

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО КВАНТОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦВЗ

Внедрение цифрового водяного знака (ЦВЗ) — технология, созданная для защиты авторских прав на компьютерные файлы. ЦВЗ делятся на два класса. К первому классу относятся знаки, видимые невооруженным глазом. Ко второму - извлекаемые с помощью специальных средств. В отличие от метаданных цифровых форматов, которые могут нести в себе дополнительную информацию, ЦВЗ отличаются тем, что информация «зашифрована» прямо в сигнал. Объекты мультимедиа в этом случае будут представлять собой контейнеры (носители) данных. Подмена объекта идентификации, приведет к выводу о подделке всего документа. Цифровые водяные знаки получили своё название от старого понятия водяных знаков на ценных бумагах (деньгах, документах и пр.).

В большинстве методов внедрения данных в изображение используются те или иные свойства изображения-контейнера. Важную роль в задачах обработки и сжатия мультимедийных данных играют различные ортогональные преобразования. Среди всех линейных ортогональных преобразований наибольшую популярность получили вейвлет-преобразование и дискретное косинусное преобразование (ДКП). Учитывая широкую популярность форматов, использующих те или иные методы сжатия мультимедийных данных, естественно использовать особенности этих форматов для внедрения ЦВЗ. Данная статья посвящена одному методу внедрения ЦВЗ в изображения, сохраненные в формате JPEG.

Согласно алгоритмам JPEG исходное изображение разбивается на равные квадраты со стороной в восемь пикселей. Для цветовых компонентов на этих квадратах вычисляются коэффициенты дискретного преобразования Фурье, что является основой для сжатия изображения. Степень сжатия регулируется уровнем квантования этих коэффициентов, что, прежде всего, приводит к изменению высокочастотных коэффициентов сигнала (наименее значимых). Таким образом, если ставится задача о робастности, то есть, устойчивости ЦВЗ, то использовать необходимо, прежде всего, низкочастотные коэффициенты. Из всех коэффициентов Фурье наименьшей деформации подвержены коэффициенты, несущие в себе информацию о среднем значении яркости блока, что делает эти коэффициенты наиболее интересными для внедрения ЦВЗ. С другой стороны, изменение значений этих коэффициентов вызывает искажение всего квадрата восемь на восемь.

Целью данной работы является получение метода внедрения информации (цифрового водяного знака), позволяющего производить вложение ЦВЗ в низкочастотные коэффициенты ДКП, что делает его устойчивым к сжатию алгоритмом JPEG, и вызывающего достаточно небольшие искажения изображения-носителя ЦВЗ.

В основе предложенного метода лежит следующая конструкция. На первом шаге берём однотипные коэффициенты дискретного косинусного преобразования Фурье, сортируем их, собирая в группы коэффициенты, которые мало отличаются друг от друга. Далее вносим изменения в коэффициенты из этих групп. Тем самым вносим достаточно небольшие искажения, которые будут устойчивы к пережатию JPEG.

Придём к изложению нашего метода. Пусть  $Y$  — это яркостная составляющая изображения размерами  $(M \times N)$ .

В соответствии с идеологией JPEG, изображение делится на блоки 8 на 8. Для каждого из этих блоков вычисляется значение коэффициентов Фурье, которые затем упорядочиваются в соответствии с правилом «Зигзаг»

$$F_{(m,n)} = c(m)c(n) \cdot \sum_{k=0}^7 \sum_{l=0}^7 x_{(m,n)} \cos \frac{(2k+1)m\pi}{16} \cos \frac{(2l+1)n\pi}{16},$$

$$\text{где } c(i) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{8}}, & i = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{8}}, & i \neq 0 \end{cases} \quad \text{и } n = 1, \dots, [N/8], m = 1, \dots, [M/8]$$

здесь  $[]$  – целая часть числа.

