

# Устойчивый алгоритм встраивания цифровых водяных знаков в видеопоток

П.Г. Черепанов  
pcherepanov@gehtsoft.com

С.В. Белим  
belimsv@omsu.ru

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

## Аннотация

В статье предложен алгоритм встраивания цифровых водяных знаков в видеофайлы устойчивый к импульсным шумам. Предложенный алгоритм основан на трехмерном аналоге метода Коха-Жао. Встраиваемое сообщение представлено в виде трехмерного объекта. Для повышения устойчивости встраиваемый объект представляется в виде цифровой голограммы. Показана устойчивость предложенного метода к импульсному шуму и потере кадров.

## Введение

Разработка алгоритмов встраивания цифровых водяных знаков остается актуальной в задачах защиты от несанкционированного копирования информации и установления авторства данных. Наибольшее распространение получил подход, связанный с пок кадровым встраиванием скрытого сообщения [1, 2]. При таком подходе видеопоток рассматривается как набор изображений, для которых важен порядок. В каждый кадр независимо встраивается сообщение на основе какого-либо стеганографического алгоритма. При извлечении сообщения важную роль играет порядок кадров, который позволяет восстановить информацию без потерь. В связи с чем приходится решать проблему синхронизации кадров. Утеря, либо искажение кадров может приводить к невозможности проверки цифрового водяного знака.

Ряд публикаций был направлен на решение проблемы обеспечения синхронизации кадров при стеганографическом встраивании. Один из предложенных подходов [3, 4] основан на упорядочивании с использованием статистических характеристик кадров. Однако данный подход не свободен от ошибок, связанных с наличием близких по характеристикам кадров в видеопоследовательности. Большинство подходов основано на встраивании дополнительной информации. Так в статье [2] авторы используют метки синхронизации, которые встраиваются независимо от цифровых водяных знаков, что приводит к снижению объема полезной информации. Другой подход, изложенный в статье [5] основан на применении избыточного кодирования. Кроме проблемы синхронизации кадров приходится сталкиваться с задачей снижения визуальной видимости цифровых водяных знаков. Данная задача может быть решена с помощью специального алгоритма выбора коэффициентов дискретного косинусного преобразования [6] или дискретного вейвлет-преобразования [7].

Возникновение дополнительных трудностей встраивания цифровых водяных знаков в видеопоток с помощью алгоритмов, ориентированных на изображения, связано с использованием набора преобразований, требующих согласований, вместо одного преобразования. Одним из выходов является обработка видеопотока как единого трехмерного объекта. Впервые исследование видеофайлов с помощью трехмерного дис-

---

*Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes.*

In: Sergey V. Belim, Nadezda F. Bogachenko (eds.): Proceedings of the Workshop on Data, Modeling and Security 2017 (DMS-2017), Omsk, Russia, October 2017, published at <http://ceur-ws.org>

кретного косинусного преобразования было осуществлено в работе [8]. Основным препятствием широкого распространения данного подхода были высокие требования к аппаратной составляющей вычислительно-го комплекса. В дальнейшем, с увеличением вычислительной мощности компьютерных систем, в данном направлении был выполнен ряд работ [9, 10, 11, 12], посвященных влиянию распределения коэффициентов дискретного косинусного преобразования на качество кодировки видеопотока. Алгоритм встраивания цифровых водяных знаков в 3D изображения на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования предложен в статье [13], в которой показано, что такой подход обладает повышенной устойчивостью по сравнению с двумерным аналогом.

Встраивание цифровых водяных знаков в видеопоток, как трехмерный объект рассмотрен в нескольких статьях. При этом используются различные подходы: статические и динамические компоненты волны вдоль временной оси [14], трехмерное Фурье преобразование [15, 16], вейвлет-преобразование [17, 18, 19]. Использование трехмерного дискретного косинусного преобразования для встраивания цифровых водяных знаков было предложено в статьях [20, 21]. Авторы использовали методы модуляции яркости изображения (QIM) и модуляции размытия изображения (RDM).

В данной статье предложен алгоритм встраивания цифровых водяных знаков в видеопоток на основе модификации метода Коха-Жао для трехмерного случая.

