

Шапиро Давид Александрович

**ФАЗОВЫЕ ВОДЯНЫЕ ЗНАКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЗАЩИТУ
ЦИФРОВОГО ВИДЕОКОНТЕНТА В ИНФОРМАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССАХ**

2.3.8. Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре геоинформатики и информационной безопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

Научный руководитель:

Сергеев Владислав Викторович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор кафедры геоинформатики и информационной безопасности.

Официальные оппоненты:

Бабенко Людмила Климентьевна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», профессор кафедры безопасности информационных технологий им. О.Б. Макаревича;

Ложников Павел Сергеевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Комплексной защиты информации».

Ведущая организация:

федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации», г. Воронеж.

Защита состоится 29 июня 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.09, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: https://ssau.ru/resources/dis_protection/shapiro.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.379.09,
доктор технических наук, доцент

С.В. Востокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В XXI веке межпользовательская коммуникация в сети Интернет получила широкое распространение, в частности, увеличился объем обмена мультимедийными данными. Одним из наиболее востребованных видов мультимедийного контента являются видеоматериалы, которые могут использоваться для передачи между конкретными пользователями, размещения в открытом доступе, а также для продажи на специализированных платформах. Однако с развитием технологий увеличились риски несанкционированного доступа к размещаемому контенту, что может наносить как репутационные, так и финансовые риски для правообладателя видео. В связи с этим актуальной задачей является разработка и внедрение эффективных механизмов защиты контента в процессах обработки и передачи видео.

В последние десятилетия для защиты видеоконтента часто используются стойкие цифровые водяные знаки (ЦВЗ) - специальные метки, встраиваемые в цифровой контент с целью защиты авторских прав, подтверждения информации и отслеживания путей распространения. В таком случае, даже если видео было скопировано незаконным путём, то в нём все равно будет содержаться информация об авторстве, и при извлечении ЦВЗ система позволяет верифицировать подлинность контента и идентифицировать владельца, тем самым обеспечивая защиту информационных потоков.

Разработка и исследование методов защиты видео с помощью стойких ЦВЗ рассматриваются в работах как российских учёных: О.О. Евсютина, В.Г. Иваненко, О.И. Шелухина и др., так и зарубежных: P. Fernandez, P. Aberna, X. Luo, M. Kaczyński, H. T Alrikabi и Y. Zhang и др. Однако существующие подходы имеют ряд недостатков. Некоторые из работ описывают методы, позволяющие извлекать ЦВЗ из отдельного кадра видео, что делает их уязвимыми к атакам на основе покадрового анализа. Также в последние годы распространены работы, в которых предложено использование нейронных сетей для встраивания и извлечения ЦВЗ. Однако их использование накладывает слишком высокие требования к вычислительным ресурсам в процессе обучения модели, а также имеет строгие требования к объёму встраиваемой информации.

Таким образом, разработка нового метода защиты видеозаписей с использованием стойких ЦВЗ, нивелирующего недостатки известных методов и обладающего рядом преимуществ перед ними, по мнению автора, является актуальной.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и исследование метода защиты видео, применимого к различным кодекам, обеспечивающего стойкость к распространённым атакам за счёт распределения ЦВЗ по всему объёму видеопотока.

Для достижения цели необходимо решить следующие основные задачи.

1. Анализ существующих методов активной (с использованием ЦВЗ) защиты цифровых видео, выработка требований к разработке нового метода.
2. Разработка нового метода и вычислительных алгоритмов защиты цифровых видео с использованием ЦВЗ.
3. Исследование работоспособности и оценка эффективности разработанного метода и алгоритмов защиты цифровых видео с использованием ЦВЗ.
4. Апробация разработанного метода и алгоритмов на реальных видеофайлах, проведение исследования предложенных алгоритмов и разработка рекомендаций по их выбору в зависимости от сферы применения.

Методология и методы исследования

В диссертационной работе используются методы статистического анализа, цифровой обработки сигналов, стеганографии и компьютерного анализа изображений.

Научная новизна результатов

1. Предложен новый принцип и разработан метод встраивания в видео “фазовых” ЦВЗ, исключающий возможность извлечения защитной информации из отдельного кадра. Метод заключается в добавлении в каждый пиксель видеокadra, рассматриваемый как

функция времени, слабой синусоиды с индивидуальной фазой. При этом сам ЦВЗ представляет собой двумерное поле (изображение) фаз в кадре.

2. Разработан алгоритм извлечения фазового ЦВЗ с помощью узкополосной цифровой фильтрации и постепенного накопления информации по последовательности кадров.

3. Разработана модификация исходного метода по защите видео, дополнительно снижающая вычислительную сложность алгоритма извлечения за счет использования предельной частоты встраиваемой синусоиды.

4. Разработана модификация исходного метода защиты видео, обеспечивающая дополнительную стойкость метода за счёт использования вторичного спектрального контейнера для ЦВЗ.

5. Предложена статистическая модель цифровых видео, описывающая их свойства на уровне набора автокорреляционных функций, а также эвристические алгоритмы оценки параметров этой модели по реальным видеоданным.

6. Получены новые результаты экспериментальных исследований разработанного метода и алгоритмов, позволяющие оценить эффективность работы метода и алгоритмов на видеофайлах, синтезированных по предложенной статистической модели.

7. Получены новые результаты экспериментальных исследований разработанного метода и алгоритмов на реальных видеофайлах, показывающие высокую стойкость метода к сжатию с потерями, осуществляемому популярными кодеками MPEG-2, H.264 и H.265, а также к другим видам атак на видео.

Практическая значимость работы

Разработанные метод и алгоритмы могут быть использованы в составе информационных систем, реализующих функцию защиты потока видеoinформации с ограниченным доступом или предотвращающих несанкционированное использование видеоконтента.

На защиту выносятся:

1. Метод защиты цифрового видеоконтента с использованием фазовых ЦВЗ.

2. Алгоритмы извлечения фазового ЦВЗ из защищенного видео в результате постепенного накопления информации по последовательности кадров.

