

На правах рукописи



МОРКОВИН Сергей Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ОБРАБОТКИ ВИДЕОДАННЫХ С ДИНАМИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ СО СКРЫТЫМ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫМ СЛОЕМ**

Специальность 2.3.5. Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и
компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Орёл – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации».

Научный руководитель: **Невров Алексей Александрович**,
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Алексеев Владимир Витальевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации»
Грибунин Вадим Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, Автономная некоммерческая организация «Институт инженерной физики», главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр «Орион»

Защита состоится «29» сентября 2023 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский пр-т, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «20» июня 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гусев Константин Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс в области информатизации общества способствует развитию и совершенствованию социо-киберфизических систем различного уровня и функциональной направленности. В настоящее время одним из наиболее востребованных вариантов подобных систем являются системы, обеспечивающие функции обработки видеоданных. В рамках таких систем видеоданные подвергаются различным преобразованиям, связанным с модификацией их форматов, изменением временного порядка представления отдельных структурных элементов видеоданных (СЭВ), параметров (разрешение, углы поворота и т.д.), а также наложением дополнительных слоев, содержащих как различный контент, так и метаданные. В подобных условиях одной из важных задач является идентификация источника обрабатываемых видеоданных, представляющая общий класс задач, к частным случаям которых относятся задачи идентификации прав интеллектуальной собственности по отношению к медиа-объектам, определение авторства видеоданных или их отдельных СЭВ и т.д. В общем случае указанная задача относится к предметным областям цифровой идентификации объектов и технических средств защиты авторских прав (англ. DRM — digital rights management). Она решается включением в структуру обрабатываемых данных уникальных идентификаторов — информационных объектов, сопоставляющих источник данных с этими данными. Выдача таких идентификаторов возлагается, как правило, на международные системы нумерации, например, на ISAN и ISRC. Обобщенно идентификатор как объект включается в структурно-параметрические характеристики обрабатываемых данных в качестве метаданных. Применительно к обработке видеоданных объект-идентификатор может находиться в области визуального восприятия или иметь скрытый идентификационный слой, доступ к которому может быть получен только на специально организованном этапе контроля. Вне зависимости от вида идентификатора общей проблемой таких объектов при обработке видеоданных является их низкая устойчивость (робастность) к преобразованиям, которым подвергаются видеоданные на различных этапах обработки, и, как следствие, нарушение их целостности как информационного объекта, позволяющего решать задачу идентификации.

Большой вклад в разработку математического обеспечения и программных средств для задач идентификации в системах обработки медиаконтента и, в частности, видеоданных внесли зарубежные и отечественные ученые: Н. Farid, R. Anderson, K. Sullivan, N. Provos, J. Fridrich, А.Н. Фионов, А.В. Балакин, В.Г. Грибунин, И.В. Туринцев, В.В. Алексеев, В.А. Митекин. При этом большинство исследований ориентировано на обработку цифровых изображений или статических фрагментов видеоданных.

Очевидно, что указанная проблема требует разработки соответствующего математического и программного обеспечения обработки

видеоданных, метаданные которых содержат объекты со скрытым идентификационным слоем (ОСИС), что и определяет актуальность темы диссертационного исследования.

Тематика диссертационной работы соответствует перспективной тематике научных исследований ФГКВОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» – Алгоритмы маркирования растровых изображений на основе робастного водяного знака.

Целью работы является разработка математического и программного обеспечения обработки видеоданных с объектами, содержащими скрытый идентификационный слой, обеспечивающего повышение устойчивости этих объектов к преобразованиям видеоданных в процессе их обработки.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния проблемы использования объектов со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, методов обеспечения их устойчивости на этапах преобразований видеоданных, или их отдельных структурных элементов видеоданных.

2. Выполнить моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих объекты со скрытым идентификационным слоем, для получения зависимости между спектральной функцией частотной области структурных элементов видеоданных и распределением возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству этих элементов.

3. Разработать алгоритм формирования в обрабатываемых видеоданных динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, для выбора областей его формирования, повышающих устойчивость к комбинациям множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки.

4. Разработать алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству структурных элементов видеоданных.

5. Провести численные эксперименты для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

6. Разработать программные средства обработки видеоданных, содержащих динамический объект со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающие повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки.

Объект исследования: система обработки видеоданных.

Предмет исследования: математическое и программное обеспечение обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертации

задач использовались методы системного анализа и моделирования, теории множеств, теории вероятностей и математической статистики; технологии программирования и имитационного моделирования.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки): п.3 «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем»; п.7 «Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, форматы, протоколы и программные средства человеко-машинных интерфейсов, компьютерной графики, визуализации, обработки изображений и видеоданных, систем виртуальной реальности, многомодального взаимодействия в социо-киберфизических системах».

Научная новизна работы. В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем, отличающаяся от известных возможностью динамического изменения параметров его формирования в энергетически значимых составляющих спектра частотной области видеоданных и обеспечивающая получение равномерного распределения множества возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем, по множеству структурных элементов видеоданных;

- алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, отличающийся от известных применением процедуры координатно-переменного выбора области формирования и обеспечивающий повышение показателя накопленной устойчивости при различных комбинациях множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки;

- алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, отличающийся от известных итерационным накоплением информации о найденном подмножестве элементов этого объекта и обеспечивающий возможность решения задачи идентификации на основе накопленной информации;

- архитектура программной системы обработки видеоданных, отличающаяся от известных наличием модулей формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем и комбинации воздействий на структурные элементы видеоданных и обеспечивающая повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки этих объектов, частично распознанных на уровне автоматической обработки.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных,

содержащих объект со скрытым идентификационным слоем, позволяет сформировать равномерное распределение возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем, по энергетически значимым составляющим спектра частотной области каждого структурного элемента видеоданных;

- алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных позволяет повысить показатель накопленной устойчивости при различных комбинациях множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки;

- алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных позволяет решить задачу идентификации на основе накопленной информации о найденном подмножестве его элементов;

- архитектура программной системы обработки видеоданных обеспечивает повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки объектов со скрытым идентификационным слоем, частично распознанных на уровне автоматической обработки.

