

ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

PROCESSING AND TRANSMISSION OF INFORMATION

УДК 003.26+004.56+004.627

Н. В. Попеня, Д. М. Романенко

Белорусский государственный технологический университет

МЕТОД АДАПТИВНОЙ ВИДЕОСТЕГАНОГРАФИИ ДЛЯ H.264-СЖАТЫХ ВИДЕОПОТОКОВ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯЦИИ DCT-КОЭФФИЦИЕНТОВ И АНАЛИЗА СТАБИЛЬНОСТИ СЦЕН

Статья посвящена разработке и исследованию робастного метода видеостеганографии, предназначенного для работы с видеосигналами, подверженными сжатию с потерями по стандарту H.264/AVC. Предлагаемый метод решает проблему низкой устойчивости классических подходов, таких как LSB (Least Significant Bit), путем встраивания данных в частотной области. Основой метода является модуляция индекса квантования (Quantization Index Modulation, QIM) для коэффициентов дискретного косинусного преобразования (DCT) в канале яркости (Y) цветового пространства YCrCb. Для повышения скрытности и надежности применяется гибридный адаптивный подход. Ключевым элементом является двухпроходный алгоритм: на первом проходе выполняется анализ видеопотока для построения «плана встраивания» без внесения изменений. В ходе анализа идентифицируются стабильные кадры с помощью алгоритма Лукаса – Канаде, и для каждого кадра вычисляется коэффициент надежности, на основе которого адаптивно подбирается шаг квантования для QIM. Дополнительно, с помощью фильтра Лапласа, анализируется текстура кадра для выбора только наиболее подходящих для модификации блоков. На втором проходе выполняется непосредственное встраивание данных. Проведенные эксперименты демонстрируют высокую устойчивость: итоговый коэффициент битовых ошибок (BER) составляет менее 10–20% даже после сжатия кодеком H.264 (libx264, 10000 кбит/с). Анализируются компромиссы между емкостью, устойчивостью и скрытностью путем варьирования ключевых параметров (порога текстурности и шага квантования). Обосновывается необходимость применения кодов коррекции ошибок (ECC) для достижения безошибочного извлечения.

Ключевые слова: видеостеганография, DCT, QIM (модуляция индекса квантования), адаптивный метод, анализ движения, алгоритм Лукаса – Канаде, анализ текстур, H.264-сжатие, устойчивость к сжатию.

Для цитирования: Попеня Н. В., Романенко Д. В. Метод адаптивной видеостеганографии для H.264-сжатых видеопотоков на основе модуляции DCT-коэффициентов и анализа стабильности сцен // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2026. № 1 (302). С. 87–99.

DOI: 10.52065/2520-6141-2026-302-8.

N. V. Popenya, D. M. Romanenko
Belarusian State Technological University

AN ADAPTIVE VIDEO STEGANOGRAPHY METHOD FOR H.264-COMPRESSED VIDEO BASED ON DCT COEFFICIENT MODULATION AND SCENE STABILITY ANALYSIS

This article is dedicated to the development and research of a robust video steganography method designed for operation with video signals subjected to lossy compression under the H.264/AVC standard. The proposed method addresses the issue of low robustness found in classical approaches, such as the

Least Significant Bit (LSB), by embedding data in the frequency domain. The core of the method is Quantization Index Modulation (QIM) applied to the Discrete Cosine Transform (DCT) coefficients within the luminance (Y) channel of the YCrCb color space. To enhance stealth and reliability, a hybrid adaptive approach is employed. A key element is a two-pass algorithm: the first pass involves analyzing the video stream to construct an "embedding plan" without making any modifications. During this analysis, stable frames are identified using the Lucas-Kanade algorithm, and a reliability score is calculated for each frame, which is then used to adaptively select the quantization step for QIM. Additionally, the frame's texture is analyzed using a Laplacian filter to select only the most suitable blocks for modification. In the second pass, the data is embedded directly according to the plan. Experimental results demonstrate high robustness, achieving a Bit Error Rate (BER) of less than 10–20% even after compression with the H.264 codec (libx264, 10,000 kbps). The trade-offs between capacity, robustness, and stealth are analyzed by varying key parameters (texture threshold and quantization step). The necessity of employing Error Correction Codes (ECC) to achieve error-free extraction is substantiated.

Keywords: video steganography, DCT, QIM (Quantization Index Modulation), adaptive method, motion analysis, Lucas-Kanade algorithm, texture analysis, H.264 compression, compression robustness.

For citation: Popenya N. V., Romanenko D. M. An adaptive video steganography method for H.264-compressed video streams based on DCT coefficient modulation and scene stability analysis. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2026, no. 1 (302), pp. 87–99 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-6141-2026-302-8.

Введение. Развитие мультимедийных технологий повышает требования к методам защиты информации. Помимо криптографических средств, обеспечивающих конфиденциальность содержимого, значительный интерес представляет стеганография, задачей которой является сокрытие самого факта передачи данных путем их встраивания в цифровые контейнеры [1]. Среди различных типов контейнеров видеофайлы выделяются благодаря своей высокой информационной емкости и сложной структуре, что делает их подходящей средой для скртия значительных объемов данных [2].

Однако практическая реализация видеостеганографии сталкивается с фундаментальным препятствием – доминированием форматов сжатия с потерями, таких как стандарт H.264/AVC [3]. Алгоритмы, лежащие в основе этого стандарта, целенаправленно удаляют визуальную избыточность, что приводит к необратимым изменениям в пиксельном представлении видеокадров. Это делает классические стеганографические методы, оперирующие в пространственной области, например модификацию наименее значащих бит (LSB), практически неприменимыми. Процесс квантования, являющийся ядром сжатия, разрушает информацию, закодированную в младших битах, делая канал связи полностью неработоспособным.

