

**МЕТОД ВСТРАИВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ JPEG, МИНИМИЗИРУЮЩИЙ ПСИХОВИЗУАЛЬНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ОБЪЕМОВ ВСТРОЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ****А.С. Кирмичиева, Н.И. Кушниренко, А.А. Яковенко, Н.В. Калашников, А.Э. Лозан**Одесский национальный политехнический университет,  
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: nasananastia@ukr.net

Цифровые фотографии традиционно являются одним из наиболее распространенных типов стеганографических контейнеров. Подавляющее большинство цифровых фотографий хранится в сжатом виде с использованием алгоритмов семейства JPEG, или алгоритма webP, который структурно отличается от JPEG лишь в малозначительных деталях. Поскольку указанные алгоритмы не сохраняют точные значения пикселей, добавление скрытой информации в файлы такого типа предполагает добавление информации в т.н. пространстве преобразований (transform domain), другими словами, изменению подлежат квантованные коэффициенты дискретного косинусного преобразования (ДКП), именно те данные, которые остаются неизменными в процессе сжатия изображения. В широко распространенных стеганографических алгоритмах, работающих с такими форматами, обычно изменяются младшие значащие биты (LSB) квантованных компонентов ДКП блоков изображения. При этом внедрение обычно проводится последовательно, начиная с начальных блоков изображения. Исходя из этого, следует, что для усовершенствования метода необходимо изменение последовательности внедрения битов информации. В данной статье разработан стеганографический алгоритм для изображений JPEG, функционирующий в области квантованных ДКП-компонентов, который позволяет оценить психовизуальную заметность внедрения для каждого ДКП-компонента каждого блока изображения-носителя и произвести внедрение в те ДКП-компоненты, для которых заметность является минимальной. Для проверки эффективности стеганографического алгоритма используются объективные критерии, которые позволяют получить просто вычисляемую характеристику изображения разностного сигнала между двумя изображениями: исходным и преобразованным.

**Ключевые слова:** цифровая стеганография, JPEG, дискретное косинусное преобразование, квантование, DCT-коэффициенты, психовизуальная модель, JG.

**Введение**

Цифровые фотографии традиционно являются одним из наиболее распространенных типов стеганографических контейнеров. Разработано множество алгоритмов, позволяющих добавлять скрытые данные к цифровым изображениям, а также множество алгоритмов, позволяющих детектировать внедрение по тому или иному алгоритму.

Подавляющее большинство цифровых фотографий хранится в сжатом виде с использованием алгоритмов семейства JPEG, или алгоритма webP, который структурно отличается от JPEG лишь в малозначительных деталях. Поскольку указанные алгоритмы не сохраняют точные значения пикселей, добавление скрытой информации в файлы такого типа предполагает добавление информации в т.н. пространстве преобразований (transform domain), другими словами, изменению подлежат квантованные коэффициенты дискретного косинусного преобразования (ДКП), именно те данные, которые остаются неизменными в процессе сжатия изображения.

В широко распространенных стеганографических алгоритмах, работающих с такими форматами, обычно изменяются младшие значащие биты (LSB) квантованных

компонентов ДКП блоков изображения. При этом внедрение обычно проводится последовательно, начиная с начальных блоков изображения.

Назовем компоненты ДКП блоков изображения, в которые может быть произведено внедрение, точками внедрения.

Если количество информации, которая должна быть добавлена в изображение, невелико по сравнению с количеством таких точек внедрения в изображении, то в распространенных алгоритмах заполняются только точки внедрения в начале изображения.

## **Цель работы**

*Целью* данной статьи является разработка алгоритма, который позволяет создать карту точек внедрения в изображении, оценить каждую точку внедрения на предмет того, насколько заметно будет внедрение в эту точку согласно психовизуальной модели JPEG, и произвести внедрение в точки, начиная с самых «незаметных».

Таким образом, если размер внедряемого сообщения меньше количества точек внедрения, данные будут добавляться в те точки, которые приведут к наименьшей заметности внедрения. Если размер внедряемого сообщения равен количеству точек внедрения, то заметность внедрения будет соответствовать распространенным алгоритмам, например, JSTEG.

## **Основная часть**

В первую очередь, необходимо провести анализ существующих стеганографических методов.

