

Новик Наталья Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения ЭВМ и информационных технологий, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва.

AuthorID: 396917, SPIN-код: 3384-7700

Электронный адрес: nvnovik@mail.ru

Natalia V. Novik

Ph.D. of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of computer software and information technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow. AuthorID: 396917, SPIN-code: 3384-7700

E-mail address: nvnovik@mail.ru

Ковалец Кирилл Эдуардович

магистр, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва.

Электронный адрес: kovaletskir@gmail.com

Kirill E. Kovalets

Master of Computer Science, Department of Computer Software and Information Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow.

E-mail address: kovaletskir@gmail.com

МЕТОД СЖАТИЯ СТАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ХАФФМАНА

Аннотация. Задача сжатия изображений остается актуальной и востребованной вследствие возрастающего объема изображений в современном информационном обществе. В статье рассмотрены методы сжатия без потерь информации статических изображений. При использовании методов сжатия самыми значимыми вопросами являются преобразование и восстановление информации, степень сжатия. Авторами предложен гибридный метод сжатия информации, основанный на методе Хаффмана, который позволяет при решении ряда задач максимально использовать возможности алгоритма Хаффмана и нивелировать его недостатки. В разработанном методе улучшение производится за счет первичной обработки изображения другим методом сжатия, а именно словарным методом LZW. Предложенный гибридный метод позволяет увеличить коэффициент сжатия информации по сравнению с исходными методами, а также минимизировать зависимость от особенностей входных изображений. Проведен анализ разработанного гибридного метода и его сравнение с исходными методами. Разработаны рекомендации для выбора оптимального метода (Хаффмана, LZW, гибридный метод) при решении различных задач.

Ключевые слова: сжатие изображений, сжатие без потерь, гибридный метод сжатия, алгоритм Хаффмана, словарный метод LZW.

Для цитирования: Новик Н.В., Ковалец К.Э. Метод сжатия статических изображений на основе алгоритма Хаффмана // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 2. С. 149 – 157. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.02.P.149

STATIC IMAGE COMPRESSION METHOD BASED ON THE HOFFMAN ALGORITHM

Abstract. The problem of image compression remains relevant and in demand due to the increasing volume of images in today's information society. The article examines lossless compression methods for static im-

ages. When using compression methods, the most important issues are the transformation and restoration of information, as well as the compression ratio. The authors propose a hybrid information compression method based on the Huffman algorithm which allows for the maximum utilization of the advantages of the Huffman algorithm in solving a range of tasks while mitigating its shortcomings. In the developed method, improvements are achieved by initially processing the image with another compression method – specifically, the dictionary-based LZW method. The proposed hybrid method allows to increase in the information compression ratio compared to the original methods and minimize dependency on the characteristics of the input images. An analysis of the developed hybrid method has been conducted and compared with the original methods. Recommendations have been developed for selecting the optimal method (Huffman, LZW, or the hybrid method) for solving various tasks.

Keywords: static image compression, lossless compression, hybrid compression method, Huffman algorithm, dictionary-based LZW method.

For citation: Novik N.V., Kovalets K.E. (2025) Static Image Compression Method based on the Huffman Algorithm. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management*. No. 2. Pp. 149 – 157. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.02.P.149 (In Russian).

Методы сжатия статических изображений активно применяются для хранения и передачи растровых изображений. За счет уменьшения размера файла методы сжатия позволяют достичь увеличения скорости передачи данных, а также уменьшения занимаемого места на диске.

Например, одной из областей применения методов сжатия изображений является медицина, где важно с применением минимальных ресурсов передавать и хранить в медицинских информационных системах диагностическую информацию: снимки КТ, МРТ, УЗИ и другие исследования. Методы сжатия изображений активно применяются в интернет-магазинах, где скорость загрузки снимков товаров на странице с ассортиментом является ключевой.

В современном мире лавинообразно увеличивается объем хранимой информации, поэтому вопрос сжатия файлов и рисунков при хранении является крайне актуальным. Совершенствование методов сжатия и разработка новых алгоритмов остается важной задачей для обеспечения эффективного хранения и передачи изображений.

