

Улучшенный алгоритм встраивания информации в область ДКП цифровых изображений на основе метода QIM с переменным шагом квантования

О.О. Евсютин, А.С. Кокурина, Р.В. Мещеряков
eoo@keva.tusur.ru | annakokurina94@yandex.ru | mrv@tusur.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Стеганографическое сокрытие информации в частотной области цифровых изображений сопряжено с такими проблемами, как потеря встроенной информации и искажение естественной модели изображения. Ранее авторами настоящего исследования был предложен подход к решению первой проблемы, заключающийся в итеративном исправлении ошибок встраивания, и получен алгоритм, основанный на методе QIM и обеспечивающий безошибочность извлечения встроенной информации за счет предложенного подхода. В настоящей работе предлагается новый подход к минимизации искажений естественной модели цифрового изображения в области ДКП, основанный на изменении шага квантования в зависимости от локальных характеристик изображения в частотной области. Результатом работы является улучшенный алгоритм встраивания информации в область ДКП цифровых изображений, объединяющий два предложенных подхода. Результаты экспериментов показывают, что разработанный алгоритм наряду с обеспечением безошибочности извлечения позволяет существенно уменьшить искажения, вносимые в коэффициенты ДКП, и обеспечить статистическую неразличимость исходных изображений и стеганоизображений в 75% случаев.

Ключевые слова: цифровые изображения, стеганография, дискретное косинусное преобразование, QIM.

An improved algorithm for embedding information into the digital images DCT domain based on the QIM method with a variable quantization step

O.O. Evsutin, A.S. Kokurina, R.V. Meshcheryakov
eoo@keva.tusur.ru | annakokurina94@yandex.ru | mrv@tusur.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Steganographic concealment of information in digital images frequency domain involves such problems as loss of embedded information and distortion of the natural model of digital images. Previously, the authors of this study proposed an approach to solving the first problem, consisting in iterative correction of embedding errors, and obtained an algorithm based on the QIM method and ensuring the error-free extracting of embedded information through the proposed approach. In this paper, we propose an approach to minimizing the distortions of the natural digital image model in the DCT domain, based on changing the quantization step depending on the image local characteristics in the frequency domain. The result of the work is an improved algorithm for embedding information in the DCT domain of digital images, combining the two proposed approaches. The results of the experiments show that the developed algorithm along with ensuring the error-free extraction makes it possible to reduce the distortions introduced into the DCT coefficients and to ensure the statistical indistinguishability of the cover images and stego images in 75% of cases.

Keywords: digital images, steganography, discrete cosine transform, QIM.

1. Введение

Цифровая стеганография предназначена для обеспечения конфиденциальности информации посредством ее скрытой передачи внутри некоторых цифровых объектов. Наибольшей популярностью пользуется сокрытие информации в цифровых изображениях по причине их широкой распространенности, простоты обработки и последующей передачи.

Одним из основных требований к методам встраивания информации является возможность ее последующего безошибочного извлечения. Это особенно актуально для частотного встраивания, когда биты сообщения записываются в частотные коэффициенты, полученные из пикселей изображения с помощью некоторого частотного преобразования.

Ранее авторами настоящего исследования был предложен новый подход к обеспечению безошибочности, заключающийся в итеративном исправлении ошибок встраивания, и получен алгоритм, основанный на методе модуляции индекса квантования (QIM) в области дискретного косинусного преобразования (ДКП) и обеспечивающий безошибочность извлечения встроенной информации за счет предложенного подхода [2].

Другим важным требованием к стеганографическим методам является незаметность встраивания. Внедрение дополнительной информации в элементы данных, составляющие цифровое изображение, нарушает естественный вид модели цифрового изображения и раскрывает факт передачи в нем дополнительной информации. В результате изображения-контейнеры и стеганоизображения становятся статистически различимы. Вид искажений зависит от операции встраивания.

Данная работа развивает исследование [2] и предлагает новый подход к минимизации искажений естественной модели цифрового изображения в области ДКП при встраивании по методу QIM, основанный на изменении шага квантования в зависимости от локальных характеристик изображения в частотной области.

Основным результатом работы является новый улучшенный алгоритм встраивания информации в область ДКП цифровых изображений, одновременно обеспечивающий безошибочность встраивания и статистическую неразличимость изображений-контейнеров и стеганоизображений.