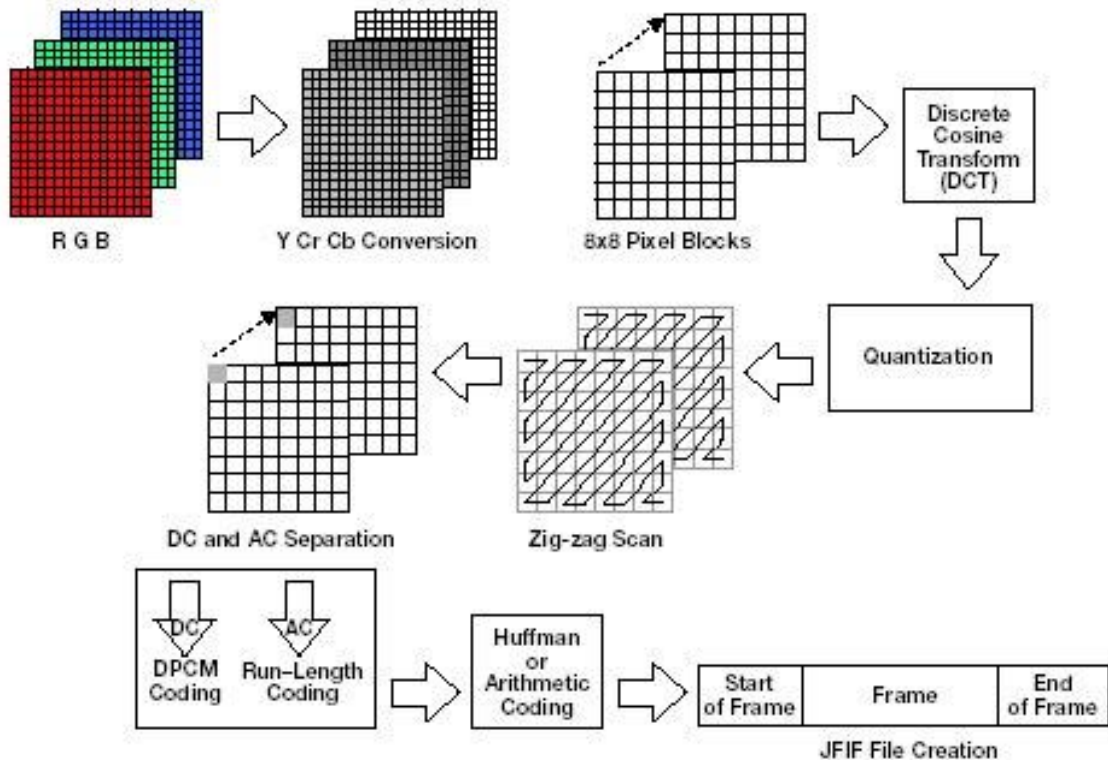
Методы замены в пространственной области. Метод замены младших бит (LSB-метод) основан на том, что младшие разряды графических, аудио- и видеоформатов несут мало информации и их изменение фактически не сказывается на качестве передаваемого изображения или звука. Это дает возможность использовать их для сокрытия конфиденциальной информации [1]. Основным преимуществом этого метода является простота реализации и возможность тайной передачи большого объема информации. Однако за счет введения дополнительной информации искажаются статистические характеристики файла-контейнера и скрытое сообщение легко обнаружить с помощью статистических методов стеганоанализа, таких как оценка энтропии и коэффициентов корреляции. Для снижения компрометирующих признаков требуется корректировка статистических характеристик. Недостатком метода является также его чувствительность к операциям цифровой обработки: сжатие, применение фильтрации, конвертации цветов, геометрических преобразований, дополнительного зашумления и изменения формата контейнера [2].

В методах, действующих в частотной области, данные скрываются в коэффициентах ортогонального преобразования контейнера. Для этого чаще всего используются преобразования, применяемые в современных алгоритмах сжатия с потерями (дискретное косинусное преобразование в стандарте JPEG и вейвлет-преобразование - в JPEG2000) [3]. Сокрытие информации может проводиться как в исходное изображение, так и одновременно с осуществлением сжатия изображения-контейнера. Важно, что стеганосистемы, в которых учтены особенности алгоритма сжатия, могут быть нечувствительны к дальнейшей компрессии контейнера [4]. Также они обеспечивают большую устойчивость к геометрическим преобразованиям и выявлению канала передачи (по сравнению с методом LSB), поскольку есть возможность в широком диапазоне варьировать качество сжатого изображения, что делает невозможным определение происхождения искажения.