Практическая значимость исследования заключается в разработке кроссплатформенных программных средств обработки видеоданных, содержащих динамические объекты со скрытым идентификационным слоем. На элементы этих программных средств получено свидетельство о государственной регистрации в реестре Федеральной службы по интеллектуальной собственности.

Результаты внедрения. Основные положения и результаты диссертационной работы реализованы в виде специального программного средства обработки видеоданных, содержащих динамические ОСИС, и нашли практическое применение в работе ФГУП «НТЦ «Орион». Результаты также внедрены в образовательный процесс Академии ФСО России.

Апробация результатов диссертационного исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: III Международная научная конференция MIP Engineering-III 2021: «Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации», Двадцать седьмая международная открытая научная конференция «Современные проблемы информатизации» «Modern Informatization Problems» (с изданием материалов конференции в Science Book Publishing House, USA), Всероссийская межведомственная научно-технической конференция по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи «НАУКА И АСУ — 2021», «Modern Informatization problems in simulation and social technologies MIP-2022'SCT» Proceedings - XXXVII 2022.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 8 печатных работ, в т.ч. 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, свидетельство о государственной регистрации программы, а также статья в издании, индексируемом в Scopus. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1,2] – теоретико-множественная модель процесса обработки видеоданных, содержащих объект со скрытым идентификационным слоем; [4] – алгоритм формирования динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных; [3,6] – алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных; [5,7] – архитектура программной системы обработки видеоданных, позволяющая повысить устойчивость динамического объекта со скрытым идентификационным слоем к преобразованиям видеоданных в процессе их обработки.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включая 28 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 46 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные научные результаты, а также приведены сведения об их апробации и внедрении.

В первой главе рассмотрены тенденции развития и совершенствования технологии обработки видеоданных, метаданные которых содержат ОСИС. Проведен анализ состояния проблемы использования ОСИС в обрабатываемых видеоданных, методов обеспечения их устойчивости на этапах преобразований видеоданных, или их отдельных СЭВ. Представлена классификация современных методов внедрения ОСИС в видеоданные. Выявлены их достоинства и недостатки. Исследованы подходы к оцениванию качества ОСИС по показателям устойчивости. Обозначена необходимость совершенствования методов обработки ОСИС в видеоданных за счет модификации существующих решений. В этой связи, было сформулировано противоречие между требованием обладателей контента, сохраняемого в видеоданных, связанное с обеспечением высокой устойчивости ОСИС, подтверждающих их правообладание, при сохранении допустимого качества видеоданных. На основании этого противоречия была выполнена формальная постановка научной задачи, которая определила решение задачи выбора параметров формирования динамических ОСИС, обеспечивающих повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки для заданного множества возмущений, которым подвергаются видеоданные, по критерию пригодности.

Вторая глава посвящена разработке математического обеспечения для обработки ОСИС. Выполнено моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих ОСИС, для получения зависимости между спектральной функцией частотной области СЭВ и распределением возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству СЭВ. В качестве базовой методологии при моделировании ОСИС выбран теоретико-множественный подход.

Процесс формирования ОСИС состоит из следующих этапов:

1. Декомпозиция видеоданных на цветовые каналы: $Str \rightarrow \{Str_i\}, i = \{r, g, b\}$, где Str – видеоданные, Str_i – цветовая составляющая i -го цвета, $\{r, g, b\}$ – индекс красной, зеленой и синей составляющей соответственно.

2. Представление видеоданных в виде множества СЭВ: $Str_i \rightarrow \{It_{i,k}\}, k = \{1, 2, \dots, K\}$, где $It_{i,k}$ – изображение k -го СЭВ i -й цветовой составляющей, K – общее количество СЭВ.

3. Перевод изображения СЭВ $It_{i,k}$ из пространственного представления в частотную область: $Sp_{i,k}(u, v) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} It_{i,k}(x, y) \cdot e^{-i \cdot 2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$, где $Sp_{i,k}$ – спектральная функция частотной области СЭВ $It_{i,k}$, x и y – пространственные, а u и v – частотные координаты. В дальнейшем применяется нормирование коэффициентов спектра для обработки именно «значимых» и «весомых», областей спектра Фурье, что облегчает контроль целостности ОСИС и вносит равнозначное распределение ОСИС по всему частотному спектру СЭВ.

4. Выделение энергетически значимой области спектра, необходимой для формирования ОСИС. Предлагается внедрять ОСИС в область спектра НЧ, в большей степени, и СЧ – в меньшей.

5. Формирование ОСИС, содержащего информацию об идентификаторе пользователя информационной системы в виде монохромного изображения числа в шестнадцатеричном представлении. Определяются размеры шрифта строки ОСИС, его контрастности и яркости, а также координаты его центра. Предлагается значения координат центра ОСИС сделать переменными в каждом СЭВ, а закон изменения координат определить, как псевдослучайный. Такой подход позволит равномерно распределить шумы при формировании ОСИС по значимой области спектра Фурье.

6. Встраивание ОСИС $DW_{i,k}(x, y)$ в преобразованный на третьем этапе СЭВ $|Sp_{i,k}(u, v)|$:

$|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW} = |Sp_{i,k}(u, v)| - DW_{i,k}(x, y)^N, DW_{i,k}(x, y)^N = \frac{DW_{i,k}(x, y) - DW_{i,k}(x, y)_{min}}{DW_{i,k}(x, y)_{max} - DW_{i,k}(x, y)_{min}} \cdot \Delta Sp$, где $|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW}$ – спектр Фурье СЭВ содержащий ОСИС, $DW_{i,k}(x, y)^N$ – нормированное изображение ОСИС, $DW_{i,k}(x, y)_{max}$ и $DW_{i,k}(x, y)_{min}$ – максимальное и минимальное значения яркости точек монохромного ОСИС, ΔSp – динамический диапазон спектра Фурье СЭВ.

На заключительных стадиях процесса внедрения ОСИС выполняются процедуры, обратные этапам 3, 2 и 1:

7. Обратное ДПФ спектрального представления СЭВ со сформированным ОСИС $|Sp_{i,k}(u, v)|^{DW}$: $I_{T_{i,k}}(x, y)^{DW} = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |Sp_{i,k}(u, v)|^{DW} \cdot e^{i \cdot 2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$, после чего формируется СЭВ содержащий ОСИС (СЭВ').

