

На правах рукописи



Вильховский Данил Эдуардович

**АЛГОРИТМЫ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ИЗОБРАЖЕНИЙ С НИЗКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ
СТЕГОКОНТЕЙНЕРА**

**Специальность 2.3.6. Методы и системы защиты информации,
информационная безопасность**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Омск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, **Гуц Александр Константинович**

Официальные оппоненты:

Атласов Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГКОУ ВО «Московский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.Я. Кикотя», профессор кафедры естественных научных дисциплин учебно-научного комплекса информационных технологий

Красов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», заведующий кафедрой защищенных систем связи

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ», г. Казань

Защита диссертации состоится 02 февраля 2024 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.07 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте <https://uust.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Виноградова Ирина Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема выявления стеганографических вставок, получившая название стеганографического анализа или стегоанализа, является важной составляющей построения комплексной системы защиты информации, так как решает сразу несколько задач построения защищенных информационных систем.

Первая задача состоит в установлении факта встраивания или отсутствия встраивания информации. Большинство современных алгоритмов стегоанализа решают именно эту задачу. Вторая и третья задачи стеганографического анализа состоят в определении параметров алгоритма встраивания и извлечении встроеного сообщения с максимальной точностью. Решение третьей задачи тесно связано со второй задачей и невозможно без ее решения. Следует отметить, что для второй и третьей задач стегоанализа невозможно построение общих алгоритмов. На сегодняшний день для большинства методов стеганографического встраивания не разработаны специализированные алгоритмы, решающие вторую и третью задачи. Существующие же алгоритмы обладают невысокой точностью.

Основной целью стеганографического анализа (стегоанализа) является оценка уровня скрытности сообщения, под которой понимается невозможность обнаружения встроеного сообщения без дополнительной информации о параметрах встраивания. При этом, чем меньший уровень заполнения стегоконтейнера (меньшая по размеру маска встраивания), тем сложнее распознать наличие встраивания, чем и могут воспользоваться злоумышленники, намеренно встраивая в изображение или иной контейнер сообщения, которые имеют небольшой объем.

В связи с чем разработка новых специализированных алгоритмов стегоанализа цифровых изображений, позволяющих не только распознавать наличие встраивания, но и локализовать область встраивания для дальнейшего извлечения встроеного сообщения и эффективно работающих с низкими уровнями заполнения стегоконтейнера (низкой стегонагрузкой) является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Методы стегоанализа находятся в постоянном развитии, что, во многом, обусловлено развитием методов стеганографии.

Большой вклад в развитие методов стеганографии внесли: Т. Шарп (T.Sharp), К. Хемпстальк (Hempstalk K.), К. Чжан (X. Zhang), С. Ванг (S. Wang), Л.К. Бабенко, И.С. Вершинин, А.В. Красов, В.Н. Кустов, В.А. Райхлин, М.В. Шакурский и др.

В развитие методов стегоанализа внесли большой вклад: Н. Провос (N. Provos), Д. Фридрих (J. Fridrich), К. Салливан (K. Sullivan), Х. Фарид (H. Farid), Абденюв А.Ж., Леонов Л.С., Жилкин М.Ю. и пр. Однако анализ современных исследований в области стеганографического анализа свидетельствует о том, что наряду с имеющимися алгоритмами недостаточно разработаны специализированные алгоритмы для цветных изображений с низким заполнением стегоконтейнера, показывающие высокую эффективность при работе со встраиваниями, выполненными методом LSB-замены или методом Коха-Жао. Кроме того, большинство существующих алгоритмов стегоанализа не решают задачу локализации области встраивания.

Объектом исследования являются изображения с низким уровнем заполнения стегоконтейнера (<25%), встраивания в которые осуществлялись с помощью методов LSB-замены и Коха-Жао.

Предметом исследования являются алгоритмы обнаружения и локализации сообщений, встроеного в изображения методами LSB-замены и Коха-Жао, при низком заполнении стегоконтейнера.

Целью исследования является повышение эффективности работы методов стеганографического анализа для изображений с низким заполнением стегоконтейнера.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи исследования**:

1. Разработка алгоритма стегоанализа метода LSB-замены при низком заполнении стегоконтейнера на основе анализа битового нулевого слоя на предмет наличия уникальных последовательностей с применением алгоритма решения задачи о наибольшем пустом прямоугольнике.

2. Разработка алгоритма стегоанализа метода LSB-замены при низком заполнении стегоконтейнера на основе сравнительного анализа битового нулевого и первого слоев с использованием моделей попарного сходства, моделей доминирования, моментов изображения, а также задачи о наименьшем пустом прямоугольнике.

3. Разработка алгоритма стегоанализа метода Коха-Жао на основе анализа коэффициентов дискретного косинусного преобразования с выделением их сигнатур и применением алгоритма машинного обучения и кластеризации DBSCAN.

4. Разработка программного обеспечения, реализующего предложенные алгоритмы стегоанализа, и оценка их эффективности.

Научная новизна

1. Предложен алгоритм стеганографического анализа метода LSB-замены и локализации области встраивания при низком заполнении стегоконтейнера, основанный на анализе нулевого слоя на предмет установления областей с уникальными последовательностями пикселей с применением метода решения задачи о наибольшем пустом прямоугольнике, *отличающийся* наличием модуля предварительной обработки изображения, позволяющего выделить области, содержащие уникальные последовательности пикселей, модуля фильтрации шумов и блока автоматического поиска границ встраиваний на базе алгоритма решения задачи о наименьшем пустом прямоугольнике, что дает возможность обнаружить встроеное сообщение, а также определить его положение и размер.

По реализации данного алгоритма на языке программирования Python получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022613002 от 01.03.2022.

