

УДК 004.056.52; 004.056.55

СЛЕПОЙ АЛГОРИТМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. И. Гончаренко¹, И. Г. Таранцев^{1,2}, К. Ф. Лысаков^{1,2}

¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

E-mail: egor@sl.iae.nsk.su

lysakov@sl.iae.nsk.su

Рассматривается проблема внедрения цифровых водяных знаков в последовательность телевизионных изображений. Разработаны алгоритм внедрения подобных знаков, основанный на комбинации процедур сингулярного разложения и фильтрации Хаара, и соответствующий ему слепой алгоритм их извлечения. Показано, что внедрённая водяная метка устойчива к основным искажениям, возникающим в телевизионном тракте, например к добавлению шумов, потере чёткости, обрезке и сжатию мультимедийного материала алгоритмами MPEG2 или AVC. При использовании помехоустойчивого кодирования число корректно извлечённых бит цифровых водяных знаков достигает 100 %.

Ключевые слова: телевидение, стеганография, слепой алгоритм извлечения, преобразование Хаара, сингулярное разложение.

DOI: 10.15372/AUT20160404

Введение. На сегодняшний день в сфере телевидения актуальна проблема автоматической идентификации владельца мультимедийной информации в целях соблюдения Федерального закона «О рекламе». Существующие исследования и наработки в области стеганографии представляют широкие возможности для внедрения и автоматической идентификации мультимедийных данных без их видимого изменения за счёт применения неслепых алгоритмов, однако такие алгоритмы требуют наличия полной и актуальной базы всех возможных меток, что на текущий момент не является осуществимым условием для точек извлечения по следующим причинам:

— добавление новых данных о метках происходит в головном офисе телекомпаний или рекламных агентств (новые фильмы, программы, реклама и т. д.);

— отсутствие стабильной, надёжной и высокоскоростной связи у региональных телекомпаний с головным офисом, в котором хранится актуальная база меток;

— необходимость контроля над выходом контента именно в региональном вещании.

Один из способов решения данной проблемы — это маркирование видео цифровыми водяными знаками (ЦВЗ) с возможностью слепого извлечения.

Существует большое количество алгоритмов внедрения ЦВЗ (называемых также водяными метками), которые отличаются устойчивостью к различным искажениям контейнера (носителя ЦВЗ), визуальной неразличимостью оригинального и отмеченного изображений, пропускной способностью скрытого канала и информацией, необходимой для извлечения метки [1–3]. Все эти свойства являются антагонистами, т. е. при улучшении одной характеристики обязательно ухудшаются другие. Характерный темп поступления видеоданных в телевидении составляет 20 Мбайт/с, а типичная величина ЦВЗ равна

1 Кбайт при минимальной длительности ролика-носителя 30 с. Следовательно, величина пропускной способности скрытого канала составляет 0,0002 % от объёма информации в контейнере. Такие низкие требования к данной величине позволяют жертвовать ею в целях повышения устойчивости ЦВЗ к искажениям и визуальной неразличимости отмеченного и исходного видеоматериалов. Внедрённый ЦВЗ должен быть устойчив к наиболее распространённым искажениям, возникающим в стандартном телевизионном тракте. Типичными искажениями являются добавление аддитивных шумов, сдвиг на несколько пикселей, потеря чёткости, сжатие различными алгоритмами, например AVC или MPEG2. Важна также способность алгоритма извлечения получать метку с темпом поступления видеоданных, что накладывает серьёзные ограничения на сложность алгоритма.

Цель данной работы — создание алгоритма маркирования видео, обеспечивающего слепое извлечение, визуальную неразличимость исходного и отмеченного образцов и высокую устойчивость к стандартным искажениям, возникающим в телевизионном тракте.

1. Основной алгоритм внедрения. Базой для создания алгоритма послужили работы [4, 5]. Цифровым водяным знаком является битовая последовательность $\{\text{WatermarkBit}_1, \dots, \text{WatermarkBit}_n\}$, а контейнером — видеоролик, который разбивается на последовательность кадров. Необходимо отметить, что каждый кадр маркируется по отдельности.

1. Изображение разбивается на блоки размером 16×16 пикселей, каждый бит ЦВЗ внедряется в один блок.

2. Блок конвертируется из RGB -формата в $YCrCb$. Внедрение осуществляется только в Y -составляющую.