Существуют два основных типа сжатия изображений: с потерями и без потерь [1]. Сжатие без потерь позволяет уменьшить размер файла с сохранением всех деталей исходного изображения. Сжатие с потерями приводит к более сильному уменьшению размера исходного файла ценой потери его деталей, следствием чего является потеря качества изображения.

Разработаны различные форматы файлов изображений, каждый из которых предназначен для определенных задач и использует в своей реализации собственные способы сжатия и сохранения информации. Например, формат JPEG [2; 3] используется для сжатия с потерями, формат PNG предназначен для сжатия изображений без потерь.

Для сжатия без потерь используются алгоритмы RLE¹ [4], алгоритм Хаффмана² [5], словарные алгоритмы [6], алгоритм унарного кодирования³.

¹ Run-Length Encoding (RLE) // FileFormat.info. URL: https://www.fileformat.info/mirror/egff/ch09_03.htm (дата обращения: 18.01.2025).

² Huffman Coding Algorithm // Programiz.com. URL: <https://www.programiz.com/dsa/huffman-coding> (дата обращения: 18.01.2025).

³ Unary Encoding // Microsoft Learn. 2024. 23 April. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/openspecs/windows_protocols/ms-rdpegrx/11bf987b-eeba-4ed8-8fd2-0c89f632382b (дата обращения: 18.01.2025).

Метод сжатия статических изображений на основе
алгоритма Хаффмана

Чтобы максимально использовать возможности алгоритмов и нивелировать их недостатки, авторами предложен гибридный метод сжатия изображений, основанный на методе Хаффмана. В разработанном методе улучшение производится за счет первичной обработки изображения другим методом сжатия, а именно словарным методом LZW⁴ [7]. Формальная постановка задачи в виде IDEF0-диаграммы представлена на Рисунках 1–3.



Рисунок 1. IDEF0-диаграмма верхнего уровня A0

Источник: здесь и далее рисунки выполнены авторами.

Диаграмма уровня A1 (Рисунок 2) иллюстрирует общую структуру гибридного метода сжатия: преобразование изображения в байтовую строку, этап сжатия и создание итогового файла с сжатым изображением.

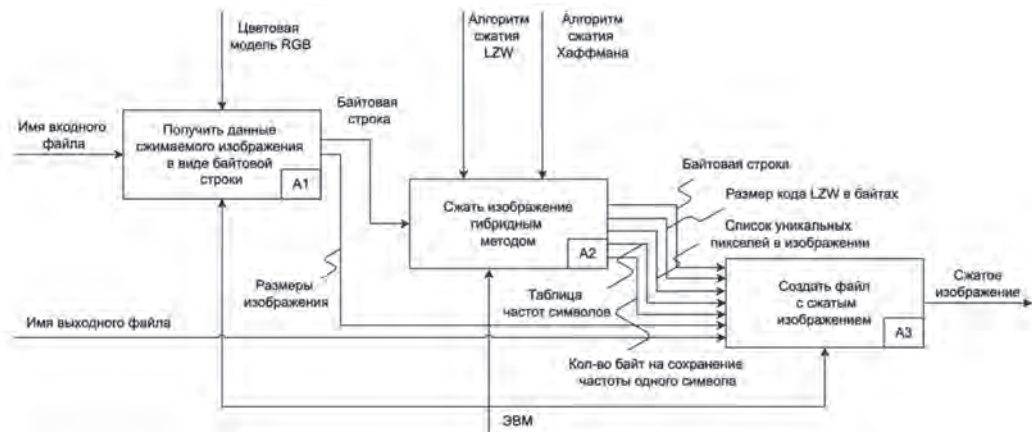


Рисунок 2. Детализированная IDEF0-диаграмма первого уровня

Диаграмма уровня A2 (Рисунок 3) раскрывает детали этапа сжатия, выделяя первичную обработку изображения методом LZW, построение таблицы частот символов, генерацию дерева Хаффмана и повторное кодирование методом Хаффмана.

⁴ Verma S. LZW (Lempel–Ziv–Welch) Compression Technique // Scaler Topics. 2023. 31 January. URL: <https://www.scaler.com/topics/lzw-compression/> (дата обращения: 18.01.2025).