8. Объединение множества статичных СЭВ' в видеоданные каждого из цветовых каналов: $\{I_{T_{i,k}}\}^{DW} \rightarrow Str_i^{DW}$.

9. Заключительным этапом формирования ОСИС в видеоданные выступает объединение цветовых потоковых составляющих в видеоданные содержащие ОСИС в частотной области Str^{DW} : $\{Str_i\}^{DW} \rightarrow Str^{DW}, i = \{r, g, b\}$.

Формально п.6 отражает зависимость между спектральной функцией частотной области СЭВ и распределением возмущений, создаваемых ОСИС.

Также было выполнено моделирование возмущений на ОСИС. Под возмущением было принято считать воздействие на СЭВ', приводящее к частичному или полному разрушению ОСИС. Определено i -ое возмущение, как множество $U_i = \{u_1^i, u_2^i, \dots, u_k^i\}$, где u_j^i – j -тый способ реализации i -го возмущения. Общая модель возмущений на ОСИС определяется объединением всех множеств возмущений и представляется выражением: $U = U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n$.

Полный перечень возмущений на ОСИС, относительно предметной области исследования:

- изменение размеров кадра, изменение разрешения изображения, сжатие-растяжение (U_1);
- обрезка изображения, вырезание части кадра из общего изображения (U_2);
- кодирование и перекодирование, компрессия с помощью известных кодеков (U_3);
- изменение частоты кадров, «битрейта» (U_4);
- вырезание временного отрезка, обрезка по времени (U_5);
- применение фильтров (U_6);
- конвертирование в монохромное видео (U_7).

В основе разработанного математического обеспечения лежит терминативный подход, суть которого состоит в определении техник и способов обеспечения устойчивости ОСИС – терминаторов возмущений.

Проведен анализ существующих методов и способов повышения устойчивости исследуемых объектов на предмет выделения необходимых техник-терминаторов t_j , позволяющих нивелировать соответствующее возмущение $t_j: U_i \rightarrow \emptyset$. В результате проведения исследований, обнаружен недостаток существующих терминаторов, что потребовало разработать собственные техники для полного отображения множества возмущений в

пустое множество: $\langle t_1, t_2, \dots, t_m \rangle: U \rightarrow \emptyset$, где $\langle t_1, t_2, \dots, t_m \rangle$ – множество терминаторов возмущений – техник и способов устранения возмущений на ОСИС.

Проведены исследования по обоснованию метрики устойчивости ОСИС в видеоданных, в основу которой лег индекс структурного сходства – *SSIM*, являющийся модифицированной корреляционной характеристикой. Первоначально показатель устойчивости (робастности) по отношению ко множеству возмущений U_j определялся следующим выражением: $Rob^{U_j} = SSIM(DW, DW^{U_j})$, где DW, DW^{U_j} – монохромное изображение СЭВ' и изображение СЭВ', подвергнувшегося реализации возмущения из множества U_j . В процессе исследования был обнаружен эффект «накопления» информации о динамическом ОСИС, учет которого позволил вывести конечное аналитическое выражение показателя накопленной робастности:

$Rob_n^U = |SSIM(DW_c, DW_c^U)| = |SSIM(DW_c, \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^3 DW_{ck,ci}^U)|$, где U – смоделированное множество воздействий, $DW_c = \{dw_{c1}, \dots, dw_{cm}\} = \{dw_{cm}\}$ и $DW_c^{U_j} = \{dw_{c1}^{U_j}, \dots, dw_{cm}^{U_j}\} = \{dw_{cm}^{U_j}\}$ – суммарный «накопленный» образ ОСИС до и после искажений, K – количество кадров. Операция приведения значения *SSIM* к абсолютной величине – $|SSIM|$ обеспечивает переход показателя робастности к шкале (0, 1).

Во введенном показателе обеспечивается инвариантность метрики параметра устойчивости от вида возмущений. Также возникает возможность избежать недостатка дискретности параметра устойчивости ОСИС, а его оценка будет сводиться к сравнению с некоторым пороговым значением $SSIM_{пор}$, превышение которого гарантирует однозначную идентификацию ОСИС.

Отличительной особенностью разработанной теоретико-множественной модели формирования ОСИС в видеоданных является комплексирование способов и техник терминаторов возмущений, определяемых объектом исследования. Предложенная модель способна обеспечить устойчивость по отношению к потенциальным возмущениям на видеоданные: $T = t_1 \cup t_2 \cup t_3 \cup t_4 \cup t_5: U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7\} \rightarrow \emptyset$. Возможно конечное множество комбинаций описанных возмущений и их реализаций. Каждая комбинация возмущений вносит уникальное множество искажений в СЭВ'. Вычисление индекса структурного сходства ОСИС в исходном СЭВ' и подвергнувшегося комбинации возмущений, позволяет оценивать устойчивость сформированного ОСИС по отношению к конкретной комбинации возмущений.

Таким образом, разработанная модель обеспечивает получение зависимости между параметрами формируемого ОСИС и энергетически значимыми составляющими спектра частотной области видеоданных, а также получение равномерного распределения множества возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем, по множеству СЭВ'.

В третьей главе представлен алгоритм формирования в обрабатываемых видеоданных динамического ОСИС и алгоритм контроля целостности динамического ОСИС, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству СЭВ'. Алгоритм формирования ОСИС в видеоданных представлен на рисунке 1. Работа алгоритма динамического формирования ОСИС в частотной области видеоданных состоит из нескольких групп этапов. На первоначальных этапах происходит формирование ОСИС в виде изображения идентификатора пользователя IDhex и декодирование видеоданных. Следующая группа – основная – осуществляет формирование ОСИС в частотной области каждого СЭВ каждой цветовой составляющей видеоданных. Процедура формирования динамического ОСИС дополнена методом выбора координат и угла поворота ОСИС для каждого СЭВ. Завершается алгоритм процедурами обратного преобразования Фурье и кодирования видеоданных в исходный формат. Таким образом, для разработанного алгоритма обосновано использование координатно-переменного выбора новых координат ОСИС для каждого СЭВ по псевдослучайному закону, что позволяет снизить влияние параметров ОСИС на спектр СЭВ', и, тем самым, увеличить показатель его скрытности в пространственной области видеоданных.

