

Встраивание данных в плоскости Грея цифрового полутонового изображения

В. Горбачев, Л. Денисов, Е. Кайнарова, Е. Яковлева *

Северо-Западный институт печати Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия
{Елена Кайнарова}helenkainarova@gmail.com

Аннотация

Рассмотрена стеганографическая система, использующая плоскости Грея полутонового цифрового изображения, которые построены с помощью кодов Грея. Предложены алгоритмы встраивания и детектирования. Найдено, что данные, скрытые в плоскостях Грея, испытывают при JPEG-сжатии меньшее разрушение, чем данные, встроенные в битовые плоскости.

Ключевые слова: стеганография, коды Грея, цифровое изображение, JPEG-сжатие.

1. ВВЕДЕНИЕ

Коды Грея хорошо известны в теории информации [1]. Построенные с их помощью плоскости для случая цифрового изображения позволяют выделить одно из его главных свойств - избыточность, что представляет интерес для современной стеганографии, которая занимается встраиванием цифровых данных.

Плоскости Грея получают из битовых плоскостей и определяют представление изображения в пространственной области. Для пространственной области описано большое число методов встраивания цифровых данных или цифровых водяных знаков (ЦВЗ) [2], среди которых варианты LSB (Least Significant Bit), блочное и аддитивное встраивание, где используется битовое представление.

После того как данные встроены полученное стегоизображение часто сохраняют в каком-либо графическом формате для дальнейшего использования. Преобразование в графический формат, например, JPEG, который осуществляет сжатие с потерей, может разрушать ЦВЗ. Причина простая: встраивание основано на избыточности изображения, а избыточность удаляется сжатием с потерей. Простым решением служит выбор формата без потерь типа tiff или png. Однако JPEG очень широко используется на практике, поэтому в литературе уделяется большое внимание стеганографии устойчивой к JPEG-сжатию. Техника устойчивая к сжатию с потерями позволяет решать разные задачи, в число которых входит распознавание образов, повышение качества изображения (см., например, [3, 4]) и другие. Встраивание ЦВЗ в jpg-файл с последующим JPEG сжатием известно как J2J (JPEG-to-JPEG) преобразование [6]. Оно изучалось во многих работах, где представлены методы, предлагающие разнообразные компромиссы между уровнем сжатия и деградацией ЦВЗ.

Цель нашей работы – рассмотреть встраивание бинарного изображения в плоскости Грея с последующим JPEG-сжатием. Методы встраивания в плоскости Грея, предложенные в [7] и развитые в [7, 8, 9], продемонстрировали их устойчивость к RS (Regular-Singular) анализу, атакам типа χ^2 и SPA (Sample Pair Analysis). Детекторы для обнаружения ЦВЗ, которые

построены на основе SPA, могут иметь высокую эффективность [10], однако их проектирование сильно усложняется при использовании битовых плоскостей, начиная со второй [11]. В нашей работе для встраивания выбрана четвертая плоскость Грея, детектор для которой авторам не известен. В отличие от приведенных работ, где рассматривались разнообразные атаки, мы интересовались устойчивостью к JPEG-сжатию. Как показали результаты численного эксперимента встраивание в плоскости Грея является более устойчивым к JPEG-сжатию, чем использование битовых плоскостей.

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОЛУТОНОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОСТЕЙ ГРЕЯ

Коды Грея для пиксела c получаются из двоичного представления его яркости $c = b_W b_{W-1} \dots b_1$ с помощью соотношения $g_W = g_W$ и $g_V = b_V + b_{V+1}, V < W$, где все $b_V, g_V \in 0, 1$. Здесь и далее все биты складываются по модулю два. Двоичные разряды b_V имеют вес $2^{V-1}, V = 1, \dots, W$, где старший разряд W , для кодов Грея это не так, поскольку они относятся к системам счисления с неестественными весами. В полутоновом изображении совокупность одноименных двоичных разрядов b_V образует битовую плоскость, это бинарное изображение B_V , где пиксел имеет два значения яркости. Аналогично совокупность кодов Грея g_V будем называть плоскостью Грея G_V , которая также является бинарным изображением. Любое полутоновое изображение можно представить с помощью плоскостей Грея.