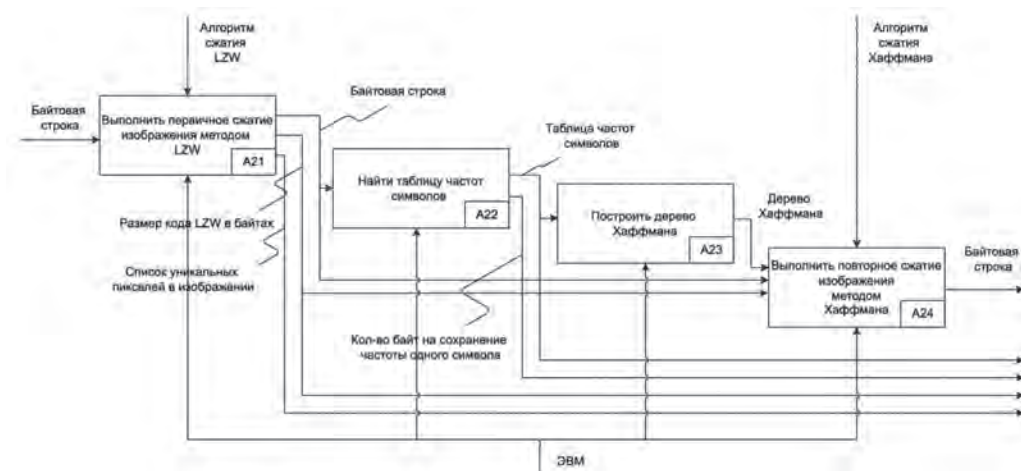


Рисунок 3. Детализированная IDEF0-диаграмма уровня A2

Предложенный гибридный метод должен минимизировать зависимость коэффициента сжатия информации от особенностей входных изображений.

Словарные алгоритмы сжатия, например LZW (Lempel-Ziv-Welch), применяют словарь для замены повторяющихся последовательностей данных более короткими символами. Цель таковых – нахождение повторяющихся участков данных и замена их кодами из словаря. Такой подход позволяет достичь уменьшения размера исходного сообщения. При LZW применяется один проход для кодирования данных, создания таблицы частот пикселей сжимаемого изображения не требуется. Использование алгоритма LZW позволяет удалить избыточность из последовательности пикселей и заменить повторяющиеся подстроки уникальными кодами, что значительно уменьшает размер исходного изображения.

Алгоритм Хаффмана – это метод сжатия данных, в основе которого лежит замена часто встречающихся символов более короткими кодами, а редко встречающихся – более длинными. При использовании данного алгоритма для сжатия изображений без потерь пиксели будут выступать в роли кодируемых символов.

При реализации метода Хаффмана вес каждого пикселя вычисляется в зависимости от вероятности вхождения символов в сообщение. Этот способ не позволяет провести кодирование за один проход, так как требуется составить таблицу частот пикселей и заменить каждый пиксель уникальным кодом.

Разработанный гибридный метод сжатия состоит из следующих этапов:

- 1) получение данных сжимаемого изображения в виде байтовой строки, которая будет использоваться в качестве входных данных для алгоритма LZW;
- 2) выполнение первичного сжатия изображения алгоритмом LZW;
- 3) нахождение таблицы частот символов;
- 4) построение дерева Хаффмана на основе вычисленной таблицы частот символов;
- 5) выполнение повторного сжатия изображения алгоритмом Хаффмана;
- 6) создание файла со сжатым изображением для его распаковки.

Таким образом, использование первичной обработки изображения в гибридном методе сжатия позволяет подготовить данные для метода Хаффмана путем уменьшения коли-

чества обрабатываемых символов. Такой подход приводит к более эффективному сжатию и увеличению общей степени сжатия.

Разработано программное обеспечение с демонстрацией работы гибридного метода сжатия изображений. В качестве языка программирования использовался Python⁵. Выбор данного языка обусловлен поддержкой объектно-ориентированной парадигмы программирования и наличием большого количества сторонних библиотек. Для работы с массивами битов при сжатии данных методом Хаффмана использовалась библиотека `bitarray`⁶, для отображения прогресса этапов сжатия и распаковки изображений – библиотека `progress`⁷, для получения списка файлов, доступных для сжатия, – модуль `subprocess`⁸.

