

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ВНЕДРЕНИЯ ВОДЯНОГО ЗНАКА В ЧАСТОТНУЮ ОБЛАСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Крыжановский А.В., студент гр.051006

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Ярмолик В.Н. – д.т.н., профессор

Аннотация. Работа содержит исследования некоторых методов внедрения водяного знака в частотную область изображения, разработку алгоритмов, проведение экспериментов, сравнение экспериментальных результатов и анализ разработанных алгоритмов.

Ключевые слова. Изображение, водяной знак, цифровой водяной знак, защита авторского права, амплитудно-частотная характеристика, частотная область, пространственная область, двумерное преобразование Фурье, обратное двумерное преобразование Фурье.

В связи с бурным развитием мультимедиа остро встал вопрос защиты авторских прав и интеллектуальной собственности, представленной в цифровом виде. Примерами могут являться фотографии, аудио- и видеозаписи. Такой цифровой контент подвергается значительному риску несанкционированного использования, копирования и распространения без разрешения правообладателя. Один из наиболее эффективных технических средств защиты мультимедийной информации заключается во встраивании в защищаемый объект некоторых данных с помощью цифровых водяных знаков. Этот метод позволяет встроить подпись или, например, логотип компании, в цифровой документ с помощью некоторых алгоритмов, что позволяет идентифицировать оригинального создателя контента.

На сегодняшний день существует множество способов внедрить цифровой водяной знак в изображение. Можно выделить две основные группы методов: пространственные и частотные [1].

Пространственные методы внедрения цифрового водяного знака в изображение основаны на изменениях яркости или цветовых компонентах исходного изображения, без необходимости в специальных преобразованиях. Это упрощает процесс внедрения, поскольку не требуется дополнительных операций над изображением. Однако, их недостатком является низкая устойчивость к различным операциям обработки сигналов, что делает их менее надёжными.

Частотные методы в свою очередь базируются на преобразованиях изображения, представляющих собой определённую декомпозицию исходного изображения. Декомпозиция изображения в частотных методах внедрения цифрового водяного знака происходит с использованием преобразований, таких как дискретное преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование или вейвлет-преобразование. Эти методы разбивают изображение на частотные компоненты, которые представляют различные частоты сигнала в изображении. Значением сигнала в монохромных изображениях является яркость, в цветных – цвет. Далее, в процессе внедрения цифрового водяного знака, выбираются определённые частотные компоненты изображения, в которые будет внедрён водяной знак. Следующим шагом является изменение выбранных частот компонент таким образом, чтобы встроить в них информацию водяного знака. После внедрения водяного знака происходит обратная декомпозиция для возвращения изображения в пространственное представление. В результате этого процесса внедрённый водяной знак становится незаметным для человеческого глаза, но при этом остаётся распознаваемым с помощью специальных алгоритмов и сохраняет свою устойчивость к различным видам атак на изображение.

В рамках исследования было реализовано два алгоритма внедрения водяного знака в частотную область изображения: метод «кольца» [2] и метод «печати» [3].

В методе «кольца» водяной знак встраивается в амплитудные коэффициенты в частотной области, расположенные в виде кольца. Радиус r позволяет регулировать в какие частоты будет внедрён водяной знак: низкие, средние или высокие. Общий вид алгоритма представлен на рисунке 1. Сначала производится двумерное преобразование Фурье над яркостью изображения. Для RGB изображения используется яркость Y после преобразования RGB в YCbCr пространство. Далее с помощью секретного ключа k генерируется псевдослучайная последовательность V , длиной l равной $2\pi r$. Затем амплитудные коэффициенты модифицируются согласно формуле (1):

$$A_w(x_i, y_i) = A(x_i, y_i) + \alpha \cdot V_i \quad (1)$$

где A_w – модифицированные амплитудные коэффициенты; A – исходные амплитудные коэффициенты; α – коэффициент силы внедрения; V – псевдослучайная последовательность. Координаты x и y

изображения определяются согласно формулам (2) и (3) соответственно:

$$x_i = \left(\frac{w}{2} + 1\right) + \left\lfloor r \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{l}\right) \right\rfloor \quad (2)$$

$$y_i = \left(\frac{h}{2} + 1\right) + \left\lfloor r \cdot \sin\left(\frac{2\pi i}{l}\right) \right\rfloor \quad (3)$$

где w и h ширина и высота изображения соответственно; r – радиус кольца; l – длина псевдослучайного вектора.

После модификации амплитудных коэффициентов производится обратное двумерное преобразование Фурье.