## 1 Постановка задачи и решение

Модифицируем двухмерный метод Коха - Жао [22] на трехмерный случай дискретного косинусного преобразования. Встраивание будем осуществлять в канал синего цвета, как наименее различимый визуально. Разобьем исходный видеопоток на блоки по  $N$  кадров каждый и будем встраивать цифровой водяной знак в каждый блок отдельно. Для этого каждый такой блок разобьем на подблоки  $N \times N \times N$  пикселей. Разбиение на блоки будем выполнять слева-направо, сверху-вниз, обозначив  $i$ -ый блок как  $f^i$ . Далее произведем вычисление спектральных коэффициентов дискретного косинусного преобразования для каждого из подблоков. Введем обозначение для спектрального коэффициента дискретного косинусного преобразования в точке  $(u, v, k) - f_{u,v,k}^i, f_{x,y,z}^i$  - значение яркости пикселя в исходном подблоке в точке  $(x, y, z)$ :

$$f_{u,v,k}^i = \frac{\xi(u)\xi(v)\xi(k)}{\sqrt{8/N^3}} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{z=0}^{N-1} f_{x,y,z}^i \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi k(2z+1)}{2N}\right),$$

где

$$\xi(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{if } u > 0 \\ 1, & \text{if } u = 0. \end{cases}$$

В результате данного преобразования будет получен набор трехмерных матриц коэффициентов дискретного косинусного преобразования. В каждой из таких матриц можно скрыть один бит информации. В окрестности точки с координатами  $(0, 0, 0)$  находятся коэффициенты низкочастотных компонент, которые несут в себе преобладающую часть видеопотока, и, поэтому, встраивание в эту область будет наиболее заметным. В окрестности точки  $(N, N, N)$  находятся коэффициенты высокочастотных компонент, изменения которых несут наименее визуально заметное влияние на видеопоток, но в тоже время область высокочастотных компонент является наиболее изменяемой во время работы различных алгоритмов обработки видеоизображения. Поэтому встраивание будем осуществлять в область среднечастотных компонент для обеспечения минимального искажения исходного видеопотока и сохранения устойчивости алгоритма к различным преобразованиям. Выберем две точки из области среднечастотных компонент -  $(u_1, v_1, k_1)$ ,  $(u_2, v_2, k_2)$ . Зададим величину порога, с которым будем сравнивать результаты разности модулей коэффициентов -  $P$ . В качестве цифрового водяного знака выберем сообщение  $m$ . Обозначим  $i$ -ый бит встраиваемого цифрового водяного знака через  $m_i$ . Перед встраиванием сообщения в блок  $f_{u,v,k}^i$  вычислим значения вспомогательных функций:

$$\begin{aligned} \omega_1^i(u_1, v_1, k_1) &= |f_{u_1, v_1, k_1}^i|, \\ \omega_2^i(u_2, v_2, k_2) &= |f_{u_2, v_2, k_2}^i|, \\ Z_1^i(u_1, v_1, k_1) &= \begin{cases} -1, & \text{if } f_{u_1, v_1, k_1}^i < 0 \\ 1, & \text{if } f_{u_1, v_1, k_1}^i \geq 0. \end{cases} \\ Z_2^i(u_2, v_2, k_2) &= \begin{cases} -1, & \text{if } f_{u_2, v_2, k_2}^i < 0 \\ 1, & \text{if } f_{u_2, v_2, k_2}^i \geq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Проведем встраивание с помощью пересчета коэффициентов дискретного косинусного преобразования

$$\begin{aligned}\Omega^i(u_1, v_1, k_1) &= \begin{cases} P + \omega_2^i(u_2, v_2, k_2) + 1, & \text{if } (\omega_1 - \omega_2) \leq P \text{ and } m_i = 0, \\ \omega_1^i(u_1, v_1, k_1), & \text{if } (\omega_1 - \omega_2) > P \text{ and } m_i = 1. \end{cases} \\ \Omega^i(u_2, v_2, k_2) &= \begin{cases} P + \omega_1^i(u_1, v_1, k_1) + 1, & \text{if } (\omega_1 - \omega_2) \geq P \text{ and } m_i = 1, \\ \omega_2^i(u_2, v_2, k_2), & \text{if } (\omega_1 - \omega_2) < P \text{ and } m_i = 0. \end{cases} \\ F^i(u_1, v_1, k_1) &= Z_1^i(u_1, v_1, k_1) \cdot \Omega^i(u_1, v_1, k_1), \\ F^i(u_2, v_2, k_2) &= Z_2^i(u_2, v_2, k_2) \cdot \Omega^i(u_2, v_2, k_2).\end{aligned}$$