Схема разработанного алгоритма контроля целостности динамического ОСИС представлена на рисунке 2. Предварительной процедурой (блок 3) является декодирование видеоданных и инициализация образа ОСИС, необходимого для накопления информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству СЭВ' путем суммирования с предыдущим значением образа и последующим выполнением контрастирования (блок 13). Следующая группа процедур (блоки 7-10) осуществляет обработку частотной области каждого СЭВ каждой цветовой составляющей видеоданных. В ходе нее в цикле осуществляется нормирование спектра СЭВ, выделение значимой области спектра и поиск в ней ОСИС. В случае неудачного поиска алгоритм переходит к обработке следующей цветовой составляющей СЭВ или к следующему СЭВ. В противном случае, осуществляется определение координат и угла поворота строки ОСИС.

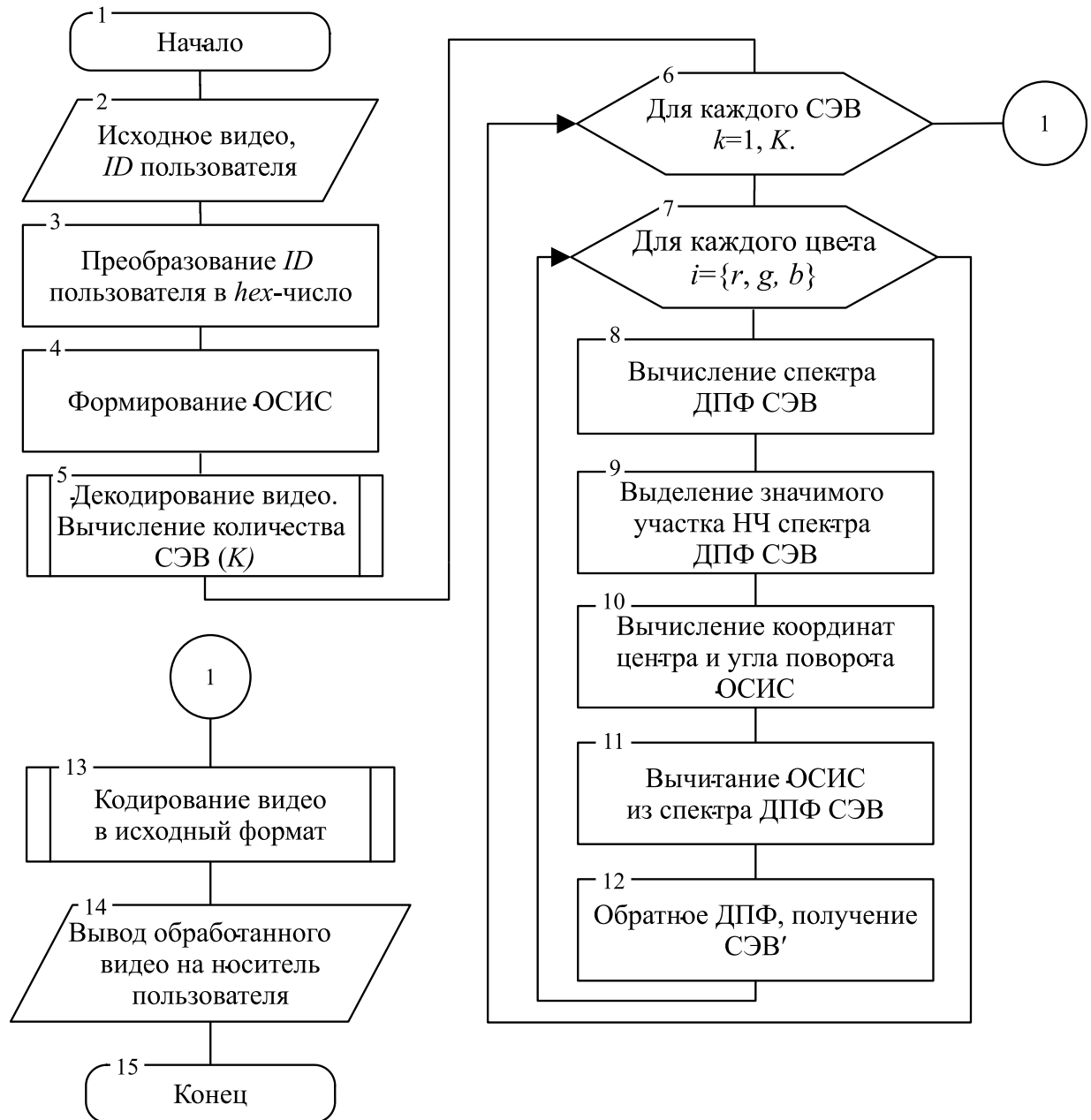


Рисунок 1 – Схема алгоритма формирования в обрабатываемых видеоданных динамического ОСИС

Следующей процедурой разработанного алгоритма контроля выступает predetermined процедура распознавания выделенной строки IDhex идентификатора, реализованная подключением программного модуля оптического распознавания текста одной из известных OCR-систем. В цикле обработки спектральной области каждого СЭВ' предусмотрен преждевременный выход в случае успешного распознавания ОСИС.

