

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ И СКАНИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ПРОЯВЛЕНИЕ DQ-ЭФФЕКТА**

*В работе проводится анализ влияния процесса печати и сканирования на проявление эффекта двойного квантования, часто возникающего при фальсификации цифрового изображения.*

Доказательство подлинности цифровых изображений (ЦИ) является актуальной задачей во многих областях человеческой деятельности. Большинство современных цифровых фотокамер используют для хранения ЦИ формат JPEG с потерями, основой которого является дискретное косинусное преобразование (DCT) [1], а большинство несанкционированных изменений цифровой фотографии сводится к замещению некоторой ее области на область другого ЦИ. После такой фальсификации полученное изображение часто сохраняется в формате JPEG, что приводит к повторному квантованию [1] коэффициентов DCT (DCT-коэффициентов) некоторой части или всего фальсифицированного ЦИ. Двукратное использование JPEG-сжатия с разными коэффициентами квантования, как правило, приводит к видимым особенностям гистограмм DCT-коэффициентов. Эти особенности в общем случае можно охарактеризовать как периодическое возникновение пиков и впадин, называемое DQ-эффектом. Обнаружение «следов» двойного квантования является «указателем» на возможную фальсификацию изображения. В силу этого определение отличительных особенностей двукратного применения JPEG-сжатия ЦИ и построение методов выявления этих особенностей – чрезвычайно актуально с точки зрения решения проблемы обнаружения фальсификации цифровой фотографии. В публикациях, посвященных исследованию DQ-эффекта, доступных из открытой печати, например, [2,3], к сожалению, не уделяется внимание вопросам, связанным с особенностями его проявления в реальных условиях: при наличии шума округления, возмущений, возникающих в процессе печати, сканирования и т.д. Однако без учета всех реальных возмущающих факторов, очевидно искажающих идеальную картину DQ-эффекта, невозможно создание на его основе практического метода доказательства подлинности цифровой фотографии, выявления области ее фальсификаций, что является *глобальной целью* авторов.

*Цель* настоящей работы – исследование влияния процесса печати и сканирования (ППС), который часто является неотъемлемой частью работы с ЦИ, на проявление DQ-эффекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Формально представить ППС;
2. Определить основные возмущающие факторы, являющиеся составными частями ППС, действие которых потенциально может значительно исказить картину проявления DQ-эффекта.

Анализ ППС является чрезвычайно сложной комплексной задачей [4,5]. До настоящего момента лишь небольшое количество публикаций было посвящено попыткам построения модели совокупного ППС, причем ни в одной из них не затрагивался вопрос использования предлагаемых моделей для изучения влияния ППС на проявление DQ-эффекта.

Впервые в открытой печати математическая модель ППС была предложена в [4], где отдельно рассматривались и формализовались два сопровождающих данный

процесс явления: искажения значений яркости пикселей и геометрические деформации исходного изображения, включающие в себя повороты, масштабирование, обрезку (cropping). Однако предложенная модель является достаточно сложной при практическом применении в той ее части, которая учитывает возмущения яркости пикселей, поскольку требует знания большого количества параметров и характеристик используемых технических средств, их взаимосвязей. Для целей, преследуемых в настоящей работе, такая подробность является излишней.

В [5] показано, что математическую модель, предложенную в [4], можно значительно упростить, выделив три составляющих ППС: цветной высокочастотный шум, нелинейные искажения, обрезку. Однако сведение всех геометрических искажений лишь к обрезке недопустимо упрощает формализацию, поэтому в качестве составляющих ППС далее будут рассматриваться:

1. Высокочастотный шум,
2. Нелинейные искажения,
3. Геометрические деформации, включающие в себя не только обрезку, но и повороты, и масштабирование.

Грубо говоря, используемая в настоящей работе модель является «промежуточным звеном» между формализациями, предложенными в [4] и [5].