|             |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $F_{(0,0)}$ | $F_{(0,1)}$ | $F_{(0,2)}$ | $F_{(0,3)}$ | $F_{(0,4)}$ | $F_{(0,5)}$ | $F_{(0,6)}$ | $F_{(0,7)}$ |
| $F_{(1,0)}$ | $F_{(1,1)}$ | $F_{(1,2)}$ | $F_{(1,3)}$ | $F_{(1,4)}$ | $F_{(1,5)}$ | $F_{(1,6)}$ | $F_{(1,7)}$ |
| $F_{(2,0)}$ | $F_{(2,1)}$ | $F_{(2,2)}$ | $F_{(2,3)}$ | $F_{(2,4)}$ | $F_{(2,5)}$ | $F_{(2,6)}$ | $F_{(2,7)}$ |
| $F_{(3,0)}$ | $F_{(3,1)}$ | $F_{(3,2)}$ | $F_{(3,3)}$ | $F_{(3,4)}$ | $F_{(3,5)}$ | $F_{(3,6)}$ | $F_{(3,7)}$ |
| $F_{(4,0)}$ | $F_{(4,1)}$ | $F_{(4,2)}$ | $F_{(4,3)}$ | $F_{(4,4)}$ | $F_{(4,5)}$ | $F_{(4,6)}$ | $F_{(4,7)}$ |
| $F_{(5,0)}$ | $F_{(5,1)}$ | $F_{(5,2)}$ | $F_{(5,3)}$ | $F_{(5,4)}$ | $F_{(5,5)}$ | $F_{(5,6)}$ | $F_{(5,7)}$ |
| $F_{(6,0)}$ | $F_{(6,1)}$ | $F_{(6,2)}$ | $F_{(6,3)}$ | $F_{(6,4)}$ | $F_{(6,5)}$ | $F_{(6,6)}$ | $F_{(6,7)}$ |
| $F_{(7,0)}$ | $F_{(7,1)}$ | $F_{(7,2)}$ | $F_{(7,3)}$ | $F_{(7,4)}$ | $F_{(7,5)}$ | $F_{(7,6)}$ | $F_{(7,7)}$ |

Из коэффициентов  $F_{(0,0)}$ , несущих в себе информацию о среднем значении освещенности в блоке, мы формируем множество  $Z = \{F^k\}$ , где  $k$  – количество блоков в изображении.

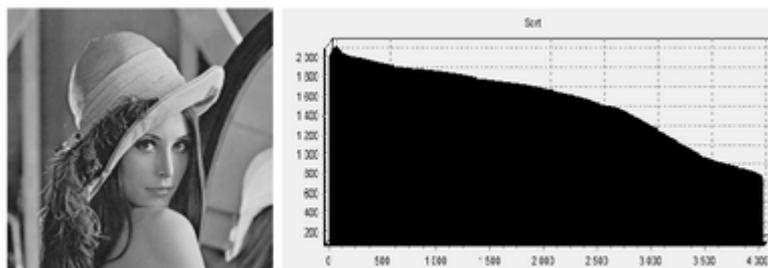


Рис. 1. Коэффициенты  $F_{(0,0)}$  тестового изображения «Lenna» упорядочены по убыванию

Множество коэффициентов Фурье упорядоченных по убыванию обозначим через  $\mathfrak{R}$  (см. рис.1). Устанавливаем ошибку квантования, и квантуем эти коэффициенты в соответствии с предлагаемым алгоритмом (см. Дополнение 1). Геометрически процедура квантования представляет собой аппроксимацию исходных данных ступенчатой функцией. Предлагается метод построения асимптотически оптимальной (в смысле среднеквадратичной метрики) ступенчатой аппроксимации, адаптивной к исходным данным.

Упорядоченные данные  $\mathfrak{R}$  представляют собой множество, состоящее из участков, где данные изменяются немного и участков, где они изменяются сильно. Данное множество мы приближаем ступенчатой функцией. Вложение производится в те места, на которых полученное множество приближается горизонтальными фрагментами ступенчатой функции. Особенностью алгоритма является построение ступенчатой функции, адаптивной к упорядоченному множеству данных, асимптотически оптимально описывающей  $\mathfrak{R}$ . Математическое обоснование алгоритма приведено в дополнении 1.

Практическая реализация алгоритма выглядит следующим образом:

Пусть набор точек упорядочен по убыванию и образует кривую следующего вида.