2. Предложен алгоритм стеганографического анализа метода LSB-замены и локализации области встраивания при низком заполнении стегоконтейнера, основанный на сравнительном анализе нулевого и первого слоев изображения, *отличающийся* наличием модуля первичной классификации изображения посредством выявления межслойных попарных несовпадений и локализации подозрительных пикселей для определения максимально широкой области возможного встраивания с применением алгоритма решения задачи о наибольшем пустом прямоугольнике с блоком рекурсивного фильтра для нивелирования случайных шумов, а также модулем локализации фактической области встраивания на основе моделей доминирования и соотношения пикселей и использовании моментов изображения для сужения области встраивания посредством последовательного отсечения излишних блоков, что дает возможность обнаружить встроеное сообщение, а также определить его положение и размер.

По реализации данного алгоритма на языке программирования Python получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022613021 от 01.03.2022.

3. Предложен алгоритм стеганографического анализа метода Коха-Жао и локализации области встраивания, основанный на анализе разниц пар коэффициентов дискретного косинусного преобразования, *отличающийся* присутствием модуля автоматической кластеризации на основании двух сигнатур, определяемых на основе разниц пар коэффициентов ДКП, и использованием алгоритма машинного обучения и кластеризации DBSCAN для выделения кластера, содержащего блоки встраивания, позволяющего определить наличие встраивания, а также его положение и размер.

По реализации данного алгоритма на языке программирования Python получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022613003 от 01.03.2022.

4. Разработан программный комплекс, позволяющий проводить стегоанализ изображений с данными, внедренными методом LSB-вставки и методом Коха-Жао.

Научная значимость результатов заключается в создании новых алгоритмов стеганографического анализа цифровых изображений, позволяющих определять наличие и локализацию встраиваний, выполненных методами LSB-замены или Коха-Жао при низком заполнении стегоконтейнера.

Практическая значимость результатов заключается в том, что разработанные алгоритмы и реализованный с их использованием программный комплекс позволяют с высокой эффективностью проводить стегоатаку на метод LSB-замены и метод Коха-Жао, при уровне стегонагрузки от 10% до 25%.

Точность обнаружения LSB-вставки в цветных искусственных изображениях с градиентной заливкой составляет 98-99%, а точность локализации встраивания составляет от 96,87 до 98,27% – вне зависимости от компоненты, в которую было осуществлено встраивание. Ложных срабатываний при анализе чистых изображений не выявлено.

Точность обнаружения LSB-вставки в цветных фотографических изображениях варьируется от 69,00% (при 10% стегонагрузке) до 88,6% (при 25% стегонагрузке), а средняя точность локализации области встраивания составляет от 85,47% до 92,37% – практически вне зависимости от компоненты, в которую было осуществлено встраивание. Процент ложных срабатываний при анализе чистых изображений составляет 3,4%.

При стегоатаке на метод Коха-Жао эффективность обнаружения встроенного сообщения практически не зависит от уровня стегонагрузки и варьируется от 98,6% (при 10% стегонагрузке) до 98,8% (при 25% стегонагрузке), а эффективность локализации области встраивания составляет 97,16 – 98,57%. Процент ложно-положительных результатов – всего 1,8%.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского, а также в системы документооборота организаций ООО Строительно-монтажный трест «Стройбетон» и ООО «РЕЙЛСТРОЙ-1520»: добавленная функция стегоанализа базы данных изображений позволил существенно повысить уровень информационной защищенности внутреннего документооборота организации.

Методы исследования. Для решения данного комплекса задач были использованы методы поддержки принятия решений, численные методы исследования функций, методы таксономии, методы теории вероятностей и математической статистики, теории информационной безопасности и защиты информации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм анализа цветных искусственных цифровых изображений на наличие LSB-вставок и локализации области встраивания на основе анализа нулевого слоя на предмет наличия уникальных последовательностей пикселей с применением задачи о наибольшем пустом прямоугольнике.

2. Алгоритм анализа цветных фотографических цифровых изображений на наличие LSB-вставок и локализации области встраивания на основе сравнительного анализа нулевого и первого слоев изображения на предмет выявления межслойных попарных несовпадений с использованием моделей доминирования пикселей, моментов изображения и применением задачи о наибольшем пустом прямоугольнике.

3. Алгоритм анализа цифровых изображений на наличие вставок методом Коха-Жао и локализации области встраивания на основе анализа разниц пар коэффициентов дискретного

косинусного преобразования с выделением двух сигнатур и применением алгоритма машинного обучения и кластеризации DBSCAN.

4. Программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы.

Степень достоверности научных положений и выводов обоснована корректной постановкой задач, отсутствием внутренних и иных противоречий, адекватностью применяемых методов результатами, полученными в процессе тестирования разработанных алгоритмов, апробацией на научных конференциях, публикацией результатов в ведущих рецензируемых научных изданиях, государственной регистрацией программ для ЭВМ, а также внедрением разработанного на основе данных алгоритмов программного комплекса в деятельность организаций ООО Строительно-монтажный трест «Стройбетон» и ООО «РЕЙЛСТРОЙ-1520» для анализа изображений на наличие стеганографических вставок.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: IV Всероссийская научная конференция «Омские научные чтения» (Омск, 2020), XV Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2021), IX Международная научная конференция «Математическое и компьютерное моделирование» (Омск, 2021), XI Всероссийская научно-практическая конференция «Молодые учёные России» (Пенза, 2022), IX Научно-практическая конференция с международным участием «Новые горизонты» (Брянск, 2022), XXVI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР – 2022» (Томск, 2022), 23 всероссийский конкурс-конференция студентов и аспирантов SIBINFO-2023, Научная сессия ТУСУР (Томск, 2023).

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность:

п.6. Методы, модели и средства мониторинга, предупреждения, обнаружения и противодействия нарушениям и компьютерным атакам в компьютерных сетях.

Личный вклад соискателя

В диссертации используются результаты, в получении которых основная роль при постановке и решении задач, а также тестировании алгоритмов и обобщении полученных данных принадлежит автору. Ряд публикаций написан в соавторстве с Гуцом А.К.