3. Модификация метода защиты цифрового видеоконтента, направленная на повышение вычислительной эффективности извлечения ЦВЗ.

4. Модификация метода защиты цифрового видеоконтента, дополнительно повышающая стойкость к атакам за счёт использования вторичного спектрального контейнера для ЦВЗ.

5. Статистическая модель цифровых видео, описывающая их свойства на уровне набора автокорреляционных функций, а также эвристические алгоритмы оценки параметров модели по реальным видеоданным.

6. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода, подтверждающие эффективность метода на реальных и синтезированных видео.

7. Результаты экспериментальных исследований разработанного метода и алгоритмов, демонстрирующие стойкость метода к типовым атакам, включая сжатие с потерями.

Соответствие специальности

Область исследования соответствует направлениям исследований паспорта научной специальности 2.3.8. Информатика и информационные процессы в части пунктов:

1. Разработка компьютерных методов и моделей описания, оценки и оптимизации информационных процессов и ресурсов, а также средств анализа и выявления закономерностей на основе обмена информацией пользователями и возможностей используемого программно-аппаратного обеспечения.

3. Разработка методов и алгоритмов кодирования, сжатия и размещения информации для повышения эффективности и надежности функционирования инфокоммуникационных систем при её хранении и передаче.

17. Разработка методов обеспечения надежной обработки информации и обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций для целей передачи, хранения и защиты информации; разработка основ теории надежности и безопасности использования информационных технологий.

Апробация работы

Основные результаты диссертации представлены на пяти научных конференциях:

1. Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ, Самара, Россия) - 2022 год;
2. 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS, США) – 2023 год;
3. Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ, Самара, Россия) - 2024 год;
4. 12th International Conference on Signal Processing & Integrated Networks (SPIN, Индия) – 2025 год;
5. Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ, Самарканд, Узбекистан) - 2025 год;

Публикации

По теме диссертации опубликовано восемь работ. Из них две работы опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК, пять работ опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и/или WebOfScience, а также получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты диссертационной работы использованы:

1. При выполнении проекта Российского научного фонда № 22-71-10097 «Методы защиты перспективных типов и форматов данных цифровыми водяными знаками».
2. При выполнении проекта «Методы идентификации мобильных динамических объектов по оптическим изображениям», выполняемого в Самарском университете по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ (шифр проекта FSSS-2026-0003).
3. В ряде хоздоговорных НИОКР в АО «Самара-Информспутник».
4. В учебном процессе кафедры геоинформатики и информационной безопасности Самарского университета (дисциплина «Цифровые водяные знаки и стеганография»).

Соответствующие акты использования результатов приведены в приложениях к диссертации.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского научного фонда № 22-71-10097-П, <https://rscf.ru/project/22-71-10097-%D0%9F/> и № 22-71-10097, <https://rscf.ru/project/22-71-10097/>.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, включающего 7 таблиц и 77 рисунков, список литературы из 97 источников и 5 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, приведены сведения о структуре диссертации.

В первом разделе выполнен анализ известных методов использования цифровых водяных знаков для защиты видео, а также описание используемых тестовых материалов и необходимых требований, предъявляемых к системе использования ЦВЗ. Сами ЦВЗ представляют собой специальные метки, внедряемые в визуальный контент с целью защиты авторских прав, подтверждения подлинности информации и контроля распространения. ЦВЗ подразделяются на видимые и невидимые, при этом для защиты видеоданных преимущественно используются невидимые стойкие метки, обеспечивающие сохранность защитной информации даже при незаконном копировании и компрессии с потерями.

Основными требованиями к системам внедрения ЦВЗ являются незаметность, емкость и стойкость (к распространённым атакам), обеспечение которых требует компромиссного подхода. Современные методы встраивания ЦВЗ классифицируются на кодекозависимые, использующие параметры процедуры сжатия видеопотока, и кодеконезависимые, реализуемые как на уровне отдельных кадров (в пространственной или частотной областях), так и на уровне групп кадров с применением аналитических моделей или нейросетей. Однако у каждого из этих подходов имеются недостатки.

К основным недостаткам пространственных методов относят низкую стойкость к яркостным преобразованиям, зашумлению, сжатию и геометрическим атакам. Методы встраивания ЦВЗ в частотную область считаются более стойкими к основным атакам, в частности к сжатию с потерями, однако имеют недостаток: в них встраивание происходит независимо в каждый кадр изображения. Это открывает злоумышленнику возможность оценки ЦВЗ в каждом кадре независимо друг от друга, тем самым собирая статистику о структуре и особенностях самого ЦВЗ. Это повышает вероятность удаления или подделки водяного знака.

Для устранения этого недостатка в некоторых алгоритмах авторы рассматривают возможность использования группы кадров (Group of Pictures, GOP) для встраивания информации только в кадры, выбранные по какому-либо правилу. Однако такие методы уязвимы к изменению структуры кадра, перестановке или удалению кадров. Поскольку в реальных системах видеоданные практически не используются в несжатом виде, широкое распространение получили методы, в основе которых лежит использование конкретного кодека. Однако такие методы имеют общий недостаток и не всегда могут быть использованы при произвольном выборе кодека, в связи с этим нельзя говорить об их универсальности.

В последние годы получили распространение методы встраивания, основанные на нейронных сетях. Их популярность в задачах защиты видео объясняется, в частности, возможностью внедрения цифрового водяного знака не в отдельные кадры, а сразу в видеофрагменты, а также способностью нейросетей обучаться устойчивому извлечению метки даже из видео, подвергнутого различным типам атак. Однако использование такого подхода требует большого объёма вычислительных мощностей для обучения нейронной сети, а также выдвигает ряд требований к устройству, на котором будет запускаться. Помимо этого, важным недостатком систем защиты с использованием нейронных сетей является низкая гибкость к встраиваемым параметрам: в большинстве методов, представленных на данный момент, встраиваемый ЦВЗ должен представлять собой бинарную последовательность с фиксированным количеством битов.