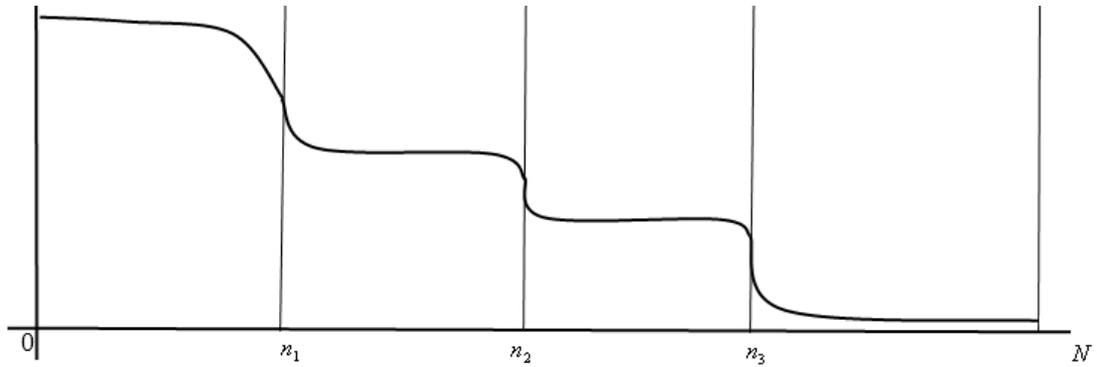


Рис. 2. Набор точек упорядочен по убыванию.  $n_i$  – узлы ступенчатой функции.

Как следует из дополнения 1, оптимальное расположение узлов определяется соотношением

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} \Phi(x) dx = \frac{1}{n} \int_0^T \Phi(x) dx$$

где  $\Phi(x) = (y'(x))^2$ . При этом количество узлов из условия (см.(2))

$$n = \left\lceil \frac{1}{\sqrt{12\varepsilon}} \left( \int_0^T \Phi(x) dx \right)^{\frac{3}{2}} \right\rceil + 1,$$

где  $\varepsilon$  - заранее заданная ошибка.

Приведем алгоритмизацию. Пусть

$$\tilde{\Phi}_i \approx \left( \frac{(y_{i+1} - y_{i-1}))^2}{(x_{i+1} - x_{i-1})} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Узлами ступенчатой функции считаем те точки, которые удовлетворяют условию:

$$\sum_{v=0}^{n_i} \tilde{\Phi}_v \leq \frac{i}{n} \sum_{v=0}^N \tilde{\Phi}_v \leq \sum_{v=0}^{n_{i+1}} \tilde{\Phi}_v$$

Геометрическая иллюстрация выглядит следующим образом

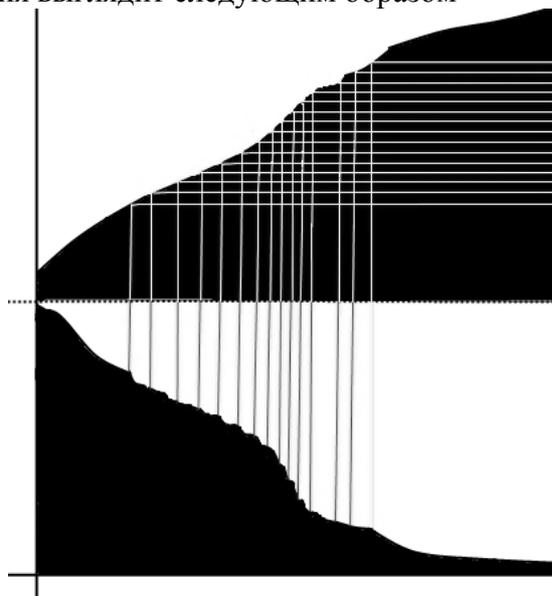


Рис. 3. Определение узлов ступенчатой функции.

Пороги образуются усреднением значений точек, которые лежат в промежутках между узлами.

Далее, внутри каждую ступеньку сортируем по порядку считывания и делаем вложение.

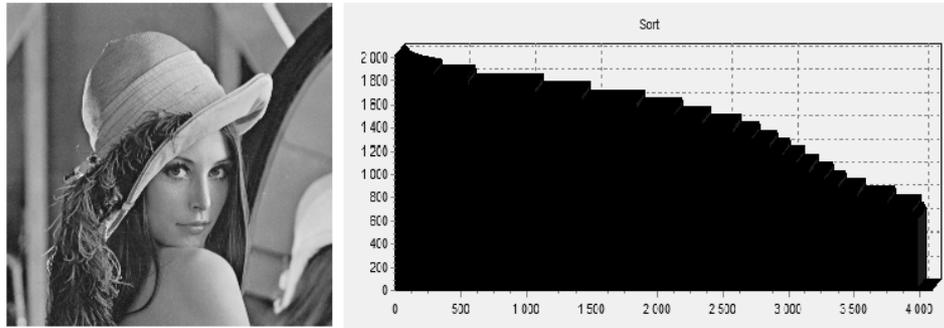


Рис. 4. Тестовое изображение «Lenna» после аппроксимации,  $\varepsilon = 50$

Информацию внедряем следующим образом:

- Для внедрения битовой последовательности «00» – изменяем значение первого коэффициента из последовательности
- Для внедрения битовой последовательности «01» – изменяем значение второго коэффициента из последовательности
- Для внедрения битовой последовательности «10» – изменяем значение третьего коэффициента из последовательности
- Для внедрения битовой последовательности «11» – изменяем значение четвертого коэффициента из последовательности

Вносим изменение в соответствии с той информацией, которую мы вкладываем, увеличивая или уменьшая значение коэффициентов на значение  $\frac{\varepsilon}{4}$ , где  $\varepsilon$  – заранее определенная ошибка. Тем самым мы улучшаем качество изображения, отчасти компенсируя внесенные нами на этапе квантования изменения.