Для получения результирующего видеопотока осуществим обратное дискретное косинусное преобразование по формуле:

$$F_{x,y,z}^i = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\xi(u)\xi(v)\xi(k)}{\sqrt{8/N^3}} F_{u,v,k}^i \cos\left(\frac{\pi u(2x+1)}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi v(2y+1)}{2N}\right) \cos\left(\frac{\pi k(2z+1)}{2N}\right),$$

Полученные подблоки собираются в обратном порядке в блок кадров. Извлечение цифрового водяного знака происходит посредством разбиения исходного изображения на аналогичные блоки  $N \times N \times N$  и применения к ним дискретного косинусного преобразования. Выделение  $m_i$  символа встроенного цифрового водяного знака происходит по следующему правилу:

$$\begin{aligned}\omega_1^i(u_1, v_1, k_1) &= |F_{u_1, v_1, k_1}^i|, \\ \omega_2^i(u_2, v_2, k_2) &= |F_{u_2, v_2, k_2}^i|, \\ m_i &= \begin{cases} 0, & \text{if } (\omega_1^i(u_1, v_1, k_1) \geq \omega_2^i(u_2, v_2, k_2)), \\ 1, & \text{if } (\omega_1^i(u_1, v_1, k_1) < \omega_2^i(u_2, v_2, k_2)). \end{cases}\end{aligned}\tag{1}$$

Таким образом, получим следующий алгоритм:

1. Разбить исходный видеопоток на блоки из  $N$  кадров.
2. Разбить каждый блок на подблоки размером  $N \times N \times N$  пикселей.
3. Вычислить матрицу дискретных косинусных коэффициентов для каждого подблока.
4. Выбрать две точки из области среднечастотных компонент, т.е. точки лежащий вдоль второстепенной диагонали  $(0, 0, N) - (N, N, 0)$ .
5. Определить оптимальную величину порога  $P$ , минимизирующую влияние на исходный видеопоток и максимизирующую надежность встраиваемого водяного знака.
6. Последовательно встроить каждый бит цифрового водяного знака в соответствующий подблок дискретных косинусных коэффициентов.
7. Применить к каждому из подблоков коэффициентов дискретного косинусного преобразования обратное преобразование.
8. Собрать из полученных подблоков блоки из  $N$  кадров.
9. Собрать видеопоток из полученных блоков.

Для того чтобы извлечь цифровой водяной знак из видеопотока требуется выполнить шаги 1-3 из полученного алгоритма.

## 2 Получение голограммы цифрового водяного знака

Для повышения устойчивости цифрового водяного знака к модификации потока предлагается встраивать не сам цифровой водяной знак, а его голограмму, т.к. голограмма обладает возможностью восстановить исходное изображение по любой части голограммы, но с некоторыми потерями [23].

Получение голограммы начинается с разделения луча света, который имеет постоянную во времени разность фаз (т.е. когерентен), на два луча: объектного и опорного. Опорный луч идет сразу на результирующую фотопластинку. А объектный луч идет сначала на предоставленное изображение, а затем отражается от него и попадает на ту же фотопластинку, что и опорный. Для повышения устойчивости голограммы произведем масштабирование в два раза во время фиксации лучей света. В результате на фотопластинке фиксируется интерференция объектного и опорного лучей света.

Для построения голограммы вычислим результат интерференции двух лучей света – опорного и объектного в каждой точке голограммы. Для вычисления интенсивности объектного света в конкретной точке голограммы считаем сумму интенсивности света от каждой точки водяного знака по следующей формуле:

$$\varepsilon(\tilde{x}, \tilde{y}) = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^N 3I(x, y) \cos\left(\frac{d}{l}\right),$$

где под точкой водяного знака и точкой голограммы подразумевается геометрическое положение пикселей в изображениях,  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  – положение пикселя в голограмме,  $(x, y)$  – положение пикселя в исходном изображении,  $I(x, y)$  – интенсивность света исходного водяного знака,  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – расстояние между точками водяного знака и голограммы, вычисляемая следующим образом:

$$d = \sqrt{(2x - \tilde{x})^2 + (2y - \tilde{y})^2 + (2z - \tilde{z})^2}.$$

В связи с двумерностью голограммы  $(2z - \tilde{z})^2 = 1$ .

Таким образом, получим следующий алгоритм:

1. Положим интенсивность опорного луча света в каждой точке голограммы равной половине исходной интенсивности, т.е. 128.
2. Выберем длину волны источника света.
3. Вычислим для каждой точки голограммы интенсивность объектного света.
4. Сложим для каждой точки голограммы полученную интенсивность объектного света с интенсивностью опорного света.