Далее в первом разделе приведены основные требования, которым должен удовлетворять алгоритм встраивания ЦВЗ. Приведено обоснование необходимости использования помехоустойчивого кода в качестве ЦВЗ в рамках этой работы. Поскольку наиболее распространенное бинарное изображение, использующее помехоустойчивое кодирование, это QR-код, то в дальнейшем в рамках этой работы будет использоваться именно это обозначение. В технологии его использования заложено две полезные особенности: возможность извлечения с высокой скоростью с помощью любого портативного устройства (такого как телефон) и возможность исправления ошибок (частично поврежденный код может быть успешно прочитан). Также важным достоинством именно QR-кода является возможность простого сравнения каждого элемента встраиваемого и извлекаемого QR-кода, что позволяет получать эмпирическую оценку вероятности корректного извлечения:

$$P = \frac{N_+}{N}, \quad (1)$$

где N_+ - количество правильно извлеченных элементов, N – общее число элементов QR-кода.

В работе для встраивания использовались бинарные изображения размеров 65x65 и 89x89 квадратов (один квадрат представляет собой 1 бит), каждый из которых размером 16x16 пикселей. Использование такой площадки позволяет дополнительно увеличить вероятность корректного извлечения за счёт усреднения по площади квадратов.

Использование помехоустойчивых кодов обеспечивает корректное извлечение информации даже при незначительном искажении кода. В частности, экспериментально было доказано, что допустимым считается повреждение ЦВЗ не более 14% элементов от исходной встраиваемой двоичной последовательности. Поэтому будем считать ЦВЗ корректно извлеченным при $P > 0,86$.

Далее в разделе описываются видеоматериалы, на которых проводится тестирование метода и алгоритмов. Для тестирования использовались как реальные видеозаписи, состоящие из видеок кадров размерами 1920x1080 (стандарт видео в формате высокой чёткости (Full HD)), так и синтезированные видеозаписи такого же формата.

В качестве реальных видеозаписей использовались три фрагмента, разные по содержанию и по динамике:

1) “RealBarca” – видео опасных моментов футбольного матча. В кадрах присутствует достаточно однородная текстура заднего фона, а также несколько объектов разной величины. Начало новых сцен происходит в среднем раз в 250 кадров.

2) “LutGaya” – видео с динамичным музыкальным клипом. Фон часто изменяется и неоднородный. Расположение и количество объектов в кадре непостоянно. Сцены сменяются в среднем каждые 200 кадров, а камера часто приближается и отдаляется в ходе статических моментов сцен.

3) “Road” – видео с дорожной камеры видеонаблюдения. Фон статичен на протяжении всего видео, а съёмка происходит в рамках одной сцены. В течение видео в кадре появляются разные машины, которые затем исчезают.

Для генерации синтезированных видео использовалась модель, предложенная в рамках данной диссертации. Согласно этой модели, приемлемое статистическое сходство между сгенерированным и реальным кадрами видео можно достичь при использовании четырехкомпонентной модели:

$$S = \mu + T + N_T + N_S, \quad (2)$$

где S - кадр видео;

μ - псевдослучайное двумерное мозаичное поле, моделирующее регистрируемую сцену. Оно обновляется (заново генерируется) в моменты смены сцены, происходящие с заданной интенсивностью, регулярно или случайно.

T - текстурная компонента, описывающая случайные колебания яркости на наблюдаемых объектах сцены. В пределах одной сцены компонента остается неизменной, но регенерируется при каждой смене сцены.

N_T – текстурный шум. Как и текстурная компонента, этот шум не изменяется в течение одной сцены, но обновляется при ее смене.

N_S – шум видеодатчика (сенсорный шум). Данный шум случайно изменяется как в пространстве, так и во времени: его значения генерируются заново для каждого кадра.

Еще одним параметром модели, характеризующим динамические свойства видео, является интенсивность смены кадров λ . С помощью данного параметра регулируется имитация монтажных склеек в итоговом видео. При смене сцены изображение генерируется заново по формуле (4) с использованием новых начальных значений генератора случайных чисел.

Для оценки основных параметров модели, требуемых для синтеза кадров синтетического видео, применялась пространственная и временная автокорреляционные функции (АКФ). Известно, что АКФ двумерного изображения (кадра), как правило, экспоненциально убывает в любом направлении от начала координат. Но более точную аппроксимацию АКФ изображений удастся получить при использовании двухэкспоненциальной модели с аддитивным добавлением двух независимых шумов:

$$B(k_1, k_2) = D_M p_M \sqrt{k_1^2 + k_2^2} + D_T p_T \sqrt{k_1^2 + k_2^2} + D_1 \delta(k_1, k_2) + D_2 \delta(k_1, k_2), \quad (3)$$

где ρ_m и ρ_T – коэффициенты корреляции между пикселями мозаики и текстуры соответственно, D_m, D_T – дисперсия мозаики и текстуры соответственно, D_1, D_2 – дисперсии текстурного и сенсорного шумов, $\delta(k_1, k_2) = \begin{cases} 1, & \text{при } k_1, k_2 = 0 \\ 0, & \text{при } k_1, k_2 \neq 0. \end{cases}$ – дискретная дельта-функция, характеризующая некоррелированные шумы.

При переходе от синтезирования отдельных кадров к синтезированию видео важным параметром является интенсивность потока смены сцен λ . Предполагается, что смена сцены происходит независимо в случайные моменты дискретного времени, а временная АКФ, описывающая процесс интенсивности видеопотока во времени, будет иметь экспоненциальный вид:

$$B_X(n) = D_X e^{-\lambda|n|} = D_X \rho_X^{|n|}, \quad (4)$$

где n – целочисленный аргумент АКФ, D_X – дисперсия случайного кусочно-постоянного процесса, λ – интенсивность потока переключения его значений, ρ_X – коэффициент корреляции между соседними значениями временной АКФ.

Оценив величину коэффициента корреляции, можно вычислить параметр интенсивности смены сцены λ :

$$\rho_X = e^{-\lambda}, \quad \lambda = -\ln \rho_X \quad (5)$$

Далее проведен ряд экспериментальных исследований разработанного метода синтезирования видео, подтверждающие схожесть статистических оценок на реальных и сгенерированных видео.

