

# Метод защиты видео при помощи фазовых цифровых водяных знаков

Д.А. Шапиро  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
david-shapiro@mail.ru

В.В. Сергеев  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Институт систем обработки  
изображений - филиал ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН  
Самара, Россия  
vserg@geosamara.ru

В.А. Федосеев  
Самарский национальный  
исследовательский университет им.  
академика С.П. Королева  
Институт систем обработки  
изображений - филиал ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН  
Самара, Россия  
vicanfed@gmail.com

**Аннотация**—В работе представлен новый метод встраивания стойких цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в видеосигнал. Суть метода состоит в добавлении к каждому пикселю видеосигнала малозаметной синусоидальной последовательности, развивающейся во времени, и имеющей индивидуальную фазу. Двумерное поле этих фаз соответствует изображению встраиваемого ЦВЗ. Описаны простые алгоритмы встраивания и извлечения ЦВЗ из видео. Приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие высокое качество извлечения ЦВЗ при их визуальной неразличимости.

**Ключевые слова**— цифровой видеосигнал, цифровой водяной знак, фазовое встраивание, защита видео.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие Интернета и беспроводной связи значительно упрощает доступ к таким продуктам, как изображения, видео и т. д. Однако такое развитие привело к незаконному использованию и распространению продуктов, защищенных авторским правом.

Одним из способов решения проблемы повышения защищенности видеoinформации является использование цифровых водяных знаков (ЦВЗ) [1-3].

В настоящей работе предлагается новый метод встраивания двумерных ЦВЗ в цифровой видеосигнал. Преимуществом метода является распределенный во времени характер ЦВЗ, обеспечивающий его незаметность и повышенную стойкость к различным искажениям видео. Суть метода состоит в добавлении к каждому пикселю видеосигнала малозаметной синусоидальной последовательности, развивающейся во времени, и имеющей индивидуальную (меняющуюся от пикселя к пикселю) фазу. Двумерное поле этих фаз соответствует изображению встраиваемого ЦВЗ. Из отдельного кадра видео такой ЦВЗ выделить невозможно, однако из любого достаточно продолжительного фрагмента видео он извлекается легко и с высоким качеством.

## 2. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Для краткости изложения далее будем рассматривать одноканальный (черно-белый) видеосигнал. Пусть  $x_0(m)$  –  $m$ -й кадр исходного видео, а  $x_0(m, n_1, n_2)$  – значение пикселя с координатами  $(n_1, n_2)$  в  $m$ -м кадре. Метод встраивания фазового ЦВЗ состоит в добавлении к

исходному видео синусоидальной компоненты, начальная фаза которого определяется изображением ЦВЗ:

$$x(m, n_1, n_2) = x_0(m, n_1, n_2) + w(m, n_1, n_2), \quad (1)$$

$$w(m, n_1, n_2) = A \cdot \sin(\theta m + \varphi(n_1, n_2)), \quad (2)$$

где  $A$  – амплитуда,  $\theta$  – опорная частота,  $\varphi = \varphi(n_1, n_2)$  – фазовое изображение ЦВЗ.

Для извлечения из пикселя встроенной фазовой информации можно использовать любой узкополосный (настроенный на частоту  $\theta$ ) цифровой фильтр, например, линейную инвариантную к сдвигу систему [4] с комплекснозначной импульсной характеристикой (ИХ):

$$h(k) = \alpha^m e^{i\theta m} u(m), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – параметр затухания ИХ ( $0 < \alpha < 1$ ),  $u(m)$  – функция единичного скачка. Эта система преобразует входной вещественный сигнал  $x(m)$  в выходной комплекснозначный:

$$y(m) = h(m) * x(m) = y_c(m) + iy_s(m), \quad (4)$$

где «\*» – символ свертки. Обработка сигнала, т.е. выполнение пары преобразований для расчёта  $y_c$  и  $y_s$  реализуется при помощи разностных уравнений:

$$f(m) = 2\alpha \cos(\theta) f(m-1) - \alpha^2 f(m-2) + x(m), \quad (5)$$

$$y_c(m) = f(m) - \alpha * \cos(\theta) f(m-1), \quad (6)$$

$$y_s(m) = \alpha * \sin(\theta) f(m-1), \quad (7)$$

где  $f(m)$  – промежуточная последовательность.

Вещественную и мнимую компоненты выходного сигнала, полученные в результате вычислений по формулам (5)-(7), можно интерпретировать как оценки синусной и косинусной составляющей колебания с частотой  $\theta$  и фазой  $\varphi$ , аддитивно добавленного к сигналу в качестве ЦВЗ:

$$y_c(m) = B \cos(\theta m + \varphi), \quad (8)$$

$$y_s(m) = B \sin(\theta m + \varphi), \quad (9)$$

где  $B$  – амплитуда этих колебаний.