3. Над блоком проводится четырёхуровневое преобразование Хаара [6], компонента LL_4 заменяется нулём, после чего компоненты LH_1, HL_1 и HH_1 отбрасываются и из оставшихся компонент строится матрица M (изображённая на рис. 1 в левом верхнем углу), над которой и осуществляются дальнейшие преобразования.

4. Над матрицей M выполняется сингулярное разложение SVD (Singular Value Decomposition) [7], в результате чего получаются три матрицы: U, Σ и V , где Σ — матрица сингулярных чисел с неотрицательными вещественными элементами по диагонали. Сингулярное число, имеющее порядковый номер 1, также называемое главным сингулярным числом, будем обозначать $S(1, 1)$.

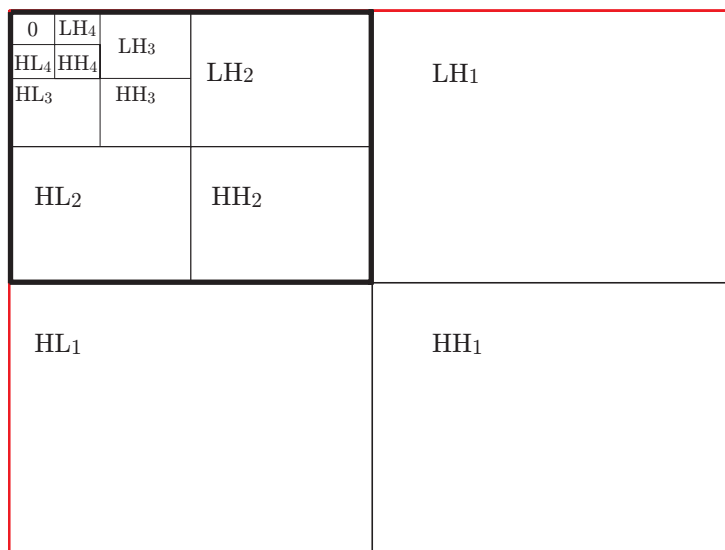


Рис. 1. Блок яркостной компоненты после четырёхуровневого преобразования Хаара. Жирным выделена область, которая будет подвергаться дальнейшим модификациям

