

Метод формирования изображений ЦВЗ повышенной стойкости в задаче защиты авторских прав на растровые изображения

Ю.Д. Выборнова¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В статье исследуется метод построения растровых цифровых водяных знаков (ЦВЗ) повышенной стойкости на основе бинарной последовательности. Целью данной работы является анализ применимости метода в задаче защиты авторских прав на растровые изображения. Показано, что формируемые шумоподобные изображения ЦВЗ могут быть незаметно встроены в пространственную область защищаемого изображения, а результирующий метод аддитивного встраивания демонстрирует явные преимущества перед существующими аналогами.

1. Введение

На сегодняшний день наиболее эффективным способом защиты мультимедийных данных от несанкционированного распространения и подделки является встраивание цифровых водяных знаков. Существующие методы классифицируются, как правило, в зависимости от области, в которую вносится защитная информация.

В пространственной области ЦВЗ внедряется в изображение путем непосредственного изменения значений яркости пикселей [1-3], тогда как в области преобразования ЦВЗ внедряется путем изменения коэффициентов разложения матрицы изображения. Для защиты авторских прав на сегодняшний день наиболее часто применяются дискретное вейвлет-преобразование [4-6], сингулярное разложение (SVD) [4-9] и дискретное косинусное преобразование [9,10]. В работе [7] предлагается встраивать биты ЦВЗ в коэффициенты дискретного преобразования Чебышева.

Большинство исследований в области встраивания ЦВЗ сфокусировано на второй группе методов, т.е. методов встраивания в область преобразования, поскольку они демонстрируют высокую стойкость и при этом вносят меньше видимых искажений, чем методы встраивания в пространственную область. Последние в свою очередь имеют более низкую вычислительную сложность, что также является немаловажным критерием при выборе метода защиты мультимедийных данных.

В работе [11] предложен метод встраивания ЦВЗ повышенной стойкости, который не требует спектральных преобразований. Метод основан на суммировании защищаемого изображения с шумоподобным изображением, кодирующим некоторую битовую последовательность ЦВЗ. Метод, предложенный в настоящей статье, также основан на формировании шумоподобного контейнера для бинарной последовательности, но при этом в

силу уникальных особенностей демонстрирует значительно более высокие показатели стойкости и информационной емкости.

2. Предлагаемый подход к защите авторских прав

Предлагаемое решение задачи защиты авторских прав на растровые изображения заключается в использовании «шумоподобного» изображения в качестве вторичного контейнера для ЦВЗ, представленного в форме битовой последовательности. Применение в качестве ЦВЗ не просто растрового изображения, а шумоподобного контейнера позволяет автоматизировать процедуру верификации, обеспечить достаточный объем встраиваемой защитной информации, а также повысить стойкость ЦВЗ к злоумышленным атакам.

2.1. Формирование шумоподобного изображения ЦВЗ

Для получения шумоподобного изображения на основе битовой последовательности формируется двумерный пространственный спектр изображения путем расставления в спектральной области двумерных дельта-импульсов с равным шагом по углу [12]. Импульсы расставляются на двух кольцах различного радиуса в зависимости от значения соответствующего бита последовательности – на кольце меньшего или большего радиуса. Два импульса служат «ключом» начала последовательности, они размещаются на обоих кольцах при одинаковом угле. Затем при помощи обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) осуществляется переход к двумерному изображению.

2.2. Процедура извлечения последовательности

Очевидно, для извлечения последовательности необходимо вычислить ДПФ шумоподобного изображения и локализовать координаты спектральных компонент, имеющих большую амплитуду (импульсы). Далее оцениваются радиусы найденных колец в спектральной области (при их наличии) и определяется ключ начала последовательности, после чего бинарная последовательность ЦВЗ может быть декодирована.

2.3. Процедура встраивания ЦВЗ

Аналогично [11] встраивание шумоподобного изображения ЦВЗ осуществляется аддитивно по следующей формуле:

$$C^w(m_1, m_2) = C(m_1, m_2) + R(m_1, m_2) \times [W(m_1, m_2) - M(W)],$$

$$\text{где } R(m_1, m_2) = q \sqrt{\frac{D(C(m_1 + k_1, m_2 + k_2))}{D(W)}}, k = -1, 1.$$

Здесь C – исходный контейнер, C^w – заполненный контейнер, W – шумоподобный ЦВЗ, $M(X)$ и $D(X)$ – математическое ожидание и дисперсия, соответственно. Коэффициент усиления ЦВЗ q – адаптивный параметр встраивания.