В качестве входных данных разработанный программный комплекс получает путь до изображения в формате BMP, TIFF, PNG или JPEG, а также путь до директории, куда необходимо сохранить сжатое и распакованное изображения. На выходе в директории с результатами создаются два файла с расширениями `.bin` (для сжатого изображения) и `.bmp` (для распакованного). В консоль выводится подробная информация об этапах сжатия и распаковки изображения, размеры исходного и полученного файлов, итоговая степень сжатия.

В разработанном методе *на первом этапе* проводится первичное сжатие изображения методом LZW. В процессе обработки пикселей входного изображения создается словарь повторяющихся цепочек байтов. Выделенные последовательности пикселей заменяются на уникальные коды фиксированной длины. Размер кода зависит от количества заменяемых последовательностей (чем длиннее код, тем больше цепочек байтов можно заменить на первом этапе метода). Тот же словарь повторяющихся цепочек пикселей используется при распаковке сжатого изображения.

На втором этапе подсчитывается количество каждого уникального кода в полученной байтовой строке и строится таблица частот символов.

Третий этап заключается в построении дерева Хаффмана. Задача этапа – присвоение часто встречающимся символам более коротких кодов, редко встречающимся – более длинных. В отличие от классического дерева Хаффмана в разработанном методе за один символ принимается не один байт, а уникальный код, состоящий из заданного числа байтов.

На четвертом этапе происходит применение метода сжатия Хаффмана к байтовой строке, полученной на первом этапе алгоритма. На основе построенного дерева каждой цепочке байтов (уникальному коду из метода LZW) присваивается код Хаффмана переменной длины, который за счет уникального префикса может быть однозначно декодирован.

На заключительном этапе разработанного метода происходит формирование байтовой строки со сжатым изображением и формирование информации для его распаковки, которая включает в себя таблицу частот символов для восстановления дерева Хаффмана и уникальные пиксели исходного изображения для воссоздания словаря повторяющихся цепочек байтов. Полученная байтовая строка является результатом сжатия статического изображения гибридным методом.

⁵ Welcome to Python // Python. URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 01.03.2025).

⁶ `bitarray` 3.4.2 // PyPI. 2025. 21 мая. URL: <https://pypi.org/project/bitarray/> (дата обращения: 22.05.2025).

⁷ `progress` 1.6 // PyPI. 2021. 28 июля. URL: <https://pypi.org/project/progress/> (дата обращения: 01.03.2025).

⁸ Subprocess management – Python 3.13.1 documentation // Python. URL: <https://docs.python.org/3/library/subprocess.html> (дата обращения: 01.03.2025)

Для оценки эффективности разработанного гибридного метода сжатия изображений использовались следующие критерии.

Степень сжатия – показывает, на сколько процентов от изначального размера файла удалось сжать изображение. Чем выше коэффициент, тем лучше удалось выполнить сжатие. При этом учитывается не только размер сжатого изображения, но и объем метаданных, необходимых для его восстановления.

Размер информации для распаковки – показывает, какую часть сжатого изображения занимает информация, необходимая для восстановления исходного файла. Чем выше этот показатель, тем большую долю от сжатого файла занимают метаданные. Большой объем информации для распаковки может не дать достичь высокой степени сжатия изображения.

Для проведения исследования были выбраны изображения в формате BMP. Выбор файлов данного формата обусловлен хранением информации о каждом пикселе изображения в исходном качестве без сжатия. Также BMP-файлы широко используются на практике в различных приложениях и системах и подходят для работы и с черно-белыми, и с цветными изображениями. Все это делает выбранный формат оптимальным для проведения сравнения разработанного метода с аналогами.

Результаты сравнения по степени сжатия предложенного гибридного метода сжатия статических изображений без потерь методом LZW и методом Хаффмана приведены в Таблице 1 и на Рисунке 4.

Таблица 1

Результаты сравнения методов сжатия изображений по степени сжатия

Изображение	Метод LZW, %	Гибридный метод, %	Метод Хаффмана, %
sunrise.bmp	83,01	75,29	69,91
mars.bmp	84,61	78,30	71,59
wheat.bmp	77,67	70,52	68,02
forest.bmp	44,52	54,23	67,77
girl.bmp	40,84	48,05	59,23

Источник: здесь и далее таблицы составлены авторами.

