

УДК 621.396.62

А.И. Стрелков, В.И. Барсов, А.В. Воронин

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО АЛГОРИТМУ JPEG С ПОТЕРЯМИ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрена математическая модель, позволяющая оценить влияние степени сжатия и характеристик изображения на входе системы сжатия на статистические характеристики изображения.

сжатие информации, модель системы сжатия, статистические характеристики

Введение

Постановка проблемы. Среди множества существующих алгоритмов сжатия изображений алгоритм сжатия JPEG на сегодняшний день является наиболее распространенным стандартом сжатия, и поддерживается многочисленными программно-аппаратными средствами цифровой обработки, хранения и передачи изображений. В статье «Исследование методов оптимизации алгоритма jpeg» [1] был предложен вариант оптимизации стандартной схемы сжатия jpeg с целью повышения устойчивости к воздействию помех. Метод оптимизации не затрагивал этап округления коэффициентов и не давал значительного улучшения PSNR.

При разработке метода оптимизации алгоритма, оценка эффективности метода производилась относительно измерения отношения сигнал/шум, что не позволяет в полной мере оценить эффективность метода оптимизации, так как существуют методы, позволяющие даже при высоком уровне шума восстановить исходное не зашумленное изображение. Такие методы, как правило, работают со статистическими характеристиками изображения. Следовательно, проводить оценку метода оптимизации целесообразно относительно изменения статистических характеристик изображения.

Таким образом, необходимо построить модель, позволяющую оценить изменение статистических характеристик изображения в результате сжатия. В данном контексте целесообразно оценить влияние степени сжатия на характеристики обнаружения заданного объекта на фоне аддитивной помехи.

Анализ литературы. При построении модели, ограничимся обработкой 8-ми битного полутонного изображения для снижения вычислительных затрат. Для оценки помехоустойчивости алгоритма необходимо смоделировать зашумленное изображение. В большинстве случаев любая случайная помеха может быть представлена белым шумом [2]. Так как в оптике имеют место помехи только с положительными отсчетами яркости, то целесообразно для

моделирования помехи использовать массив случайных величин, с распределением по закону Пуассона. В случае, когда число отсчетов велико при расчетах Пуассоновский закон распределения будем аппроксимировать нормальным законом распределения, когда $\sigma^2 = \bar{U}$:

$$S = \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \cdot e^{-\frac{(U - \sigma^2)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \right),$$

где S – плотность распределения вероятности; σ – средне-квадратичное отклонение.

Порядок определения статистических характеристик до и после сжатия состоит в следующем, имея конечное число исходов случайной величины (помеха или смесь сигнал+помеха) в виде двумерного массива $a_{i,j}$, находим число исходов с одинаковым значением для каждого элемента в массиве $n_{i,j}$. Далее, имея общее число элементов N и $n_{i,j}$, находим вероятность для каждого элемента массива:

$$p_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{N}.$$

После чего находится среднее значение случайной величины \bar{U} и дисперсию D :

$$\bar{U} = \sum_i \sum_j p_{i,j};$$

$$D = \frac{1}{N} \cdot \sum_i \sum_j (a_{i,j}^2 - \bar{U}^2).$$

Среднеквадратичное отклонение равно корень квадратный из дисперсии.

Для оценки достоверности модели необходимо на начальном этапе использовать стандартную схему сжатия jpeg, возможно даже реализацию кодера в существующем программном обеспечении. Стандартная схема сжатия jpeg включает следующие этапы [3]:

1. Дискретное косинусное преобразование (ДКП).