В данной статье рассматривается один из методов, использующих частотную область, а именно, метод, основанный на внедрении битов сообщения в наименее заметные места на этапе дискретного косинусного преобразования, в связи с его стойкостью к различного рода превращениям и операциям цифровой обработки.

Рассмотрим подробно алгоритм сжатия изображения JPEG.

Алгоритм JPEG оперирует областями 8x8, на которых яркость меняется сравнительно плавно. Алгоритм разработан группой экспертов в области фотографии [5]. JPEG – Joint Photographic Expert Group – подразделение в рамках ISO – Международной организации по стандартизации. Шаги алгоритма изображены на рисунке 1.



**Рис. 1.** Алгоритм сжатия изображения формата JPEG

В этом алгоритме изображение преобразуется из цветового пространства RGB в YCbCr, где Y – компонента яркости, а Cb и Cr – компоненты цветности. Поэтому важнее сохранить большую точность при передаче Y, чем при передаче Cb и Cr. Затем значения каналов разбиваются на блоки 8x8. Каждый блок подвергается дискретному косинусному преобразованию (ДКП), являющемуся разновидностью дискретного преобразования Фурье [6]. Таким образом, при преобразовании получается матрица, элементы которой соответствуют интенсивности различных пространственных частот исходного блока.

Для каждого элемента матрицы дискретного косинусного преобразования существует соответствующий элемент матрицы квантования. Результирующая матрица получается делением каждого элемента матрицы дискретного косинусного преобразования на соответствующий элемент матрицы квантования и последующим округлением результата до ближайшего целого числа. Как правило, значения элементов матрицы квантования растут в направлении слева направо и сверху вниз [7]. Для разработки алгоритма была выбрана стандартная матрица квантования стандарта IJG (рис. 2).

16, 11, 10, 16, 24, 40, 51, 61,
12, 12, 14, 19, 26, 58, 60, 55,
14, 13, 16, 24, 40, 57, 69, 56,
14, 17, 22, 29, 51, 87, 80, 62,
18, 22, 37, 56, 68, 109, 103, 77,
24, 35, 55, 64, 81, 104, 113, 92,
49, 64, 78, 87, 103, 121, 120, 101,
72, 92, 95, 98, 112, 100, 103, 99

**Рис. 2.** Матрица квантования JG

Полученная матрица преобразуется в 64-элементный вектор при помощи «зигзаг»-преобразования. Таким образом, в начале вектора располагаются коэффициенты матрицы, соответствующие низким частотам, а в конце – высоким. Полученный вектор сворачивается с помощью алгоритма группового кодирования RLE, а затем кодируется кодами Хаффмана.

Чтобы сделать факт внедрения наименее заметным с точки зрения психовизуальной модели JPEG, необходимо выбрать для внедрения такие ДКП-компоненты блоков изображения, которые будут наименее заметны для человека.

Для определения степени незаметности изменения компонента, для каждого компонента рассчитывается рейтинг эффективности внедрения  $S$ .

Для подсчета рейтинга  $S$  используются два соображения:

- внедрение наименее заметно в том частотном компоненте, который наименее заметен для человеческого зрения. Для определения частотной незаметности используется рейтинг  $S_{HF}$ ;
- внедрение наименее заметно в тех компонентах, которые имеют высокое абсолютное значение, в них относительная мощность изменения будет минимальна. Для определения незаметности по значению используется рейтинг  $S_v$ .

Для того чтобы определить, какие частотные компоненты наименее заметны, используется психовизуальная модель JPEG, в частности, матрицы квантования JG. Высокие числа в матрице квантования соответствуют частотным компонентам, которые с точки зрения психовизуальной модели JPEG являются наименее ценными для восприятия, то есть, наименее заметными. Внедрение в такие компоненты приведет к меньшим психовизуальным искажениям. Согласно подавляющему большинству матриц квантования JPEG, наименее заметными являются высокочастотные компоненты ДКП.