Для достижения робастности (устойчивости) к сжатию необходимо перенести процесс встраивания из пространственной области в область преобразования. Поскольку стандарт H.264 основан на дискретном косинусном преобразовании (DCT) [4], модификация DCT-коэффициентов представляет собой фундаментальный подход к построению робастных стегосистем, так как позволяет оперировать данными в той же области представления, в которой происходят основные потери при компрессии. Существуют различные методы работы в DCT-области, среди которых модуляция индекса квантования (Quantization Index Modulation, QIM) обладает преимуществом, заключающимся в обеспечении доказуемой помехоустойчивости к аддитивному шуму, вносимому в процессе квантования [5].

Обеспечение высокой робастности является необходимым, но недостаточным условием для создания стегосистемы. Важным свойством является скрытность, которая определяется как статистическая и перцептивная неразличимость стегоконтейнера от оригинала. Произвольное встраивание данных, даже в DCT-области, без учета локальных характеристик контента, может привести к возникновению двух типов уязвимостей: появление визуальных артефактов, особенно заметных в гладких, низкочастотных областях кадра, где зрительная система человека (Human Visual System, HVS) наиболее чувствительна к искажениям [6], и статистических аномалий в распределении DCT-коэффициентов, которые могут быть обнаружены методами современного стегоанализа [2].

Предлагаемый в данной работе метод является гибридным, сочетающим устойчивость DCT-QIM с интеллектуальным выбором мест для встраивания. Для повышения скрытности встраивание производится только в визуально сложные («текстурные») области кадра, где модификации менее заметны для зрительной системы человека [7]. Кроме того, для минимизации артефактов движения используются только стабильные, малоподвижные кадры, идентифицируемые с помощью анализа оптического потока по методу Лукаса – Канаде [8].

Применение адаптивных стратегий вводит фундаментальное требование к синхронизации между процессами встраивания и извлечения, особенно в «слепых» сценариях, где декодер не имеет доступа к исходному контейнеру. Сжатие с потерями является нелинейной и деструктивной операцией, которая изменяет статистические и перцептивные свойства медиасигнала. В результате этого характеристики, на основе которых принималось решение о встраивании (градиенты яркости для оценки текстуры или векторы оптического потока для оценки движения), подвергаются значительным искажениям. Это явление, известное как деградация или декорреляция признаков, приводит к тому, что при анализе стегоконтейнера на этапе извлечения идентифицируется иное множество подходящих для стеганографии локаций, что делает точное восстановление данных невозможным.

Целью данной статьи является разработка и экспериментальное исследование адаптивного метода видеостеганографии, обеспечивающего повышенную устойчивость к H.264-сжатию и высокую скрытность за счет комбинации DCT-QIM, анализа межкадрового движения и внутрикадровой текстуры.

Основная часть. Предложенный метод представляет собой многокомпонентную систему, в основе которой лежат три ключевых принципа, обеспечивающих его эффективность и научную новизну.

Во-первых, для достижения робастности используется встраивание в DCT-область методом QIM, однако, в отличие от статических подходов, параметры встраивания динамически адаптируются к содержимому контейнера. Для этого применяется двухуровневый анализ: на межкадровом (temporal) уровне оценивается стабильность сцены для модуляции шага квантования Δ_k , а на внутрикадровом (spatial) – текстурная сложность для выбора оптимальных для модификации блоков 8×8 пикселей.

Во-вторых, для решения проблемы десинхронизации используется двухпроходная архитектура. Сжатие с потерями является нелинейной операцией, изменяющей перцептивные свойства сигнала. Деградация признаков приводит к тому, что при анализе стегоконтейнера на этапе извлечения идентифицируется иное множество подходящих для стеганографии локаций по сравнению с исходным видео. Двухпроходная модель разделяет процесс на неразрушающий аналитический этап (рис. 1, а) и этап модификации (рис. 1, б), позволяя сформировать исчерпывающий план действий до внесения изменений.

В-третьих, для предотвращения каскадных ошибок, вызванных потерей части адресного пространства после сжатия, применяется канонический (растровый) порядок обработки блоков. Это гарантирует синхронизацию для всех успешно идентифицированных локаций.

Процесс реализации метода включает несколько последовательных этапов, обеспечивающих как подготовку данных, так и их адаптивное встраивание, и начинается с предварительной подготовки скрываемого сообщения, включающей его шифрование (например, AES-GCM [9]) и применение кодов коррекции ошибок ECC [10] для повышения целостности.

На этапе предварительного анализа и формирования плана встраивания производится всесторонний анализ исходного видеосигнала V_{in} с целью сбора метаданных, необходимых для последующего встраивания. Этот проход является неразрушающим, то есть осуществляется только чтение и анализ исходного контейнера без внесения каких-либо модификаций.