Далее решаем систему уравнений (8), (9) относительно фазовых сигналов:

$$C(m) = B \cos(\varphi) = \cos(\theta m) * y_c(m) + \sin(\theta m) * y_s(m), \quad (10)$$

$$S(m) = B \sin(\varphi) = \cos(\theta m) * y_s(m) - \sin(\theta m) * y_c(m). \quad (11)$$

И, наконец, выделяем фазу, в которой и будет содержаться необходимый ЦВЗ:

$$\varphi = \begin{cases} \arctg \frac{S(m)}{C(m)}, & C(m) \geq 0, S(m) \geq 0, \\ \arctg \frac{S(m)}{C(m)} + \pi, & C(m) < 0, \\ \arctg \frac{S(m)}{C(m)} + 2\pi, & S(m) < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Вычисленная по (12) фаза синусоиды, встроенной в пиксель, в идеале не зависит от номера кадра  $m$ . Однако в реальных условиях она претерпевает случайные возмущения, связанные с динамикой основного видео. Поэтому полезно рассматривать эту фазу снова как функцию  $m$  и применить к ней некоторую процедуру сглаживания (усреднения) во времени. Также следует отметить необходимость учета периодического (с периодом  $2\pi$ ) характера фазы, которое может исказить результат усреднения.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В проведенных экспериментах использовались фрагменты тестовых однокомпонентных видеосигналов, обладающих яркостными и динамическими характеристиками, типичными для художественных видеофильмов. Пиксели видео имели байтовый формат (256 уровней яркости) Длина фрагментов составляла 3000 кадров (1 минута 40 секунд при частоте 30 кадров в секунду). В качестве ЦВЗ был взят условный QR-код, состоящий из  $65 \times 65$  квадратных клеток, каждый размером в  $16 \times 16$  пикселей. Клеткам QR-кода назначались случайные равновероятные значения 0 или 1, которые переносились во встраиваемые синусоиды с разностью фаз  $\pi/2$ .

При извлечении ЦВЗ полученные для выбранного кадра значения фаз усреднялись по пикселям каждой клетки, трансформировались обратно в бинарную форму и сравнивались с со значениями клеток исходного QR-кода. Большое число клеток QR-кода ( $65 \times 65 = 4225$ ), позволяет с высокой точностью (0,024%) оценивать вероятность ошибок извлечения каждого элемента ЦВЗ.

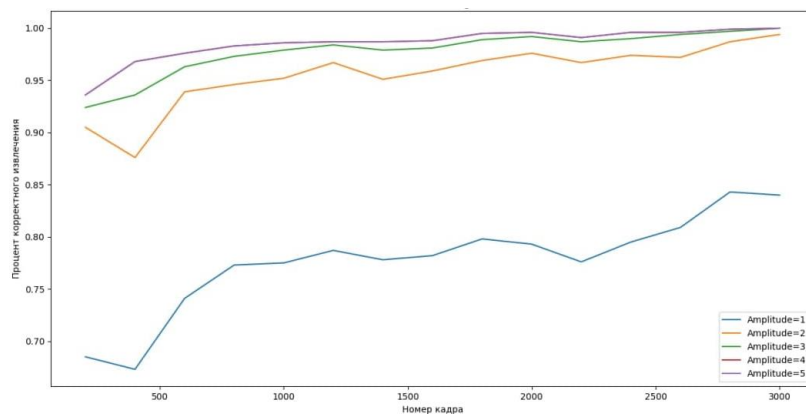


Рис. 1. График зависимости вероятности правильного извлечения элемента ЦВЗ от номера кадра

В ходе экспериментов варьировалась амплитуда встраиваемой синусоидальной компоненты (значение  $A$ ) в диапазоне от 1 до 5, а попытка извлечения ЦВЗ осуществлялась каждые 100 кадров.

Пример полученных результатов для одного из тестовых видео приведён на рис. 1. Как свидетельствует рисунок, при амплитуде синусоиды  $A > 1$  точность извлечения не опускается ниже 93%, что является приемлемым для практического использования. Подобная картина наблюдается и для других видеоизображений. Заметим, что малая амплитуда встраиваемых синусоид (на рисунке демонстрируются результаты для  $A \leq 5$ ) заведомо обеспечивает визуальную неразличимость ЦВЗ.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый метод фазового встраивания стойких цифровых водяных знаков в видео. Результаты экспериментальных исследований демонстрируют работоспособность метода и высокое качество извлечения ЦВЗ при визуальной неразличимости защитной информации, вносимых в видеоизображения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-29-09045).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zheng, J. A Novel Video Copyright Protection Scheme Based on Blockchain and Double Watermarking / J. Zheng, S. Teng, P. Li, W. Ou, D. Zhou, J. Ye // Security and Communication Networks. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1-16. DOI: 10.1155/2021/6493306.
- [2] Yu, X. A Survey on Robust Video Watermarking Algorithms for Copyright Protection / X. Yu, C. Wang, X. Zhou // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8(10). – P. 1891. DOI: 10.3390/app8101891.
- [3] Egorova, A. QIM-Based Semi-Fragile Watermarking for H.264 Video Authentication / A. Egorova, V. Fedoseev // 8th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS). – 2020. – P. 1-6. DOI: 10.1109/ISDFS49300.2020.9116454.
- [4] Оппенгейм, А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер. – М.: Связь, 1979. – 420 с.