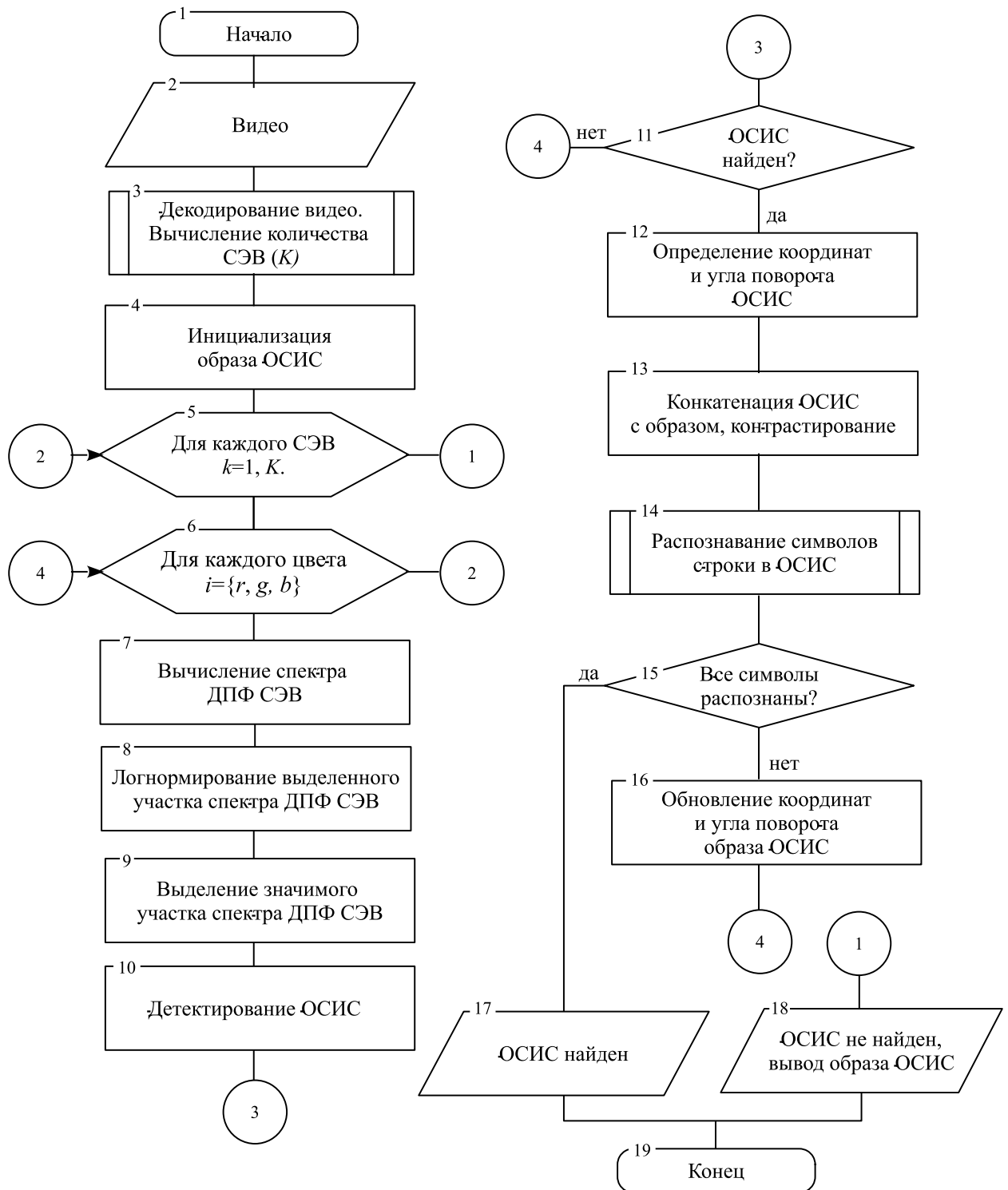


Рисунок 2 – Схема алгоритма контроля целостности динамического ОСИС в обрабатываемых видеоданных

Отличительной особенностью алгоритма является наличие возможности неполного распознавания ОСИС и допущение случая распознавания не всех символов строки IDhex, а лишь ее части. На заключительных этапах пользователю предоставляется либо распознанный идентификатор, либо сообщение об отсутствии ОСИС и вывод изображения

образа ОСИС, накопленного в результате обработки. В дальнейшем процедура поиска и распознавания ОСИС в видеоданных выполняется оператором DRM-системы на уровне автоматизированной обработки (рисунок 4).

Таким образом разработанный алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных позволяет решить задачу их идентификации на основе накопленной информации о найденном подмножестве элементов ОСИС. Указанные алгоритмы использованы при разработке архитектуры системы обработки видеоданных, отличающейся от известных наличием модулей формирования динамического ОСИС и итерационного накопления информации о найденном подмножестве его элементов.

В четвертой главе представлена архитектура программной системы обработки видеоданных с реализованными алгоритмами формирования и контроля целостности ОСИС (рисунок 3), а также проведены численные эксперименты для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

Рассматриваемая система обработки видеоданных функционально позволяет производить формирование и контроль целостности динамических ОСИС в видеоданных. Описываемая система состоит из модуля формирования ОСИС, на вход которого принимаются исходные видеоданные, в которые необходимо произвести внедрение динамического ОСИС в виде IDhex идентификатора пользователя системы. В процессе формирования используются три вспомогательных компонента: видео-декодер, блок ДПФ и видео-кодер. На выходе модуля формирования ОСИС образуются СЭВ'. Далее СЭВ' подвергаются фиксированному множеству комбинаций возмущений. Для каждой комбинации возмущений выполняется контроль целостности ОСИС.

Для выполнения процедуры контроля целостности динамического ОСИС необходимо выполнить детектирование этого объекта в СЭВ'. Модуль детектирования ОСИС на вход получает анализируемые видеоданные, которые потенциально содержат искомый ОСИС. В большинстве случаев, анализируемые видеоданные будут являться фрагментами СЭВ', подвергшихся различным возмущениям. В процессе детектирования используются два вспомогательных компонента: видео-декодер и блок ДПФ. Модуль детектирования ОСИС реализован по двухуровневой схеме с уровнями автоматического и автоматизированного поиска и распознавания ОСИС. В случае, если на уровне автоматического детектирования поиск ОСИС не дал положительного результата, реализуется процедура поиска и распознавания ОСИС в видеоданных, выполняемая оператором DRM-системы на автоматизированном уровне, который вручную анализирует частотную область видеоданных с целью поиска наличия ОСИС. Результатом работы модуля контроля целостности ОСИС является значение строки IDhex или уведомление об отсутствии ОСИС в анализируемых видеоданных.