Описание и обоснование решений, лежащих в основе разработанного алгоритма, представлено в следующих разделах данной статьи.

2. Обеспечение безошибочного извлечения информации, встроенной по методу QIM

Основная идея метода QIM [4] заключается в модуляции яркости пикселей или значений частотных коэффициентов в зависимости от значений встраиваемых битов. Существует большое количество вариаций классического метода QIM. Например, в работе [3] представлена основанная на QIM техника внедрения цифровых водяных знаков для трёхмерных сеток. Авторы работы [10] предлагают улучшенную версию QIM, обеспечивающую устойчивость к масштабированию и ряду других искажений. В [7] представлен вариант метода QIM для JPEG-изображений, направленный на повышение устойчивости к атакам, основанным на гистограммах. В статье [8] описан метод стеганографического встраивания информации в область ДВП для изображений в формате JPEG2000. Авторами работы [9] предлагается использовать двойное вложение в рамках QIM, где один коэффициент модифицируется дважды для встраивания двух битов.

В основе алгоритма, представленного в настоящей статье, лежит формула, предложенная в статье [1]. Исходная формула описывает встраивание информации в пиксели изображения. В настоящей работе она модифицирована для применения к коэффициентам ДКП несжатых цифровых изображений и имеет следующий вид:

$$C'_{x,y} = \begin{cases} \operatorname{sgn} C_{x,y} \cdot \left(\left\lfloor \frac{C_{x,y}}{q} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{C_{x,y}}{q/2} \right\rfloor \right), & \text{если } b_i = 0; \\ \operatorname{sgn} C_{x,y} \cdot \left(\left\lfloor \frac{C_{x,y}}{q} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{C_{x,y}}{q/2} \right\rfloor + \frac{q}{2} \right), & \text{если } b_i = 1; \end{cases} \quad (1)$$

где $C_{x,y}$ – коэффициент ДКП до встраивания, $C'_{x,y}$ – коэффициент ДКП после встраивания, q – шаг квантования, b_i – бит сообщения, $[a]$ – целая часть a ,

$\left\{ \frac{a}{b} \right\}$ – остаток от деления a на b .

Извлечение информации производится по формуле

$$b_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \left\lfloor \frac{C'_{x,y}}{q} \right\rfloor < \frac{q}{2}, \\ 1, & \text{если } \left\lfloor \frac{C'_{x,y}}{q} \right\rfloor \geq \frac{q}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм, основанный на формулах (1) и (2), сформулирован в статье [2]. Его основной особенностью является безошибочное извлечение информации из стеганоизображения за счёт итеративной процедуры встраивания, впервые предложенной авторами настоящей работы в статье [5]. Итеративная процедура встраивания заключается в следующем. На этапе встраивания выполняется извлечение информации с проверкой на наличие ошибок. В случае, если при извлечении возникли ошибки, они исправляются, а затем выполняется повторное встраивание информации в уже изменённый блок. Если безошибочного извлечения не удалось достичь за определённое число шагов, блок обрабатывается таким образом, чтобы при извлечении ни один из его элементов не мог быть интерпретирован как содержащий встроенный бит. В данном алгоритме для этих целей применяется встраивание бита-флага в один из заранее выбранных коэффициентов. Областью встраивания является 21

высоочастотный коэффициент блока (с номерами 43–63 при зигзаг-сканировании).

Эксперименты, проведенные с данным алгоритмом, демонстрируют хорошие показатели ёмкости и визуального качества встраивания, оцениваемого по метрике PSNR [2].

3. Искажение гистограммы изображения в области ДКП при встраивании по методу QIM

Несмотря на высокое качество встраивания алгоритм [2] приводит к существенному искажению естественной модели цифрового изображения в частотной области.

Для иллюстрации этой проблемы обратимся к рис. 1, на котором изображены фрагменты гистограмм распределения значений коэффициентов ДКП классического тестового изображения «Lena» до и после встраивания информации согласно указанному алгоритму (шаг квантования $q = 10$). Вид гистограммы стеганоизображения значительно отличается от вида гистограммы оригинального изображения. На гистограмме из рис. 1 (б) отчётливо заметно возникновение пиков в районе ± 5 , что соответствует величине $\pm q/2$.