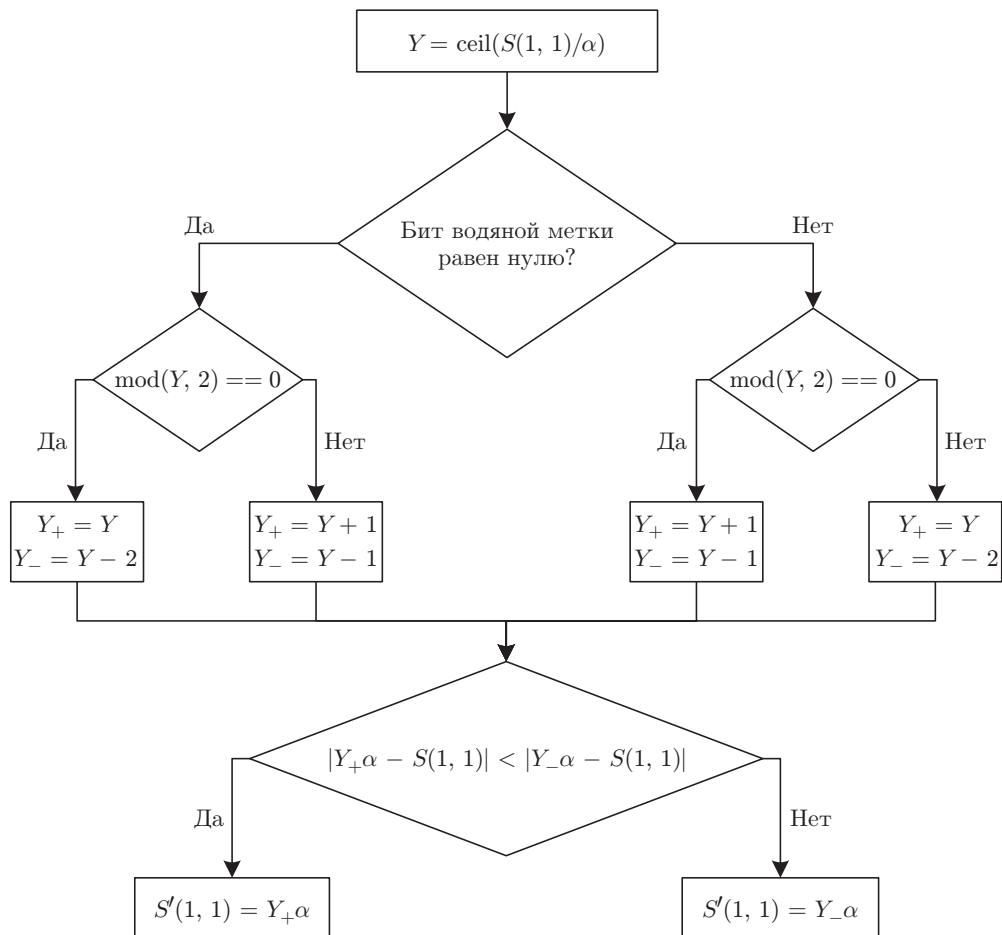


Рис. 2. Модификация старшего сингулярного числа

5. Основная идея внедрения заключается в необходимости изменить самое старшее сингулярное число таким образом, чтобы в итоге целая часть от деления на порог внедрения α совпадала по чётности с внедряемым битом водяной метки (рис. 2). Величина порога определяется компромиссом между устойчивостью ЦВЗ к искажениям и его визуальной невосприимчивостью. Далее модифицированные объекты (блоки, числа, матрицы) будут отмечаться апострофом. Модифицированное главное сингулярное число обозначим как $S'(1, 1)$.

6. После внедрения бита водяной метки перемножаем матрицы U , Σ' и V в соответствии с определением SVD, вследствие чего получаем матрицу M' .

7. В матрице M' число в первой строке и первом столбце меняется на LL_4 . Из этой матрицы, а также компонент LH_1 , HL_1 и HH_1 формируем модифицированный блок, над которым выполняем обратное четырёхуровневое преобразование Хаара.

8. Блоки из YUV -пространства переводятся в RGB -пространство.

9. Из блоков собирается полное изображение.

2. Итерационный алгоритм внедрения. В процессе модификации главного сингулярного числа (на шаге 5) необходимо учесть следующие факторы: особенность нетекстурных изображений давать вырожденную матрицу сингулярных чисел при сингулярном разложении, ограничение RGB -компонент изображения и специфику определения SVD-разложения. Данные проблемы решаются итерационным алгоритмом внедрения.

Модифицируемый блок при SVD-разложении может давать нулевую (или близкую к нулевой) матрицу Σ , если все пиксели внутри блока имеют примерно одно и то же значе-

ние яркости. Для устранения этого явления необходимо добавить к яркостной компоненте сигнал вида $\sin(Tx) \cdot \sin(Ty)$, где $T = \pi/7$, а x и y принимают значения от 0 до 7, что приводит к изменению сингулярной матрицы. Форма сигнала была выбрана таким образом, чтобы не возникало эффектов «блочности» из-за перепадов яркости на границах блоков. Необходимо также отметить, что шумоподобные сигналы непригодны для решения данной проблемы, поскольку будут удалены при AVC/MPEG2-сжатии, и, следовательно, вместе с ними будут удалены биты ЦВЗ.

В результате внедрения величина старшего сингулярного числа может измениться настолько, что окажется меньше, чем величина $S(2, 2)$. В соответствии с определением SVD-разложения эти два числа поменяются местами при извлечении, что приведёт к неправильной работе алгоритма в дальнейшем. Избежать подобной ситуации можно при модификации сингулярного числа в большую сторону ($S'(1, 1) = Y_+ \alpha$).

Все вышеописанные процедуры могут выполняться некорректно из-за особенностей машинного округления и ограничения RGB -компонент значениями от 0 до 255. Во избежание этого внедрение и извлечение повторяются несколько раз (операции 2–8 из разд. 1), в результате чего между пикселями происходит перераспределение энергии, что с каждым разом повышает вероятность успешного внедрения. Эксперименты показали, что требуется не более 5–10 итераций для всех блоков. Однако в особом случае, когда у большинства пикселей блока RGB -компоненты находятся на краю диапазона, часть энергии внедрения теряется, и алгоритм не сходится при любом числе итераций. Выходом из данной ситуации является модификация пикселя в противоположную сторону с сохранением целой части от деления на α . Например, если при увеличении старшего сингулярного числа алгоритм после большого количества повторений не сходится, то следует его уменьшить, а также проконтролировать, чтобы каждое последующее сингулярное число не возрастало. После такой модификации алгоритм быстро сходится.