Публикации результатов работы. По материалам исследования опубликовано 15 работ, в том числе 3 работы в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК (квартили К2 и К3), 1 работа в научном издании входящем в перечень изданий, индексируемых базой данных zbMATH, 2 работы в изданиях, индексируемых в базе Scopus, 6 публикаций в материалах конференций, получено 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы и приложения. Основной текст диссертации изложен на 147 страницах, содержит 24 рисунка, 9 таблиц, 6 приложений. Список литературы включает в себя 157 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень её разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования, определяются методологические основания исследования, теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе проводится обзор основных методов и алгоритмов стеганографического анализа изображений, показаны их основные характеристики, преимущества и недостатки.

Наибольшее распространение для пространственной области встраивания получили алгоритмы, основанные на методе замены наименее значащего бита (LSB-замены). Для частотной области встраивания наиболее распространены алгоритмы с использованием дискретного косинусного преобразования, основанные на алгоритме Коха-Жао, так как они обеспечивают максимальную скрытность встраиваемой информации.

Алгоритмы стегоанализа можно разделить на общие и специализированные. Общие алгоритмы предназначены для обнаружения факта встраивания без уточнения метода встраивания. Общие алгоритмы основываются на предположениях о статистических характеристиках исходного изображения, которые изменяются при внедрении стеганографической вставки.

Специализированные алгоритмы стегоанализа привязаны к методу встраивания. В этом случае сначала делается предположение об используемом стеганографическом методе, после чего выполняется проверка наличия встроенных данных. Существующие алгоритмы стегоанализа основаны на статистических методах и эффективны только при заполнении стегоконтейнера более чем на 25%. При более низких показателях заполнения вероятность обнаружения наличия стеганографической вставки не превышает 30%. Если заполнение стегоконтейнера не превышает 25%, то статистические характеристики изображения со вставкой отличаются от исходного изображения не более чем на 7% и сопоставимо с погрешностями используемого метода. Кроме этого, статистические методы не позволяют определять положение области встраивания на изображении и ее размер.

Во второй главе представлен алгоритм определения наличия, размеров и положения областей встраивания, выполненных методом LSB-замены, в цветных искусственных изображениях на основе анализа нулевого битового слоя. Алгоритм основан на том факте, что в нулевом слое областей равномерной и градиентной заливки исходного изображения-контейнера наблюдаются повторяющиеся, т.е. не уникальные последовательности нулевых и единичных битов, тогда как встраиваемое сообщение изменяет характер последовательности нулевых и единичных битов нулевого слоя, инвертируя их в уникальные, т.е. неповторяющиеся последовательности в области встраивания.

Нулевой слой представляет собой матрицу из нулей и единиц. Для построения алгоритма обнаружения и автоматического выделения области встраивания сообщения в нулевой слой сделаем некоторые предположения: прямоугольная область встраивания имеет пересечение с областью равномерной или градиентной заливки изображения стегоконтейнера от 10 до 25%; стороны прямоугольной области встраивания параллельны сторонам изображения стегоконтейнера; встраиваемое сообщение представляет собой поток битов с распределением нулей и единиц, близким к равномерному.

Работа алгоритма обнаружения и локализации области встраивания основывается на особенностях комбинаций пикселей нулевого слоя в чистых областях с градиентной заливкой и областях встраивания. Так в искусственных изображениях с градиентной заливкой карта битов нулевого слоя представляет собой множество повторяющихся комбинаций единичных и нулевых битов, тогда как LSB-встраивания – это множество неповторяющихся (т.е. уникальных) комбинаций пикселей.

В общем виде алгоритм состоит из трех этапов.

Этап 1. Установление принадлежности пикселя изображения к уникальной или повторяющейся комбинации битов нулевого слоя

Шаг 1. В первоначальном изображении последовательно выделяются блоки размером 5×5 пикселей таким образом, чтобы исследуемый пиксель являлся центральным для этого блока. Для каждого i -го блока последовательность битов S_i записывается в виде двоичного кода.

Шаг 2. По каждому i -му блоку (где $i = (1; n)$) производится последовательное сравнение содержащейся в блоке комбинации последовательностей S_i с комбинациями последовательностей S_j других блоков и классификация пикселя как пикселя как входящего в уникальную или неуникальную последовательность:

Если последовательность S_i анализируемого блока совпадает хотя бы один раз с какой-либо последовательностью S_j других блоков, блок считается неуникальным, а его центральному пикселю присваивается единичное значение. В противном случае блок считается уникальным, а его центральному пикселю присваивается нулевое значение.

В результате составляется матрица M_0 , в которой в бинарном виде записана принадлежность пикселя:

- значение 1 – пиксель входит в повторяющуюся последовательность;
- значение 0 – пиксель входит в уникальную последовательность.

Этап 2. обработка значений матрицы M_0 специально разработанным фильтром с целью устранения шумов.

Шумом следует считать такой пиксель, который был классифицирован как центральный пиксель блока с повторяющейся последовательностью, но при этом расположенный среди пикселей, классифицированных как центральные пиксели блоков с уникальной последовательностью. И наоборот.

Шаг 1. В матрице M_0 для каждого пикселя с единичным значением выделяются блоки размерностью 5×5 .

Шаг 2. В каждом из выделенных блоков, производится последовательное сравнение значения исследуемого i -ого пикселя со значениями других пикселей, входящих в этот блок. Если более чем 70% всех пикселей, принадлежащих анализируемому блоку, имеют нулевые значения, исследуемый пиксель считается зашумленным и ему присваивается нулевое значение. Иначе – значение пикселя остается неизменным, единичным.

В результате, будет сформирована новая матрица M_1 , не содержащая шумов.

Этап 3. Определение области с повышенной концентрацией уникальных комбинаций битов нулевого слоя – локализация области встраивания.