На базе матрицы квантования JG, создается матрица  $S_{HF}$ , сопоставляющая каждому из 64 спектральных компонентов ДКП индекс заметности этого компонента  $S_{HF}$ .

С другой стороны, наименьшие визуальные искажения будут достигнуты в том случае, если абсолютная величина спектрального компонента велика, в таком случае изменение младшего значащего бита будет иметь наименьший психовизуальный эффект. Следовательно, рейтинг значения  $S_v$  должен быть тем больше, чем больше абсолютное значение компонента. Также надо учитывать, что в результате внедрения компонент может быть изменен вследствие изменения его младшего значащего бита. Для того, чтобы сохранить точное значение рейтинга до и после внедрения, используется среднее значение между парой чисел, которые отличаются только

младшим значащим битом. Например, для компонентов со значением 2 и 3, рейтинг  $S_v$  составляет 2.5, для значений 4 и 5 рейтинг  $S_v$  составляет 4.5 (рис. 3).

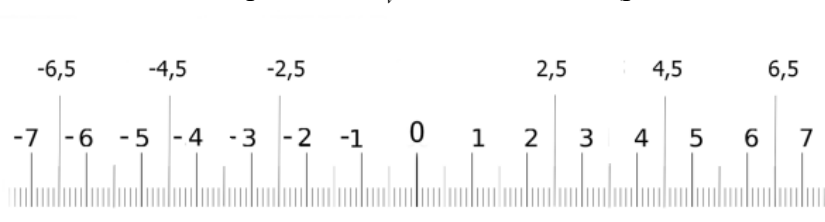


Рис. 3. Оптимизация рейтинга

Суммарный рейтинг незаметности в таком случае определяется следующим образом:

$$S = \sum(S_{HF} S_V).$$

Проведём непосредственное внедрение информации. Для проведения эксперимента было выбрано изображения с разрешением 780x507 пикселей (рис. 4). Текст внедряемого сообщения представлен в виде двоичного вектора.



Рис. 4. Исходное изображение

*Основные шаги разработанного метода внедрения сообщения в контейнер изображения формата JPEG.*

**Шаг 1.** Переход из пространства RGB в пространство YCrCb.

**Шаг 2.** Разделение изображения на блоки – октеты 8x8 пикселей.

**Шаг 3.** К каждому октету применяется двумерное дискретное косинусное преобразование. В результате получается вещественный спектр октета - spectrum.

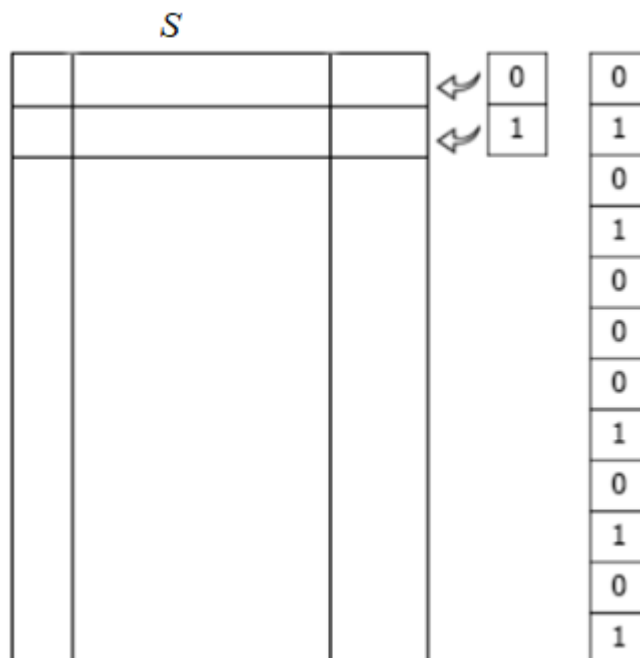
**Шаг 4.** Сформированные блоки поддаются квантованию. Далее из них формируется многомерный массив.

**Шаг 5.** Для каждого компонента spectrum вычисляется рейтинг –  $S$ . Рейтинг указывает, насколько удачен тот или иной компонент, для встраивания в него бита сообщения.