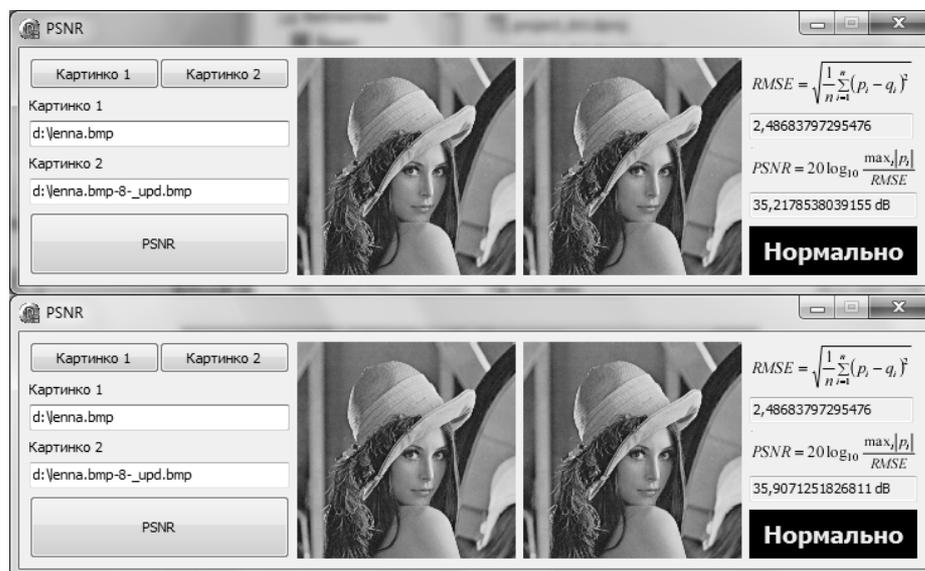


Рис.5. Тестовое изображение «Lenna» квантование с вложением и без вложения.

Восстановление вложенной информации происходит следующим образом:

- Упорядочиваем коэффициенты Фурье по убыванию
- ищем горизонтальные пороги большие чем  $\frac{\varepsilon}{2}$

Из горизонтальных порогов формируем множество. Упорядочиваем в нём коэффициенты в соответствии порядком считывания. Основываясь на том насколько значения отдельного коэффициента больше или меньше среднего значения для порога, производим изъятие:

- Если отличается значение первого коэффициента, восстанавливаем битовую последовательность «00»
- Если отличается значение второго коэффициента, восстанавливаем битовую последовательность «01»
- Если отличается значение третьего коэффициента, восстанавливаем битовую последовательность «10»
- Если отличается значение четвертого коэффициента, восстанавливаем битовую последовательность «11»