Пусть встраиваемое сообщение имеет размеры $X \times Y$. Необходимо извлечь такие пиксели, которые имеют нулевое значение и формируют монолитный кластер, расположенный в границах пикселей с единичным значением. Таким образом, область встраивания будет определена в виде прямоугольника с координатами (x_1, y_1) по левому верхнему углу и (x_2, y_2) по правому нижнему углу, все пиксели которого принадлежат только уникальным последовательностям. Значения координат можно найти путем решения задачи о наибольшем пустом прямоугольнике, после чего осуществляется окончательная верификация выделенной области на наличие встраивания. Проведенные эмпирические исследования показали, что площадь области сосредоточения пикселей, входящих в уникальную последовательности, в чистых изображениях не превышает 1% от общей

площади анализируемого изображения. Таким образом, выделенная область считается областью встраивания, если выполняется следующее условие $S_1 \geq 0.01 \times S_0$, где S_1 – площадь выделенной области, а S_0 – общая площадь анализируемого изображения.

Компьютерный эксперимент проводился для 100цветных искусственных изображений с градиентной заливкой. Встраиваемое сообщение представляло собой текстовую строку, область встраивания прямоугольная. Для встраивания поочередно использованы красная, зеленая и синяя компоненты – для каждого изображения. Уровень стегонагрузки составлял 25% и 10% – для каждого изображения и каждой компоненты. Также, каждое из ста изображений подвергалось исследованию при полном отсутствии встраивания (чистые изображения).

Эффективность обнаружения СГВ с заполнением стегоконтейнера в 25% составляет 99%, а эффективность обнаружения СГВ с заполнением стегоконтейнера всего в 10% составляет 98%, что превышает эффективность статистических методов, применяемых для высоких значений заполнения стегоконтейнера. Применение алгоритма задачи о наибольшем пустом прямоугольнике даёт возможность локализовать область встраивания в автоматическом режиме. При этом для искусственных изображений границы области встраивания могут быть определены с погрешностью, не превышающей 1,73%, для стегоконтейнера в 25%, и 3,13%, для стегоконтейнера в 10%, что означает, что алгоритм способен выявить только, соответственно, 98,27% и 96,87% пикселей с подмененным младшим битом. Аналогичные алгоритмы определения положения зашумленных пикселей допускают ошибку до 36%. При этом эффективность алгоритма не зависит от компоненты, в которую было произведено встраивания.

В третьей главе представлен алгоритм определения наличия и локализации областей встраивания, выполненных методом LSB-замены, в цветных фотографических изображениях на основе сравнительного анализа нулевого и первого битового слоев. Алгоритм основан на подтверждаемой гипотезе о преимущественном повторении в первом слое закономерностей, присутствующих в нулевом слое исходного изображения-контейнера. Для поиска пикселей с замененным нулевым битом анализируется нулевой и первый слои каждой из компонент на предмет наличия межслойного попарного сходства пикселей и их соседей, а также межслойного изменения в моделях доминирования белых пикселей. Для локализации области встраивания используется гипотеза о сущности встраивания как случайном наборе пикселей с единичными и нулевыми значениями и анализируется нулевой слой выделенной области предполагаемого встраивания на предмет удовлетворения условию равного (или близко к равному) соотношения единиц и нулей.

Алгоритм определения наличия LSB-вставок в цветных фотографических изображениях состоит из трех этапов.

Этап 1. Анализ сохранения структуры изображения между его нулевым и первым слоями с использованием трех сигнатур:

- K_1 – сигнатура горизонтальной структуры изображения попарные значения анализируемого бита и его соседа справа;
- K_2 – сигнатура вертикальной структуры изображения попарные значения анализируемого бита и его соседа снизу;
- K_3 – сигнатура диагональной структуры изображения попарные значения анализируемого бита и его соседа по диагонали справа.

Шаг 1. Разделим нулевой и первый слои исследуемого изображения на блоки с окном 10. Установим координаты каждого из пикселей для каждого блока.

Шаг 2. Осуществим строгое закрепление областей сравнения.

Шаг 3. Произведем анализ пикселей попарных блоков по сигнатурам $K_1 - K_3$ на предмет удовлетворения сигнатур нулевого и первого слоев следующему условию: $K_1^{(ij)^0} = K_1^{(ij)^1}$, $K_2^{(ij)^0} = K_2^{(ij)^1}$, $K_3^{(ij)^0} = K_3^{(ij)^1}$, где $K_1^{(ij)^0}$ – сигнатура K_1 по пикселю нулевого слоя с координатами (i;j); $K_1^{(ij)^1}$ – сигнатура K_1 по пикселю первого слоя с координатами (i;j); $K_2^{(ij)^0}$ – сигнатура K_2 по пикселю нулевого слоя с координатами (i;j); $K_2^{(ij)^1}$ – сигнатура K_2 по пикселю первого слоя с координатами (i;j); $K_3^{(ij)^0}$ – сигнатура K_3 по пикселю нулевого слоя с координатами (i;j); $K_3^{(ij)^1}$ – сигнатура K_3 по пикселю первого слоя с координатами (i;j).

Для каждого блока вводим внутренний счетчик k_i . Для каждого выполнения условия (6) значение счетчика повторений увеличивается на единицу.

Шаг 4. Рассчитаем средний удельный вес попарных совпадений $\bar{\partial}_i$ для каждого i -го блока

анализируемого изображения:
$$\bar{\partial}_i = \frac{k_i}{3 \times 81}$$

Шаг 5. Вычисляем минимально допустимый удельный вес попарных совпадений $\omega = \bar{X} + S$, где \bar{X} – среднее арифметическое значение по выборке; S – среднеквадратичное отклонение значений по выборке.

является выполнения условия

Шаг 6. Прогоняем значения каждого из блоков по приведенному выше критерию $\bar{\partial}_i \leq 0.2$ (критерию включения блока в выборку). Если $\bar{\partial}_i > \omega$, то блок считается условно чистым и имеет значение 1, иначе – считается, что блок может содержать встраивание (условное стего) и ему присваивается значение 0. В результате получаем карту блоков изображения с разделением блоков на условно чистые и условные стего.