Эта проблема [6] является типичной для классического алгоритма QIM. Она связана с тем, что QIM сужает число возможных вариантов значений элементов данных цифрового изображения (пикселей или коэффициентов ДКП), в которые производится встраивание сообщения. В случае конкретного алгоритма, возникновение данной проблемы напрямую следует из формулы (1). Например, при встраивании единичного бита в коэффициенты, значения которых близки к нулю, формула преобразуется к виду $\operatorname{sgn} C_{x,y} \cdot \left(\left\lfloor C_{x,y} \right\rfloor + \frac{q}{2} \right)$, что в итоге трансформирует коэффициенты ДКП в значения, близкие к $\pm q/2$.

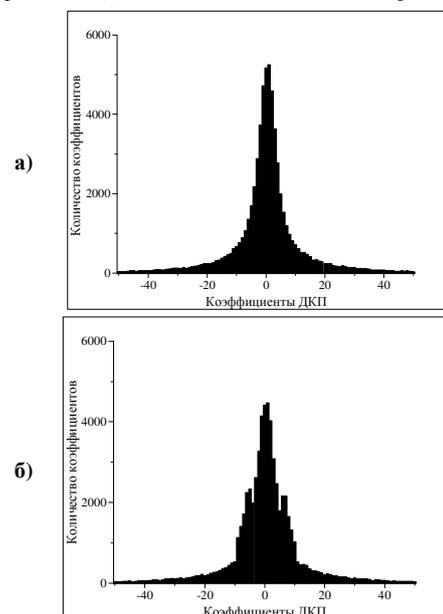


Рис. 1. Гистограммы изображения «Lena»: а) до встраивания; б) после встраивания

Описанная проблема напрямую связана с уязвимостью алгоритма перед стеганоанализом, поскольку существенное искажение естественной модели в частотной области цифрового изображения может служить явным признаком наличия стеганографического вложения.

4. Восстановление естественной модели цифрового изображения за счет переменного шага квантования

Чтобы решить указанную проблему алгоритм [2] был модифицирован таким образом, чтобы шаг квантования для каждого блока коэффициентов ДКП зависел от характеристик этого блока. Для этого была введена формула, определяющая величину шага квантования:

$$q_n = \begin{cases} \lceil F/E \rceil \cdot K, & \text{если } F \geq E, \\ \lfloor E/F \rfloor \cdot K, & \text{если } F < E. \end{cases} \quad (3)$$

где E – среднее значение модулей АС-коэффициентов ДКП по области встраивания, F – среднее значение модулей АС-коэффициентов ДКП вне области встраивания, K – целочисленный коэффициент, n – номер блока коэффициентов ДКП изображения контейнера.

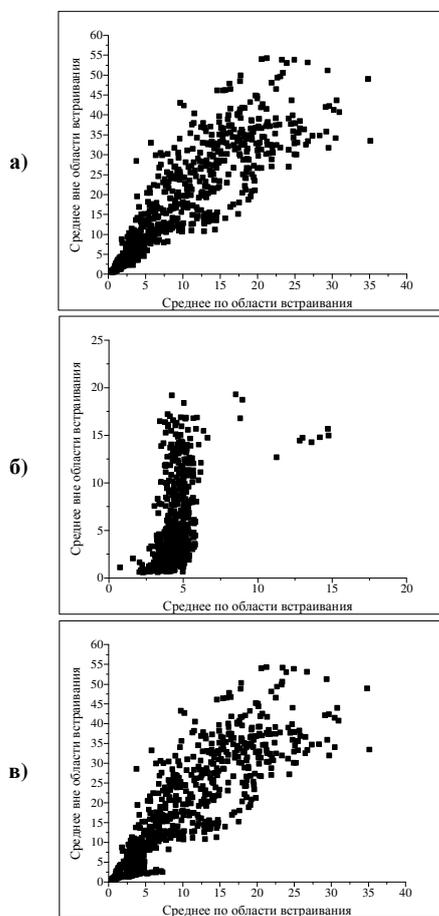


Рис. 2. Соотношение между средними значениями коэффициентов ДКП для: а) изображения контейнера; б) стегоизображения, полученного по алгоритму [2]; в) стегоизображения, полученного по улучшенному алгоритму [2] с переменным шагом квантования

Идея подобного способа вычисления шага квантования возникла из следующего наблюдения: соотношение между средними значениями коэффициентов ДКП по области встраивания и вне её имеет схожий характер для различных изображений. На рис. 2 (а) представлен пример, иллюстрирующий данное соотношение для тестового изображения «Airplane». График на рис. 2 (б) существенно отличается от графика на рис. 2 (а) по причине искажения естественной модели цифрового изображения в частотной области за счёт встраивания информации с постоянным

шагом квантования (шаг квантования $q = 10$). Однако график, представленный на рис. 2 (в), демонстрирует, что встраивание информации с переменным шагом квантования, рассчитанным по формуле (3), позволяет значительно уменьшить изменение данного соотношения.