Двумерное преобразование для квадратной матрицы описывается следующим уравнением:

$$T[i, j] = c(i, j) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} V[y, x] \times \\ \times \cos \frac{(2 \cdot y + 1) \cdot i \cdot \pi}{2 \cdot N} \cdot \cos \frac{(2 \cdot x + 1) \cdot j \cdot \pi}{2 \cdot N},$$

где

$$c(i, j) = \frac{2}{N}, \quad i \text{ и } j \neq 0;$$

$$c(i, j) = \frac{1}{N}, \quad i \text{ или } j = 0,$$

а обратное преобразование ДКП описывается уравнением:

$$V[y, x] = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} c(i, j) \cdot T[i, j] \times \\ \times \cos \frac{(2 \cdot y + 1) \cdot i \cdot \pi}{2 \cdot N} \cdot \cos \frac{(2 \cdot x + 1) \cdot j \cdot \pi}{2 \cdot N}.$$

2. Скалярное квантование спектра ДКП.

Каждый элемент спектра равномерно квантуется независимо от других с округлением до целого: $\tilde{y}_{k,l} = \lfloor y_{k,l} / u_{k,l} \rfloor$. Целая величина $u_{k,l}$ определяется по таблице (матрице) квантования u (размера 8×8), задача формирования которой лежит на разработчике системы сжатия. Поскольку таблица квантования стандартом не регламентируется (хотя имеется рекомендуемый набор таблиц), она передается в заголовке выходных данных, т.к. знание таблицы квантования необходимо для последующего восстановления изображения. Диапазон возможных значений, которые могут принимать элементы спектра, после выполнения процедуры квантования существенно уменьшается, появляется большое количество нулей.

3. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ).

При ДИКМ из исходного набора (последовательности) данных $\{x_j\}$ формируют "разностную" последовательность $\{\Delta_j\} = \{x_j - x_{j-1}\}$. Соседние элементы последовательности $\{x_j\}$ имеют близкие значения (сильную корреляцию); элементы последовательности $\{\Delta_j\}$ оказываются менее коррелированными, что позволяет осуществить в дальнейшем более эффективное статистическое кодирование.

4. Энтропийное кодирование.

В базовой схеме кодирования JPEG для этой цели используется алгоритм Хаффмена. Таблицы кодов Хаффмена должен строить сам разработчик системы сжатия (например, в результате статистического анализа данных обработки изображения, или исходя из каких-то априорных сведений), поэтому таблицы кодов Хаффмена необходимо помещать в заголовок выходных данных системы сжатия.

Для моделирования этапа сжатия возможно использование библиотеки `libjpeg`, реализующей описанную схему сжатия в языке C. Данная библиотека поставляется как в виде бинарного модуля к компилятору C, так и в исходных кодах, вследствие чего в дальнейшем возможно модифицировать исходный код для исследования методов оптимизации алгоритма.

Вероятность правильного обнаружения заданного объекта (случай, когда сигнал детерминированный) на фоне аддитивной помехи при нормальном законе распределения определяется по формуле

$$d = \int_{U_{\text{пор}}}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{c+m}^2}} \right) \cdot e^{-\frac{(U - \bar{U}_{c+m})^2}{2 \cdot \sigma_{c+m}^2}} \cdot dU,$$

при чем $U_{\text{пор}}$ определяем из выражения для расчета вероятности ложной тревоги задавая допустимым значением f :

$$f = \int_{U_{\text{пор}}}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_m^2}} \right) \cdot e^{-\frac{(U - \bar{U}_m)^2}{2 \cdot \sigma_m^2}} \cdot dU.$$

Утверждение о том, что закон распределения для помехи и смеси сигнал+помеха нормальный, справедливы только до сжатия. После сжатия необходимо построить гистограмму распределения и аппроксимировать ее функцией. Характеристики обнаружения объекта после сжатия будут определяться по методике, справедливой для полученного на выходе закона распределения [5].

Таким образом, мы имеем все необходимые элементы для построения модели, позволяющей оценить влияние степени сжатия изображения по алгоритму `jpeg` на статистические характеристики изображения, а также на характеристики обнаружения заданного объекта.

Цель работы. Построение модели и оценка с ее помощью влияния степени сжатия изображения по алгоритму `jpeg` с потерями на статистические характеристики изображения, а также на характеристики обнаружения заданного объекта.