Этап 2. Анализ условно чистых блоков рекурсивным с целью их дополнительной верификации.

Часть блоков, содержащих встраивание, может иметь высокую сохраняемость структуры изображения, и, следовательно изначально могут быть классифицированы как условно чистые. Такие блоки являются шумами. Подобные ложно-негативные блоки носят случайный единичный характер, тогда как истинно устойчивые сохранения структуры имеют тенденцию к кластеризации.

Рекурсивный фильтр позволяет осуществить проверку условно-чистых блоков на предмет вхождения их в кластеры размерностью не менее 2×2 , тем самым, верифицировать их чистоту. Алгоритм рекурсивного фильтра имеет следующий вид.

Шаг 1. Составляем 3 списка:

- список А – список всех блоков, определённых как условно-чистые, т.е. не содержащие встраивание;
- список Б – список всех блоков, определённых как условно-стего, т.е. потенциально содержащие встраивание;
- список В – список блоков, которые следует проанализировать на предмет их вхождения в кластер с заданными параметрами.

Шаг 2. Из списка В случайным образом выбирается i -ый блок для анализа.

Шаг 3. Проводится анализ 8 близлежащих соседей выбранного i -го блока:

А) Если ни один из соседствующих блоков не является чистым, значение анализируемого блока инвертируется как блок, потенциально содержащий встраивание, и заносится в список Б, и исключается из списков В и А.

Б) Если собирается квадрат 2×2 из чистых блоков, то анализируемый блок и все из соседствующих с ним чистых блоков отмечаются как новосформированный кластер. Поочередно для каждого из соседствующих блоков запускается рекурсивная функция с аналогичным алгоритмом, блок, являющийся точкой входа, отмечается как блок, обработанный фильтром, и исключается из списка В. Кластер может быть расширен по мере обработки блоков. Формирование кластера завершено, если следующий анализируемый блок и его соседи не формируют квадрат 2×2 . Последний анализируемый блок исключается из списка В, но остается в списке А.

В) Если хотя бы один из соседствующих блоков также является чистым блоком, но при этом условие для формирования кластера не выполняется, рекурсивная функция запускается для найденного чистого соседствующего блока, а сам блок, являющийся точкой входа, отмечается как блок, обработанный фильтром, и исключается из списка В. Если рекурсия не обнаруживает ни одного случая выполнения условия кластеризации, значения всей цепочки блоков инвертируются в блоки, потенциально содержащие встраивание. Данные блоки исключаются из списка А и В и включаются в список Б. После чего алгоритм возвращается к шагу 2.

Работа алгоритма завершается при условии отсутствия новой точки входа.

Этап 3. Выявление максимально широкой области возможного встраивания и окончательная верификация изображения на предмет встраивания.

Шаг 1. Решение задачи о наибольшем пустом прямоугольнике – позволяет выявить наибольший по площади прямоугольный массив условных стего-блоков, заключенный между чистыми блоками.

Шаг 2. Верификация изображения на предмет встраивания с использованием моделей доминирования белых/черных пикселей:

1. Для нулевого слоя предполагаемой области встраивания по каждому пикселю формируется блок вхождения, т.е. блок, образованный этим пикселем и его 8 окружающими соседями.

2. В каждом блоке вхождения осуществляется подсчет количества белых пикселей с записью модели их доминирования m_i^0 .

3. Результаты выявленных моделей доминирования заносятся в структуру данных.

4. Действия 1-3 выполняются для пикселей первого слоя предполагаемой области встраивания. Модель доминирования белых пикселей в блоке вхождения первого слоя выделенной области предполагаемого встраивания обозначена как m_i^1

5. Формируется список пикселей первого слоя, обнаруживающих модели типа $m_i^1 = 0$, $m_i^1 = 1$, $m_i^1 = 8$ и $m_i^1 = 9$.

6. По каждому пикселю из сформированного ранее списка производится сравнение моделей m_i^0 и m_i^1 . Если $(m_i^1 - m_i^0) \leq |3|$, то считается, что изменение модели доминирования белых пикселей в блоке вхождения по исследуемому пикселю находится в пределах нормы, т.е. пиксель является неизменным. Иначе – считается, что изменение модели доминирования белых пикселей в блоке вхождения по исследуемому пикселю превышает допустимые отклонения, пиксель является измененным.

В результате формируется массив пикселей с изменениями в моделях доминирования.

7. Для выделенной области предполагаемого встраивания осуществляется расчет момента изображения MI с использованием массива измененных пикселей, на основании которого

осуществляется окончательная верификация на предмет встраивания. Если координаты момента MI соответствуют центральным координатам исследуемой области в пределах допустимых значений, то изображение чистое. Иначе – изображение содержит встраивание.

Алгоритм локализации области встраивания основывается на особенностях встраивания как случайного набора пикселей со значениями 1 и 0 и гипотезе о соотношении 1 и 0 на участках встраивания, близком к 0,5.

1. Разбивка ранее выделенной предполагаемой области встраивания на блоки размерностью 20×20 .

2. Для каждого блока рассчитывается показатель плотности единичных значений $p'_i = \frac{Q_1}{Q}$, где Q – общее количество пикселей в исследуемой области; Q_1 – количество пикселей в исследуемой области, имеющих единичное значение. Если значение $p' \leq 0.5$ то $p = p'$. Если значение $p' > 0.5$, то $p_i = 1 - p'_i$.

3. По каждому блоку анализируется показатель плотности единичных значений p . Если $p = 0.5$, блок классифицируется как блок, возможно содержащий встраивание и ему присваивается значение $(255, 0, 0)$. Иначе – блок классифицируется как не содержащий встраивание и ему присваивается одно значение $(x, 0, 0)$, где значение x определяется по формуле $x = 255 \times 2 \times p$.