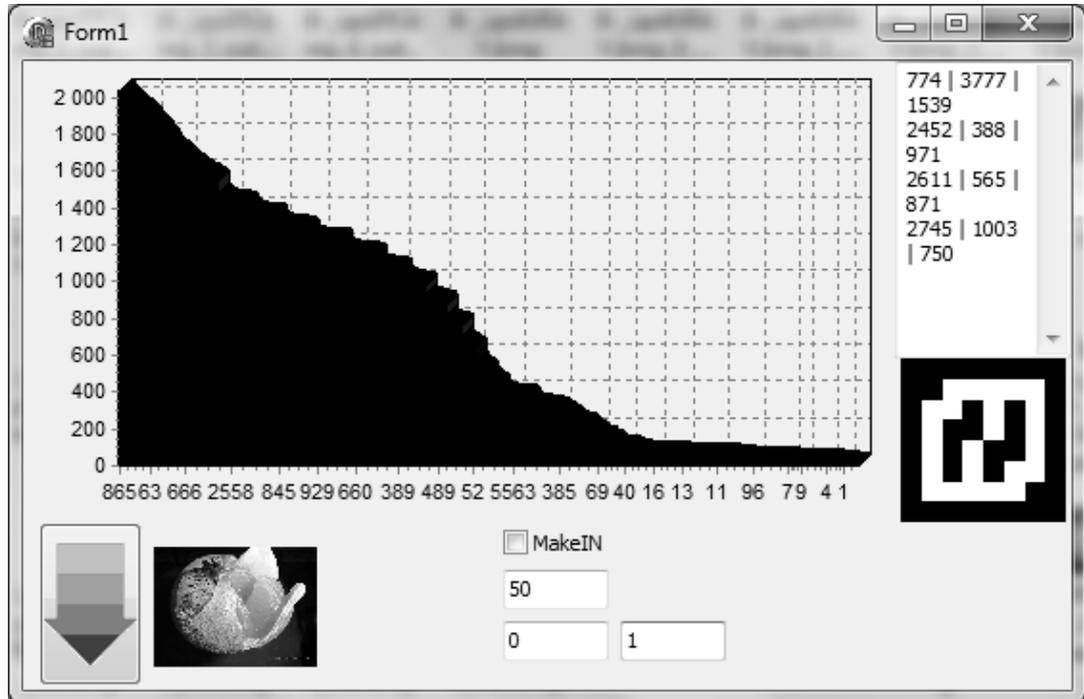


Рис.6. Извлечение ЦВЗ из носителя, преобразованного в оттенки серого.

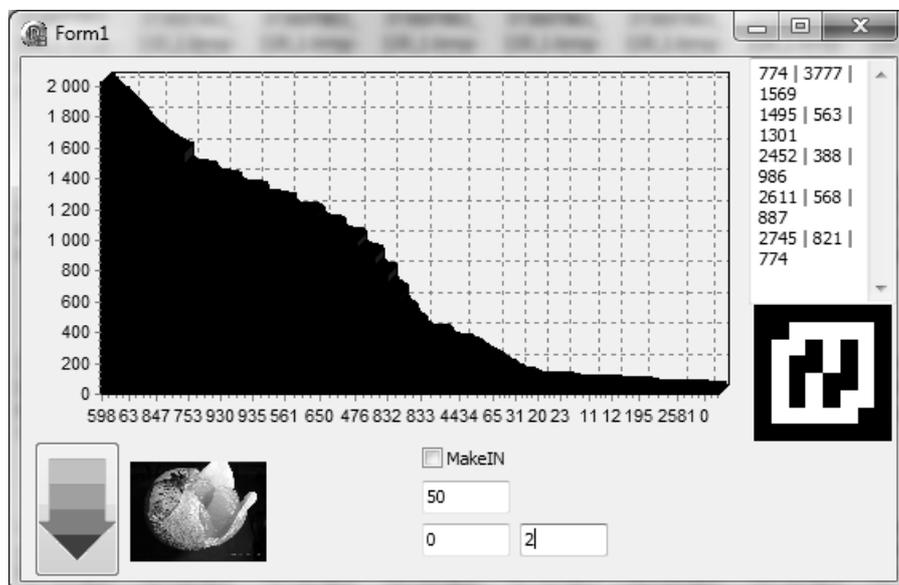
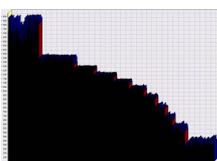


Рис.7. Извлечение ЦВЗ из носителя, пережатого до значения коэффициента качества равного 50.

Использование коэффициентов, несущих в себе информацию о среднем значении освещенности, позволило добиться устойчивости метода к пережатию средствами JPEG до значения коэффициента качества равного 50 включительно.

Заметим, что в предложенном алгоритме есть свои сложности, которые связаны с точным определением точки, которая формирует порог. Приведем случаи, которые могут вызвать затруднение.

Это изображение



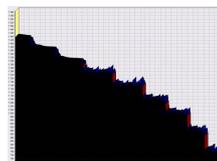
иллюстрирует вложение нашим методом без пережатия средствами JPEG.

Носитель пережат



средствами JPEG до значения коэффициента качества равного 70.

Носитель пережат



средствами JPEG до значения коэффициента качества равного 30.

Как видно из иллюстраций, сам алгоритм JPEG при высоких степенях сжатия, вносит значительные изменения в коэффициенты Фурье, используемые нами для вложения. Проиллюстрируем работу алгоритма.



Рис.8. Извлечение ЦВЗ из носителя. Без пережатия. Без преобразования в оттенки серого. Количество обнаруженных меток – 9. Точно идентифицированных – 8.



Рис.9. Извлечение ЦВЗ из носителя. Без пережатия. Носитель преобразован в оттенки серого. Количество обнаруженных меток – 9. Точно идентифицированных – 5.