Пусть C – это 8-битовое полутоновое изображение. Его представление через битовые плоскости имеет вид

$$C = \sum_{V=1}^8 2^{V-1} B_V. \text{ Из определения кода Грея следует, что}$$

$$B_8 = G_8,$$

$$B_T = G_8 + \dots + G_V + \dots + G_T, \quad (1)$$

где $T < 8$. Отсюда вытекает важное свойство, которое используется дальше. Так, согласно (1) модификация одной плоскости Грея, например, G_V приводит к модификации сразу нескольких битовых плоскостей $B_1, \dots, B_T, \dots, B_V$. В итоге представление 8-битового изображения имеет вид

$$C = \sum_{V=1}^8 2^{V-1} (G_8 + \dots + G_V) \quad (2)$$

3. АЛГОРИТМЫ ВСТРАИВАНИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Будем рассматривать задачу встраивания бинарного изображения M в полутоновое, используя его плоскости Грея. Для этого возьмем простой алгоритм побитового сложения

$$G_V \rightarrow G_{VM} = G_V + M,$$

который представляет собой вариант метода LSB в пространственной области. Заметим, если использовать младшие плоскости V , где бинарное изображение выглядит как шум, то G_V играет роль секретного ключа, который выбирается случайным.

В результате получается стегоизображение

$$S = 2^7 B_8 + \dots + 2^{V-1} B_{VM} + \dots + 2^0 B_{1M}, \quad (3)$$

где $B_{TM}, T=1, \dots, V$ битовые плоскости со встроенным бинарным изображением M

$$B_{VM} = B_V + M.$$

Отсюда следует, что встраивание в одну плоскость Грея G_V эквивалентно встраиванию в набор битовых плоскостей B_1, \dots, B_V . Из этого свойства возникает две возможности детектирования, когда скрытое изображение извлекается либо из плоскости Грея, либо из битовой плоскости.

Будем рассматривать не слепое детектирование, где требуется исходное изображение C . Для этого случая скрытое изображение можно извлечь из плоскости Грея G_V путем побитового сложения $M = G_{VM} + G_V$. Пусть функция $bitget(A, V)$, обозначение взято из MATLAB, вычисляет битовую плоскость V изображения A . Тогда, с учетом определения плоскости Грея, формула детектирования принимает вид

$$D_1 : M = bitget(C, V) + bitget(C, V+1) + bitget(S, V) + bitget(S, V+1) \quad (4)$$

где побитовая сумма $bitget(C, V+1) + bitget(S, V+1) = 0$, поскольку в плоскость $V+1$ ничего не встраивалось. Кроме этого есть вторая возможность детектирования. Так, можно взять одну из битовых плоскостей, поскольку $M = B_T + B_{TM}$ тогда

$$D_2 : M = bitget(C, T) + bitget(S, T) \quad (5)$$

где $T = 1, 2, \dots, V$.

Избыточность изображения позволяет модифицировать не одну, а несколько плоскостей. Это обстоятельство служит основой для слепого детектирования, когда исходное изображение не требуется. Схема следующая. В плоскость с номером V встраивается содержимое плоскости K вместе с M , а детектирование осуществляется из плоскостей K и V стего-изображения.

Для плоскостей Грея данная схема имеет следующий вид. Встраивание

$$G_V \rightarrow G_{VM} = G_K + M,$$

детектирование

$$M = G_{VM} + G_K = bitget(S, V) + bitget(S, V+1) + bitget(S, K) + bitget(S, K+1) \quad (6)$$

Если выбрать $K = V+1$, то $M = bitget(S, V) + bitget(S, V+2)$. Приведенный вариант со слепым детектированием в отличие от не слепого, нельзя свести к эквивалентному встраиванию в битовые плоскости (3). Поэтому никаких двух путей детектирования типа (4) и (5) не возникает. Поясним на примере. Пусть $V = 2$, $K = 3$ и $G_2 \rightarrow G_{2M} = G_3 + M$. Запишем (2) в виде

$$C = Z + 2^2(Y + G_3) + 2^1(Y + G_3 + G_2) + 2^0(Y + G_3 + G_2 + G_1)$$

где $Y = G_8 + \dots + G_4$. Используя выражение для G_{2M} , вместо (2) найдем

$$S = Z + 2^2(Y + G_3) + 2^1(Y + M) + 2^0(Y + G_1 + M).$$

Согласно (6), детектирование определяется выражением $M = bitget(S, 2) + bitget(S, 4)$.

