	0.009
8	64	0.131	0.006
9	5	0.315	0.116
9	35	0.144	0.017
9	64	0.106	0.016

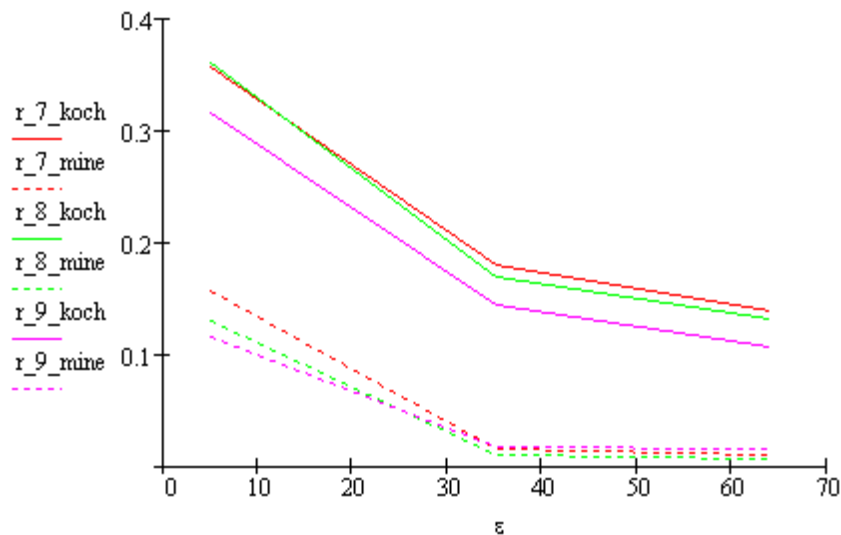


Рисунок 6 – График зависимости среднего значения показателя для оценки вносимых при внедрении ЦВЗ искажений (r) от степени стойкости внедрения (ε)

На основании результатов проведенного экспериментального исследования были сделаны выводы о том, что для внедрения информации предпочтительнее использовать частотные коэффициенты 8 и 9 побочных диагоналей ДКП матрицы, а также о том, что внедренные по разработанной методике цифровые водяные знаки незаметнее тех, что были внедрены с использованием метода «Koch», т.к. значение показателя r для них меньше на 56.02%-95.42%, а значит цель диссертационной работы достигнута.

Четвертая глава посвящена рассмотрению возможных областей применения разработанной методики внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов, а именно:

- 1) защита авторских прав на цифровые изображения;
- 2) защита цифровых изображений от подделки.

В **заключении** приведены основные научные и практические результаты:

- 1) среди частотных коэффициентов ДКП матрицы согласно критерию U-Манна-Уитни нет статистически однородных;
- 2) частотные коэффициенты ДКП матрицы следует изменять на величины от 5 до 64 в зависимости от той степени стойкости внедрения информации, которую необходимо достигнуть;
- 3) для внедрения информации предпочтительнее использовать частотные коэффициенты 8 и 9 побочных диагоналей ДКП матрицы;
- 4) разработана модель нейросетевого предсказателя значений среднечастотных коэффициентов ДКП матрицы;
- 5) разработан алгоритм выбора способа изменения ДКП коэффициентов при внедрении цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов;
- 6) разработана методика внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических

алгоритмов;

7) полученные результаты позволяют на 56.02%-95.42% уменьшить среднее значение квадрата коэффициента линейной корреляции вносимых внедрением ЦВЗ искажений изображения (как по горизонтали, так и по вертикали), тем самым, повышая их незаметность.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

В рецензируемых научных журналах и изданиях:

1) Коваленко М.П., Букин А.Г., Коваленко А.П. Исследование зависимости числа пригодных для сокрытия информации в изображениях коэффициентов матрицы дискретно-косинусного преобразования от используемой цветовой модели // Известия Института инженерной физики. 2010. №3(17). С. 30-33

Статьи:

2) Коваленко М.П. Исследование статистических свойств искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы в условиях воздействия на изображение случайного шума // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2012. №1(67). С. 78-81

3) Коваленко М.П. Исследование статистических свойств искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы в условиях воздействия на изображение медианного фильтра // Научная перспектива. 2012. №2. С. 47-48

4) Коваленко М.П. Исследование статистических свойств искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы в условиях воздействия на изображение JPEG-сжатия // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2012. №2(68). С. 96-99

5) Коваленко М.П. Исследование однородности искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы, вносимых JPEG-сжатием и медианной фильтрацией изображений // Международная заочная научно-практическая конференция «Технические науки: теоретические и прикладные аспекты». Труды. – Новосибирск: СибАК. – 2012. – С. 51-57

6) Коваленко М.П. Исследование статистических свойств искажений частотных коэффициентов ДКП матрицы при различных воздействиях на изображение // Научный обозреватель. 2012. №3. С. 39-40

7) Коваленко М.П. Генетические алгоритмы в стеганографии // IX Международная заочная научно-практическая конференция «Технические науки - от теории к практике». Труды. – Новосибирск: СибАК. – 2012. – С. 17-20

8) Коваленко М.П., Смирнов Я.Д. Использование искусственных нейронных сетей при внедрении цифровых водяных знаков в графические изображения // VIII Международная научно-практическая конференция «Эффективные инструменты современных наук». Труды. – Прага: Publishing House “Education and Science” s.r.o. – 2012. – С. 87-97

9) Коваленко М.П. Модель нейросетевого предсказателя значений среднечастотных коэффициентов ДКП матрицы // Научная перспектива. 2012. №8. С. 94-96

10) Коваленко М.П., Коваленко А.П. Методика выбора способа изменения ДКП коэффициентов при внедрении цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов // VIII Международная научно-практическая конференция «Научный прогресс на рубеже тысячелетий». Труды. – Прага: Publishing House “Education and Science” s.r.o. – 2012. – С. 41-47

11) Коваленко М.П., Рязанцев А.М., Коваленко А.П. Методика внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения на основе искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов // VIII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации». Труды. – Перемишль: Sp. z o.o. “Nauka I studia”. – 2012. – С. 70-78