Шум, возникающий за счет ППС, является возмущающим воздействием для ДСТ-коэффициентов, реакция которых будет различной. Коэффициенты, отвечающие низким частотам, будут менее чувствительными к возмущающим воздействиям, чем коэффициенты, отвечающие средним и высоким частотам. Таким образом, даже в случае малых возмущающих воздействий изменения ДСТ-коэффициентов, отвечающих высоким и, возможно, средним частотам могут оказаться значительными, что приведет к значительным искажениям картины DQ-эффекта в их гистограммах. Кроме того, ДСТ-коэффициенты высоких частот в принципе являются неинформативными с точки зрения обнаружения следов двойного квантования: они практически все обнуляются при первом квантовании. Таким образом, для обнаружения следов двойного квантования на гистограммах ДСТ-коэффициентов ЦИ в реальных условиях имеет смысл исследовать не все гистограммы, а лишь те, которые соответствуют низким частотам. Следовательно, для решения задачи 2 важно выяснить, какие из искажающих факторов 1-3, присутствующих в ППС, затронут именно низкие частоты. Эти искажающие факторы и будут потенциально теми, которые могут «испортить» анализируемую картину DQ-эффекта.

Первые два фактора возмущают в значительной мере лишь высокочастотные и среднечастотные ДСТ-коэффициенты сигнала [5], поэтому для наших целей эти составляющие не представляют интереса, т.к. не могут значительно испортить картину DQ-эффекта, наблюдаемую в низкочастотной области.

Рассмотрим составляющие геометрической деформации изображения, возникающие в ППС.

Процесс печати предполагает переход из дискретной области в непрерывную [4,5]. Пусть  $f(x, y)$  задает исходное изображение на непрерывной области,  $f_R(x, y)$  - изображение после поворота на угол  $\theta$  против часовой стрелки. Точке с координатами  $(x, y)$  изображения  $f_R(x, y)$  соответствует точка  $(\bar{x}, \bar{y})$  изображения  $f(x, y)$  [6]:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix},$$

т.е.

$$f_R(x, y) = f(\bar{x}, \bar{y}) = f(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta). \quad (1)$$

Пусть  $F(u, v)$  и  $F_R(u, v)$  - преобразования Фурье для  $f(x, y)$  и  $f_R(x, y)$  соответственно,

$$F_R(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_R(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy. \quad (2)$$

Подставляя в подинтегральное выражение (2) формулу (1) и делая в полученном интеграле замену  $(\bar{x}, \bar{y}) = (x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta)$ , для которой определитель якобиана очевидно равен 1, из (2) получаем:

$$\begin{aligned} F_R(u, v) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\bar{x}, \bar{y}) e^{-2\pi i(\bar{x}(u \cos \theta - v \sin \theta) + \bar{y}(u \sin \theta + v \cos \theta))} d\bar{x} d\bar{y} = F(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

**Утверждение 1.** Поворот непрерывного изображения приводит к аналогичному изменению интегрального преобразования Фурье, не меняя его области значений.

Соотношение (3) согласуется с соотношением, полученным для аналогичного случая в [4], чего нельзя сказать о следующем выводе, для которого в [4] допущена грубая ошибка.

Пусть изображение  $f(x, y)$  подвергается масштабированию с коэффициентами  $\lambda_1, \lambda_2$  соответственно по осям  $x, y$ . Результирующее изображение обозначим  $f_S(x, y)$ . Точка с координатами  $(x, y)$  на изображении  $f_S(x, y)$  соответствует точке  $(\bar{x}, \bar{y})$  изображения  $f(x, y)$ , для которой

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$f_S(x, y) = f(\bar{x}, \bar{y}) = f\left(\frac{x}{\lambda_1}, \frac{y}{\lambda_2}\right). \quad (4)$$

Обозначим  $F_S(u, v)$  преобразование Фурье для  $f_S(x, y)$ :

$$F_S(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), делая замену  $(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\frac{x}{\lambda_1}, \frac{y}{\lambda_2}\right)$  и учитывая, что для такой замены  $\det J = \lambda_1 \lambda_2$ , где  $J$  - якобиан, получаем  $F_S(u, v) = \lambda_1 \lambda_2 F(u \lambda_1, v \lambda_2)$ .