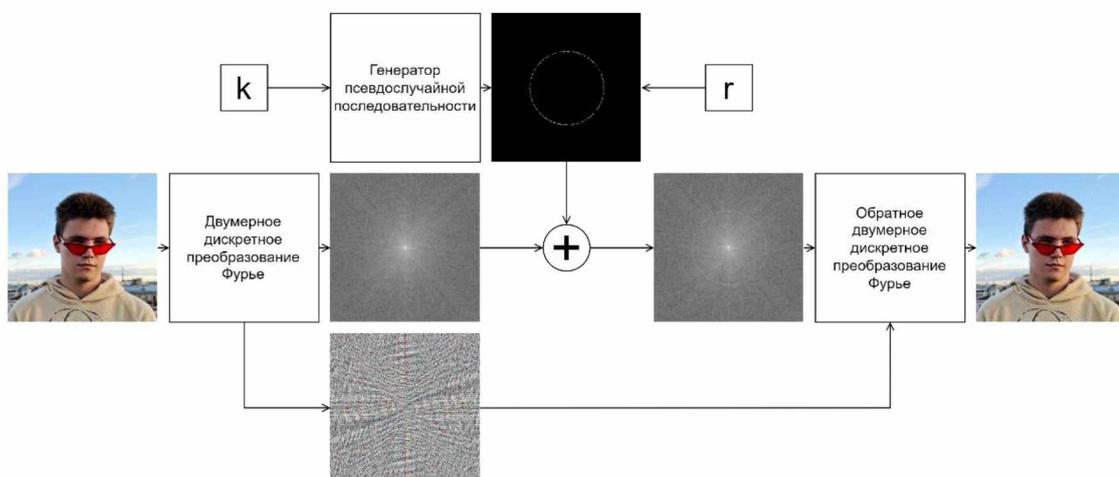


Рисунок 1 – Общий вид алгоритма внедрения водяного знака методом «кольца»

Для обнаружения водяного знака в методе «кольца» требуется только секретный ключ k . Над яркостью подписанного изображения производится двумерное преобразование Фурье. Затем для каждого возможного радиуса вычисляется кросс-корреляция амплитудных коэффициентов с псевдослучайной последовательностью V , и выбирается максимальное значение S . Если значение S выше порогового – в изображении присутствует водяной знак, иначе – нет.

В методе «печати» в качестве водяного знака используется изображение. Это изображение представляет собой узнаваемый рисунок, например, название или логотип компании. Общий вид алгоритма представлен на рисунке 2. Сначала производится двумерное преобразование Фурье над яркостью для монохромных изображений или над яркостью каждого канала в RGB изображении. Далее с помощью секретного ключа k генерируется псевдослучайная последовательность V длиной равной размеру исходного изображения. Изображение печати переводится в чёрно-белый вид, где чёрный представляется как 0, а белый – 1, и масштабируется методом билинейной интерполяции до размера исходного изображения. Затем производится операция xor между чёрно-белым изображением печати и псевдослучайной последовательностью. Полученный шум внедряется в изображение путём модифицирования амплитудных коэффициентов по формуле (4):

$$A_w(x, y) = A + \alpha \cdot S(x, y) \text{ xor } V(x, y) \quad (4)$$

где A_w – модифицированные амплитудные коэффициенты; A – исходные амплитудные коэффициенты; α – коэффициент силы внедрения; S – отмасштабированное чёрно-белое изображение печати; V – псевдослучайная последовательность.

После модификации амплитудных коэффициентов производится обратное двумерное преобразование Фурье.

Алгоритм извлечения водяного знака в методе «печати» осуществляется с помощью предсказания исходного значения. Предсказание основано на свертке амплитудных значений в

окрестности $A_w(x, y)$. Свертка представляет собой сумму пикселей в окрестности исходного пикселя. Веса определяются небольшой матрицей, называемой маской свертки. Чтобы предсказать значение $\bar{A}(x, y)$ используется маска размытия, в которой все коэффициенты свертки равны. Например, в маске 5 на 5 элементов веса всех элементов равны $1/25$. Таким образом, предсказанное значение $A_w(x, y)$ вычисляется по формуле (5):

$$\bar{A}(x, y) = \frac{1}{c \cdot c} \sum_{i=-c/2}^{c/2} \sum_{j=-c/2}^{c/2} A_w(x + i, y + j) \quad (5)$$

где c – размер матрицы свёртки; A_w – амплитудные коэффициенты изображения с внедрённым водяным знаком; \bar{A} – предсказанное значение амплитудного коэффициента.