В результате формируется карта блоков выделенной предполагаемой области встраивания.

4. Для исходного массива рассчитывается средняя плотность блоков $\bar{p} = \frac{\sum_1^n p_i}{F \times G}$, где $F \times G$ – общее количество блоков в анализируемой области.

5. Используя стандартную функцию, определяется центр масс анализируемой области – CM с координатами $(x_{CM}; y_{CM})$. Критерий для вычисления центра масс – плотность единичных значений p_i в блоках.

6. Координаты центра масс $(x_{CM}; y_{CM})$ сравниваются со значениями центральных координат $(x_0; y_0)$ по формулам $\Delta x = \left| \frac{x_{CM} - x_0}{x_0} \right|$ и $\Delta y = \left| \frac{y_{CM} - y_0}{y_0} \right|$. Отклонение центра масс

изображения от центрального значения означает существование блоков, не содержащих встраивание и имеющих плотность p меньше 0,5. Определяются стратегии сужения области исследования:

- Стратегия 1 – отсечение по x справа;
- Стратегия 2 – отсечение по x слева;
- Стратегия 3 – отсечение по y снизу;
- Стратегия 4 – отсечение по y сверху;

На основании проведенных сравнений алгоритмом принимается одно из следующих решений. Если $\Delta x = \Delta y = 0$ выделенная область является областью встраивания в полном объеме. Иначе – если $\Delta x > \Delta y$, то: если $\Delta x < 0$, то применяется Стратегия 1; иначе – применяется Стратегия 2; если $\Delta x < \Delta y$, то если $\Delta y < 0$, то применяется Стратегия 3; иначе – применяется Стратегия 4.

7. Полученный после реализации выбранной стратегии массив MS_i запоминаем как новый массив

8. Для нового массива MS_i рассчитывается средняя плотность блоков \bar{p}_{MS_i}

9. Производится сравнение средней плотности блоков исходного и нового массивов. Если $P_{MS_i} > P_{MS_{i-1}}$, то принимается решение об использовании нового массива в качестве фокусного, продолжается реализация выбранной стратегии. Иначе – в качестве фокусного остается ранее выделенный массив, вновь выполняются шаги 4-9.

Компьютерный эксперимент проводился для цветных фотографических изображений. Общее количество изображений составило 500. Встраиваемое сообщение представляло собой текстовую строку, представленную в виде последовательности битов, область встраивания прямоугольная. Для встраивания были поочередно использованы красная, зеленая и синяя компоненты – для каждого изображения. Уровень стегонагрузки составлял 25% и 10% – для каждого изображения и каждой компоненты. Также, каждое из изображений подвергалось исследованию при полном отсутствии встраивания (чистые изображения).

В среднем, эффективность обнаружения СГВ с заполнением стегоконтейнера на 25% и 10% по компонентам составляет, соответственно 88,53% и 69,07%, что сопоставимо с эффективностью существующих методов стегоанализа с привлечением машинного обучения, где подобные результаты описываются только для 25% уровня заполнения стегоконтейнера. Алгоритм позволяет локализовать область встраивания в автоматическом режиме. Для цветных фотографических изображений границы области встраивания могут быть определены с точностью, в среднем, 92,37%, для стегоконтейнера, заполненного на 25%, и 85,47%, для стегоконтейнера, заполненного на 10%, что означает, что алгоритм оставляет невыявленными всего, соответственно, 7,57% и 14,53% пикселей с подмененным младшим битом. Эффективность алгоритма не зависит от компоненты, в которую было произведено встраивание.

В четвертой главе представлен алгоритм выявления стеганографических вставок в изображение, встраиваемых с помощью метода Коха-Жао в непрерывную область изображения.

Алгоритм стеганографического анализа основан на выявлении коэффициентов ДКП, в которые осуществлялось встраивание. Разделим изображение на блоки B_i ($i = 1, \dots, N$) размером 8×8 пикселей. Для каждого блока B_i ($i = 1, \dots, N$) рассчитаем коэффициенты ДКП. Результат – совокупность матриц коэффициентов D_i ($i = 1, \dots, N$) с размером 8×8 . Далее для каждой из матриц необходимо произвести расчет разницы пар коэффициентов ДКП, анализ которых впоследствии будет проводиться предлагаемым алгоритмом.

Алгоритм осуществляет атаку среднечастотных коэффициентов ДКП – компоненты (3, 4) и (4, 3) – как частот, наиболее безопасных для встраивания.

Сформируем последовательность, элементы которой есть разницы пар среднечастотных коэффициентов ДКП. Алгоритм использует следующие сигнатуры:

— $P_i = C^{max} - |C_i|$, где C^{max} – модульное максимальное значение разницы пар среднечастотных коэффициентов ДКП среди всех элементов анализируемой последовательности;

$|C_i|$ – модульное значение разницы пар среднечастотных коэффициентов ДКП текущего элемента анализируемой последовательности.

— $R_i = C_i - C_{i+1}$, где C_i – значение разницы пар среднечастотных коэффициентов текущего (т.е. исследуемого) элемента анализируемой последовательности; C_{i+1} – значение разницы пар среднечастотных коэффициентов последующего элемента анализируемой последовательности.

Исследуемый i -й элемент может являться блоком, не содержащим СГВ, если значение его отклонения P_i стремится к значению C^{max} всей анализируемой последовательности (существенное

отклонение по сигнатуре). Исследуемый i -й элемент может являться блоком, содержащим СГВ, если значение его отклонения P_i стремится к минимальному значению среди всех значений по анализируемой последовательности $P_i \rightarrow P_{\min}^j$ (несущественное отклонение по сигнатуре).