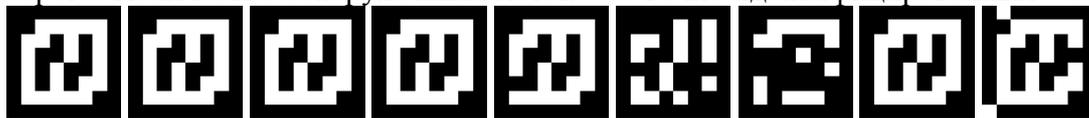


Рис.10. Извлечение ЦВЗ из носителя. Носитель пережат до значения коэффициента качества равного 70. Без преобразования в оттенки серого. Количество обнаруженных меток – 9. Точно идентифицированных – 6.



Рис.11. Извлечение ЦВЗ из носителя. Носитель пережат до значения коэффициента качества равного 50. Без преобразования в оттенки серого. Количество обнаруженных меток – 9. Точно идентифицированных – 4.

Для реального использования применяется не точные извлечения каждого ЦВЗ, а усредненные значения, что позволяет проводить точную идентификацию для высоких степеней сжатия.

Приведем ещё одну область использования нашего алгоритма. Это стеганографическая защита данных. Способ внедрения стего-сообщения выглядит так.

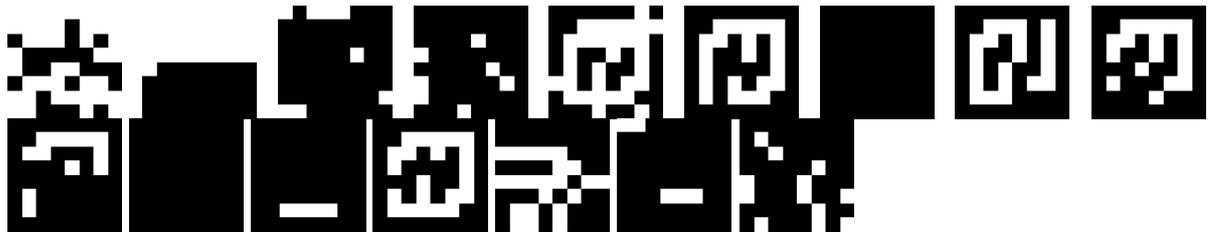


Рис.12. Извлечение ЦВЗ из носителя. Носитель пережат до значения коэффициента качества равного 30. Без преобразования в оттенки серого. Количество обнаруженных меток – 16. Точно идентифицированных – 0.

Равноправное пространство цветов изображения-носителя RGB, преобразуем в неравноправное цветовое пространство YCrCb. Для связи между RGB и YCrCb используются равенства

$$\begin{cases} Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B, \\ Cr = Red - Cyan = 0.596R - 0.275G - 0.3216B, \\ Cb = Magenta - Green = 0.212R - 0.523G + 0.311B. \end{cases}$$

Взяв за основу компоненту цвета Y, несущую в себе яркостную составляющую сигнала, упорядочиваем её по убыванию, задаём ошибку квантования, и квантуем эти величины наилучшим образом. Внедрение стеговложения производим по тем же правилам, что и внедрение ЦВЗ.

Размер вложения будет равен числу пикселей в изображении, если оно хранится в файлах формата BMP или PNG, или числу доступных коэффициентов, если изображение контейнер является файлом Jpeg.

Использование неравноправного цветового пространства позволяет добиться устойчивости вложения к преобразованию изображения-носителя в оттенки серого.

Значение пикового отношения сигнала к шуму для примера, изображенного на рисунке, будет равняться 33 db. Объём контейнера 1Mb, объём вложения – 130kb.



Рис.13. PSNR при стего-вложении. 33dB.

Таким образом, предложенный нами алгоритм, за счет избирательного внедрения информации, показал высокую робастность в задачах внедрения ЦВЗ. И возможность применения его в задачах стеганографии.

#### Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений .- М.: Техносфера, 2005.
2. Farah I.R., Ismail I.B., Ahmed M.B. A Watermarking System Using the Wavelet Technique for Satellite Images. Processings of world academy of science/ engineering and technology. Vol. 17, 2006.
3. Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В. Цифровая стеганография. — М.: «Солон-Пресс», 2002.
4. Jeng-Shyang Pan, Hsiang-Cheh Huang, Lakhmi C. Jain. Intelligent Watermarking Techniques. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Рецензент: Щербак Л.М.  
Поступила 22.09.2010