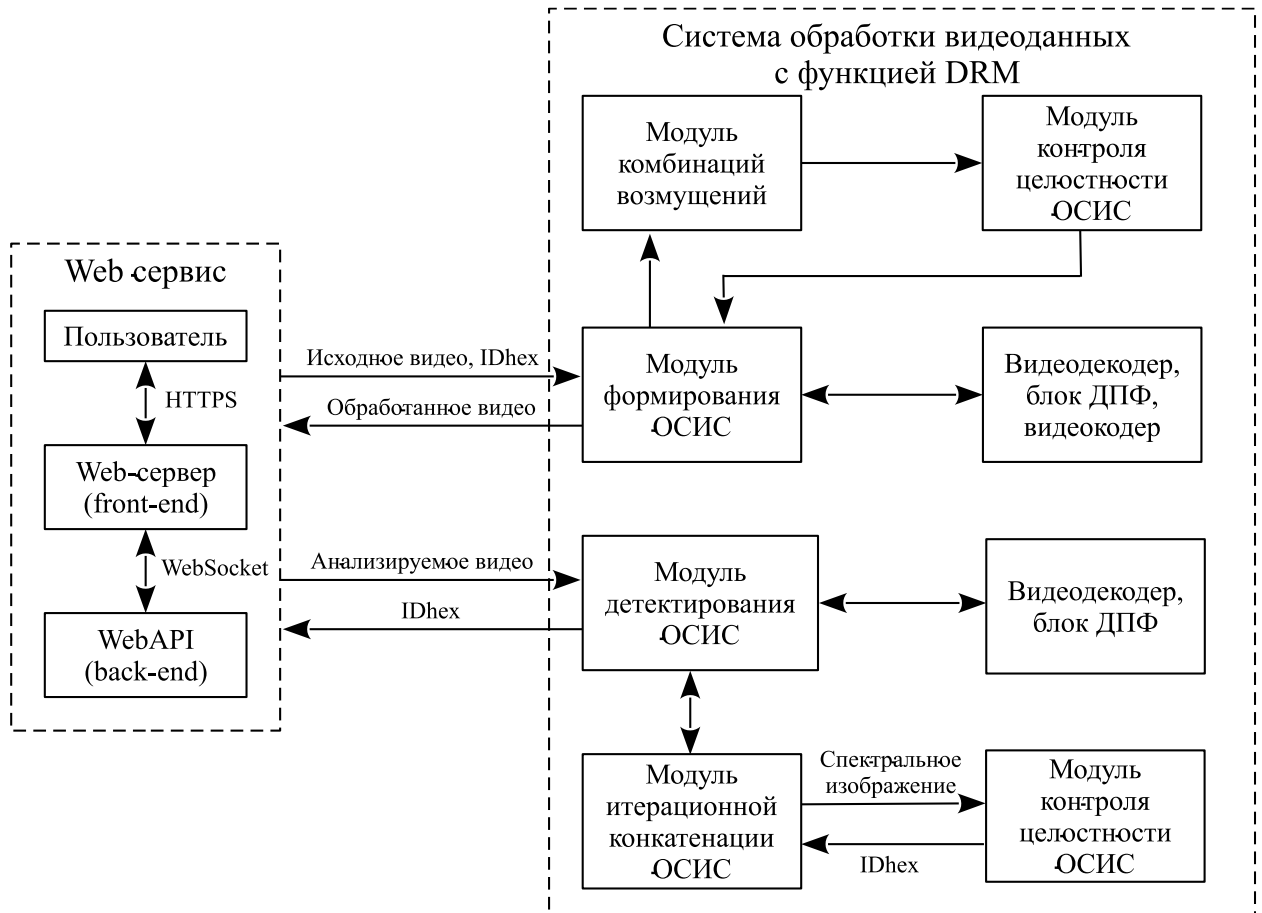


Рисунок 3 – Обобщенная архитектура программной системы обработки видеоданных

На рисунке 4 представлен полный тракт циркуляции распространяемых видеоданных в рамках DRM-системы. Исходные видеоданные вместе с уникальными метаданными, идентифицирующими их источник, поступают на вход системы обработки видеоданных в модуль формирования динамического ОСИС. После формирования динамического ОСИС видеоданные передаются пользователям через доверенных провайдеров видеоданных. В случае утечки распространяемых видеоданных в открытый доступ, они подаются на вход модуля детектирования и контроля целостности ОСИС, и в случае его положительного распознавания в дальнейшем решается задача определения источника их утечки.

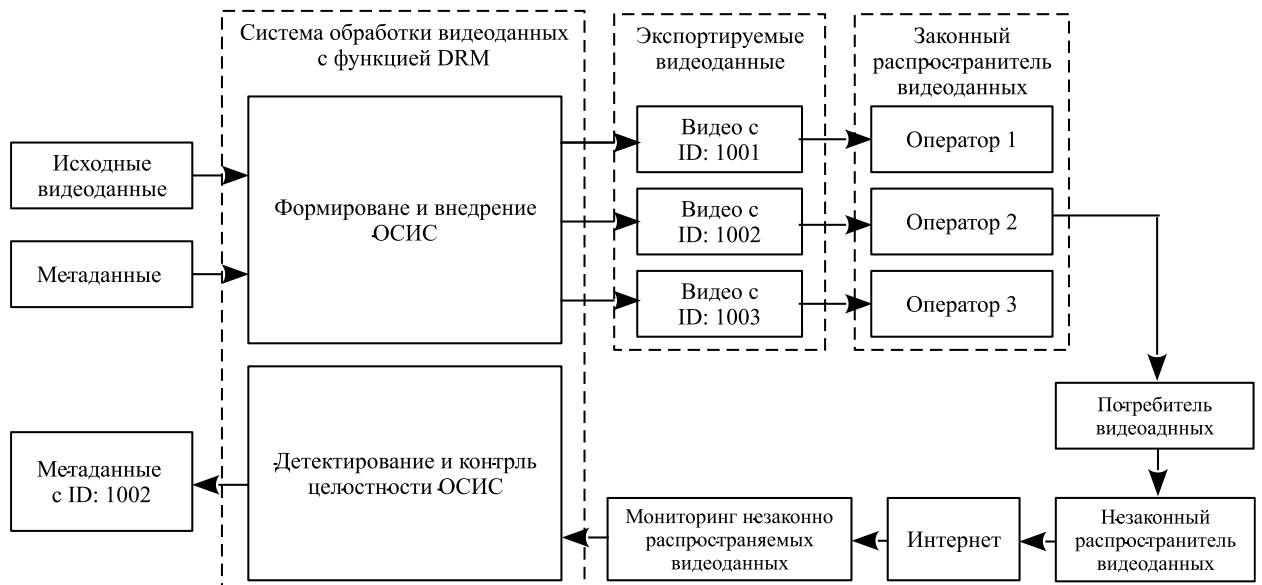


Рисунок 4 – Место программной системы обработки видеоданных в структуре DRM-системы

Таким образом была разработана архитектура программной системы обработки видеоданных, обеспечивающая повышение вероятности идентификации динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающая повышение вероятности их идентификации за счет двухуровневой схемы, включающей уровень автоматизированной постобработки этих объектов, частично распознанных на уровне автоматической обработки.