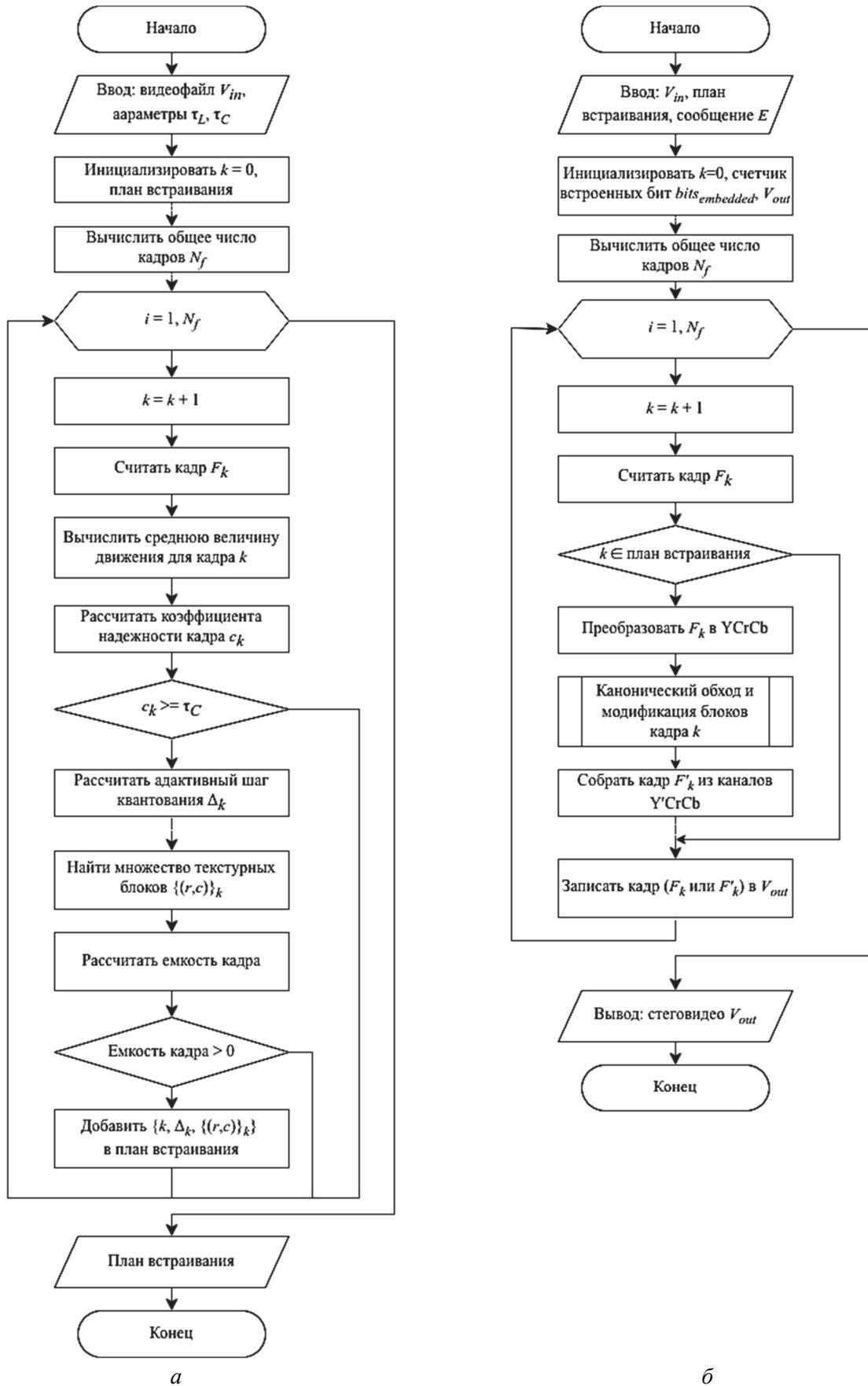


Рис. 1. Схема предложенного метода:
 а – неразрушающий аналитический проход для формирования плана встраивания;
 б – модифицирующий проход для встраивания данных согласно плану

Анализ межкадрового движения основан на вычислении оптического потока между парой последовательных кадров $\{F_{(k-1)}, F_k\}$. Множество характерных точек $P_0 = \{p_{(0,1)}, p_{(0,2)}, \dots, p_{(0,N)}\}$ на кадре $F_{(k-1)}$ определяется с использованием алгоритма Ши – Томаси [9]. Затем, для каждой точки $p_{(0,i)}$ ищется ее соответствующее положение $p_{(0,i)}$ на кадре F_k путем минимизации суммы квадратов разностей яркостей в локальной окрестности Ω по вектору смещения $d = [d_x, d_y]^T$:

$$\varepsilon(d) = \sum_{\{x,y \in \Omega\}} [I_{\{k-1\}}(x,y) - I_{k(x+dx,y+dy)}]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $I_{k(x,y)}$ – интенсивность пикселя в кадре k . Решение этой задачи находится итерационно методом Лукаса – Канаде [8]. Средняя величина движения для кадра k вычисляется как среднее евклидово расстояние смещения для всех успешно отслеженных точек.

Вместо бинарной классификации «стабильный/динамичный», вводится понятие коэффициента надежности кадра, $c_k \in [0, 1]$, как убывающей функции от среднего евклидова расстояния, где τ_L – верхний порог допустимого движения. Этот «мягкий» подход позволяет более гибко оценивать пригодность кадра. Кадры с $c_k < \tau_C$ (где τ_C – порог уверенности) полностью исключаются. Для оставшихся кадров вычисляется адаптивный шаг квантования Δ_k для QIM. Зависимость Δ_k от c_k является обратной:

$$\Delta_k = \Delta_{\max} - (\Delta_{\max} - \Delta_{\text{base}}) \cdot c_k, \quad (2)$$

где Δ_{base} и Δ_{\max} – минимальный и максимальный шаги квантования соответственно. Эта модель обеспечивает применение более сильного (робастного) встраивания (большая Δ_k) для менее надежных, но все еще приемлемых кадров.