2.4. Процедура извлечения ЦВЗ

Для извлечения изображения ЦВЗ необходимо знать ключ $\langle R, G, M \rangle$, где

$$G(m_1, m_2) = \frac{C(m_1, m_2)}{R(m_1, m_2)}. \text{ Тогда извлеченный ЦВЗ:}$$

$$W^R(m_1, m_2) = \frac{C^w(m_1, m_2)}{R(m_1, m_2)} - G(m_1, m_2) + M.$$

Для повышения стойкости к преобразованиям извлеченное изображение может быть подвергнуто дополнительной обработке (например, процедуре интерполяции).

3. Экспериментальные исследования

Для исследования потенциальных возможностей использования «шумоподобного» изображения, встраиваемого в растровое изображение, были проведены вычислительные эксперименты.

Набор исследуемых изображений-контейнеров размерами $N_1 \times N_2 = 1024 \times 1024$ пикселей приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. Тестовый набор изображений: а) man.tiff (А); б) airport.tiff (В); в) pentagon.tiff (С).

3.1. Визуальная неразличимость и информационная емкость

Для оценки визуальной неразличимости был проведен экспериментальный расчет пикового отношения сигнала к шуму (peak signal-to-noise ratio, PSNR), которое наиболее часто применяется для оценки качества изображения со встроенным ЦВЗ. Данный эксперимент в том числе включает анализ информационной емкости шумоподобного изображения-контейнера для различных длин битовых последовательностей ЦВЗ l . Во всех экспериментах генерировались шумоподобные изображения, размеры которых совпадают с размерами контейнеров из тестового набора. Битовые ЦВЗ встраивались в кольца радиусов r и $(r + \Delta r)$ в области дискретного спектра изображения. Для надежного извлечения встроенной битовой последовательности ЦВЗ был выбран параметр $\Delta r = 8$. Результаты эксперимента приведены в таблицах 1 – 3.

Таблица 1. PSNR, $l = 10$, $r = 10$.

q	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
А	49,60	43,95	40,74	38,51	36,84	35,48	34,33	33,35	32,50	31,73	31,05	30,43
В	48,17	42,19	38,69	36,22	34,34	32,82	31,55	30,48	29,55	28,73	28,01	27,36
С	50,18	44,20	40,70	38,21	36,29	34,73	33,42	32,30	31,31	30,44	29,67	28,96

Таблица 2. PSNR, $l = 50, r = 60$.

q	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
A	39,88	34,90	32,10	30,18	28,72	27,56	26,61	25,81	25,12	24,52	23,98	23,50
B	38,77	32,91	29,64	27,46	25,87	24,64	23,65	22,82	22,12	21,52	20,99	20,52
C	40,09	34,12	30,74	28,45	26,74	25,41	24,34	23,45	22,69	22,04	21,47	20,96

Таблица 3. PSNR, $l = 100, r = 116$.

q	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
A	36,85	31,77	29,05	27,25	25,91	24,86	24,00	23,27	22,65	22,10	21,62	21,19
B	34,96	29,32	26,32	24,38	22,98	21,91	21,05	20,33	19,71	19,19	18,72	18,30
C	36,36	30,53	27,33	25,22	23,70	22,53	21,59	20,82	20,17	19,61	19,13	18,70

3.2. Стойкость к преобразованиям

Для исследования стойкости метода к преобразованиям эксперименты строились следующим образом. В тестовое изображение поочередно встраивались 100 шумоподобных ЦВЗ. Параметры формирования шумоподобного ЦВЗ: $l = 10, r = 10, \Delta r = 8$. Изображение со встроенным ЦВЗ подвергалось преобразованию различной степени, после чего предпринималась попытка извлечения ЦВЗ. Будем считать метод устойчивым к преобразованию, если вероятность корректного извлечения $P > 0,98$.

В таблице 4 представлена зависимость стойкости к JPEG-сжатию от коэффициента усиления ЦВЗ q .

Таблица 4. Минимально допустимая степень сжатия JPEG.

q	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
A	–	95	90	80	70	45
B	95	90	65	35	20	10
C	90	70	45	35	20	15

В таблице 5 представлена зависимость стойкости к добавлению шума от коэффициента усиления ЦВЗ q .

Таблица 5. Максимально допустимая доля зашумления: «salt&pepper».

q	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
A	0,91	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
B, C	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

В таблице 6 представлена зависимость стойкости к медианной фильтрации от коэффициента усиления ЦВЗ q .

Таблица 6. Максимально допустимый размер окна при медианной фильтрации, квадратных пикселей.

q	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
A	3	3	5	5	5	7
B	3	5	5	7	7	9
C	3	5	7	9	9	12

В таблице 7 представлена зависимость стойкости к повороту от коэффициента усиления ЦВЗ q .