Для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных были выполнены численные эксперименты. Значения диапазонов параметров формирования динамических ОСИС: интенсивность («глубина») формирования от 20 до 30; относительная площадь, занимаемая ОСИС в СЭВ, от 0.004 до 0.02; координатная область формирования – прямоугольник с диагональю (0.1, 0.1) – (0.65, 0.65), соответствующий СЧ и НЧ спектра. Дальнейшее определение граничных условий устойчивости производилось при максимальных значениях глубины формирования ОСИС 30 и относительной занимаемой им площади 0.02.

Результаты сравнительного анализа предложенного в работе решения приведены на рисунке 5 при воздействии возмущений $a_1 - a_3$ и на рисунке 6 при воздействии возмущений $a_8 - a_{10}$. Визуализация устойчивости при остальных возмущениях не имеет смысла в силу их большой корреляции с представленными данными.

На графиках приведены усредненные по всей выборке видеоданных значения показателя устойчивости, для способа статического размещения ОСИС (пунктирные линии) и модифицированного способа на основе динамически изменяемых координат ОСИС по псевдослучайному закону (сплошные линии). Показатель устойчивости определялся при воздействии

следующих возмущений: изменение размеров кадра a_1 ; изменение разрешения изображения a_2 ; сжатие изображения a_3 ; обрезка изображения по краям a_4 ; вырезание части изображения a_5 ; изменение частоты кадров a_6 ; обрезка видео по времени a_7 ; компрессия видео с помощью кодеков $H.263$ – a_8 , $H.264$ – a_9 , $MPEG-2$ – a_{10} , $MPEG-4$ – a_{11} , $VP8$ – a_{12} ; фильтрация изображений Гаусса a_{13} , контрастирование a_{14} , медианная фильтрация – a_{15} .

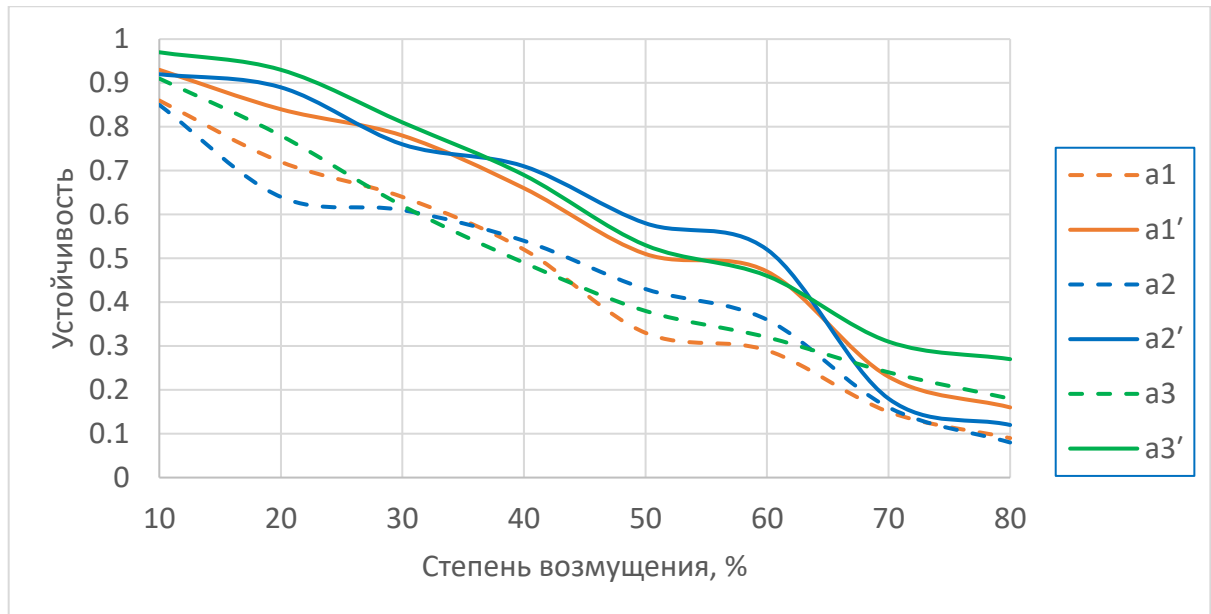


Рисунок 5 – Устойчивость ОСИС при воздействии возмущений a_1 – a_3

Анализ полученных данных позволяет судить о значительном выигрыше в устойчивости ОСИС от применения подхода псевдослучайного изменения координат, который достигает 28 %. В среднем результаты анализа демонстрируют выигрыш от модификации метода в 16 %.