Основная часть

Для исследования работы алгоритма сжатия с использованием программного пакета `Mathcad` построена математическая модель, позволяющая задавать следующие входные параметры:

1. Размер и уровень яркости для фонового изображения.
2. Размер, форма, уровень яркости для обнаруживаемого сигнала.
3. Закон распределения и статистические характеристики случайной величины, которая моделирует помеху.

4. Алгоритм сжатия, а также степень сжатия для входного изображения.

Для проведения исследований определены следующие характеристики сигнала и помехи:

1. Сигнал задан в виде прямоугольного объекта размером 20% от размера всего изображения, в данном случае это прямоугольник 40x50 пикселей так как размер изображения задан 100x100 пикселей. Уровень яркости сигнала 20 (при условии что черный это 0 а белый это 255 для рассматриваемого 8-ми битного изображения). Фон абсолютно черный (уровень яркости 0).

2. В качестве помехи использовался двумерный массив, сгенерированный случайно, случайная величина в массиве задана законом распределения Пуассона с дисперсией равной 160.

График распределения вероятности для смоделированной помехи представлен на рис. 1.

Рассчитываем статистические характеристики полученной смеси. Так как сигнал детерминированный, а помеха распределена по нормальному закону, то и смесь в области сигнала тоже будет распределена по нормальному закону, дисперсия в этом случае будет равна дисперсии помехи $D=160$, а среднее значение будет смещено на величину яркости сигнала вправо $\bar{U} = 160 + 20 = 180$.

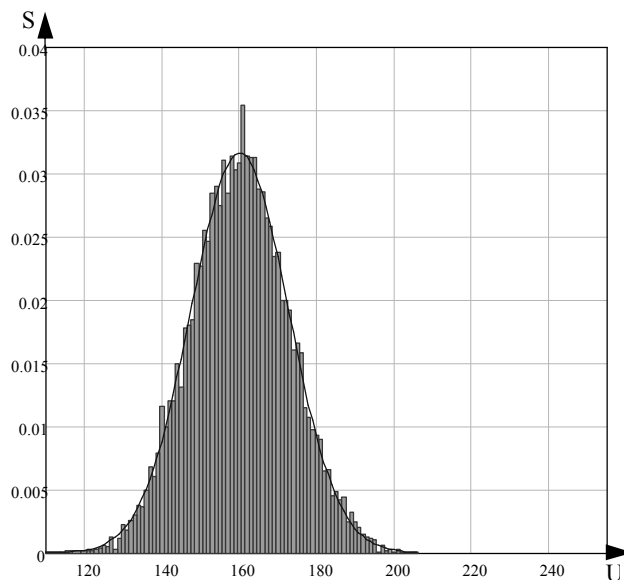


Рис. 1. Плотность распределения вероятности для смоделированной помехи.

График распределения вероятности для смеси сигнал+помеха представлен на рис. 2.

Строим гистограммы распределения вероятности для изображения смоделированной помехи, а также смеси сигнал+помеха после сжатия и аппроксимируем их функциями.

Полученная гистограмма распределения вероятности помехи при сжатии с потерями 30% представлена на рис. 3.

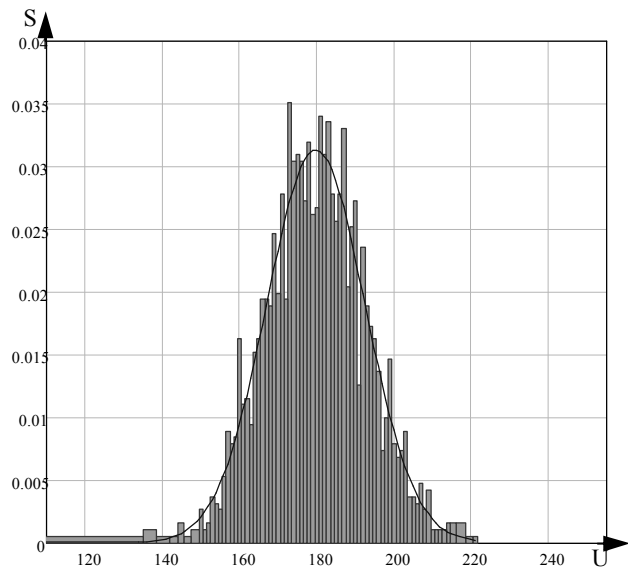


Рис. 2. Плотность распределения вероятности для смеси сигнал+помеха.