Например, при инвариантных параметрах $\tau_L = 5,0$, $\tau_C = 0,2$, $\Delta_{\text{base}} = 10,0$ и $\Delta_{\max} = 20,0$, работа адаптивного механизма для трех гипотетических кадров будет следующей:

1) статичный кадр. Средняя величина движения для кадра равняется 0,5. Коэффициент надежности $c_k = 1 - (0,5 / 5,0) = 0,9$. Поскольку $0,9 \geq 0,2$, кадр используется. Адаптивный шаг квантования $\Delta_k = 20 - (20 - 10) \cdot 0,9 = 11,0$. Для высоконадежного кадра применяется «нежное» встраивание с малым шагом Δ ;

2) умеренная динамика. Средняя величина движения для кадра равняется 4,0. Коэффициент надежности $c_k = 1 - (4,0 / 5,0) = 0,2$. Поскольку $0,2 \geq 0,2$, кадр все еще используется. Адаптивный шаг $\Delta_k = 20 - (20 - 10) \cdot 0,2 = 18,0$. Для кадра на грани стабильности применяется более агрессивное, робастное встраивание с большим шагом Δ ;

3) динамичный кадр. Средняя величина движения для кадра равняется 6,0. Коэффициент надежности $c_k = 1 - (6,0 / 5,0)$, что меньше нуля, следовательно, $c_k = 0$. Поскольку $0 < 0,2$, кадр отбрасывается и не используется для встраивания.

Результаты работы алгоритма анализа межкадрового движения и формирования параметров адаптации для тестовой видеопоследовательности комплексно представлены на рис. 2.

На верхнем графике видны четкие пики, соответствующие динамичным сценам (например, в диапазоне кадров 20–80), где величина движения значительно превышает пороговое значение $\tau_L = 5,0$. На среднем графике этим пикам соответствуют области, где коэффициент надежности c_k падает до нуля.

Алгоритм идентифицирует несколько протяженных стабильных участков (например, в диапазонах ~90–400 и ~430–630 кадров), где движение опускается ниже порога τ_L . В этих областях коэффициент надежности c_k поднимается выше порога – $\tau_C = 0,2$. Именно эти сегменты выбираются системой как пригодные для дальнейшего анализа.

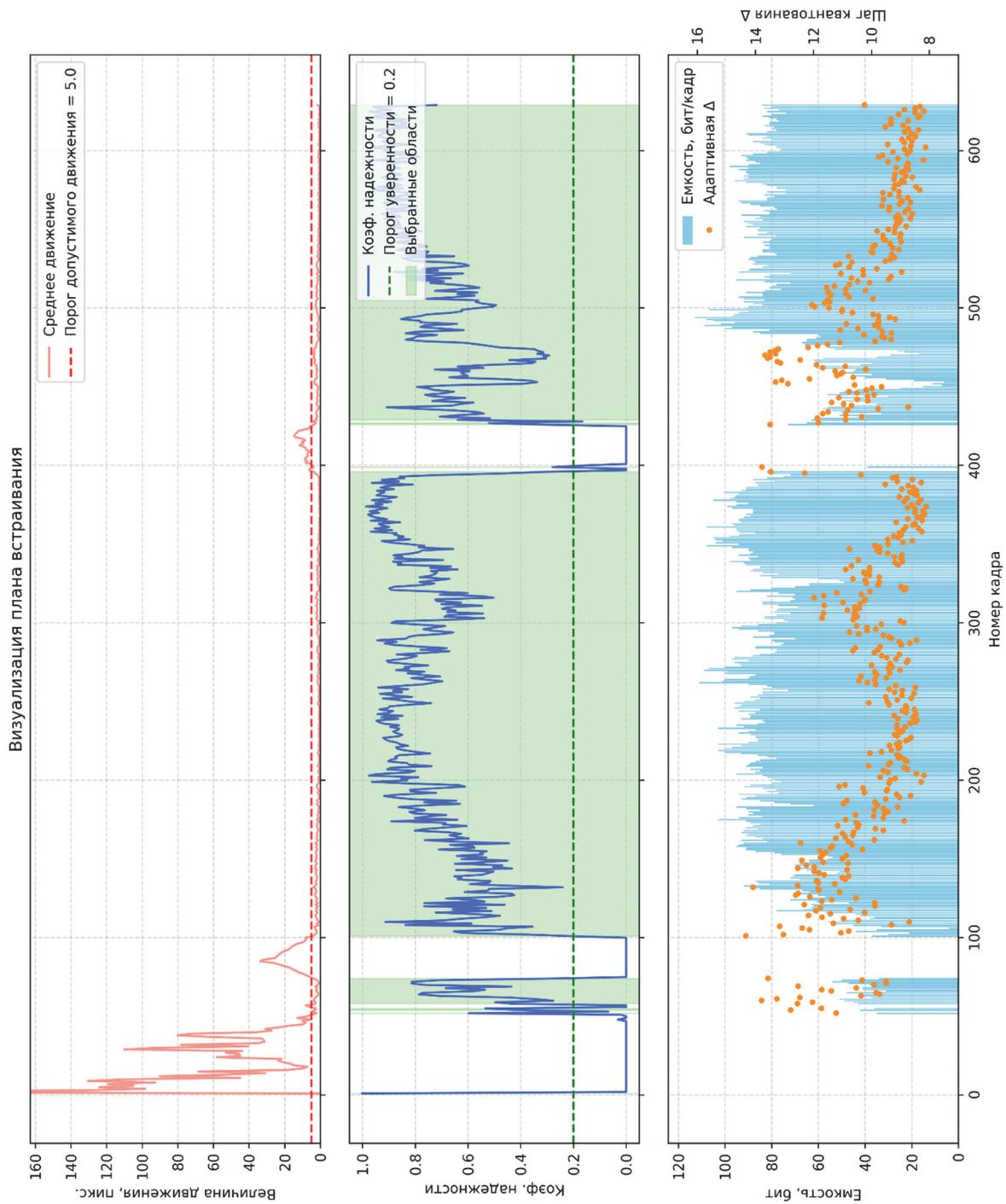


Рис. 2. Визуализация формирования плана встраивания для тестовой видеопоследовательности

Нижний график визуализирует итоговый план встраивания для этих выбранных областей. Высота столбцов, представляющих емкость каждого кадра в битах (определяется количеством найденных текстурных блоков), значительно варьируется в зависимости от сложности содержимого. Оранжевыми точками показан адаптивный шаг квантования Δ_k . Наглядно прослеживается обратная зависимость, описанная в формуле (2): в наиболее стабильных участках с c_k , близких к 1,0 (например, кадры 150–400), применяется минимальный шаг Δ , обеспечивающий максимальную скрытность. В то же время в пограничных областях с более низкой надежностью (например, у кадров ~ 90 , ~ 430) значение Δ автоматически увеличивается для повышения робастности.