Таким образом, берутся все спектральные компоненты всех октетов изображения, и для каждого из них находится значение  $S$ . Далее производится сортировка компонентов по уменьшению его  $S$ . В полученном списке будет указываться величина компонента и его местонахождение.

Результатом этого является способ создания рейтинга значений спектрального компонента, который не зависит от того, было проведено внедрение в этот компонент или нет.

Внедрение сообщения в наименее заметные места. Сообщение представляется в виде последовательности бит, и эти биты заменяют младшие значащие биты выбранных частотных компонентов изображения, начиная с самых благоприятных согласно рейтингу  $S$  (рис. 5).



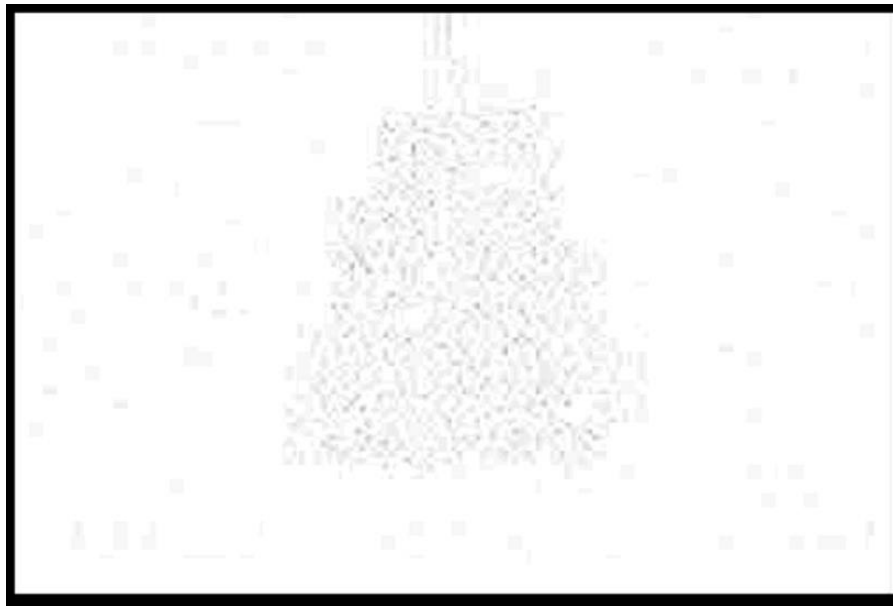
**Рис. 5.** Внедрение сообщения

Завершается сжатие изображения (рис. 6).



**Рис. 6.** Результат алгоритма

Как видно, на первый взгляд, изображения идентичны. Однако, при выделении и усилении разницы между изображениями, можно заметить незначительные, незаметные различия (рис. 7).



**Рис. 7.** Разница изображений

Реализация рассмотренного метода осуществлялась в среде математических вычислений Matlab. Для наглядности изменений сравниваются статистические показатели контейнера в исследуемом методе в зависимости от внедрения различной длины сообщения.

При изучении действия разработанного метода проводилось сравнение цветных изображений, в которые вводились сообщения различной длины (рис. 8, рис. 9, рис. 10).




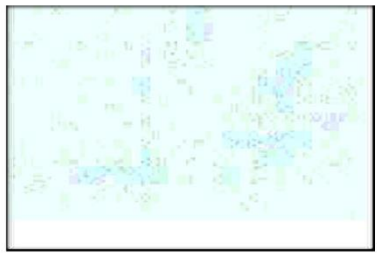
При разности этих изображений с оригиналом можно рассмотреть значительные изменения количества мест внедрения информации.