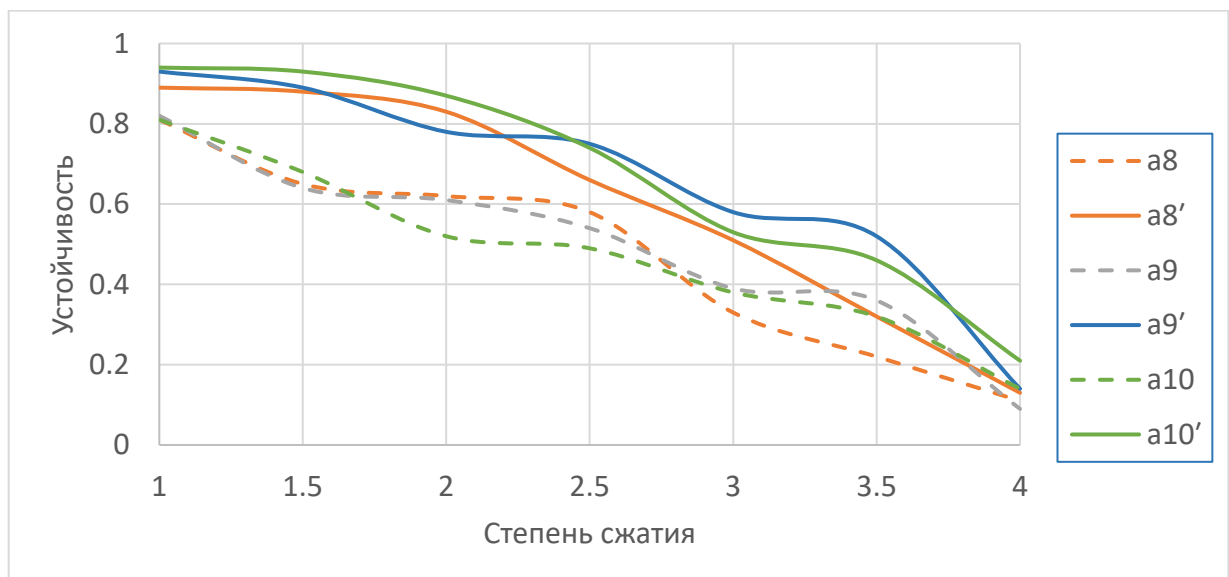


Рисунок 6 – Устойчивость ОСИС при воздействии возмущений a_8 – a_{10}

Разработаны программные средства обработки видеоданных, содержащих динамические ОСИС, обеспечивающие повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки видеоданных.

Исходный код написан на языке C++, в интегрированной среде разработки Sublime Text 4. Проект скомпилирован компилятором GCC-12. Используются библиотеки Boost-1.82 и Opencv-4.7. Экспериментальные исследования по оценке эффективности разработанного СПО проводились на базе видеофайлов – записей с камер наблюдения. Объем базы равен 10 000 видео с различным разрешением: *VGA*, *HD*, *FullHD*, *QHD* и *UHD*; различной длительностью в диапазоне от 4 до 100 с; сжатое кодеками согласно стандартов *H.263*, *H.264*, *MPEG-2*, *MPEG-4* и *VP8*. Были получены следующие результаты: средняя скорость встраивания от 4 кадр/с (*UHD*) до 22 кадр/с (*VHD*), разброс между кодеками незначительный (менее 20 %); линейная зависимость времени встраивания от длительности видео; время детектирования ОСИС в пределах от 0,1 до 3,9 с, при воздействии различных возмущений из модели возмущений; достаточная длительность видеофайла, для обеспечения требуемой вероятности детектирования ОСИС при реализации рассмотренных в работе возмущений в пределах граничных значений робастности – 4 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ состояния проблемы использования объектов со скрытым идентификационным слоем в обрабатываемых видеоданных, методов обеспечения их устойчивости на этапах преобразований видеоданных, или их отдельных структурных элементов видеоданных.

2. Выполнено моделирование процесса обработки видеоданных, содержащих объекты со скрытым идентификационным слоем, для получения зависимости между спектральной функцией частотной области структурных элементов видеоданных и распределением возмущений, создаваемых скрытым идентификационным слоем по множеству этих элементов.

3. Разработан алгоритм формирования в обрабатываемых видеоданных динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, для выбора областей его формирования, повышающих устойчивость к комбинациям множества преобразований, которым подвергаются видеоданные на этапах обработки.

4. Разработан алгоритм контроля целостности динамического объекта со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающий накопление информации о найденном подмножестве элементов этого объекта по множеству структурных элементов видеоданных.

5. Разработаны программные средства обработки видеоданных,

содержащих динамический объект со скрытым идентификационным слоем, обеспечивающие повышение их устойчивости к преобразованиям в ходе обработки.

6. Проведены численные эксперименты для оценки предложенных решений по показателю накопленной устойчивости к преобразованиям видеоданных.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях списка ВАК:

1. Морковин, С.В. Метод динамического внедрения робастного цифрового водяного знака в видеоданные // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – № 4 (86). – С. 66-68.

2. Морковин, С.В. Алгоритмы и программные средства человеко-машинной обработки цифровых водяных знаков в видеопоследовательности. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – №10 (3). – С. 30-31.

3. Морковин, С.В., Миняев, А.А., Мишин, А.Б., Овсянников, А.Н. Алгоритм динамического координатно-переменного внедрения и автоматического обнаружения невидимых робастных цифровых водяных знаков в частотной области видеопотока // Системы управления и информационные технологии. – 2022. – №2 (88). – С. 13-18.

4. Морковин, С.В., Невров А.А. Метод внедрения невидимых робастных цифровых водяных знаков в видеопоследовательность на основе изменяемых координат маркирования спектральной области кадра // Системы управления и информационные технологии. – 2022. – №3 (89). – С. 85-88.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

5. Morkovin, S. Comparative analysis of metrics for estimating the introduced distortions in images when injection digital watermarks in the frequency spectrum / A. Filimonov, M. Rykshin, O. Tsvetkova // MIP Engineering-III 2021: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering. – 2021. № MIP_III_4016.

Свидетельство о государственной регистрации программ и патенты:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021618016. Модуль внедрения цифровых водяных знаков в изображения на основе преобразований в спектральной области / С.В. Морковин, Э.А. Яндашевская; заявители и правообладатели: С.В. Морковин, Э.А. Яндашевская; заявл. 17.05.2021; опубл. 21.05.2021.

Статьи и материалы конференций:

7. Морковин, С.В., Миняев, А.А., Мишин, А.Б. Проблема робастности невидимых цифровых водяных знаков, внедряемых в

видеоданные // Сборник трудов Всероссийской межведомственной научно-технической конференции по теоретическим и прикладным проблемам развития и совершенствования автоматизированных систем управления и связи «НАУКА И АСУ – 2021». – 2021. – С. 25–26.

8. Мишин, А.Б., Морковин, С.В. Модифицированный метод внедрения робастного невидимого цифрового водяного знака в видеоданные // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 42-49. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-42-49

9. Morkovin S.V. A method for embedding a changeable invisible digital watermark in video data // Modern Informatization problems in simulation and social technologies MIP-2022'SCT Proceedings - XXXVII 2022. – 2022. p. 126-131.