Для восстановления исходного цифрового водяного знака применим тот же самый подход, но положим интенсивность опорного света равной нулю.

### 3 Компьютерный эксперимент

Исследование проводилось с целью протестировать устойчивость цифровых водяных знаков, встроенных с помощью предложенного метода, к преднамеренным искажениям видеопотока посредством импульсного шума, а так же атаки потери кадров. В качестве контейнера был взят видеопоток с форматом .mp4 с разрешением  $512 \times 512$ . Выберем  $N = 8$ , так как различные алгоритмы обработки видеоизображения работают с блоками  $8 \times 8 \times 8$ , что позволяет сделать алгоритм более устойчивым к различным преобразованиям. Экспериментальным образом была определена оптимальная величина порога  $P = 170$ , т.е. которая имеет минимальное влияние на исходный видеопоток и максимальную надежность встраиваемого водяного знака. В качестве цифрового водяного знака для построения голограммы было взято монохромное изображение знака ©. Для встраивания был выбран канал синего цвета в цветовой модели RGB.

Модель импульсного шума предполагает, что каждый пиксель изображения, имеющий ранее значение  $i$ , может с некоторой вероятностью  $p(i)$  данное значение сохранить, или значение этого пикселя будет заменено случайным образом с некоторой вероятностью  $q(i, j)$  на некоторое значение  $j$  из отрезка  $[0, 255]$ . В рамках данного исследования проводились эксперименты с различными значениями вероятности  $p(i)$  – в качестве тестовых параметров взяты значения от 0.1 до 0.9 с шагом 0.1.

Было протестировано два способа: встраивание исходного цифрового водяного знака в видеопоток и встраивание голограммы цифрового водяного знака. На рисунке 1 представлены результаты соответствующих экспериментов.

Так же дополнительно были проведен эксперимент для оценки устойчивости предлагаемого метода при атаке потери кадров. В рамках данного эксперимента случайным образом выбирался определенный процент кадров из общего видеопотока и данные изображения заменялись на пустые (белые кадры). Результаты представлены на рисунке 2.

Как можно увидеть из полученных результатов, предложенный алгоритм позволяет получить более стабильное поведение водяного знака при атаке зашумления и потере кадров.

### Список литературы

- [1] E.T. Lin, E.J. Delp. Temporal synchronization in video watermarking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(10):3007–3022, 2004.

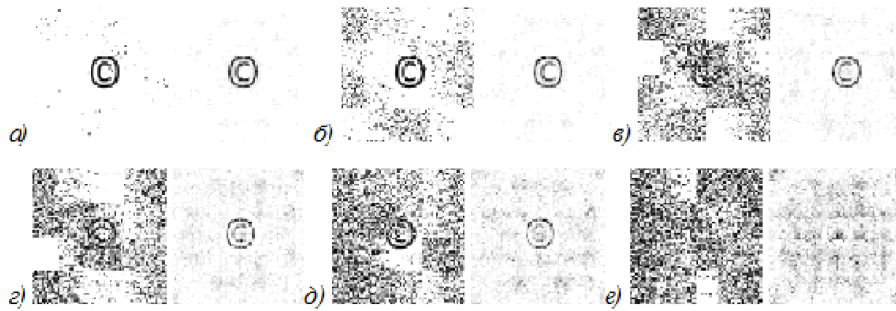


Рис. 1: Результаты извлечения исходного водяного знака (слева) и голограммы (справа) при искажении оригинального видеопотока посредством импульсного шума до 80% (а - 10%, б - 30%, в - 50%, г - 60%, д - 70%, е - 80%)

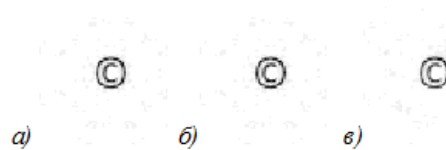


Рис. 2: Результаты извлечения голограммы при атаке потери кадров. (а - 20%, б - 40%, в - 60% потерь от общего числа кадров)