Во втором разделе описан новый метод встраивания ЦВЗ, разрабатываемый в диссертации (далее для краткости он называется «базовым»). Описан принцип встраивания фазового ЦВЗ, который заключается в добавлении к каждому пикселю видеосигнала малозаметной синусоиды, развивающейся во времени и имеющей индивидуальную (изменяющуюся от пикселя к пикселю) фазу. Встраиваемое изображение ЦВЗ соответствует двумерному полю этих фаз.

В дальнейшем для описания метода будет рассматриваться встраивание ЦВЗ в одноканальный (чёрно-белый) видеосигнал, поэтому и ЦВЗ будет использоваться тоже только полутоновой, но возможно обобщение метода на случай многокомпонентного (цветного) видеосигнала. Значения используемого ЦВЗ переносились в фазы встраиваемых синусоиды в диапазоне $\varphi \in [0; \frac{\pi}{2}]$.

Пусть $x_0(m)$ — m -й кадр исходной видеопоследовательности, а $x_0(m, n_1, n_2)$ — значение пикселя с координатами (n_1, n_2) в m -м кадре. Встраивание фазового ЦВЗ состоит в аддитивном добавлении к исходному видеосигналу синусоидальной компоненты, начальная фаза которого соответствует двумерному изображению ЦВЗ:

$$x(m, n_1, n_2) = x_0(m, n_1, n_2) + w(m, n_1, n_2), \quad (6)$$

$$w(m, n_1, n_2) = A \sin(\theta m + \varphi(n_1, n_2)) \quad (7)$$

где A – амплитуда; θ – опорная частота; $\varphi = \varphi(n_1, n_2)$ – фаза; m – номер кадра; n_1 и n_2 – координаты пикселя в кадре; $x_0(m, n_1, n_2)$ – кадры исходного видеоизображения.

При таком подходе из отдельного кадра видеопоследовательности извлечь такой ЦВЗ невозможно, однако из любой достаточно продолжительной серии кадров он извлекается с низкой вычислительной сложностью и с высоким качеством.

Далее рассматривается алгоритм извлечения ЦВЗ, а также приводятся возможные подходы к дополнительному улучшению его эффективности. Наглядно все этапы извлечения можно увидеть на рисунке 1.

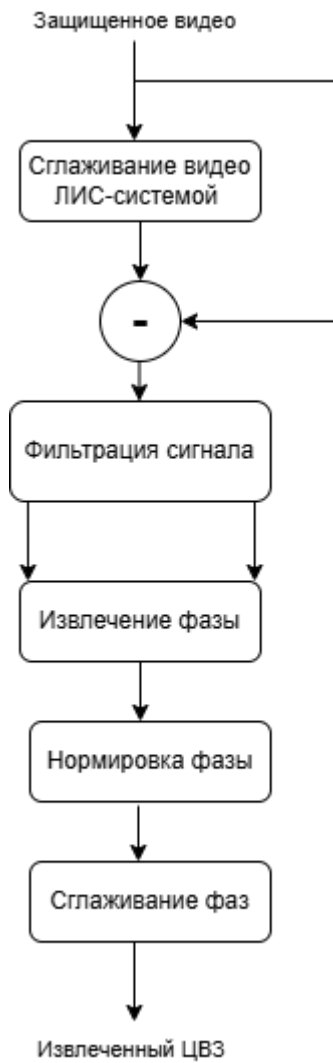


Рисунок 1 - Схема извлечения ЦВЗ

Несложно показать, что эта пара преобразований реализуется с помощью следующих разностных уравнений:

$$f(m) = 2\alpha \cos(\theta) f(m-1) - \alpha^2 f(m-2) + x(m), \quad (11)$$

$$y_c(m) = f(m) - \alpha \cos(\theta) f(m-1), \quad (12)$$

$$y_s(m) = \alpha \sin(\theta) f(m-1), \quad (13)$$

где $f(m)$ - некоторая промежуточная последовательность.

Далее решается система линейных уравнений относительно нужных нам "фазовых" сигналов, в которых устранена зависимость от опорной частоты ЦВЗ:

$$C(m) = B \cos(\theta) = \cos(\theta m) y_c(m) + \sin(\theta m) y_s(m), \quad (14)$$

$$S(m) = B \sin(\theta) = \cos(\theta m) y_s(m) - \sin(\theta m) y_c(m), \quad (15)$$

После этого фаза выделяется в диапазоне $[0; 2\pi)$:

В приведенной схеме основным этапом алгоритма является процесс узкополосной цифровой фильтрации сигнала – одномерной последовательности значений пикселя, меняющегося во времени (от кадра к кадру). Остальные пункты данной схемы являются этапами либо предобработки, либо постобработки сигнала для улучшения точности работы алгоритма.

Поскольку встроенная информация содержится в фазовой составляющей синусоиды, встроенной в каждый пиксель, то для её извлечения требуется соответствующим образом отфильтровать исходный сигнал. Для выделения фазы встроенной синусоиды можно использовать любой узкополосный (настроенный на частоту θ) цифровой фильтр, например, линейную инвариантную к сдвигу систему (ЛИС-систему) с комплекснозначной импульсной характеристикой (ИХ).

$$h(m) = \alpha^m e^{i\theta m} u(m), \quad (8)$$

где α - параметр затухания ИХ ($0 < \alpha < 1$); $u(m)$ - функция единичного скачка; m - номер кадра.