Таким образом, на этапе аналитического прохода формируется детализированный план, адаптированный как к межкадровой динамике, так и к внутрикадровому содержанию видеопотока.

Для повышения скрытности встраивание ограничивается только текстурными областями кадра F_k , где вносимые изменения менее заметны для зрительной системы человека. Кадр преобразуется в цветовое пространство YCrCb, что позволяет отделить информацию о яркости (Y-канал) от информации о цвете (Cr, Cb). Все модификации производятся только в Y-канале для минимизации цветowych артефактов. Для канала яркости Y_k строится карта текстурности T_k с использованием дискретного оператора Лапласа ∇^2 :

$$T_{k(x,y)} = |\nabla^2 Y_{k(x,y)}|. \quad (3)$$

Оператор Лапласа, являясь детектором границ второго порядка, эффективно реагирует на высокочастотные изменения, характерные для текстур [7]. Y-канал Y_k разбивается на неперекрывающиеся блоки $B_{(r,c)}$ размером 8×8 пикселей. Блок считается текстурным и пригодным для встраивания, если среднее значение его карты текстурности превышает порог τ_l .

На практике это означает, что выбор блоков происходит на основе их визуальной сложности. Блок из гладкой области (например, стена) будет иметь очень низкие значения на карте текстурности, и его среднее значение карты текстурности может быть равно, например, 5,4. При $\tau_l = 15$, условие $5,4 > 15$ не выполняется, и блок игнорируется.

Блок с контура объекта (например, элемент декора крыши) будет содержать яркие пиксели на карте текстурности, соответствующие резким перепадам яркости. Его среднее значение карты текстурности может достигать 45,6. Условие $45,6 > 15$ выполняется, и блок добавляется в список подходящих для встраивания.

Таким образом, данный этап эффективно фильтрует локации внутри кадра, оставляя только те, которые обеспечивают лучшую перцептивную скрытность.

Множество координат (r, c) всех текстурных блоков для кадра k сохраняется в плане встраивания. Пример работы детектора текстур для одного из кадров тестовой последовательности представлен на рис. 3.

Такой подход позволяет концентрировать стеганографические модификации в тех участках изображения, где они с наибольшей вероятностью будут замаскированы естественной визуальной сложностью контента.

Результатом аналитического прохода является структура данных «план встраивания». Для каждого кадра k , признанного подходящим, в плане сохраняется вычисленное значение Δ_k и множество координат текстурных блоков. Также вычисляется общая стеганографическая емкость видео как сумма емкостей всех подходящих кадров.

На втором проходе производится модификация исходного видеопотока в соответствии со сформированным планом. Исходное сообщение M проходит последовательную обработку: шифрование (AES-GCM), добавление служебного заголовка H (содержащего метаданные, например, длину сообщения) и кодирование кодом коррекции ошибок (ECC), в результате чего формируется битовая последовательность E для встраивания.