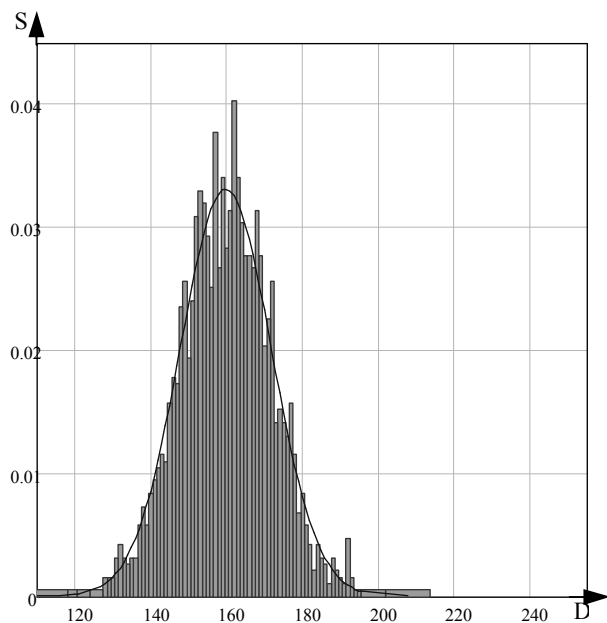


Рис. 3. Плотность распределения вероятности помехи после сжатия.

Полученная гистограмма распределения вероятности смеси сигнал+помеха при коэффициенте сжатия 30 представлена на рис. 4.

Как видно на рис. 3 и 4, после сжатия изображения по прежнему имеем распределение по нормальному закону. Очевидно, это обусловлено особенностями алгоритма сжатия.

Далее рассчитываем вероятность правильного обнаружения сигнала на фоне помехи для заданного уровня вероятности ложной тревоги 0,1 (закон распределения до и после сжатия нормальный). Производим расчеты для следующего ряда степеней потерь: 10%, 15%, 20%, 25%, 30% и для помех с дисперсиями 140, 160, 175, 190. Строим зависимости вероятности правильного обнаружения от степени сжатия.

Полученные зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала от степени сжатия изображения по алгоритму jpeg представлена на рис. 5.

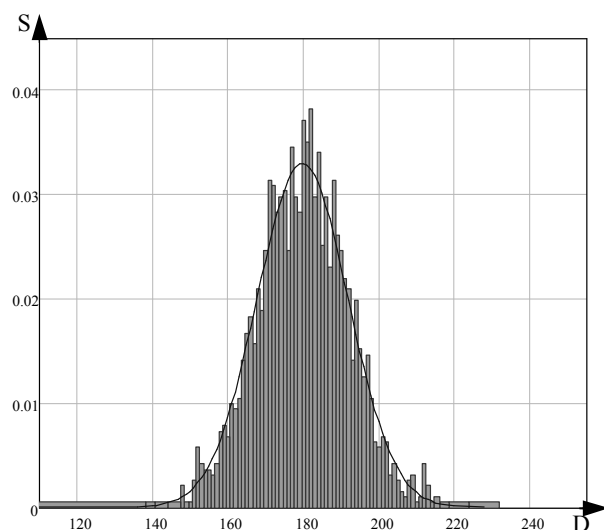


Рис. 4. Плотность распределения вероятности смеси сигнал+помеха после сжатия.