Исследуемый i -й элемент может являться границей встраивания, если значение его R_i -сигнатуры стремится к значению C^{max} всей анализируемой последовательности (существенное отклонение по сигнатуре). Исследуемый i -й элемент может не являться границей встраивания, если значение его R_i -сигнатуры стремится к своему минимальному значению среди значений по всей анализируемой последовательности, $R_i \rightarrow R_{\min}^j$ (несущественное отклонение по сигнатуре).

Таким образом, условием отнесения анализируемого элемента исследуемой последовательности к элементу, содержащему встраивание, является следующее условие строгого логического И – $P_i \rightarrow P_{\min}^j ; R_i \rightarrow R_{\min}^j$.

Локализация области встраивания основана на разделении всех элементов последовательности на кластеры (кластеризация) и проводится с использованием алгоритма машинного обучения и кластеризации DBSCAN. Сигнатура P_i соответствует характеристикам оси OX , а сигнатура R_i соответствует характеристикам оси OY .

Алгоритм локализации области встраивания выглядит следующим образом:

1. Первоначальное изображение разбивается на блоки размером 8×8 пикселей.
2. К каждому блоку применяется ДКП, результат – матрицы коэффициентов D_i ($i = 1, \dots, N$; N – количество блоков) размером 8×8 .
3. На основе матрицы коэффициентов, полученных на предыдущем этапе, строится новая последовательность J_i , содержащая модульные значения разниц пар найденных коэффициентов.
4. В последовательности J_i выделяется максимальное значение C^{max} .
5. Вычисляются сигнатуры P_i и R_i для каждого элемента последовательности последовательность J_i согласно выражениям (16) и (17) с одновременным выделением их минимальных значений P_{\min}^j и R_{\min}^j .
6. Значение указанных сигнатур подаются на вход алгоритму кластеризации DBSCAN.
7. Задаются параметры EPS и MIN SAMPLES и запускается алгоритм кластеризации DBSCAN.
8. Анализируются выделенные кластеры. Если один или несколько элементов, принадлежащих анализируемому кластеру, удовлетворяют условию $P_i = P_{\min}^j ; R_i = R_{\min}^j$, то данный кластер следует считать кластером, в котором сгруппированы блоки, содержащие встраивание, всем блокам кластера присвоить значение 1. Иначе – кластер не содержит коэффициенты, в которые осуществлялось встраивание, всем блокам кластера присваивается значение 0.
9. Для нейтрализации шумов, не включаемых алгоритмом DBSCAN ни в один из кластеров, проводится дополнительная обработка полученных данных при помощи фильтра, аналогичному

фильтру, применяемому в рамках стегоанализа цветных искусственных изображений с градиентной заливкой, что позволит дополнительно выявить блоки изображения, содержащие встраивание.

10. Итоговая локализация области встраивания производится методом решения задачи о наибольшем пустом прямоугольнике.

Компьютерный эксперимент проводился для цветных фотографических изображений на основе библиотеки изображений Беркли (Berkeley Segmentation Data Set and Benchmarks 500, BSDS500). Общее количество изображений составило 500 изображений в формате JPEG. Уровень стегонагрузки составлял 25% и 10% – для каждого изображения. Также, каждое изображение подвергалось исследованию при полном отсутствии встраивания (чистые изображения).

Эффективность обнаружения наличия СГВ, в среднем, составляет – 98,7% (фактически варьируется от 98,6% до 98,8%). Эффективность локализации области встраивания, в среднем, составляет 97,87% (фактически варьируется от 97,16% до 98,57%). Тестирование показало, что ошибки ложного определения наличия СГВ в пустом стегоконтейнере не превышают 1,8%. Предлагаемый алгоритм позволяет точно извлекать СГВ при его обнаружении и практически одинаково работает с любым уровнем стегонагрузки и любым количеством областей встраивания.

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные выводы и обобщающие результаты.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм стегоанализа метода LSB-замены в цветных искусственных изображениях на основе анализа нулевого слоя. Предложенный алгоритм позволяет определять наличие СГВ, ее положение и размер. Данный алгоритм эффективен при наличии пересечения области встраивания с достаточно небольшой областью градиентной или равномерной заливки на исходном изображении. Так, тестирование предложенного алгоритма показало его высокую эффективность при работе с изображениями, уровень стегонагрузки которых составляет 10 – 25%. Точность определения наличия встраивания составляет 98% при работе с 10% уровнем стегонагрузки и 99% при работе с уровнем стегонагрузки в 25%. При этом, алгоритм способен безошибочно распознать чистое изображение (ложно-положительные результаты отсутствуют). Точность локализации области встраивания составляет 96,87–98,27% с минимальной погрешностью при работе с 25% уровнем стегонагрузки и максимальным при работе с 10% уровне стегонагрузки. Эффективность разработанного алгоритма идентична при атаке на встраивание в любую компоненту как по точности классификации, так и по точности локализации.

По реализации данного алгоритма на языке программирования Python получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022613002 от 01.03.2022.

2. Разработан алгоритм стегоанализа метода LSB-замены в цветных фотографических изображениях на основе анализа нулевого и первого битовых слоев. Предложенный алгоритм позволяет определять наличие СГВ, ее положение и размер и показывает высокую эффективность при работе с изображениями с низким уровнем заполнения стегоконтейнера (10-25%). Тестирование алгоритма установило, что эффективность обнаружения LSB-вставок составляет 78,8% (максимальная эффективность в 88,53% достигается при работе со стегоконтейнером, в котором была произведена замена в 25% и более младших битов; минимальная эффективность наблюдается при работе с 10% уровнем стегонагрузки – 69,07% в среднем). Алгоритм верно выделяет в среднем 88,92% пикселей с замененным младшим битом (от 92,37% при стегонагрузке в 25% до 85,47% при стегонагрузке в 10%). Ложные срабатывания при работе с чистыми изображениями в среднем

составляют 3,4%. Эффективность точности классификации и локализации идентична при атаке на встраивание в любую компоненту.