4. СЖАТИЕ С ПОТЕРЕЙ

Формат JPEG осуществляет сжатие с потерями, это сложный процесс, который будем описывать преобразованием

$$A \rightarrow A_q,$$

где $q = 1, 2, \dots, 100$ – параметр качества. Он представляет собой вес, с которым используются матрицы квантования DCT (Discrete Cosine Transform) коэффициентов в формате JPEG. Большие значения q соответствуют высокому качеству и, соответственно, низкой степени сжатия.

Чтобы определить возможности плоскостей Грея для встраивания ЦВЗ, рассмотрим следующую схему, которая включает сжатие. Бинарное изображение M встраивается в битовую плоскость B_V и плоскость Грея G_V полутонового контейнера C . В результате получается два стегоизображения S_B и S_G , которые сжимаются вместе с контейнером

$$M, C \rightarrow S_B, S_G, \\ C, S_B, S_G \rightarrow C_q, S_{Bq}, S_{Gq}.$$

Затем осуществляются разные варианты детектирования: слепое и не слепое, D_1 и D_2 . Сообразно встраиванию и детектированию будем рассматривать следующие четыре извлеченных ЦВЗ

M_b, M_{gb}, M_g, M_{gc} , которые определены соотношениями

$$M_b = bitget(C_q, V) + bitget(S_{Bq}, V),$$

$$M_{gb} = bitget(C_q, T) + bitget(S_{Gq}, T),$$

$$M_g = bitget(C_q, V) + bitget(S_{Gq}, V),$$

$$M_{gc} = bitget(S, V) + bitget(S, V+2),$$

где $T = 1, \dots, V$. Здесь M_b получается при встраивании и извлечении из битовой плоскости при не слепом детектировании, M_{gb}, M_g получаются при встраивании в плоскость Грея и извлечении из битовой плоскости и плоскости Грея при не слепом детектировании, наконец, M_{gc} получается при встраивании в плоскость Грея и слепом детектировании.

5. ЭКСПЕРИМЕНТ

Основная цель эксперимента сравнить встраивание в битовые плоскости и плоскости Грея и определить какой из путей детектирования изображения, скрытого в плоскости Грея, будет лучше.

Для этого мы рассчитывали меры искажения $d(M, X)$ между исходным изображением M и извлеченными после сжатия $X = M_b, M_{gb}, M_g, M_{gc}$. В качестве мер были выбраны евклидово расстояние $e(M, X)$, пиковое отношение сигнал шум $PSNR(M, X)$ и относительная энтропия $Q(M \| X)$. Для двух матриц M и X эти величины определяются следующим образом

$$e(M, X) = \sqrt{(1/Z) \sum_{m,n} (M_{mn} - X_{mn})^2},$$

$$PSNR(M, X) = 20 \log_{10} \max |M_{mn}| / e(M, X),$$

$$Q(M \| X) = \sum_j p_M[j] (\log_2 p_M[j] - \log_2 p_X[j]), \quad (7)$$

где Z число элементов, $p_M[j]$, $p_X[j]$ гистограммы яркости M и X . Смысл этих величин хорошо известен. Чем меньше евклидово расстояние и соответственно больше PSNR, тем изображения «ближе» друг к другу. Считается, что значение PSNR от 20 до 40 децибел соответствует приемлемому визуальному качеству [11]. Относительная энтропия характеризует различие гистограмм, чем она меньше, тем меньше различаются гистограммы.

Встраивание в битовую плоскость и плоскость Грея. Бинарное изображение M и полутоновый контейнер C , представлены на рис. 1 а и б. Использовалась битовая плоскость B_4 и плоскость Грея G_4 . Выбор $V = 4$, а не младших плоскостей $V = 1, 2$ обусловлен следующим компромиссом. При JPEG-сжатии сильнее разрушаются младшие битовые плоскости, поэтому лучше встраивать в более старшие, что, однако, может приводить к «просвечиванию» скрываемого изображения. В нашем случае при $V = 4$ контейнер и стегонизображение визуально неразличимы. Заметим, для этого случая простые атаки типа χ^2 могут быть неэффективны. Для сжатия с параметром качества $q = 90$ извлеченные ЦВЗ из битовой плоскости и плоскости Грея M_b и M_g показаны на рис. 1 в и г. Здесь использовано не слепое детектирование. Визуальное качество у M_g лучше. Однако изображение, которое извлечено из плоскости Грея после сжатия, имеет не только более высокое визуальное качество, но и лучшие меры искажения, определенные согласно (7). Для примера на рис. 2 приведена зависимость PSNR, усредненная по 80 изображениям. Мы выбрали изображения из коллекции Caprichos де-Гой. Они имеют сложную текстуру, что позволяет встраивать ЦВЗ в старшие битовые плоскости. Для параметра качества $q > 50$, эта область представляет наибольший интерес, для M_g получаются значения PSNR от 15 до 30 дБ, что свидетельствует в пользу приемлемого визуального качества.