Рассмотрим влияние произведённой модификации алгоритма на распределение значений коэффициентов ДКП после встраивания. На рис. 3 представлены фрагменты гистограмм изображения «Airplane». Гистограмма на рис. 3 (б) содержит явные признаки наличия вложения. Аналогичная ситуация уже была проиллюстрирована на рис. 1 для изображения «Lena», что подтверждает тот факт, что искажение гистограммы при встраивании по алгоритму [2] возникает независимо от исходного изображения-контейнера. Рис. 3 (в) демонстрирует влияние переменного шага квантования на степень искажений гистограммы: пики сглажены, гистограмма визуально более похожа на гистограмму исходного изображения.

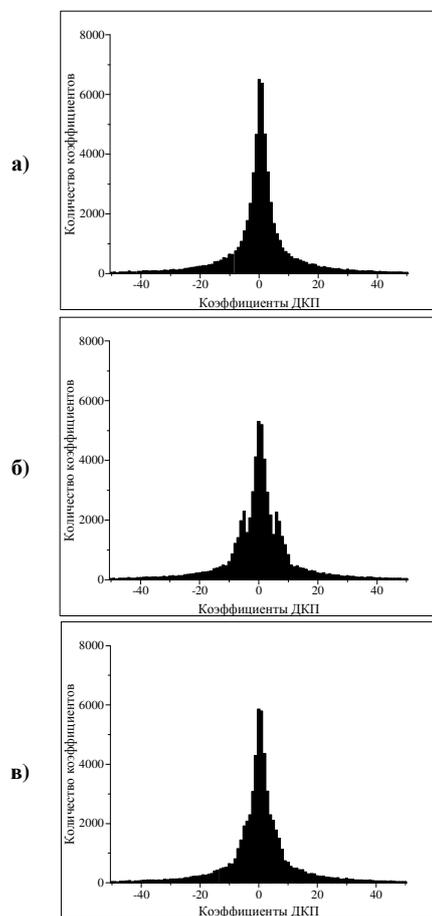


Рис. 3. Гистограммы изображения «Airplane»: а) до встраивания; б) после встраивания с постоянным шагом; в) после встраивания с переменным шагом

5. Результаты экспериментов и обсуждение

Для проверки эффективности предложенного подхода к коррективке искажений гистограммы была выполнена проверка статистической значимости различий между гистограммой контейнера и стегоизображения с помощью непараметрического критерия Уилкоксона. В табл. 1 представлены значения p -уровня значимости для данного критерия. Чтобы две гистограммы считались статистически неразличимыми, должно выполняться условие $p > 0,05$.

Изображение	p -уровень значимости	
	Постоянное $q = 5$	Переменное q
«Aerial»	$2,65 \cdot 10^{-5}$	0,099
«Airplane»	$6,21 \cdot 10^{-6}$	0,663
«Aps»	$2,03 \cdot 10^{-4}$	0,042
«Baboon»	$1,68 \cdot 10^{-7}$	0,003
«Barbara»	$2,75 \cdot 10^{-10}$	0,053
«Boat»	$2,06 \cdot 10^{-5}$	0,237
«Cameraman»	$1,46 \cdot 10^{-6}$	0,282
«Couple»	$1,87 \cdot 10^{-9}$	0,105
«Elaine»	$6,41 \cdot 10^{-6}$	0,183
«Goldhill»	$3,63 \cdot 10^{-5}$	0,512
«House»	$2,54 \cdot 10^{-8}$	0,624
«Lake»	$3,90 \cdot 10^{-5}$	0,178
«Lena»	$3,83 \cdot 10^{-10}$	0,022
«Man»	$1,57 \cdot 10^{-8}$	0,060
«Peppers»	$1,37 \cdot 10^{-5}$	0,463
«Splash»	$1,50 \cdot 10^{-4}$	0,762
«Stream and bridge»	$2,67 \cdot 10^{-7}$	0,414
«Tank»	$1,63 \cdot 10^{-5}$	0,008
«Tiffany»	$1,23 \cdot 10^{-10}$	0,000
«Truck»	$9,63 \cdot 10^{-5}$	0,550

