

УДК 681.4

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕГАНОАЛГОРИТМОВ ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНО- КОСИНУСНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Н.Н. Прохожев, О.В. Михайличенко, А.Г. Коробейников

В статье рассматривается методика повышения устойчивости стеганоалгоритмов, использующих дискретно-косинусное преобразование (ДКП) в графических стеганоконтейнерах. Исследования проводятся на примере двухкоэффициентного алгоритма Коха–Жао. Проводится оценка искажений в результате внешних воздействий на информацию, встроенную в стеганоконтейнер. В качестве внешних воздействий применяются наиболее распространенные виды обработки изображений, такие как сжатие JPEG с потерями, фильтрация, зашумление и масштабирование. Рассматриваются способы повышения устойчивости путем выбора наиболее оптимальных областей встраивания.

Ключевые слова: стеганография, алгоритмы частотной области, сжатие JPEG.

Введение

Стеганографические алгоритмы на основе ДКП представляют собой большую группу и широко применяются в стеганографических системах для встраивания цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в неподвижные изображения-контейнеры. Эти алгоритмы позволяют внедрять ЦВЗ с очень высоким уровнем скрытности и малыми значениями искажений контейнера. Еще одним значительным плюсом методов на основе ДКП является совместимость с таким широко распространенным стандартом хранения цифровых изображений, как JPEG. Большинство алгоритмов использует ЦВЗ в виде битовых последовательностей, с помощью которых очень удобно представлять строки символов или битовые изображения. Внедренная информация может однозначно подтверждать авторство или права собственности на защищаемое изображение. Однако, вследствие случайного или злонамеренного внешнего воздействия на изображение-контейнер, внедренная в него информация может быть повреждена или даже полностью уничтожена. Целью данной работы является разработка методики повышения устойчивости алгоритмов частотной области встраивания в коэффициенты ДКП.

Алгоритм встраивания ЦВЗ

Большинство алгоритмов, встраивающих информацию в область коэффициентов ДКП, кодируют встраиваемый бит информации путем модификаций пар, троек или множества коэффициентов матрицы ДКП. Для проведения оценки в работе использован двухкоэффициентный алгоритм Коха–Жао (Koch–Zhao). В алгоритм заложены принципы, являющиеся базовыми для целого семейства алгоритмов частотной области. Данный алгоритм хорошо приспособлен для использования в изображениях, подвергающихся сжатию JPEG или даже для внедрения ЦВЗ непосредственно в JPEG-поток.

Оценка устойчивости алгоритма

Методика определения устойчивости того или иного алгоритма или стеганосистемы в целом состоит из следующих шагов:

1. скрываемая информация внедряется в контейнер;
2. контейнер подвергается внешнему воздействию или атаке;
3. скрытая информация извлекается из контейнера;

4. извлеченная информация сравнивается с оригинальной и определяется степень их соответствия.

На рис.1 представлена последовательность действий при определении устойчивости алгоритма к внешним воздействиям на изображение-контейнер [1].

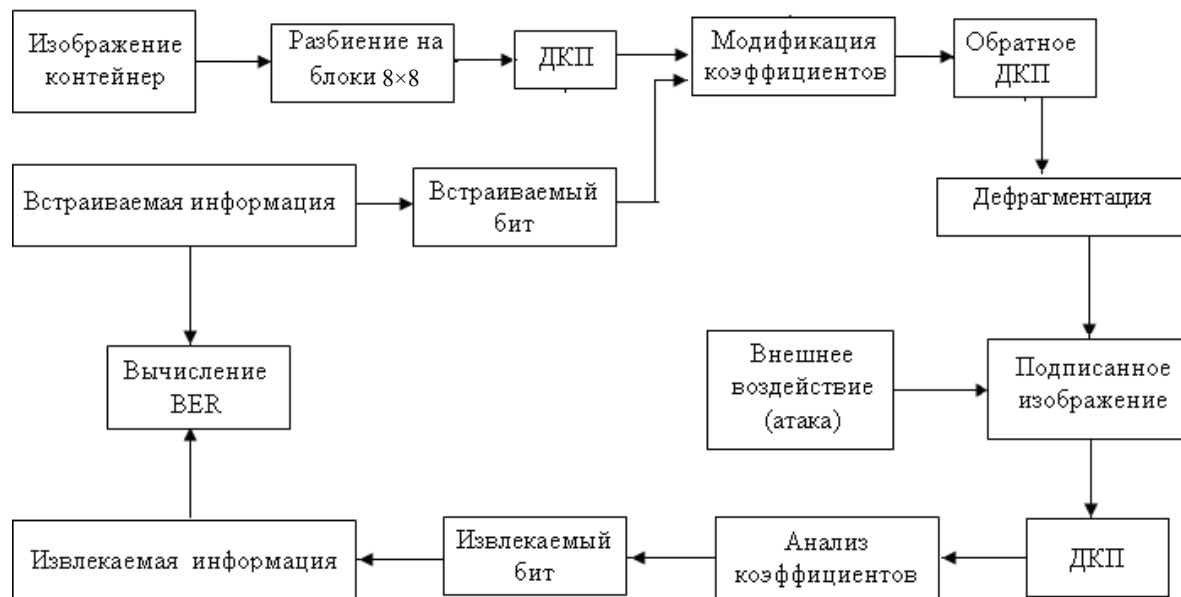


Рис. 1. Модель оценки устойчивости алгоритма к внешним воздействиям

Количественная оценка потерь информации

В качестве тестового изображения контейнера было использовано 10 полутонных естественных изображений размером 600×800 пикселей. Соответствие внедренной и извлеченной после внешнего воздействия на контейнер информации оценивается с помощью коэффициента ошибочных бит BER (Bit Error Rate) [2]:

$$BER(S, S'') = \frac{\sum p_i}{N},$$

где

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i \neq S''_i, \\ 0, & \text{если } S_i = S''_i, \end{cases}$$

S_i – i -й бит оригинала встраиваемой строки; S''_i – бит извлеченной строки; N – общее количество бит.

Повышение устойчивости встроенной информации

Традиционно для встраивания внедряемого бита информации используются коэффициенты диапазона среднечастотных компонент изображения (СЧ). Это обусловлено тем, что внедрение ЦВЗ в высокочастотные компоненты считается крайне неустойчивым, а использование низкочастотных компонентов (НЧ) приводит к слишком серьезным искажениям контейнера. Поэтому большинство авторов используют небольшой диапазон коэффициентов, лежащих вдоль второстепенной диагонали матрицы ДКП. Таким образом, соблюдается некоторый компромисс между устойчивостью и скрытостью изображения.

Оценим, насколько оправдан такой подход. В ходе исследований был проведен следующий эксперимент. Коэффициент матрицы ДКП разных частотных компонентов изменялся в некотором диапазоне и измерялся уровень искажений изображения. Уровень искажений оценивался при помощи соотношения сигнал/шум (PSNR), вычисляемого по формуле [1]:

$$\text{PSNR} = 10 \lg_{10} \frac{XY \cdot \max_{x,y} (C_{x,y})^2}{\sum_{x,y} (C_{x,y} - S_{x,y})^2},$$

где X, Y – размер изображения, $C_{x,y}$ – значение пикселя изображения-оригинала, $S_{x,y}$ – значение пикселя изображения после добавления шума. По результатам эксперимента было установлено, что уровень искажений, измеряемый соотношением сигнал/шум, не зависит от принадлежности коэффициента к той или иной группе частотных компонент. Разумеется, такое измерение искажений не совсем корректно, поскольку PSNR слабо коррелирует с системой человеческого зрения. Действительно, при визуализации артефактов внедрения низкочастотные компоненты проигрывают высокочастотным за счет более крупных деталей артефактов, тогда как высокочастотные артефакты больше напоминают шум. Но такая ситуация наблюдается только при визуализации артефактов, когда же уровень искажений ниже порога восприятия, качество изображения остается одинаковым. Поэтому в данной работе внедрение ЦВЗ осуществлялось с условием отсутствия визуализации артефактов внедрения.

Для внедрения информации были выбраны коэффициенты из низкочастотной области. Выбор осуществлялся при помощи матрицы квантования JPEG, что позволяет, во-первых, повысить устойчивость к самому преобразованию JPEG, а во-вторых, исключить внедрение в коэффициенты компонентов, слишком подверженных изменениям или таких, в которых сосредоточена основная энергия изображения. По матрице квантования JPEG была выбрана маска коэффициентов, значения которых лежат в диапазоне от 14 до 24. Таким образом, для экспериментов выбраны два алгоритма: двухкоэффициентный алгоритм Коха с внедрением ЦВЗ в среднечастотные компоненты (стандартное использование) и тот же алгоритм, но с внедрением ЦВЗ в область низкочастотных компонентов, маска которого была сформирована на основе матриц квантования JPEG.

Практические результаты сравнительного анализа устойчивости алгоритмов к внешним воздействиям

В качестве внешних воздействий были выбраны наиболее распространенные манипуляции, которым может быть подвергнуто изображение: сжатие JPEG с различными коэффициентами качества, зашумление изображения-контейнера белым гауссовским шумом, масштабирование и фильтрация. Данные виды воздействий приводят к необратимым изменениям контейнера и, как следствие, представляют реальную угрозу для встроенной в контейнер информации.

Сжатие JPEG с потерями. Для проверки устойчивости к сжатию JPEG изображение-контейнер подвергалось сжатию JPEG во всем диапазоне значений коэффициента качества JPEG (K_{jpeg}). Результат представлен на рис. 2. Заметное увеличение устойчивости обусловлено, прежде всего, снижением потерь на этапе квантования при сжатии JPEG. Если рассмотреть матрицу квантования стандарта JPEG, то легко убедиться, что в области низкочастотных компонентов коэффициенты матрицы квантования имеют наименьшие значения. Следовательно, и изменения в соответствующих коэффициентах матрицы ДКП будут меньше, чем изменения коэффициентов более высокочастотных компонентов при равном значении K_{jpeg} . Это позволяет сохранить встроенную информацию при сжатии с более низкими значениями коэффициента качества.