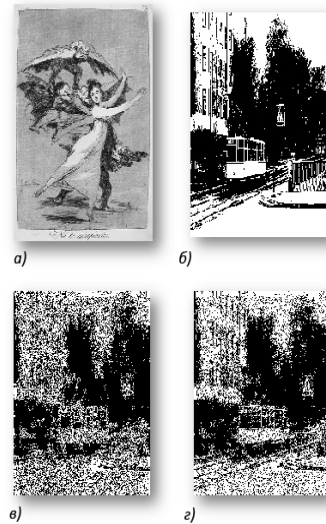


Рис. 1. Встраивание в битовую плоскость и плоскость Грея:

- а) – полутоновый контейнер; б) Бинарный ЦВЗ;
- в) – ЦВЗ, извлеченные из битовой плоскости, $q=90$;
- г) ЦВЗ, извлеченные из плоскости Грея, $q=90$

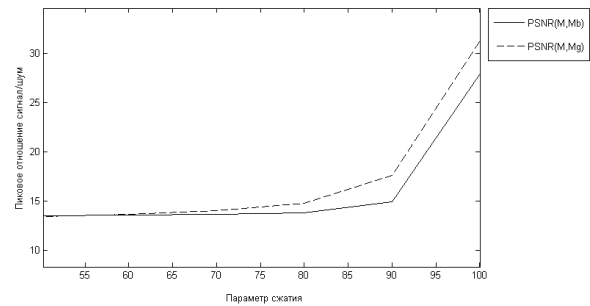


Рис. 2. Пиковое отношение сигнал шум при встраивании в битовую плоскость и плоскость Грея

Из полученных результатов следует, что выбор между встраиванием в битовые плоскости и плоскости Грея решается в пользу последних.

Встраивание в плоскость Грея с детектированием из битовой плоскости и плоскости Грея. Здесь мы рассмотрели варианты слепого и не слепого детектирования для массива из 200 полутоновых изображений. ЦВЗ встраивалось в плоскости $V = 2, 3, 4$ с характерными значениями $q = 70, 80, 90$. Были рассчитаны меры искажения $d(M, X)$, определенные согласно (7) между исходным изображением M и извлеченными после сжатия $X = M_b, M_{gb}, M_g, M_{gc}$. На рис. 3 а и б приведены значения евклидова расстояния и относительной энтропии, усредненные по 200 изображениям, в зависимости от V . Все функции убывают, это связано со следующим обстоятельством. При сжатии большее искажение испытывают младшие битовые плоскости, поскольку они представляют избыточность изображения. Меры приведены для параметра качества $q = 80$, что является не сильно щадящим режимом сжатия. Видно, что наилучшие показатели, это наименьшее евклидово расстояние и относительная энтропия между M и M_g , для не слепого детектирования. Аналогичный результат для PSNR. На рис. 3 в и г приведены две

соответствующие гистограммы евклидова расстояния и относительной энтропии. Это распределение значений этих мер, полученное из 200 изображений. Для евклидова расстояния и относительной энтропии возникают три хорошо различающиеся распределения. Их средние значения соответствуют точкам $V = 4$ кривых в верхнем ряду. Хорошо различимые распределения характеризуют различие выбранных случаев встраивания.

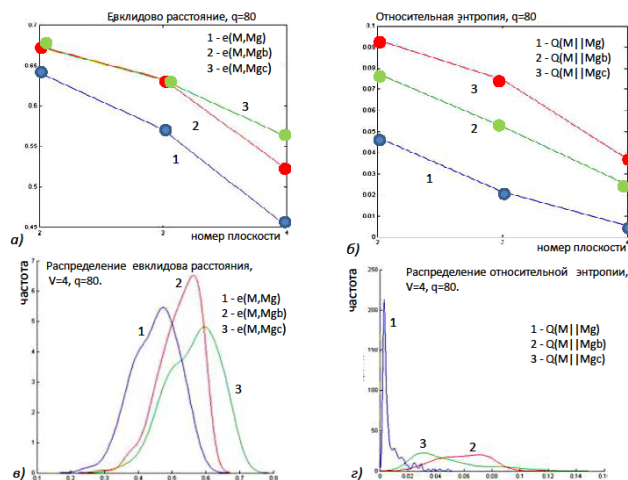


Рис. 3: Меры искажения и гистограммы для встраивания в плоскости Грея. а) Евклидово расстояние; б) Относительная энтропия; в) Распределение значений евклидова расстояния для $V=4$; г) Распределение значений относительной энтропии для $V=4$.