Табл. 1. Проверка статистической различимости гистограмм по критерию Уилкоксона

Как видно из табл. 1, при встраивании информации с постоянным шагом квантования гистограммы статистически различимы во всех случаях. Для переменного шага квантования гистограммы до и после встраивания информации статистически неразличимы в 75% случаев. Данный результат наглядно демонстрирует положительное влияние предложенного подхода на уменьшение искажений естественной модели цифрового изображения в частотной области. При этом качество встраивания улучшилось: при сравнимой ёмкости порядка 7 500 бит среднее значение PSNR составило 40,7 дБ и 41,8 дБ для алгоритмов с постоянным и переменным шагом квантования соответственно.

6. Заключение

В работе предложен новый подход к минимизации искажений естественной модели цифрового изображения в области ДКП при встраивании по методу QIM, основанный на изменении шага квантования в зависимости от локальных характеристик изображения в частотной области. С помощью данного подхода разработан улучшенный алгоритм встраивания информации в область ДКП, который обеспечивает не только безошибочное извлечение информации, но и статистическую неразличимость изображений-контейнеров и стегоизображений. Наличие эффекта от применения предложенного подхода подтверждается результатами проведённых экспериментов.

7. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-3070.2018.8.

8. Литература

[1] Глумов Н.И. Алгоритм встраивания полухрупких цифровых водяных знаков для задач аутентификации изображений и скрытой передачи информации / Н.И.

Глумов, В.А. Митекин // Компьютерная оптика. – 2011. – Том. 35, №2. – С. 262 – 267.

- [2] Евсютин О.О. Алгоритм встраивания информации в цифровые изображения с безошибочным извлечением, основанный на методе QIM / О.О. Евсютин, А.С. Кокурина, Р.В. Мещеряков // Труды XVI Всероссийской конференция «Распределенные информационно - вычислительные ресурсы. Наука – цифровой экономике» (DICR-2017). — 2017. — Россия, Новосибирск. – С. 314-322.
- [3] Borah S. Quantization index modulation (QIM) based watermarking techniques for 3D meshes / S. Borah, B. Borah // Proceedings of the Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP). — 2017. — India, Shimla. — P. 1–6.
- [4] Chen B. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding / B. Chen, G.W. Wornell // IEEE Transactions on Information Theory. – 2001. – Vol. 47, №4. – P. 1423 – 1443.
- [5] Evsutin O.O. An adaptive algorithm for the steganographic embedding information into the discrete Fourier transform phase spectrum / O.O. Evsutin, A.S. Kokurina, R.V. Mescheryakov, O.O. Shumskaya // Proceedings of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'16). — 2016. — Russia, Sochi. — P. 47–56.
- [6] Mitekin V. A new QIM-based watermarking algorithm robust against multi-image histogram attack / V. Mitekin, V. Fedoseev // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 453 – 462.
- [7] Noda H. Application of QIM with dead zone for histogram preserving JPEG steganography / H. Noda, M. Niimi, E. Kawaguchi // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing 2005. — 2005 (vol. 2). — Italy, Genova. — P. II-1082-5.
- [8] Noda H. JPEG2000 steganography possibly secure against histogram-based attack / H. Noda, Y. Tsukamizu, M. Niimi // Proceedings of the 7th Pacific Rim Conference on Multimedia. — 2006. — China, Hangzhou. — P. 80-87.
- [9] Sarkar A. Double embedding in the quantization index modulation framework / A. Sarkar, B.S. Manjunath // Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). — 2009. — Egypt, Cairo. — P. 3653-3656.
- [10] Zhu X. Improved quantization index modulation watermarking robust against amplitude scaling and constant change distortions / X. Zhu, Z. Tang // Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Image Processing. — 2008. — USA, San Diego. — P. 433-436.

Об авторах

Евсютин Олег Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности информационных систем факультета безопасности Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Его e-mail eoo@keva.tusur.ru.

Кокурина Анна Сергеевна, младший научный сотрудник кафедры безопасности информационных систем факультета безопасности Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Её e-mail annakokurina94@yandex.ru.

Мещеряков Роман Валерьевич, д-р техн. наук, заведующий кафедрой безопасности информационных систем факультета безопасности Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Его e-mail mrv@keva.tusur.ru