**Утверждение 2.** Масштабирование изображения приводит к масштабированию области значений интегрального преобразования Фурье.

Рассмотрим связь между непрерывным, дискретным преобразованиями Фурье (ДПФ) и рядом Фурье для одной и той же функции. Для простоты и наглядности

изложения будем рассматривать функцию одной переменной  $g(x)$ , однако все, сказанное ниже, без труда может быть перенесено на двумерный случай.

Поскольку интегральное преобразование Фурье для  $g(x)$  можно рассматривать как ряд Фурье для функции с бесконечно большим периодом, то коэффициенты ряда Фурье

$$A_n = \frac{2}{b-a} \int_a^b g(x) \cos\left(n \frac{2\pi x}{b-a}\right) dx, \quad B_n = \frac{2}{b-a} \int_a^b g(x) \sin\left(n \frac{2\pi x}{b-a}\right) dx, \quad n=1,2,\dots \quad (6)$$

- частные значения интегрального преобразования Фурье, взятого от функции  $g(x)$ , которая равна нулю вне  $[a,b]$  [6].

Если  $g(x)$  определена на  $[a,b]$ , то для разложения ее в ряд Фурье естественно построить ее *периодическое продолжение* с отрезка  $[a,b]$  - новую функцию, совпадающую с  $g(x)$  на  $[a,b]$ , периодическую с периодом  $b-a$  [6]. Для каждого коэффициента (6) подынтегральное выражение представляет собой периодическую функцию с периодом  $b-a$ . Для приближенного вычисления (6) можно использовать какую-либо квадратурную формулу, например, формулу трапеций [6], что и делается в реальности на практике, с одним и тем же числом значений интегрируемой функции. Тогда коэффициенты ДПФ можно рассматривать как *способ приближенного вычисления* коэффициентов ряда Фурье периодической функции [6]. В итоге можно показать [6], что коэффициенты ДПФ для  $g(x)$  с носителем  $[a,b]$  дают приближенные значения интегрального преобразования Фурье в соответствующих частотах, в частности,

$$a_k(b-a) \approx A(k/(b-a)), \quad b_k(b-a) \approx B(k/(b-a)),$$

где  $a_k, b_k$  - коэффициенты дискретных косинус- и синус-преобразований, а  $A(\omega), B(\omega)$  - интегральные косинус- и синус-преобразования Фурье соответственно [1,6].

Из вышесказанного с учетом утверждений 1, 2 вытекает истинность следующего утверждения.

**Утверждение 3.** Поворот и масштабирование ЦИ не могут привести к значительным нарушениям проявления DQ-эффекта, учитывая, что его анализ осуществляется по DCT-коэффициентам, отвечающим низким частотам.

Для подтверждения истинности утверждения 3 в среде MATLAB был проведен вычислительный эксперимент с реальными ЦИ. При моделировании масштабирования картина DQ-эффекта практически не изменялась, поэтому, в силу ограниченности объема статьи, иллюстративные результаты гистограмм DCT-коэффициентов не приводятся. Моделирование поворота в соответствии с [4,5] осуществлялось следующим образом: ЦИ переводилось в непрерывную область, где проводился непосредственно его поворот, после чего происходила дискретизация, соответствующая исходному ЦИ. Переход в непрерывную область может осуществляться явно, например, а) при помощи построения интерполяционного многочлена (глобальная интерполяция), б) интерполяционного сплайна, что является более предпочтительным с точки зрения точности приближения. Оба способа требуют значительных вычислительных затрат. В работе перевод цифрового сигнала в непрерывную область осуществлялся неявно, требовал лишь  $O(n)$  арифметических операций, где  $n$  - общее количество пикселей ЦИ, но уступал в качестве приближения: учитывая корреляцию значений яркости соседних пикселей ЦИ, в любой точке непрерывной области, являющейся

внутренностью прямоугольника, соединяющего между собой 4 ближайших соседа-пикселя [1], значение яркости полагалось равным среднему арифметическому их значений. В результате получалась кусочно-постоянная функция с конечным носителем – непрерывной областью. Даже при таком грубом приближении было установлено незначительное нарушение исходной картины DQ-эффекта. Пример для реальной цифровой фотографии приведен на рис.1 (коэффициенты первого и второго квантования соответственно равны 20 и 15).