ORIGINAL	500 BIT	1000 BIT
<p><b>DIFFERENCE</b></p>		
	<p>MSE 2.5138 SNR 36.7047</p>	<p>MSE 3.3705 SNR 35.7946</p>

**Рис. 8.** Первое цветное изображение

ORIGINAL	500 BIT	1000 BIT
		
<b>DIFFERENCE</b>		
	MSE 2.2570 SNR 36.3485	MSE 2.5957 SNR 35.7780

**Рис. 9.** Второе цветное изображение

ORIGINAL	500 BIT	1000 BIT
		
<b>DIFFERENCE</b>		
	MSE 2.1690 SNR 34.5474	MSE 2.6761 SNR 34.1629

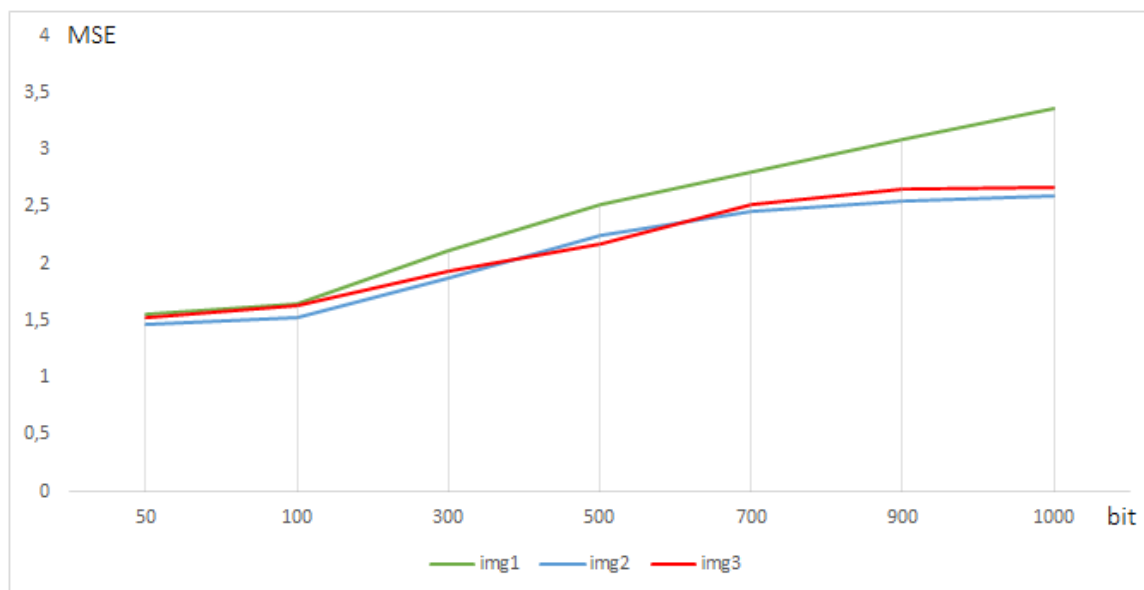
**Рис. 10.** Третье цветное изображение

Для оценки качества изображения воспользуемся объективными критериями, которые позволяют получить просто вычисляемую характеристику изображения разностного сигнала между двумя изображениями: исходным и преобразованным. Данные критерии позволяют оценивать количественные изменения значений яркости, уровень искажений изображений при их преобразованиях (фильтрации, сжатии данных и т.д.), то есть, по существу, качество самого средства преобразования – алгоритма или системы.



К таким критериям относится, прежде всего, среднеквадратический критерий (MSE). По нему мерой различия двух изображений является среднеквадратическое значение разностного сигнала двух изображений [8].

Ниже представлен график изменения среднеквадратической ошибки в зависимости от количества внедряемых бит сообщения (рис. 11).