Рис. 2. Устойчивость ЦВЗ к JPEG сжатию с потерями

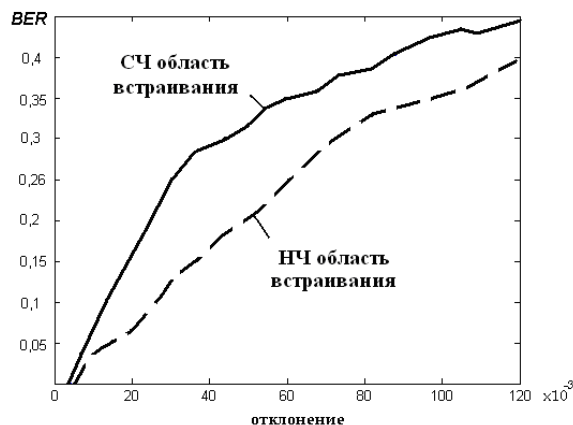


Рис. 3. Устойчивость ЦВЗ к зашумлению

Гауссовский белый шум. Для проверки устойчивости к зашумлению в контейнер вносился белый гауссовский шум с нулевым средним значением и разными значениями среднеквадратичного отклонения, изменяющимися от 0 в сторону возрастания. Увеличение величины отклонения расширяет интервал графика распределения, увеличивая тем самым диапазон значений «шумовых» пикселей. При максимальных значениях отклонения, представленных на графике, деградация изображения достигает такого уровня, что его дальнейшее использование в коммерческих целях является маловероятным. Результат устойчивости ЦВЗ к зашумлению представлен на рис. 3. В силу того, что шум представлен единичными пикселями, он, в первую очередь, влияет на коэффициенты высокочастотных компонентов, однако и низкочастотные компоненты тоже подвержены сильному воздействию, особенно при значительном зашумлении.

Масштабирование. В ходе эксперимента с масштабированием изображение-контейнер сжималось в 2 раза (50%). Очевидно, что считывание ЦВЗ из сжатого изображения полностью лишено всякого смысла, поэтому изображение восстанавливалось до исходного размера, и только затем выполнялось считывание ЦВЗ. Результаты исследования устойчивости к масштабированию представлены в табл. 1.

Масштаб	СЧ компоненты	НЧ компоненты
50%	BER = 0,46	BER = 0,21

Таблица 1. Устойчивость ЦВЗ к масштабированию

Значительную устойчивость к масштабированию не демонстрируют даже низкочастотные компоненты. Объяснить это можно алгоритмом масштабирования, при котором происходит некоторое усреднение блока пикселей, размер которого зависит от масштаба изменений. При 50%-м сжатии блок 8×8 превращается в блок 4×4, что неиз-

бежно приводит к потере 75% информации. Гарантированное сохранение встроенной информации в этом случае возможно только в DC коэффициенте и в коэффициентах, непосредственно к нему прилегающих.

Применение фильтров. Фильтрацию также можно отнести к разряду наиболее вероятных внешних воздействий на контейнер с внедренным ЦВЗ. Из большого многообразия фильтров для цифровых изображений были выбраны три вида: низкочастотный гауссовский фильтр, усредняющий фильтр с размером окна 3×3 пикселя и контрастный фильтр, повышающий резкость изображения, с тем же размером окна. Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Характерным отличием низкочастотных компонентов является слабая чувствительность к усредняющей фильтрации, по крайней мере, с окном такого размера, который был применен. Увеличение размеров окна, безусловно, повлияет и на устойчивость низкочастотных компонентов, но это приведет и к серьезной деградации изображения-контейнера.

Фильтр	СЧ компоненты, BER	НЧ компоненты, BER
Низкочастотный	0,008	0,02
Усредняющий	0,42	0,18
Контрастный	0	0,03

Таблица 2. Устойчивость ЦВЗ к фильтрации

Выводы

Полученные результаты показывают преимущества использования области низкочастотных компонентов для внедрения ЦВЗ. Наиболее убедительное преимущество, как и ожидалось, наблюдается в повышении устойчивости к сжатию JPEG, что обусловлено использованием матрицы квантования при выборе областей встраивания. Преимущество низкочастотной области встраивания прослеживается и в устойчивости к таким воздействиям, как масштабирование и усредняющая фильтрация. Вместе с тем, даже использование области низкочастотных компонентов не дает желаемой устойчивости к этим внешним воздействиям. Детальный анализ механизма воздействий позволит подобрать оптимальную область встраивания, что, в свою очередь, позволит значительно повысить устойчивость ЦВЗ к внешним воздействиям частотного характера при сохранении высокого качества изображения.

Литература

1. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика – М.: Издательство МК-Прес, 2006. – 288 с.
2. Kundur D., Hatzinakos D. Towards a telltale watermarking technique for tamper-proofing // Proceedings of ICIP '98. – Chicago, Illinois, 1998. – Vol. 2. – P. 409.

Прохожев Николай Николаевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kaja2@yandex.ru

Михайличенко Ольга Викторовна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ст. преподаватель, 19791109@list.ru

Коробейников Анатолий Григорьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, korobeynikov_a_g@mail.ru