Знак разности между предсказанным значением амплитуды и фактическим значением амплитуды определяет значение внедрённого бита в виде $S(x, y) \text{ xor } V(x, y)$: если меньше нуля – 0, иначе – 1. Чтобы получить значение $S(x, y)$ необходимо снова выполнить операцию xor с вектором V . Для генерации псевдослучайной последовательности V необходим достоверный ключ k , с помощью которого был внедрён водяной знак.

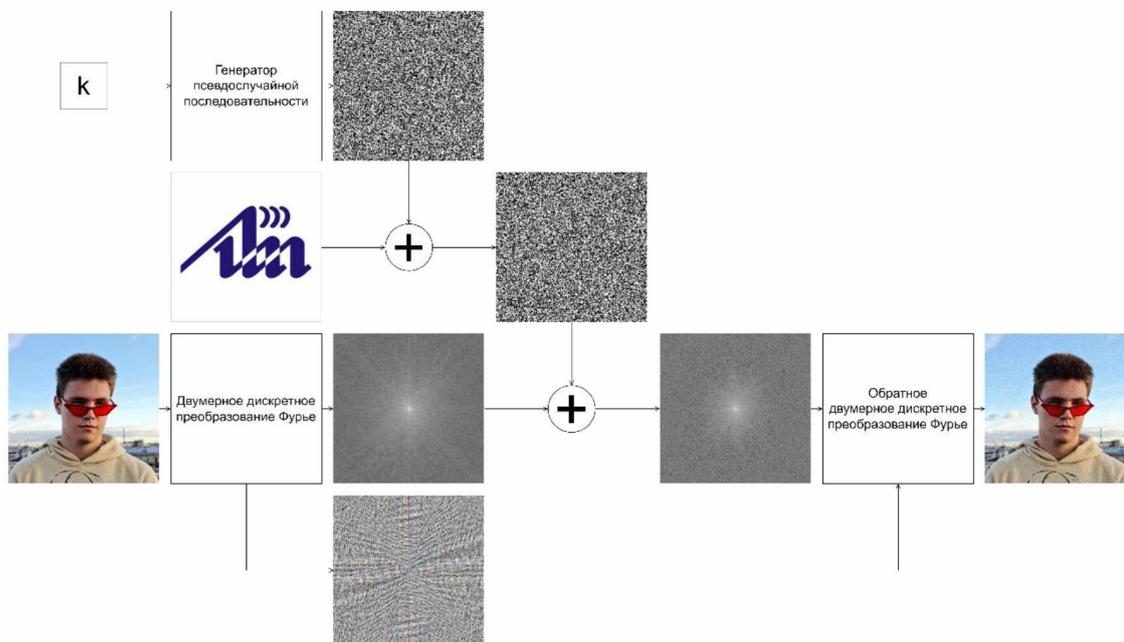


Рисунок 2 – Общий вид алгоритма внедрения водяного знака методом «печати»

На рисунке 3 представлен результат извлечения водяного знака с помощью достоверного и недостоверного ключей.



Рисунок 3 – Результат извлечения водяного знака методом «печати» для достоверного (а) и недостоверного (б) ключей

Рассмотрим влияние коэффициента α на силу внедрения водяного знака и на силу искажения

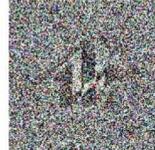
исходного изображения.

В ходе экспериментов было выявлено, что значение коэффициента α уникально для каждого изображения и зависит как от размера изображения, так и от его яркости и набора частот. Подбор силы внедрения для каждого изображения необходимо производить индивидуально, соблюдая баланс между желаемой стойкостью водяного знака и допустимым объемом модификации исходного изображения. Как показали результаты экспериментов больший коэффициент α не всегда соответствует большей стойкости водяного знака. Результаты для некоторых наборов данных для метода «кольца» представлены в таблице 1, для метода «печати» – в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние коэффициента α в методе «кольца»

Результат						
Коэфф. корреляции и α	0.747 10000	0.843 25000	0.872 50000	0.880 100000	0.878 250000	0.870 500000

Таблица 3 – Влияние коэффициента α в методе «печати»

Результат						
Печать						
α	500	1000	2000	5000	10000	25000

Рассмотрим несколько атак водяной знак. Атакам будем подвергать изображения, полученные на этапе исследования коэффициента α . В качестве атак будем использовать зашумление и размытие по Гауссу. Размытие по Гауссу будем осуществлять с радиусом 5 и σ равным 1.