В дальнейшем указанную ИХ можно представить отдельно через вещественную и мнимую часть:

$$\begin{aligned} h_c(m) &= \alpha^m \cos(\theta m) u(m) \\ h_s(m) &= \alpha^m \sin(\theta m) u(m) \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда вещественную часть выходного сигнала $y_c(m)$ и его мнимую часть $y_s(m)$ можно получить с помощью следующих преобразований:

$$y_c(m) = h_c(m) * x(m), \quad (10)$$

$$y_s(m) = h_s(m) * x(m)$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctg\left(\frac{S(m)}{C(m)}\right), & C(m) \geq 0; S(m) \geq 0 \\ \arctg\left(\frac{S(m)}{C(m)}\right) + \pi, & C(m) < 0; \\ \arctg\left(\frac{S(m)}{C(m)}\right) + 2\pi, & C(m), S(m) < 0; \end{cases} \quad (16)$$

Для того, чтобы избежать сильного влияния монтажных склеек и динамичных сцен, к видео предварительно применялась процедура экспоненциального сглаживания, реализуемая с помощью ЛИС-системы.

$$\tilde{x}(m) = \beta_1 \tilde{x}(m-1) + (1 - \beta_1)x(m), \quad (17)$$

где $\tilde{x}(m)$ – сглаженное значение пикселя; β_1 – параметр сглаживания ($0 < \beta_1 < 1$). И на этап извлечения фазы подавалась разница между исходным и сглаженным кадром:

$$\bar{x}(m) = \tilde{x}(m) - x(m), \quad (18)$$

Отдельной проблемой полученного по формуле (16) значения фазы является ситуация “перескока фаз”. Поскольку фаза синусоиды является периодической функцией с периодом 2π , а ширина рабочего диапазона фаз, из которого происходит извлечение равна $\frac{\pi}{2}$, то может возникать ситуация, в которой верхнее значение диапазона окажется больше 2π , что вследствие циклического сдвига даст значение близкое к нулю. Это приводит к некорректному извлечению ЦВЗ. Чтобы решить эту проблему, разработан алгоритм нормировки фазы, в результате его применения диапазон, в котором извлекается фаза, сдвигается в середину диапазона $[0; 2\pi]$.

Заключительным этапом постобработки извлеченной фазы является её сглаживание. Этот этап также является необходимым, поскольку на реальном видео фаза может претерпевать различные возмущения, связанные с динамикой видео. Само сглаживание будет происходить по формуле, аналогичной (17):

$$\bar{\varphi}(m) = (1 - \beta_2)\bar{\varphi}(m-1) + \beta_2\varphi(m), \quad (19)$$

где $\bar{\varphi}$ – сглаженное значение фазы пикселя; β_2 – параметр сглаживания фазы ($0 < \beta_2 < 1$).

Далее в этом разделе представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие влияние параметров алгоритмов встраивания и извлечения, таких как опорная частота, параметры затухания и сглаживания видео и фазы. В результате проведенного эксперимента выявлены значения параметров, обеспечивающие наибольшую вероятность правильного извлечения ЦВЗ из видео: значение опорной частоты $\theta = 3$, параметр сглаживания видео $\beta_1 = 0,93$, параметр сглаживания фазы $\beta_1 = 0,96$ и параметр затухания $\alpha = 0,99$.

Для корректного проведения экспериментов на синтезированном видео было необходимо определить влияние каждого из параметров модели (4) на вероятность корректного извлечения ЦВЗ. Экспериментально установлено, что эта вероятность существенно зависит только от параметра интенсивности видеопотока λ . Поэтому в дальнейшем при проведении экспериментов варьировался только он.

В третьем разделе исследуется модификация базового метода, описанного в предыдущем разделе, направленная на ускорение процесса встраивания и извлечения фазового ЦВЗ. Для краткости в дальнейшем в работе эта модификация будет именоваться “упрощённый метод”.

Поскольку экспериментально установлено, что эффективность метода возрастает по мере увеличения частоты синусоиды, то рассматривается возможность использования предельно высокой частоты, при которой синусоида превращается в последовательность, состоящую из плюс-минус единиц. В таком случае фаза будет принимать только два возможных значения, что приводит к тому что ЦВЗ становится бинарным изображением.

Теперь суть встраивания состоит в аддитивном добавлении к каждому пикселю осциллирующей последовательности $\pm(-1)^m$, начальный знак которой задается бинарным изображением ЦВЗ:

$$w(m, n_1, n_2) = A(-1)^{m+B(n_1, n_2)}, \quad (20)$$

где $B(n_1, n_2) \in \{0, 1\}$ - бинарное изображение ЦВЗ.

Процесс извлечения теперь также изменится относительно базового алгоритма, описанного во втором разделе. Для упрощенного алгоритма импульсная характеристика ЛИС-системы (8), получает вид:

$$h(m) = a^m(-1)^m u(m). \quad (21)$$

ЛИС-система, имеющая такую импульсную характеристику, может быть описана следующим разностным уравнением первого порядка:

$$f(m) = x(m) - \alpha f(m - 1). \quad (22)$$

Поскольку последовательность $f(m)$ является осциллирующей, т.е. она меняет знак в каждом кадре видео, далее необходимо выполнить процедуру инвертирования чётных кадров:

$$y(m) = (-1)^m f(m). \quad (23)$$

Поскольку целью данной модификации является ускорение работы метода, было проведено сравнение вычислительной сложности двух вариантов одного метода, базового и упрощенного, между собой. На этапе встраивания ЦВЗ два алгоритма имеют одинаковую сложность, а на этапе извлечения упрощенный метод встраивания как минимум пятикратное преимущество в вычислительной сложности.

Также в текущем разделе предложены процедуры, позволяющие дополнительно улучшить процесс извлечения за счёт уменьшения влияния движений, происходящих в кадре. Из предложенных решений наилучшим образом себя показала процедура обработки защищенного видео, использующая разностный сигнал. Такое изменение позволяет минимизировать влияние одиночных скачков на итоговый результат извлечения. Иными словами, вместо формулы (17) лучше использовать следующую формулу:

$$f(m) = \Delta(m) - \alpha f(m - 1), \quad (24)$$

где

$$\Delta(m) = x(m) - x(m - 1). \quad (25)$$

Согласно эксперименту, проведенному на синтезированном видео, даже при амплитуде $A = 1$ удается достичь полного соответствия между встроеным и извлеченным ЦВЗ менее чем за 150 кадров. В случае увеличения амплитуды хотя бы до $A = 2$, то количество необходимых для извлечения кадров сокращается до 80.