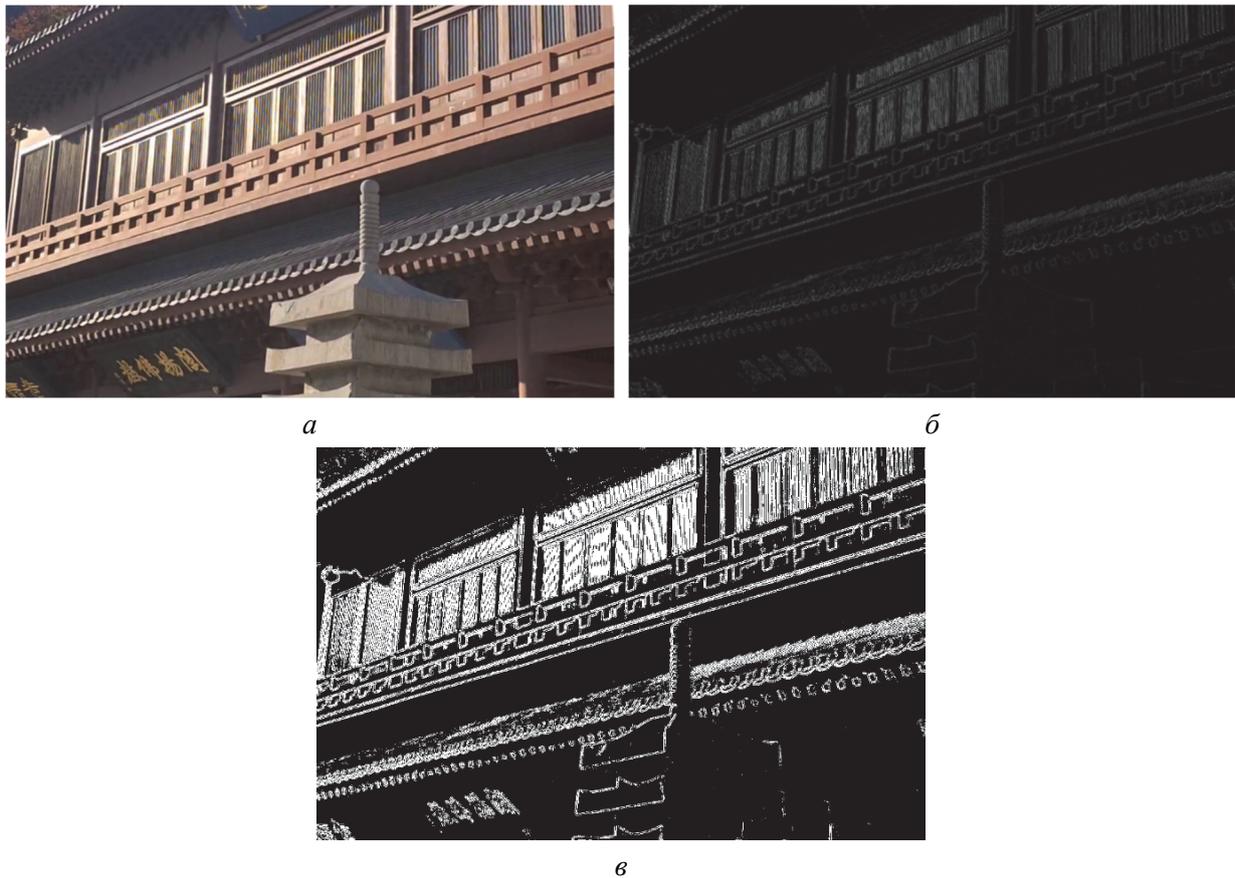


Рис. 3. Этапы анализа внутрикадровой текстуры:
а – оригинальный кадр; *б* – карта текстурности, полученная с помощью оператора Лапласа; *в* – итоговая бинарная маска

Встраивание происходит в каноническом порядке для обеспечения синхронизации. Вместо того чтобы обрабатывать текстурные блоки в том порядке, в котором они были обнаружены, алгоритм выполняет полный растровый обход (raster scan) всех возможных позиций блоков $B_{\{r,c\}}$ в кадре (сверху вниз, слева направо).

Для каждой текущей координаты (r, c) производится проверка ее принадлежности к множеству подходящих текстурных блоков, сформированных на аналитическом этапе. Если блок с данными координатами признан подходящим, он используется для встраивания одного очередного бита из последовательности E . В противном случае блок пропускается. Такой подход гарантирует, что i -й встраиваемый бит всегда будет ассоциирован с i -й подходящей локацией в канонической последовательности обхода. Это локализует ошибки, вызванные потерей блоков при сжатии, и предотвращает каскадную десинхронизацию.

После выбора подходящего блока $B_{\{r,c\}}$ из Y -канала производится его извлечение и последующее преобразование с помощью DCT. Для выбора целевого DCT-коэффициента для модификации применяется детерминированный генератор псевдослучайных чисел (PRNG). Для обеспечения уникальности и невозможности предсказания последовательности без знания секрета PRNG инициализируется начальным значением (seed), которое является криптографически безопасной функцией от глобального секрета S , номера кадра k и физических координат текущего блока (r, c) . Эта зависимость от абсолютных координат гарантирует, что для одного и того же блока $B_{\{r,c\}}$ в кадре k будет сгенерирована идентичная псевдослучайная последовательность как при встраивании, так и при извлечении, независимо от того, какие блоки были обработаны до него.

Далее, PRNG используется для выбора одного индекса j из заранее определенного множества $M_{\{mid\}}$, соответствующего среднечастотным АС-коэффициентам. Выбор именно

этой частотной области является компромиссом: низкочастотные коэффициенты слишком важны для визуального качества, а высокочастотные с высокой вероятностью будут обнулены (квантованы в ноль) при сжатии, что приведет к потере данных [10].

Модификация выбранного DCT-коэффициента C_j выполняется методом модуляции индекса квантования (QIM) с адаптивным шагом Δ_k . Суть метода заключается в принудительном отображении исходного значения коэффициента C_j на одну из двух дизъюнктивных (непересекающихся) решеток квантования, где выбор решетки определяется значением встраиваемого бита b_i . Для бинарного встраивания ($b_i \in \{0, 1\}$) эти решетки L_0 и L_1 задаются множествами:

$$L_0 = \{q \mid q = 2n \times \Delta_k, n \in \mathbb{Z}\};$$

$$L_1 = \{q \mid q = (2n + 1) \cdot \Delta_k, n \in \mathbb{Z}\}.$$

Модифицированный коэффициент C'_j находится путем поиска ближайшего к C_j значения в решетке, соответствующей биту b_i .

Описанное преобразование обеспечивает устойчивость метода, поскольку даже после внесения аддитивного шума в процессе сжатия значение коэффициента при извлечении с высокой вероятностью остается в пределах зоны принятия решения для исходной решетки. После модификации коэффициента к обновленной матрице DCT $'_{\{r,c\}}$ применяется обратное дискретное косинусное преобразование (IDCT), и полученный блок пикселей $V'_{\{r,c\}}$ заменяет исходный в Y-канале. Процесс извлечения данных является симметричным: он включает повторный аналитический проход по стежоконтейнеру, за которым следует декодирование бит путем определения принадлежности принятого коэффициента к одной из решеток – L_0 или L_1 .

Для количественной оценки эффективности и устойчивости разработанного метода была проведена серия вычислительных экспериментов. В качестве тестового контейнера использовался видеофрагмент с разрешением 1280×720 , частотой 29.97 кадров/с и длительностью 200 кадров, содержащий как статичные, так и динамичные сцены с разнообразными текстурами. Все модифицированные стежоконтейнеры сохранялись с принудительным перекодированием с использованием кодека H.264/AVC (программная реализация libx264). Для обеспечения сжатия с потерями при сохранении высокого визуального качества был установлен целевой средний битрейт 10 000 кбит/с. Программная реализация метода выполнена на языке Python с использованием библиотек OpenCV для обработки видеокадров и MoviePy для мультиплексирования медиапотоков.