Из найденных зависимостей следует, что при сжатии наиболее благоприятным вариантом детектирования является слепое.

6. ВЫВОДЫ

Плоскости Грея цифрового изображения наряду с битовыми плоскостями могут быть использованы для сокрытия бинарного изображения. Для алгоритмов типа LSB встраивание в плоскость Грея эквивалентно использованию нескольких битовых плоскостей. Особенности проявляются при JPEG сжатии стегоизображение. Это преобразование возникает естественным образом, когда изображение с ЦВЗ сохраняется на диске в jpg-файле. Наличие канала сжатия приводит к различным вариантам детектирования, среди которых возникает слепое детектирование. Чтобы оценить возможности разных вариантов, мы вычислили меры искажения между исходными и извлеченными после сжатия ЦВЗ. Использовались такие меры как евклидово расстояние, PSNR и относительная энтропия. Из расчетов, проведенных для массива изображений, следует, что лучше всего ЦВЗ встраивать и извлекать в плоскости Грея.

7. ССЫЛКИ

- [1] Хэмминг Р.В. Теория кодирования и теория информации. М., Радио и связь, 1983.
- [2] I.J. Cox, M.L. Miller, J.F. Bloom, J. Fridrich, T. Kaler. Digital Watermarking and Steganography. ELSEVIER, Morgan Kaufmann Publishers, 2008.
- [3] Тимбай Е.И. Применение корректирующего фильтра для повышения качества изображений, сжатых методом JPEG. Компьютерная оптика, том 35, №4, 2011. – С. 513 - 518.

[4] Лапшенков Е.М. Модель оценки потерь качества графического изображения при сжатии с потерями, ориентированная на системы распознавания образов. Компьютерная оптика, том 35, № 3, 2011. – С. 408 - 415.

[5] P. H.W. Wong, O.C. Au. Capacity Estimation Technique for JPEG-to-JPEG Image Watermarking.

IEEE Transaction on circuit and system for video technology, Volume 13, No 8, 2003. – P. 74 - 78.

[6] Nguyen B.C., Yoon S.M., Lee H-K. Proceedings of the 5th international conference on Digital Watermarking, Y.Q. Shi and B. Jeon (Eds.): IWDW 2006, LNCS 4283. – P. 61 - 70. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

[7] Aгаian, S., Rodriguez, B., Perez, J.: Stego sensitivity measure and multibit plane based steganography using different color models. In: Delp, E., Wong, P. (eds.) Proc.Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VIII, February 2006, vol. 6072. – P. 279 - 290.

[8] Barbier J., Mayour K. Steganalysis of Multi Bit Plane Image Steganography. Proceeding IWDW '07 Proceedings of the 6th International Workshop on Digital Watermarking Pages 99 - 111, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2008, ISBN: 978-3-540-92237-7 (2008).

[9] Xiangyang Luo, Fenlin Liu, Chunfang Yang, Shiguo Lian, Ying Zeng Multimedia Tools and Applications (Impact Factor: 0.62). 08/2013; DOI:10.1007/s11042-010-0663-3, 2013.

[10] Ker A.D. Improved detection of LSB steganography in grayscale images. In: Proc. 6th Information Hiding Workshop. Volume 3200 of Springer LNCS, 2004. – P. 97 - 115.

[11] Ker A.D. Steganalysis of Embedding in Two Least-Significant Bits. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 2, no. 1, March 2007 – P. 46 - 54.

[12] Сэлмон Д. Сжатие изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004.

Об авторах

Горбачев Валерий – преподаватель Северо-Западного института печати Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна (СЗИП СПб ГУТД).

Денисов Лев – выпускник СЗИП СПб ГУТД.

E-mail: denisovlev@yandex.ru

Кайнарова Елена – преподаватель СЗИП СПб ГУТД.

E-mail: helenkainarova@gmail.com

Яковлева Елена – преподаватель НМСУ «Горный».

E-mail: 2305lena@mail.ru