3. Устойчивость алгоритма к искажениям в телевизионном тракте. Очевидно, что алгоритм из-за разделения изображения на блоки неустойчив к сдвигу. Более устойчивым его может сделать внедрение ЦВЗ с отступами от краёв кадра, величина которых соответствует максимально возможным сдвигам, возникающим в телевизионном тракте. При этом в центр модифицируемой области необходимо внедрить специальный набор бит (сигнатуру), сдвиг которого будет совпадать со сдвигом всего изображения и его модифицируемой части в том числе. Перебрав все возможные положения сигнатуры в анализируемом изображении, можно быстро определить величину сдвига всего изображения.

Для большей устойчивости алгоритма к AVC- и MPEG2-кодированию рекомендуется внедрять один и тот же ЦВЗ в четыре кадра подряд. Повторение водяной метки 4 раза обусловлено тем, что при вышеуказанных способах кодирования используются кадры трёх основных типов: I-кадры (Intra Pictures), P-кадры (Predicted Pictures) и B-кадры (Bipredictive Pictures или Bi-Directional Pictures). Если качество I- и P-кадров при кодировании остаётся на приемлемом уровне, то B-кадры сильно искажаются. На практике подряд следует не более двух–трёх B-кадров. Поэтому в последовательности из четырёх кадров встретится, как минимум, один I- или P-кадр, из которого можно извлечь ЦВЗ с приемлемой точностью.

Часто в телевизионном эфире поверх изображения накладывается дополнительная информация (например, логотип и бегущая строка), не превышающая 7 % от площади экрана. Очевидно, что из областей наложения невозможно извлечь внедрённый ЦВЗ. Однако, если в следующие четыре кадра внедрить ту же самую водяную метку, перемешав её биты по некоторому псевдослучайному ключу, то потерянные биты будут находиться в другом месте изображения и соответственно успешно извлекаться. Разумеется, для этого необходимо сделать способ перемешивания частью информации, внедряемой в изображение, что

несколько уменьшит пропускную способность, но эта характеристика алгоритма внедрения не является ключевой в данной предметной области. Кодирование Рида — Соломона также способно повысить качество извлечения метки и рекомендовано к использованию. Таким образом, возникают два новых понятия: полезная нагрузка ЦВЗ (данные, которые может задавать пользователь) и полный ЦВЗ (полезная нагрузка вместе со способом перемешивания, сигнатурой и избыточными символами помехоустойчивого кодирования). В описанных выше алгоритмах мы сознательно не разделяли ЦВЗ на полезную нагрузку и полную для упрощения понимания принципов функционирования, однако необходимо отметить, что при финальной оценке работы алгоритмов нужно учитывать только надёжность извлечения полезной нагрузки.

4. Алгоритм извлечения водяной метки полностью совпадает с алгоритмом внедрения вплоть до шага 5. Далее бит водяной метки определяется по чётности целой части от деления $S''(1, 1)$ на α :

$$\text{WatermarkBit} = \text{mod}(\text{round}(S''(1, 1)/\alpha), 2),$$

где round — округление до ближайшего целого; $S''(1, 1)$ — старшее сингулярное число блока после возможных искажений, возникающих в телевизионном тракте; $\text{mod}(y, x)$ — остаток от деления числа y на число x . Затем идёт восстановление извлечённой метки (это может быть декодирование кодов Рида — Соломона и восстановление неправильно извлечённых бит за счёт перемешанных иным способом ЦВЗ).

5. Тестирование. Для тестирования разработанного алгоритма были выбраны семь роликов продолжительностью 75 кадров, которые удовлетворяли определённым характеристикам (яркости, текстурности изображения, чёткости границ объектов и т. д.). Каждый ролик обрабатывался независимо от других. Кадры представлены на рис. 3.