Целью экспериментальной апробации являлась количественная оценка влияния ключевых параметров метода на его итоговые характеристики: емкость, устойчивость и скрытность. Для этого была проведена серия из четырех тестовых запусков, в каждом из которых варьировалась определенная комбинация параметров. Во всех экспериментах использовался набор инвариантных (неизменяемых) настроек, обеспечивающих идентичные базовые условия для сравнения: верхний порог движения (τ_L), порог надежности (τ_C) и длина тестовой последовательности.

Верхний порог движения установлен на уровне 5,0 пикселей. Это значение было выбрано эмпирически, как компромисс, позволяющий эффективно отсекаать кадры со значительной динамикой (панорамирование, быстрое движение объектов), но при этом сохранять для анализа сцены с медленным движением.

Порог надежности установлен на уровне 0,2. Кадры, чей коэффициент надежности оказывался ниже этого значения, полностью исключались из рассмотрения. Этот порог позволяет отфильтровать кадры, находящиеся на грани стабильности, для которых предсказать влияние сжатия особенно сложно.

Варьируемые параметры, нацеленные на калибровку метода, были сгруппированы в четыре конфигурации для тестирования. Основными величинами являлись шаг квантования Δ и порог текстурности τ_L .

Диапазон шага квантования (Δ_k), определяемый Δ_{base} и Δ_{max} , напрямую влияет на степень искажения DCT-коэффициентов и, как следствие, на робастность. Были исследованы две конфигурации: базовый диапазон Δ (Δ_k варьируется в диапазоне [10,0, 18,0]) и расширенный диапазон Δ (Δ_k варьируется в диапазоне [15,0, 25,0], что предполагает более сильное воздействие на коэффициенты).

Порог текстурности (τ_T) контролирует, какие блоки внутри кадра считаются достаточно сложными для скрытного встраивания. Он напрямую влияет на стеганографическую емкость. Были исследованы три уровня: низкий порог ($\tau_T = 10$, детектор менее строгий, выбирается большее количество блоков, что приводит к увеличению емкости), средний порог ($\tau_T = 15$, сбалансированная конфигурация) и высокий порог ($\tau_T = 25$, детектор строгий, выбираются только наиболее контрастные и «шумные» блоки, что повышает скрытность, но снижает емкость).

Данные конфигурации были применены в ходе вычислительных экспериментов для количественной оценки их влияния на итоговую эффективность метода.

В качестве метрик оценки использовались: емкость, потеря блоков и коэффициент битовых ошибок. Емкость – общее количество бит, которое потенциально можно встроить в видеофрагмент при данной конфигурации согласно результатам первого аналитического прохода. Потеря блоков – доля блоков, которые были идентифицированы как подходящие для встраивания на исходном видео, но не были найдены при повторном анализе сжатого видео. Эта метрика характеризует стабильность признаков, используемых для адресации. BER (найденный) – коэффициент битовых ошибок, вычисленный только для тех бит, чьи блоки-носители были успешно найдены и до, и после сжатия. Эта метрика показывает устойчивость механизма DCT-QIM к искажениям, вносимым сжатием. BER (общий) – итоговый коэффициент ошибок, учитывающий как ошибки типа «стирание» (потерянные блоки), так и ошибки типа «инверсия» (неверно извлеченные биты).

Во всех сценариях для анализа встраивалась псевдослучайная последовательность E длиной 5000 бит, за исключением теста 4, где общая емкость контейнера (560 бит) была меньше этого значения, в данном случае встраивались все 560 бит. Сводные результаты представлены в таблице. Анализ полученных данных позволяет сделать ряд ключевых выводов. Сравнение теста 1 и теста 2 наглядно демонстрирует влияние параметра Δ на устойчивость. Увеличение шага квантования привело к радикальному снижению BER (найденные) с 11,14% до всего 1,80%. Это подтверждает высокую робастность самого механизма QIM. При достаточном шаге квантования он успешно противостоит искажениям DCT-коэффициентов, вносимым кодеком. Сравнение теста 1 и теста 3 показывает влияние порога текстурности. Снижение τ_T с 15 до 10 привело к увеличению стеганографической емкости более чем в четыре раза (с ~8000 до ~33500 бит). Примечательно, что это не привело к значительному ухудшению надежности: BER (общий) даже незначительно снизился. Это свидетельствует о том, что для тестируемого видеоконтейнера даже слабо текстурированные области являются достаточно стабильными для встраивания. Тест 4 иллюстрирует режим максимальной скрытности и надежности. Использование высокого порога $\tau_T = 25$ резко ограничивает количество доступных блоков (снижает емкость до 560 бит). Однако для этих, наиболее надежных блоков BER (найденные) составляет всего 1,36%, а итоговый BER (общий), включающий потери, – 9,46%.

Результаты калибровки параметров адаптивного метода

Название теста	Потеря блоков, %	BER (найд.), %	BER (общ.), %
Базовая Δ , средняя текстурность	5,60	11,14	16,12
Усиленная Δ , средняя текстурность	4,68	1,80	6,40
Базовая Δ , низкий порог	3,82	9,75	13,20
Усиленная Δ , высокий порог	8,21	1,36	9,46

Оптимальной конфигурацией по соотношению емкости и надежности является тест 2. BER (общий) на уровне 6,40% является достаточно низким показателем, который может быть скорректирован с применением кодов коррекции ошибок, например кодов Рида – Соломона [11]. Однако, поскольку потеря текстурных блоков приводит к выпадению битов и рассинхронизации потока, классические алгоритмы необходимо использовать в комплексе с маркерами синхронизации для предварительной локализации сдвигов перед декодированием.