Таблица 7. Максимально допустимый угол поворота, градусы.

q	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
A	–	10	10	20	20	25
B	20	20	20	25	25	25
C	25	25	25	25	25	25

Кроме того, предложенный метод является стойким к кадрированию изображения до 40 процентов и повороту изображения на углы, кратные 90 градусам.

По результатам экспериментов можно сделать следующие выводы. Во-первых, предлагаемый метод обеспечивает возможность встроить последовательность ЦВЗ длиной до 100 бит без внесения заметных искажений в защищаемое изображение. Во-вторых, метод обладает повышенной стойкостью к преобразованиям контейнера в сравнении с методом, предложенным в [11].

4. Заключение

В статье исследуется метод построения растровых цифровых водяных знаков повышенной стойкости на основе бинарной последовательности. Целью данной работы является анализ применимости метода в задаче защиты авторских прав на растровые изображения. Показано, что формируемые шумоподобные изображения ЦВЗ могут быть незаметно встроены в пространственную область защищаемого изображения, а результирующий метод аддитивного встраивания демонстрирует явные преимущества перед существующими аналогами.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-29-09045, № 19-07-00474 и № 19-07-00138.

6. Литература

- [1] Sadeghi, M. Blind gain invariant image watermarking using random projection approach / M. Sadeghi, R. Toosi, M.A. Akhaee // *Signal Processing*. – 2019. – Vol. 163. – P. 213-224.
- [2] Toosi, R. Robust image watermarking using sample area quantization / R. Toosi, M. Sadeghi, M.A. Akhaee // *Multimedia Tools and Applications*. – 2019. – Vol. 78(5). – P. 34963-34980.
- [3] Jobin, A. An imperceptible spatial domain color image watermarking scheme / A. Jobin, P. Varghese // *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. – 2019. – Vol. 31. – P. 125-133.
- [4] Devi, H.S. Red-cyan anaglyph image watermarking using DWT, Hadamard transform and singular value decomposition for copyright protection / H.S. Devi, K.M. Singh // *Journal of Information Security and Applications*. – 2019. – Vol. 50(2020). – P. 1-7.
- [5] Madhavi, K. A Secure and Robust Digital Image Watermarking Techniques / K. Madhavi, G. Rajesh, K.S. Priya // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 8(12). – P. 2758-2761.
- [6] Sharma, S. A gradient method for design of multiorder varied-depth binary diffraction gratings – a comparison / S. Sharma, H. Sharma, J.B. Sharma // *Applied Soft Computing Journal*. – 2019. – Vol. 84(105696). – P. 1-18.
- [7] Noor, R. Highly robust hybrid image watermarking approach using Tchebichef transform with secured PCA and CAT encryption / R. Noor, A. Khan, A. Sarfaraz, Z. Mehmood, A.M. Cheema // *Soft Computing*. – 2019. – P. 1-9.
- [8] Singh, S.P. A Robust Watermarking Scheme for Copyright Protection / S.P. Singh, G. Bhatnagar // *Proceedings of 3rd International Conference on Computer Vision and Image Processing*. – 2018. – Vol. 2. – P. 431-443.
- [9] Yu, X. A Robust Color Image Watermarking Algorithm Based on APDCBT and SSVD / C. Wang, X. Zhou // *Symmetry*. – 2019. – Vol. 11(1227). – P. 1-18.
- [10] Ko, H.J. Robust and blind image watermarking in DCT domain using inter-block coefficient correlation / H.J. Ko, C.T. Huang, G. Horng, S.J. Wang // *Information Sciences*. – 2019. – P. 1-33.
- [11] Глумов, Н.И. Алгоритм поблочного встраивания стойких ЦВЗ в крупноформатные изображения / Н.И. Глумов, В.А. Митекин // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 368-372.

- [12] Выборнова, Ю.Д. Метод защиты векторных карт с использованием изображения ЦВЗ как вторичного контейнера / Ю.Д. Выборнова, В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 474-483.

Method for construction of highly robust watermarks in the task of copyright protection for digital images

Y.D. Vybornova¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this paper, the method for construction of highly-robust digital watermarks based on a conversion of a binary watermark sequence is proposed. The aim of the study is to analyze the applicability of the method in the task of copyright protection for raster images. It is shown that the proposed noise-like watermark images can be imperceptibly embedded into the spatial domain of the protected image. The results of the conducted experiments demonstrate clear advantages of the proposed watermarking method over existing analogues.