- [2] D. Delannay, B. Macq. Classification of watermarking schemes robust against loss of synchronization. *Proceedings of SPIE 5306, Security, Steganography and Watermarking of Multimedia Contents VI*, 581–591, 2004.
- [3] C. Chen, J. Ni, J. Huang. Temporal statistic based video watermarking scheme robust against geometric attacks and frame dropping. *Digital Watermarking*, 81–95, Springer, 2009.
- [4] S.W. Sun, P.C. Chang. Video watermarking synchronization based on profile statistics. *Proceedings of IEEE 37th Annual 2003 International Carnahan Conference on Security Technology*, 410–413, 2003.
- [5] V.A. Mitekin, V.A. Fedoseev. A new robust information hiding method for video. *Computer Optics*, 38(3):564–573, 2014.
- [6] C. N. Sujatha, P. Satyanarayana. High Capacity Video Watermarking based on DWT-DCT-SVD. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 4(2):245–249, 2015.
- [7] A. Essauouabi, F. Regragui, E. Ibnelhaj. A Blind WaveletBased Digital Watermarking for Video. *International Journal of Computer Science and Information Security, IJCSIS*, 6(1):029–033, 2009.
- [8] J. Roese, W. Pratt, G. Robinson. Interframe cosine transform image coding. *IEEE Transaction on Communication*, 25(11):1329–1339, 1977.
- [9] M. Bauer, K. Sayood. Video coding using 3 dimensional DCT and dynamic code selection. *Proceedings of Data Compression Conference*, 451, 1995.
- [10] M. Servais, G. de Jager. Video compression using the three dimensional discrete cosine transform (3D-DCT). *Proceedings of the South African Symposium on Commun. and Signal Process*, 27–32, 1997.
- [11] R.K.W. Chan, M.C. Lee. 3D-DCT quantization as a compression technique for video sequences. *Proc. of International Conf. on Virtual Sys. and MultiMedia*, 188–196, 1997.
- [12] N. Bozinovic, J. Konrad. Motion analysis in 3D DCT domain and its application to video coding. *Signal Processing: Image Communication*, 20:510–528, 2005.

- [13] R.M. Saurabh, U.T. Gaytri, D.B. Twinkle, K.A.N. Santosh. Approach on enhance steganography using 3D image. *International Journal of Advances in Applied Science and Engineering (IJAEAS)*, 1:2348–1811, 2014.
- [14] M. Swanson, B. Zhu, A. T. Tewfik. Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models. *IEEE Journal on Sel. Areas in Comm.*, 16(4):540–550, 1998.
- [15] F. Deguillaume, G. Csurka, J. O’Ruanaidh, T. Pun. Robust 3D DFT video watermarking. *Proc. SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Content II*, 3971:346–357, 2000.
- [16] H. Liu, N. Chen, J. Huang, X. Haung, Y. Q. Shi. A robust DWT-based video watermarking algorithm. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 631–634, 2002.
- [17] M. Kucukgoz, O. Harmanci, M. K. Mihcak, R. Venkatesan. Robust Video Watermarking via Optimization Algorithm for Quantization of Pseudo-Random Semi-Global Statistics. *Proc. SPIE, Security, Steganography, and Watermarking of Mult. Cont. VII*, 5681, 2005.
- [18] P. Campisi, A. Neri. Video watermarking in the 3DDWT domain using perceptual masking. *IEEE Int. Conference on Image Processing*, Genoa, Italy, 2005.
- [19] P. Campisi. Video watermarking in the 3D-DWT domain using quantization-based methods. *IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing*, Shanghai, China, 2005.
- [20] J.H. Lim, D.J. Kim, H.T. Kim, C.S. Won. Digital video watermarking using 3D-DCT and Intra-Cubic Correlation. *Proc. SPIE, Security and Watermarking Contents III.*, 4314:54–72, 2001.
- [21] P. Campisi, A. Neri. 3D-DCT video watermarking using quantization-based methods. *15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007)*, 2007.
- [22] E. Koch, J. Zhao. Towards robust and hidden image copyright labeling. *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, 452–455, 1995.
- [23] M. V. Smirnov. Holographic approach to embedding hidden watermarks in a photographic image. *Journal of Optical Technology*, 72(6):464–468, 2005.

## **Robust Algorithm of Embedding of Digital Water Marks in a Video Stream**

Pavel G. Cherepanov, Sergey V. Belim

In article the algorithm of robusted digital water marks in video files steady against impulse noises is suggested. The suggested algorithm is based on a three-dimensional analog of a method of Koch-Zhao. The embeddable message is presented as a three-dimensional object. For increase in stability an embeddable object is presented as a digital hologram. The algorithm has demonstrated resistance to impulse noise and loss of frame.