По реализации данного алгоритма на языке программирования Python получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022613021 от 01.03.2022.

3. Разработан алгоритм стегоанализа метода Коха-Жао на основе анализа коэффициентов дискретного косинусного преобразования. Показано, что стеганографический алгоритм Коха-Жао не является устойчивым к атаке анализа коэффициентов ДКП. Предложенный алгоритм позволяет определять границы встроеного сообщения. Тестирование на коллекции изображений показало, что ошибки ложного определения наличия СГВ в пустом стегоконтейнере составляют 1,8%. Средняя эффективность обнаружения наличия встроеного сообщения составляет 98,7%. Средняя точность локализации области встраивания составляет 97,87%. Эффективность разработанного алгоритма практически идентична при стегоатаках с любым уровнем заполнения стегоконтейнера.

По реализации данного алгоритма на языке программирования Python получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022613003 от 01.03.2022.

4. Реализован и протестирован программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы. Благодаря разработанному программному комплексу представилось возможным провести оценку эффективности предложенных алгоритмов стегоанализа.

Программный комплекс принят к внедрению в системы документооборота организаций ООО Строительно-монтажный трест «Стройбетон» и ООО «РЕЙЛСТРОЙ-1520». В результате внедрения повысилась функциональность приложения, добавлена функция анализа изображений на наличие стеганографических вставок.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в:

1. Совершенствовании представленных алгоритмов с целью обеспечения высокой эффективности на предмет выявления встраивания и локализации области встраивания при работе со стегонагрузкой, в сумме составляющей 10 – 25%, но разбитой на 2-5 областей встраивания.

2. Совершенствовании представленных алгоритмов с целью обеспечения высокой эффективности на предмет выявления встраивания и локализации области встраивания при работе с общей стегонагрузкой менее 10%, как составляющих единую область встраивания, так и разбитой на 2-3 области встраивания.

3. Разработке алгоритмического обеспечения стеганографического анализа, позволяющего извлекать встроеное сообщение из выделенной области.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI:

1. Вильховский Д.Э. Метод обнаружения LSB-вставок в цветных фотографических изображениях с низким заполнением стегоконтейнера // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2022. – № 1(49). – С. 68-76. – DOI: 10.48612/jisp/f7z9-ttke-gv81.

2. Вильховский Д.Э. Метод обнаружения стеганографических вставок, встроённых методом Коха-Жао, в изображениях с низким заполнением стегоконтейнера // Вопросы защиты информации. – 2022. – №1(136). – С. 38-42. –DOI: 10.52190/2073-2600_2022_1_38.

3. Вильховский Д.Э., Гуц, А.К. Метод обнаружения LSB-вставок в искусственных цветных изображениях с градиентной заливкой с низким заполнением стегоконтейнера // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2022. – № 1 (43). – С. 43-49. – DOI: 10.14529/secur220106.

Публикации в научных изданиях, индексируемых международными базами данных, перечень которых определен в соответствии с рекомендациями ВАК

4. Вильховский Д.Э. Обзор методов стеганографического анализа изображений в работах зарубежных авторов // Математические структуры и моделирование. – 2020. – №4(56). – С. 75–102. – DOI: 10.24147/2222-8772.2020.4.75-102.

Публикации в изданиях, включенных в международную базу Scopus

5. Vilkhovskiy D.E. Steganalysis for LSB inserts in low stego-payload artificial color images / // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – Vol. 2182. – DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012102.

6. Vilkhovskiy D.E. Steganalysis for DCT inserts with the Koch-Zhao steganographic method in low stego-payload images / // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – Vol 2182. – DOI: 10.1088/1742-6596/2182/1/012101.

Другие публикации по теме диссертации

7. Вильховский Д.Э. Алгоритм стегоанализа цветных искусственных изображений // В сборнике: Молодые учёные России: сборник статей XI Всероссийской научно-практической конференции (Пенза, 12 февраля 2022г.). С. 39-41.

8. Вильховский Д.Э. Стеганографический анализ изображений на предмет обнаружения вставок, выполненных методом КОХА-ЖАО // В сборнике: Математическое и компьютерное моделирование. Сборник материалов IX Международной научной конференции, посвященной 85-летию профессора В.И. Потапова. Омск, 2021. С. 319-321.

9. Вильховский Д.Э. Стеганографический анализ искусственных изображений на предмет обнаружения LSB-вставок // В сборнике: Математическое и компьютерное моделирование. Сборник материалов IX Международной научной конференции, посвященной 85-летию профессора В.И. Потапова. Омск, 2021. С. 316-318.

10. Вильховский Д.Э. Алгоритм стеганографического анализа в противодействие методу LSB-замены для фотографических изображений с низким уровнем стегонагрузки // В сборнике: Новые горизонты. сборник докладов / под общей редакцией О. М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ, 2022. – 653 с.

11. Вильховский Д.Э. Алгоритм стегоанализа цветных изображений в противодействие методу Коха–Жао // В сборнике: Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 18–20 мая 2022 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 2. – 248 с.

12. Вильховский Д.Э. Стегоаналитический комплекс для работы с изображениями с низкой стегонагрузкой // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2023. № 1-3. С. 42-46.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Вильховский Д.Э. Обнаружение LSB-вставок в искусственных цветных изображениях с градиентной заливкой с низким заполнением стегоконтейнера: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – № 2022613002; заявл. 07.02.2022; опубл. 01.03.2022.

2. Вильховский Д.Э. Обнаружение LSB-вставок в цветных фотографических изображениях с низким заполнением стегоконтейнера: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – №2022613021; заявл. 07.02.2022; опубл. 01.03.2022.

3. Вильховский Д.Э. Обнаружение стеганографических вставок, встроенных методом Коха-Жао, в изображениях с низким заполнением стегоконтейнера: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – № 2022613003; заявл. 07.02.2022.; опубл. 01.03.2022.

Диссертант



Д.Э. Вильховский