Четвертый раздел посвящен другой модификации предлагаемого метода защиты видео. Ее суть заключается в использовании вторичного контейнера для встраивания исходного ЦВЗ. Вместо прямого встраивания в видеокдры, исходный QR-код помещается в контейнер, сформированный в двумерной спектральной области, что усложняет задачу злоумышленнику, так как сам ЦВЗ уже не связан напрямую с основным видеопотоком. Сам алгоритм встраивания будет аналогичен базовому (формулы (6), (7)), однако будет отличаться способ формирования ЦВЗ. В дальнейшем для краткости эта модификация будет обозначаться как «спектральный метод».

Изначальным ЦВЗ будет спектральное изображение, в котором расположен QR-код, а встраиваться в фазовую компоненту будет его пространственное представление, полученное в результате обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Для соблюдения пространственной изотропности фазового изображения QR-код в спектре разбивается на два равных по размеру фрагмента: первый располагается в левом верхнем углу спектра, а второй в правом верхнем. В нижних углах спектра расположены зеркальные копии соответствующих фрагментов, что позволяет сохранить вещественность изображения в пространственной

области. Стоит отметить, что встраивание QR-кода нельзя производить в нулевую компоненту спектра. В связи с этим встроенный ЦВЗ сместился на один пиксель к центру. На рисунке 2 показан пример модуля спектра размерами 1024x1024 и его отображение пространственной области.

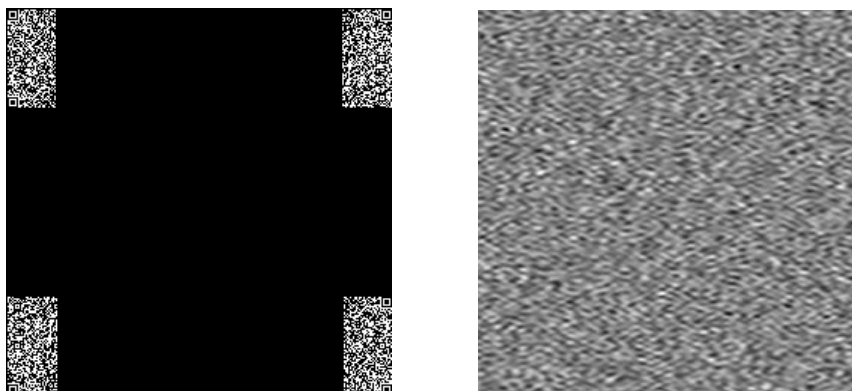


Рисунок 2 - ЦВЗ в спектральной (модуль) и пространственной области

В спектральном методе изображение ЦВЗ сразу получается полутоновым, как результат выполнения обратного ДПФ над бинарным спектром - QR-кодом:

$$f\{\varphi(n_1, n_2)\} = \text{ОДПФ}\{(\Phi(k_1, k_2))\}, \quad (26)$$

где ОДПФ – оператор обратного преобразования, $\Phi(k_1, k_2)$ комплекснозначный дискретный спектр (QR-код):

$$\Phi(k_1, k_2) = \Phi^*(K - k_1, K - k_2) = \begin{cases} e^{i\xi(k_1, k_2)} & \text{при } \{k_1, k_2\} \in D_{QR}, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (27)$$

$$0 \leq k_1, k_2 \leq K - 1,$$

где (*) - знак комплексного сопряжения, K – размер двумерного дискретного спектра (квадратного), $\xi(k_1, k_2)$ – случайные величины, лежащие в диапазоне $[0, 2\pi)$, D_{QR} – область, соответствующая единичным значениям элементов QR-кода.

Использование комплексных экспонент со случайными показателями вместо единиц исключает кумулятивный эффект от сложения косинусоидальных спектральных компонент, приводящих к аномально большому значению $\varphi(0, 0)$. Это не влияет на процесс извлечения ЦВЗ, поскольку там рассматриваются модули спектральных компонент.

При извлечении используется тот же алгоритм, что описан в разделе 2 с добавлением этапа перевода извлеченного ЦВЗ из пространственной области в спектральную:

$$\Phi(k_1, k_2) = \text{ДПФ}\{(\varphi(n_1, n_2))\}, \quad (28)$$

где ДПФ – оператор прямого преобразования.

Такой подход использует возможность исходного метода встраивать в фазу полутоновые изображения, а также позволяет повысить стойкость метода к сжатию видео.

Проведен анализ эффективности (качества восстановления ЦВЗ) такой модификации по сравнению с описанными ранее, а также зависимости эффективности встраивания от емкости ЦВЗ. В рамках экспериментов использовался разный размер ДПФ - вторичного контейнера для хранения QR-кода, разный размер самого QR-кода, а также различное расположение QR-кода в спектральной области. При выборе параметров необходимо было найти компромисс между качественным извлечением, высокой емкостью, а также незаметностью ЦВЗ в видео.

В результате сравнения результатов извлечения для каждого из методов, установлено, что наилучшие результаты получаются при использовании максимального размера контейнера ДПФ (в приведенных экспериментах 1024x1024), наименьшем размере самого QR (49x49 бит) и размещение QR-кода в области высоких частот спектрального контейнера.

Проведены эксперименты, позволяющие оценить вероятность корректного извлечения ЦВЗ при его различных амплитудах встраивания на примере синтезированного видео. Результаты показали, что при использовании амплитуды $A = 2$ удается достичь необходимый уровень $P = 0,86$ за 250 кадров, а при использовании амплитуды $A = 4$ этого количества кадров достаточно для полного совпадения между встраиваемым и извлеченным ЦВЗ. Таким образом, указанная модификация метода, как и предыдущие, позволяет корректно извлекать ЦВЗ за небольшое число кадров.

Пятый раздел посвящен экспериментальным исследованиям предложенного метода и его алгоритмов на реальных видеозаписях. Одним из основных требований к системе, использующей стойкие ЦВЗ, относят стойкость метода к наиболее распространённым атакам. Одним из важнейшим свойств, позволяющих использовать метод в реальных системах, является стойкость к сжатию с потерями. Эксперименты, проверяющие это свойство, проводились на примере трёх реальных видео для трёх разных вариантов метода, описанных в разделах 2-4. Стойкость проверялась для наиболее популярных кодеков - H.264, H.265 и MPEG-2 – при битрейте от 5 до 15 Мбит/сек.