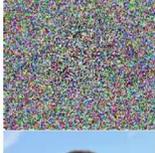
В ходе эксперимента было выявлено, что атаки подобного рода влияют на водяной знак, однако не удаляют его полностью. Метод «кольца» показал себя несколько лучше, по сравнению с методом «печати». Связано это с тем, что в методе «кольца» с помощью радиуса возможно выбрать, в какие частоты внедрить водяной знак. Чем меньше радиус, тем в более низкие частоты внедряется водяной знак и, следовательно, тем больше его стойкость, но вместе с тем сильнее модифицируется изображение. Напротив, метод «печати» работает по всей частотной области, в связи с чем при атаках на изображение есть вероятность утратить высокие частоты, которые составляют значительную часть водяного знака. Результаты атак для метода «кольца» представлены в таблице 3, для метода «печати» – в таблице 4.

Таблица 4 – Влияние атак зашумления и размытия на водяной знак в методе «кольца»

Исходный коэфф. корреляции	0.747	0.843	0.872	0.880	0.878	0.870
Изображение после зашумления						
Коэфф. корреляции после зашумления	0.752	0.824	0.864	0.876	0.876	0.870

Изображение после размытия						
Коэфф. корреляции после размытия	0.745	0.801	0.862	0.875	0.876	0.869

Таблица 5 – Влияние атак зашумления и размытия на водяной знак в методе «печати»

Исходная печать						
Изображение после зашумления						
Печать после зашумления						
Изображение после размытия						
Печать после размытия						

В ходе экспериментов были рассмотрены два алгоритма внедрения водяного знака в частотную область: метод «кольца» и метод «печати». Метод «кольца» показал лучшую стойкость в сравнении с методом «печати», однако такой водяной знак имеет меньшую ёмкость. Также результаты показали, что использование частотной области в качестве контейнера для водяного знака достаточно эффективно в целях защиты авторского права, и, к тому же, перспективно использование в других областях.

Перспективным направлением для таких методов является видео. Например, автор видеоконтента хочет лицензионно распространить и монетизировать свой контент. Для этого он может продать его на стриминговые площадки, сервисы или кинотеатр. Для каждой площадки перед продажей видеоконтент подписывается уникальным водяным знаком. В случае утечки видеоконтента в свободный доступ, с помощью водяного знака будет возможность установить источник утечки, что может стать поводом для расторжения контракта и судебного разбирательства. Ещё одним направлением в сфере видео является использование так называемых хрупких водяных знаков. Такие водяные знаки разрушаются при любой атаке, что можно использовать как факт изменения видео. Например, при ведении дежурного видеонаблюдения или работе видеорегистратора возможно внедрять хрупкие водяные знаки в кадры видео с определённым интервалом по кадрам или уникальным водяным знаком для каждого кадра. Если при проверке обнаружится, что часть водяных знаков утеряна или повреждена, то это можно использовать как факт модификации видео и установить, что видеозапись была скомпрометирована.

Однако при работе с видео придётся решить ряд проблем. Одна из них – работа с большим объёмом информации. В рамках одного изображения алгоритм способен достаточно быстро внедрить водяной знак, но в видео может использоваться от 24 кадров в секунду и выше. Если пользователь решит защитить двухчасовое видео с частотой обновления кадров 24 в секунду, алгоритму будет необходимо обработать 172800 изображений. Один из способов решения этой проблемы – не внедрять водяной знак в каждый кадр, а, например, с определённой периодичностью. Другая проблема – определение параметров внедрения для каждого изображения происходит индивидуально и, как

60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР

правило, визуально. Необходимо разработать алгоритм, который будет определять параметры внедрения, для достижения баланса между стойкостью и качеством изображения.

Список использованных источников:

1. Цифровая стеганография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев: Изд-во Москва СОЛОН-ПРЕСС, 2009 – 264 с.
2. Discrete Fourier transform-based watermarking method with an optimal implementation radius / Ante Poljicak, Lidija Mandic, Darko Agic: *Journal of Electronic Imaging* 20(3), 033008 (Jul-Sep 2011)
3. An Image Watermarking Scheme with Hidden Signatures / Won-Gyum Kim, Jong Chan Lee, Won Don Lee: *International Conference on Image Processing (Cat. 99CH36348)*, Kobe, Japan, 1999, pp. 206-210 vol. 2

ANALYSIS OF METHODS AND ALGORITHMS FOR WATERMARK EMBEDDING IN THE FREQUENCY DOMAIN OF AN IMAGE

Kryzhanouski A. V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Yarmolik V.N. – Doctor of Technical Sciences, professor

Annotation. The work contains research on some methods of watermarks embedding in the frequency domain of image, development of algorithms, experiments, comparing experimental results and analysis of the developed algorithms.

Keywords. Image, watermark, digital watermark, copyright protection, amplitude-frequency response, frequency domain, spatial domain, two-dimensional Fourier transform, invert two-dimensional Fourier transform.