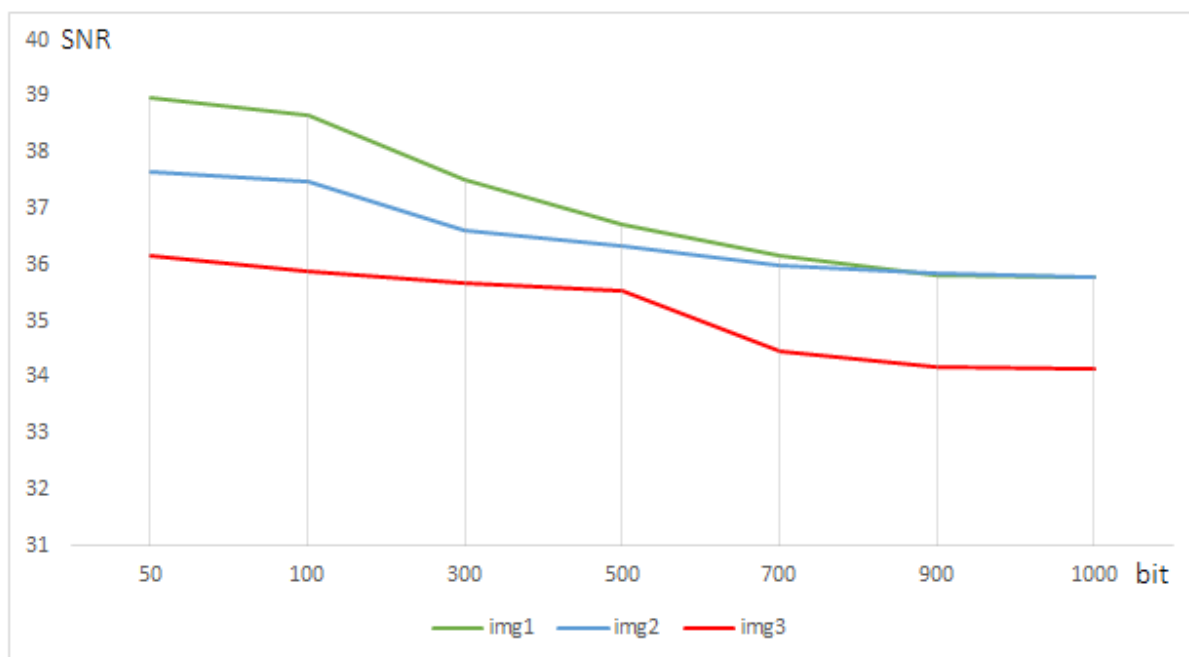


**Рис. 11.** График изменения среднеквадратической ошибки

Так, при увеличении длины встраиваемого сообщения нормированная среднеквадратическая ошибка увеличивается.

Для анализа уровня искажений, которые вносятся в контейнер во время сокрытия в нем информации, воспользуемся соотношением «сигнал/шум» – SNR [9].

На графике наблюдается уменьшение SNR, что означает увеличение шума и показывает изменения в статистических характеристиках контейнера (рис. 12).



**Рис. 12.** График отношения сигнал/шум

Благодаря тому, что данный метод внедряет биты информации именно в статистически наиболее «удачные» места, изменения среднеквадратической ошибки и значения шума увеличиваются незначительно.

## Выводы

В данной работе был разработан стеганографический алгоритм сокрытия информации в спектре изображения файла JPEG с учётом рейтинга значений спектральных компонентов. В статье были описаны основные принципы сжатия формата JPEG. Был произведён анализ методов цифровой стеганографии. На основе этого анализа, был разработан альтернативный метод внедрения, который находит наименее заметные места в изображении. Проведён статистический анализ зависимости искажений изображения от количества внедряемых бит информации.

## Список литературы

1. Грибунин, В.Г. Цифровая стеганография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. — М.: Солон-Пресс, 2009. — 272 с.
2. Fridrich, J. Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications // Cambridge University Press; 1 edition. — 2009. — Pp. 352-356.
3. Yang, C.N. Steganography and Watermarking / C.N. Yang, C.C. Lin, C.C. Chang // Nova Science Publishers Inc. — 2013. — 200 p.
4. Таранчук, А.А. Стеганографічний метод приховування даних в області частотних перетворень зображень / А.А. Таранчук, Л.Г. Гальпер // Вісник Хмельницького національного Університету, 2009. — № 2. — С. 197-201.
5. Rago, M.R. Data Hiding: Exposing Concealed Data in Multimedia, Operating Systems, Mobile Devices and Network Protocols / M.T. Rago, Chet Hosmer // Syngress. — 2012. — Pp. 115-117.
6. Калашніков, М.В. Статистичне виявлення стеганографічних повідомлень у зображеннях формату JPEG / М.В. Калашніков, О.О. Яковенко, Н.І. Кушниренко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2017. — № 25(101). — С. 310-316.
7. Wang, Y. Steganalysis of block-DCT image steganography / Y. Wang, P. Moulin // University of Illinois at Urbana-Champaign; Beckman Institute, CSL&ECE Dept., Urbana, USA.
8. Фисенко, В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко // Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. — 2009. — 192 с.
9. Кушниренко, Н.І. Урахування статистичних властивостей контейнеру для стеганографічного алгоритму / Н.І. Кушниренко, В.Я. Чечельницький, М.В. Калашніков, О.О. Яковенко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2016. — № 23(99). — С. 83-87.