Одним из важных свойств системы защиты видео с использованием ЦВЗ является визуальная неразличимость встроенного ЦВЗ. Для оценки сохранения этого свойства чаще всего используется метрика PSNR, которая имитирует восприятие человеком разницу между исходными и защищенными кадрами видео.

Таблица 1 - Значение метрики PSNR в зависимости от метода встраивания и амплитуды ЦВЗ

		Базовый метод	Упрощенный метод	Спектральный метод
RealBarca	$A = 1$	46,864	46,857	48,159
	$A = 2$	45,464	41,848	46,462
	$A = 3$	41,87	38,548	43,226
	$A = 4$	39,485	36,136	40,85
LutGaya	$A = 1$	48,058	48,048	49,266
	$A = 2$	46,671	42,678	47,419
	$A = 3$	43	39,351	44,175
	$A = 4$	40,5	36,933	41,822
Road	$A = 1$	47,347	47,313	48,139
	$A = 2$	45,777	41,958	46,441
	$A = 3$	41,954	38,577	43,199
	$A = 4$	39,506	36,13	40,823

Из приведенной таблицы видно, что при одинаковой амплитуде ЦВЗ наименьшее визуальное искажение вносит спектральный метод, а наибольшее – упрощенный метод. Поэтому в экспериментах, описанных далее, при использовании спектрального метода допускалось встраивание ЦВЗ с амплитудой A на 1 выше чем в базовом и упрощенном.

В разделе 4 экспериментально было выявлено, что спектральный метод наиболее эффективно работает при размерах QR-кода 49×49 бит, а базовый и упрощенный метод исследовались для QR-кода размеров 89×89 . Но в случае использования базового и упрощенного метода размер используемого QR-кода никак не влияет на вероятность корректного извлечения. Поэтому несмотря на разницу в объеме встраивания эти методы допустимо сравнивать между собой.

Проводилось сравнение методов по качеству извлечения из несжатого набора кадров из реальных видео. Полученные результаты сравнения приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сравнение рассматриваемых методов для несжатого видео

Название видео	Номер кадра, начиная с которого ЦВЗ корректно извлекается		
	Базовый метод	Упрощенный метод	Спектральный метод
RealBarca	25	20	210
LutGaya	190	115	300
Road	15	15	150

Даже несмотря на более высокую амплитуду встраивания, использование спектрального метода требует большего числа кадров для корректного извлечения, а упрощенный метод позволяет извлекать ЦВЗ за наименьшее число кадров.

На рисунке 3 приведены примеры вероятности корректного извлечения для одного из рассматриваемых видео – “LutGaya” при использовании базового метода встраивания. При этом перед извлечением видео поочередно подвергалось сжатию с использованием кодека H.264.

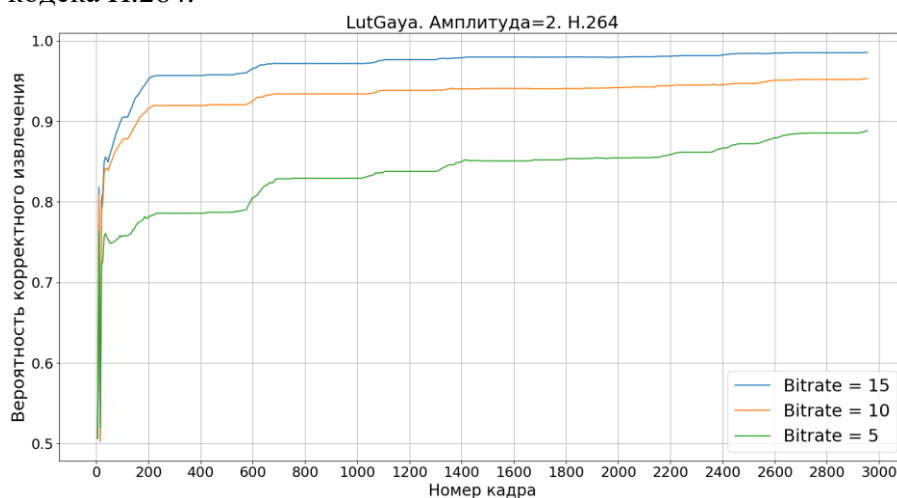


Рисунок 3 - Вероятность корректного извлечения при встраивании ЦВЗ базовым методом с использованием для видео “LutGaya” при амплитуде ЦВЗ $A = 2$ для кодека H.264

По полученным графикам можно заметить, что использование кодека H.264 позволяет за 3000 кадров достичь желаемой вероятности извлечения $P > 0,86$ даже при наибольшем из рассмотренных уровней сжатия 5 Мбит/сек.

В таблице 3 приведено наглядное сравнение описанных подходов при одинаковом битрейте 5 Мбит/сек при использовании трёх различных кодеков.

Таблица 3 - Вероятность корректного извлечения из сжатого видео (битрейт 5 Мбит/сек)

Название видео	A	Базовый метод			Упрощенный метод			Спектральный метод (A + 1)		
		H.264	H.265	MPEG-2	H.264	H.265	MPEG-2	H.264	H.265	MPEG-2
RealBarca	1	0,816	0,836	0,842	0,5	0,91	0,5	0,94	0,76	0,75
	2	0,931	0,949	0,923	1	0,99	0,5	0,96	0,87	0,83
LutGaya	1	0,87	0,75	0,88	0,75	0,55	0,7	0,92	0,84	0,8
	2	0,89	0,8	0,91	1	0,91	0,89	0,94	0,88	0,85
Road	1	0,88	1	1	0,5	1	0,5	0,86	0,76	0,77
	2	0,96	1	1	0,53	1	0,5	0,87	0,92	0,7

Из полученной таблицы видно, что упрощенный метод показывает нестабильные результаты при извлечении, зависящие от выбранного кодека и типа видео. Наиболее высокие результаты показывает спектральный метод в большинстве из рассмотренных случаев, однако указанный метод подразумевает возможность встраивания меньшего числа информации поскольку размер QR-кода 49x49 битов.