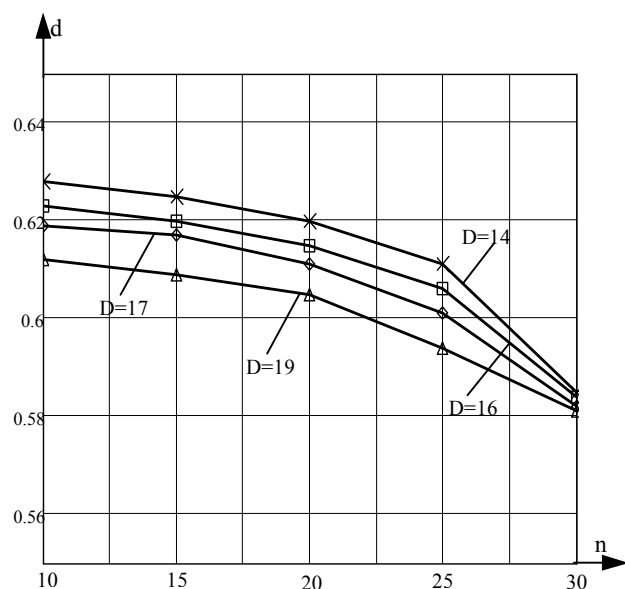


Рис. 5. Зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала от степени сжатия изображения для заданных помех с различной дисперсией.

Полученная зависимость позволяет говорить, что для заданного сигнала и заданного уровня помехи вероятность правильного обнаружения сигнала уменьшается при увеличении степени потерь до уровня 30%, причем интенсивность помехи практически не влияет на эту зависимость. Дальнейшее увеличение степени потерь приводит к значительному ухудшению изображения и потере мелких деталей на нем. Вследствие этого исследование проводилось для степеней потерь не более 30%.

Выводы

Ухудшение характеристик обнаружения при сжатии обусловлено такой особенностью алгоритма как потери мелких деталей изображения. На этапе округления коэффициентов использованная при проведении опытов классическая реализация алгоритма работает с фрагментами изображения 8x8 пикселей, поэтому, при потере части наименее значимой информации из каждого фрагмента, изображение в целом остается практически неизменным и ухудшение характеристик обнаружения происходит не слишком резко.

Потерям подвержены как мелкие детали изображения, так и сама помеха.

Практическая ценность полученных результатов на наш взгляд заключается в том, что выявлены новые аспекты работы алгоритма, а именно влияние на характеристики обнаружения.

Полученные результаты позволяют сформулировать требования, предъявляемые к сжатию рассматриваемым алгоритмом заданного изображения.

Список литературы

1. Nelson M. *The Data Compression Book*. – USA: M&T Publishing, 1991. – 340 p.
2. Стрелков А.И., Барсов В.И., Воронин А.В. Исследование влияния случайного шума на степень сжатия изображения по алгоритму JPEG // Системы обработки информации. – X.: ХВУ. – 2004. – Вып. 12 (40). – С. 218-221.
3. Стрелков А.И., Барсов В.И., Воронин А.В. Исследование методов оптимизации алгоритма JPEG // Системы обработки информации. – X.: ХВУ. – 2005. – Вып. 8 (48). – С. 140-145.
4. Wallace G.K. *The JPEG Still Picture Compression Standard* // *Communication of the ACM*. – 1991. – Vol. 34, № 4. – P. 37-41.
5. Матрюков Д. Алгоритмы сжатия информации. Часть 5. Алгоритмы сжатия в драйверах устройств // Монитор. – 1994. – № 4. – С. 47-51.
6. Wallace G.K. *The JPEG algorithm for image compression standard* // *Communications of the ACM*. – 1991. – Vol. 34, № 4. – P. 30-44.
7. Crouse M., Ramchandrn K. *Joint thresholding and quantizer selection for transform image-coding: entropy-constrained analysis and applications to baseline JPEG* // *IEEE Trans, on Image Processing*. – 1997. – Vol. 6, № 2. – P. 285-297.

Поступила в редколлегию 18.07.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.