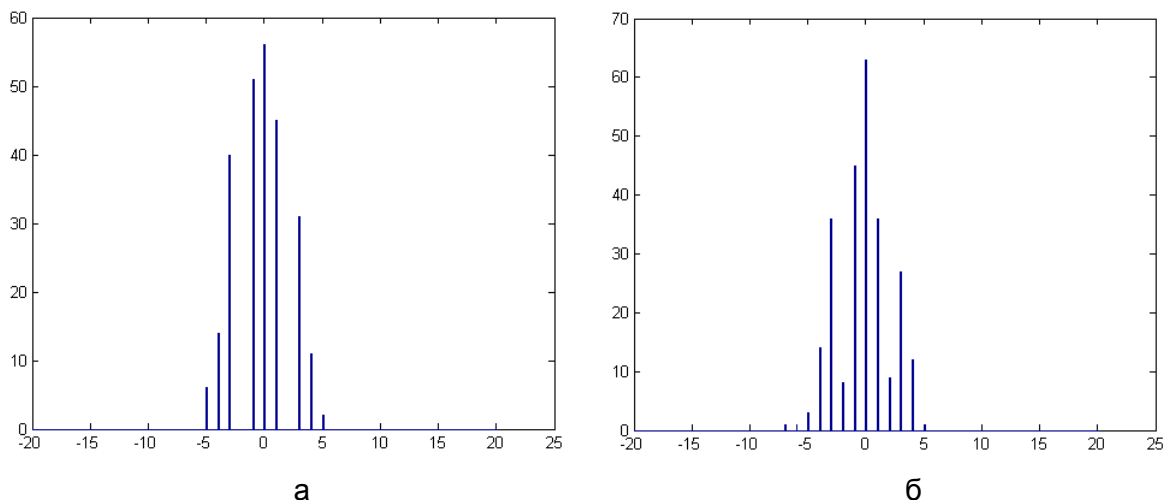


Рис.1. – Гистограммы DCT-коэффициентов для частоты (1,2): а - до поворота; б - после поворота

Процесс обрезки приводит к возмущениям во все частотные составляющие ЦИ [5], а значит является единственным фактором, присутствующим в ППС, учет которого необходим при анализе DQ-эффекта в реальных условиях, и который, как подтверждает вычислительный эксперимент, для некоторых реальных ЦИ может значительно «испортить» картину DQ-эффекта.

Таким образом, задачи, поставленные в работе, решены. Очевидно, что при построении практического метода обнаружения фальсификации ЦИ, основанного на использовании эффекта двойного квантования, для учета последствий ППС достаточно учитывать лишь процесс обрезки, который имеет свои особенности проявления на гистограммах DCT-коэффициентов, материалы исследования которых в настоящий момент готовятся к печати.

#### Литература.

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений.- М.:Техносфера,2005.-1072с.
2. Lucas J., Fridrich J. Estimation of Primary Quantization Matrix in Double Compressed JPEG Images // Proc. Of DFRWS 2003, Cleveland, OH, August 5-8.
3. Popescu A. C., Farid H. Exposing digital forgeries by detecting traces of re-sampling // IEEE Trans. Signal Process. - 2005. – Vol. 53(2). – P. 758-767.
4. C.-Y. Lin, S.-F. Chang. Distortion Modeling and Invariant Extraction for Digital Image Print-and-Scan Process // International Symposium on Multimedia Information Processing (ISMIP 99), Taipei, Taiwan, Dec.1999
5. K.Solanki, U.Madhow, B.S.Manjunath, S.Chandrasekaran. Modeling the Print-Scan Process for Resilient Data Hiding//
6. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир, 2001.– 575 с.