На основе полученных результатов экспериментов можно сделать вывод, что при необходимости передать небольшой объем информации по каналу передачи, использующему

сильное сжатие с потерями, лучше всего использовать спектральный метод. В случае необходимости встраивания ЦВЗ большего объема при использовании сжатия приоритетным является использование базового метода. Если требуется быстрая передача видео при слабом сжатии или без него, то оптимальным является упрощенный метод встраивания.

Также проведена серия экспериментов, подтверждающая стойкость каждого из предложенных методов к атакам зашумления и потери синхронизации. Приведены аргументы и аналитические выкладки, обосновывающие стойкость подхода, использующего фазовые ЦВЗ, к другим распространенным атакам: обрезки, поворота и контрастирования.

В заключении пятого раздела приведено сравнение с альтернативными методами, встраивающими ЦВЗ в весь видеоряд. Сравнение происходило с популярным методом на основе нейронных сетей, а также с двумя подходами, основанными на распределении встраиваемого ЦВЗ по пространству кадров. Фазовый метод продемонстрировал более высокую устойчивость к корреляционному анализу по сравнению с двумя из трёх рассмотренных методов: злоумышленник не может оценить встроенный ЦВЗ путём усреднения большого количества кадров. При сопоставимых результатах по метрике корреляции, эксперименты показывают, что фазовый метод обеспечивает корректное извлечение ЦВЗ по меньшему числу кадров. Сравнение с третьим методом показало преимущество в качестве извлечения, т.е. ЦВЗ извлекается за меньшее количество кадров при аналогичном уровне сжатия. Кроме того, в отличие от методов, в основе которых лежит использование нейронных сетей, фазовый метод позволяет встраивать больший объем информации, причём как в виде бинарной последовательности, так и виде вектора вещественных чисел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы разработан и исследован метод защиты видео с помощью фазовых ЦВЗ. Основные результаты диссертационной работы:

1. В результате аналитического обзора мирового состояния разработки методов активной защиты цифровых видео установлена целесообразность разработки нового метода, обладающего преимуществами перед существующими.

2. Разработан метод защиты видео фазовым ЦВЗ, основанный на встраивании в каждый пиксель видеокadra, рассматриваемый как функция времени, слабой синусоиды с индивидуальной фазой.

3. Разработаны алгоритмы, позволяющие осуществлять встраивание и извлечение из видео двумерного поля фазового ЦВЗ.

4. Разработана модификация метода, использующая предельно высокую частоту встраиваемой синусоиды и тем самым позволяющая снизить вычислительную сложность более чем в 5 раз по сравнению с исходным методом.

5. Разработана модификация метода защиты видео, использующая для повышения уровня защиты вторичный спектральный контейнер, а также метод синтеза шумоподобного полутонового изображения фазового ЦВЗ с дискретным спектром в виде QR-кода.

6. Обосновано использование в качестве ЦВЗ двумерного бинарного QR-кода с оценкой качества его извлечения по вероятности правильного получения каждого элемента кода.

7. Предложена статистическая модель цифровых видео, описывающая их свойства на уровне автокорреляционных функций, предложены эвристические алгоритмы оценки её параметров. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие возможность её применимости к задаче предварительного исследования метода и алгоритмов защиты видео.

8. Проведены экспериментальные исследования разработанного метода и алгоритмов на видеофайлах, синтезированных по предложенной статистической модели. Установлена слабая зависимость эффективности метода от всех параметров модели в широком диапазоне их изменения, кроме параметра интенсивности случайного потока смены сцен. Для типовых

значений параметров видео корректное извлечение ЦВЗ обеспечивается уже к 30 кадру с начала процедуры анализа видео.

9. Проведено экспериментальное исследование разработанного метода и алгоритмов на реальных видеофайлах, показавшее стойкость метода к сжатию с потерями при использовании популярных кодеков: H.264, H.265 и MPEG-2, а также стойкость к другим распространённым атакам на видео.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus и рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России:

1. Сергеев, В.В. Фазовые цифровые водяные знаки для защиты видеосигналов / В.В. Сергеев, В.А. Федосеев, Д.А. Шапиро // *Автометрия*. - 2022. - № 5. - С. 3-13.
2. Шапиро, Д.А. Использование спектрального вторичного контейнера в методе защиты видео с помощью фазовых ЦВЗ / Д.А. Шапиро, В.В. Сергеев // *Компьютерная оптика*. - 2025. - №5. - С. 805-810.
3. Shapiro, D. Improved ECC-based Phase Watermarking Method for Video Copyright Protection / D. Shapiro, V. Sergeyevev, V. Fedoseev // *ISDFS 2023: 11th International Symposium on Digital Forensics and Security*. - IEEE, 2023. - P. 1-6.
4. Shapiro, D. A Simple Method to Protect Video Using Binary Phase Watermarks / D. Shapiro, V. Sergeyevev // *2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. - Samara, 2024. - P. 1-6.
5. Shapiro, D.A. A Method for Synthesizing Test Videos Based on the Evaluation of the Autocorrelation Function / D.A. Shapiro // *International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*. - Singapore: Springer Nature Singapore, 2025. - P. 347-358.

Другие публикации

6. Шапиро, Д.А. Метод защиты видео при помощи фазовых цифровых водяных знаков / Д.А. Шапиро, В.В. Сергеев, В.А. Федосеев // *VIII Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2022)*. — Самара, 2022. — Т. 3. — С. 032262.
7. Сергеев, В.В. Простой метод защиты видео с помощью бинарных фазовых водяных знаков / В.В. Сергеев, Д.А. Шапиро // *X Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2024)*. — Самара, 2024. — Т. 4. — С. 40552.
8. Шапиро, Д.А. Использование спектрального вторичного контейнера в методе защиты видео с помощью фазовых ЦВЗ / Д.А. Шапиро, В.В. Сергеев // *XI Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2025)*. — Самара, 2025. — Т. 5. — С. 040742.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

9. Шапиро Д.А., Сергеев В.В. Метод защиты видео с помощью фазовых цифровых водяных знаков / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660321 от 23.04.2025.