Для объективной оценки перцептивной незаметности предложенного метода использовались количественные метрики качества изображений: пиковое отношение сигнала к шуму (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) и индекс структурного сходства (Structural Similarity Index, SSIM). Метрика PSNR позволяет оценить среднюю квадратичную ошибку между оригинальным и модифицированным кадрами, выраженную в логарифмической шкале (дБ). Метрика SSIM, в отличие от PSNR, базируется на моделях восприятия зрительной системы человека и оценивает сохранность структурной информации в кадре.

Расчет метрик производился путем покадрового сравнения исходной видеопоследовательности и сформированного стегоконтейнера. Для конфигурации теста 2 (усиленная Δ , средняя текстурность), показавшей оптимальный баланс робастности, были получены следующие значения: среднее значение PSNR составило 56,38 дБ, а индекс SSIM составил 0,9998. Значение PSNR выше 40 дБ в стеганографических системах считается показателем высокой незаметности модификаций, а близость индекса SSIM к единице подтверждает отсутствие видимых структурных искажений, вносимых алгоритмом QIM в DCT-области.

Помимо численных метрик, важной характеристикой является корректность работы адаптивного механизма маскировки. Для подтверждения эффективности выбора областей встраивания была построена карта пространственной локализации модификаций (рис. 4). На исходный кадр наложена полупрозрачная маска, в которой красным цветом выделены блоки 8×8 пикселей, выбранные алгоритмом для встраивания данных.

Анализ рис. 4 демонстрирует, что метод успешно избегает гладких областей, концентрируя данные в высокочастотных зонах (элементы черепицы, резные решетки). Это подтверждает, что высокая визуальная незаметность достигается за счет использования эффекта зрительной маскировки в текстурных областях.



Рис. 4. Карта пространственной локализации стеганографических модификаций

Такой подход минимизирует вероятность обнаружения скрытого канала как методами визуального наблюдения, так и средствами статистического стегоанализа.

Заключение. В статье предложен и исследован гибридный адаптивный метод видеостеганографии, устойчивый к сжатию с потерями по стандарту H.264. Предложенный подход, основанный на встраивании в DCT-область методом QIM, продемонстрировал высокую робастность (BER (найденные) $< 2\%$ при оптимальных настройках) и надежность синхронизации благодаря двухпроходной архитектуре и каноническому порядку обработки блоков.

Использование адаптивных компонентов, таких как анализ межкадровой динамики для модуляции параметра устойчивости Δ и анализ внутрикадровой текстуры для пространственной локализации встраивания, обеспечивает возможность настройки баланса между характеристиками стегосистемы: емкостью, робастностью и скрытностью. Установлено, что основной вклад в итоговую ошибку вносят не искажения данных внутри блоков, а потеря части стеганографической емкости из-за изменения текстурных характеристик контейнера при сжатии.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию конкретных реализаций ЕСС и шифрование для создания полноценной стегосистемы.

Список литературы

1. Katzenbeisser S., Petitcolas F. A. P. *Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking*. Boston: Artech House, 2000. 230 p.
2. Fridrich J. *Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 438 p.
3. Richardson I. E. *The H.264 advanced video compression standard*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2010. 464 p.
4. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard // *Communications of the ACM*. 1991. Vol. 34, no. 4. P. 30–44.
5. Chen B., Wornell G. W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2001. Vol. 47, no. 4. P. 1423–1443.
6. Jayant N. S. [et al.] Signal compression based on models of human perception // *Proceedings of the IEEE*. 1993. Vol. 81, no. 10. P. 1385–1422.
7. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008. 954 p.
8. Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Vancouver, 1981. P. 674–679.
9. Shi J., Tomasi C. Good features to track // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*. Seattle, 1994. P. 593–600.
10. Pevný T., Fridrich J. Merging results of multiple steganalysis tools // *Proceedings of the 9th workshop on Multimedia & security*. Dallas, 2007. P. 3–13.
11. Morelos-Zaragoza R. *The Art of Error Correcting Coding*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2006. 312 p.

References

1. Katzenbeisser S., Petitcolas F. A. P. *Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking*. Boston, Artech House Publ., 2000. 230 p.
2. Fridrich J. *Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 2009. 438 p.
3. Richardson I. E. *The H.264 advanced video compression standard*. 2nd ed. Chichester, Wiley Publ., 2010. 464 p.
4. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard. *Communications of the ACM*, 1991, vol. 34, no. 4, pp. 30–44.
5. Chen B., Wornell G. W. Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, vol. 47, no. 4, pp. 1423–1443.
6. Jayant N. S., Johnston J. D., Safranek R. J. Signal compression based on models of human perception. *Proceedings of the IEEE*, 1993, vol. 81, no. 10, pp. 1385–1422.

7. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. 3rd ed. Upper Saddle River, Prentice Hall Publ., 2008. 954 p.

8. Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Vancouver, 1981, pp. 674–679.

9. Shi J., Tomasi C. Good features to track. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*. Seattle, 1994, pp. 593–600.

10. Pevný T., Fridrich J. Merging results of multiple steganalysis tools. *Proceedings of the 9th workshop on Multimedia & security*. Dallas, 2007, pp. 3–13.

11. Morelos-Zaragoza R. *The Art of Error Correcting Coding*. 2nd ed. Chichester, Wiley Publ., 2006. 312 p.

Информация об авторах

Попеня Наталья Владимировна – аспирант кафедры информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: popenya@belstu.by

Романенко Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: rdm@belstu.by. SPIN-код: 3559-2185. Scopus ID: 51562638900. ORCID: 0000-0002-1628-770X.

Information about the authors

Popenya Natalya Vladimirovna – PhD student, the Department of Computer Science and Web-design. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: popenya@belstu.by.

Romanenko Dmitri Mikhailovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Web-design. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rdm@belstu.by. SPIN code: 3559-2185. Scopus ID: 51562638900. ORCID: 0000-0002-1628-770X.

Поступила 25.11.2025