Для симуляции прохождения видео по телевизионному тракту тестовые видеоролики подвергались следующим искажениям:

- 1) сдвиг изображения кадра по горизонтали на 2 пикселя;
- 2) кодирование и декодирование алгоритмом MPEG2 (constant bit rate, 8 Mbit/s);
- 3) изменение масштаба изображения по горизонтали с 720 до 480 пикселей и возврат к исходному масштабу;
- 4) обрезка изображения на 6 пикселей по горизонтали с сохранением исходного разрешения;
- 5) наложение бегущей строки и логотипа (см. рис. 3);



Рис. 3. Тестовые видеоролики и вид экрана после наложения титров и логотипа

Вид искажения	Ролик						
	1	2	3	4	5	6	7
Тест 1	100	100	100	100	100	100	100
Тест 2	90	84	91	83	87	81	80
Тест 3	87	86	86	82	85	81	82
Тест 4	100	100	100	100	100	100	100
Тест 5	93	93	93	93	92	92	93
Тест 6	100	99	100	100	98	98	98

б) добавление равномерно распределённого шума ко всем R -, G -, B -компонентам каждого кадра, максимальное значение шума не превышало 7 дискрет.

Конкретные параметры искажений были взяты из опыта работы лаборатории программных систем машинной графики Института автоматики и электрометрии СО РАН. Порог внедрения α равен 32, размер блока составляет 32×32 пикселя. Необходимо отметить, что аналогом потери чёткости одного из основных искажений является перемасштабирование, поскольку оно приводит к аналогичному эффекту.

В таблице показано число корректно извлечённых бит полного ЦВЗ в процентах. Данная величина была усреднена по всем кадрам одного ролика.

С применением кодирования Рида — Соломона процент корректно извлечённых бит полезной нагрузки становится равным 100.

Алгоритм извлечения реализован на языке C++ в среде MSVS. Тестирование осуществлялось на персональном компьютере с операционной системой WindowsXP SP3, оперативной памятью 2 Гб и процессором AMD Athlon 64 X2 Dual с частотой 2 ГГц. Реализованная программа затрачивала не более 15 мс на обработку одного кадра в стандарте SD PAL 576i (время кадра 20 мс). Таким образом, тестовая программа обрабатывала входящий поток в режиме поступления данных с запасом по производительности не менее 25 %.

Заключение. В предлагаемой работе продемонстрирован эффективный способ внедрения битовой цифровой водяной метки, алгоритм извлечения которой не требует оригинального контейнера и метки. Первоначально созданный алгоритм маркирования использовал только яркостную компоненту для внедрения битов водяного знака, предварительно разбивая её на блоки и выполняя над каждым блоком DWT- и SVD-разложения. В основе самого внедрения лежала модификация наибольшего сингулярного числа. Совместное использование преобразования Хаара и сингулярного разложения обеспечивало баланс между устойчивостью и визуальной неразличимостью водяной метки. Однако первоначально разработанному алгоритму были присущи недостатки: невозможность внедрения водяного знака в низкотекстурные изображения, отсутствие учёта влияния машинного округления на качество внедрения метки и особенности взаимного расположения сингулярных чисел, исправленные в конечной версии алгоритма. Эксперименты показывают, что модифицированный алгоритм устойчив ко всем основным искажениям, возникающим в стандартном телевизионном тракте (минимальное значение некорректно извлечённых бит равно 20 %). С помощью помехоустойчивого кодирования можно добиться корректного извлечения всех бит метки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Huynh-The T., Le-Tien T.** An efficient blind watermarking method based on significant difference of wavelet tree quantization using adaptive threshold // Intern. Journ. Electron. and Elec. Eng. 2013. 1, N 2. P. 98–103.

2. **Kutter M., Jordan F., Bossen F.** Digital signature of color images using amplitude modulation // Proc. SPIE. 1997. **3022**. P. 518–526.
3. **Langelaar G. C., van der Lubbe J. C. A., Lagendijk R. L.** Robust labeling methods for copy protection of images // Proc. SPIE. 1997. **3022**. P. 298–309.
4. **Soni S., Sharma M.** A novel blind hybrid SVD and DCT based watermarking schemes // Intern. Journ. Eng. Res. and Gen. Sci. 2014. **2**, Is. 3. P. 247–255.
5. **Jin C., Zhang Z., Jiang Y. et al.** A blind watermarking algorithm based on modular arithmetic in the frequency domain // Advances and Innovations in Systems, Computing Sciences and Software Engineering /Ed. Kh. Elleithy. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. P. 543–547.
6. **Сэлмон Д.** Сжатие данных, изображений и звука: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
7. **Handbook of Linear Algebra** /Ed. L. Hobgen. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2006. 1400 p.

Поступила в редакцию 7 октября 2015 г.