## METHOD OF INTRODUCING INFORMATION IN DIGITAL IMAGES JPEG, MINIMIZING PSYCHO-VISUAL DISTORTIONS FOR SMALL VOLUMES OF IMPROVED INFORMATION

A.S. Kirmichieva, N.I. Kushnirenko, O.O. Iakovenko, M.V. Kalashnikov, A.E. Lozan

Odessa National Polytechnic University,  
Shevchenko Avenue, 1, Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: nasananastia@ukr.net

Digital photos are traditionally one of the most common types of steganographic containers. The vast majority of digital photographs are stored in a compressed form using algorithms of the JPEG family, or the webP algorithm, which is structurally different from JPEG only in minor details. Since these algorithms do not preserve the exact value of the pixels, adding hidden information to files of this type implies adding information to the so-called. transform domain (transform domain), in other words, quantized coefficients of discrete cosine transform (DCT) are subject to change, namely the data that remains unchanged during image compression. In the widespread steganographic algorithms working with such formats, the least significant bits (LSB) of quantized DCT components of image blocks usually change. In this case, the introduction is usually carried out

sequentially, starting with the initial blocks of the image. On this basis, it follows that in order to improve the method, it is necessary to change the sequence of implementation of the information bits. This article has developed a steganographic algorithm for JPEG images, which functions in the area of quantized DCT components, which allows us to evaluate the psycho-visual conspicuity of embedding for each DCT component of each block of the image carrier and embed them into those DCT components for which the visibility is minimal. To verify the effectiveness of the steganographic algorithm, objective criteria are used that allow one to obtain simply a calculated characteristic of the image of a difference signal between two images: the original and the transformed one.

**Keywords:** digital steganography, JPEG, discrete cosine transform, quantization, DCT coefficients, psycho-visual model, JG.

### МЕТОД ВБУДОВИ ІНФОРМАЦІЇ В ЦИФРОВІ ЗОБРАЖЕННЯ JPEG, ЩО МІНІМІЗУЄ ПСИХОВІЗУАЛЬНІ СПОТВОРЕННЯ ДЛЯ МАЛИХ ОБСЯГІВ ВБУДОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

А.С. Кірмічієва, Н.І. Кушніренко, О.О. Яковенко, М.В. Калашніков, А.Е. Лозан

Одеський національний політехнічний університет,  
проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: nasananastia@ukr.net

Цифрові фотографії традиційно є одним з найбільш поширених типів стеганографічних контейнерів. Переважна більшість цифрових фотографій зберігається в стислому вигляді з використанням алгоритмів сімейства JPEG, або алгоритму webP, який структурно відрізняється від JPEG лише в незначних деталях. Оскільки зазначені алгоритми не зберігають точні значення пікселів, додавання прихованої інформації в файли такого типу передбачає додавання інформації в т.зв. просторі перетворень (transform domain), іншими словами, зміні підлягають квантовані коефіцієнти дискретного косинусного перетворення (ДКП), саме ті дані, які залишаються незмінними в процесі стиснення зображення. В широко поширених стеганографічних алгоритмах, які працюють з такими форматами, як правило змінюються молодші значущі біти (LSB) квантованих компонентів ДКП блоків зображення. При цьому впровадження зазвичай проводиться послідовно, починаючи з початкових блоків зображення. Виходячи з цього, можна сказати, що для удосконалення методу необхідна зміна послідовності впровадження бітів інформації. У даній статті розроблено стеганографічний алгоритм для зображень JPEG, що функціонує в області квантованих ДКП-компонентів, який дозволяє оцінити психовізуальну помітність впровадження для кожного ДКП-компонента кожного блоку зображення-носія, і зробити впровадження в ті ДКП-компоненти, для яких помітність є мінімальною. Для перевірки ефективності стеганографічного алгоритму використовуються об'єктивні критерії, які дозволяють отримати просто обчислювану характеристику зображення від'ємного сигналу між двома зображеннями: вихідним і перетвореним.

**Ключові слова:** цифрова стеганографія, JPEG, дискретне косинусне перетворення, квантування, DCT коефіцієнти, психовізуальна модель, JG.