Очевидно, что степень сжатия зависит от типа данных: метод LZW лучше работает с длинными последовательностями одинаковых пикселей, показывая наивысшую степень сжатия для изображений *sunrise.bmp* (83,01 %), *mars.bmp* (84,61 %) и *wheat.bmp* (77,67 %). Метод Хаффмана, напротив, демонстрирует лучшие результаты для изображений с неравномерным распределением цветов, пример *forest.bmp* (67,77 %) и *girl.bmp* (59,23 %).

Гибридный метод является универсальным решением, которое позволяет минимизировать зависимость от особенностей входных изображений. Например, для изображения *forest.bmp* он показывает степень сжатия 54,23 %, что выше, чем у метода LZW (44,52 %), но ниже, чем у метода Хаффмана (67,77 %). В то же время для изображения *mars.bmp* его результат (78,30 %) уступает методу LZW (84,61 %), но превосходит метод Хаффмана (71,59 %).

Таким образом, гибридный метод обеспечивает более стабильный результат сжатия, выступая как компромиссное решение между высокой степенью сжатия и универсальностью.

Метод сжатия статических изображений на основе
алгоритма Хаффмана

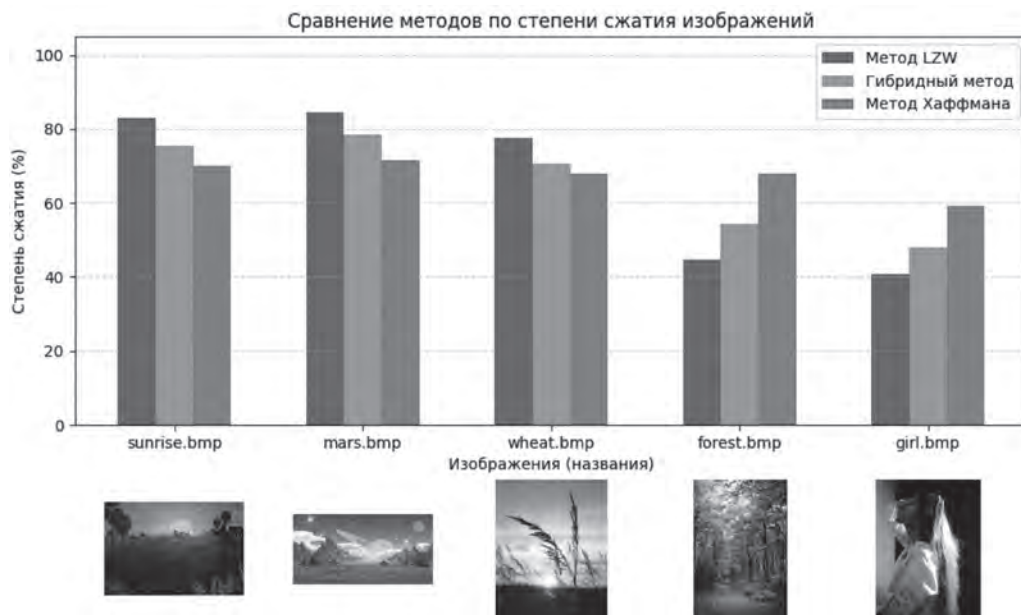


Рисунок 4. Сравнения методов сжатия статических изображений без потерь по степени сжатия

Источники:

sunrise.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/landscape-illustration-of-rural-land-agriculture-grassland--710583647464282760/>;

mars.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/79727855892992149/>;

wheat.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/871094752914032380/>;

forest.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/tiro-vertical-de-um-belo-caminho-coberto-de-rvores-de-outono-em-um-parque-com-dois-bancos-na-frente--602286150157857413/>;

girl.bmp – выполнена авторами.

Результаты сравнения методов сжатия статических изображений без потерь по количеству информации, необходимой для распаковки изображений, приведены в Таблице 2 и на Рисунке 5.

Таблица 2

Результаты сравнения методов сжатия по размеру информации для распаковки
изображений

Изображение	Метод LZW, %	Гибридный метод, %	Метод Хаффмана, %
sunrise.bmp	0,53	41,20	0,51
mars.bmp	0,77	41,81	0,72
wheat.bmp	0,76	39,07	0,88
forest.bmp	0,25	33,50	0,73
girl.bmp	2,72	39,05	6,59

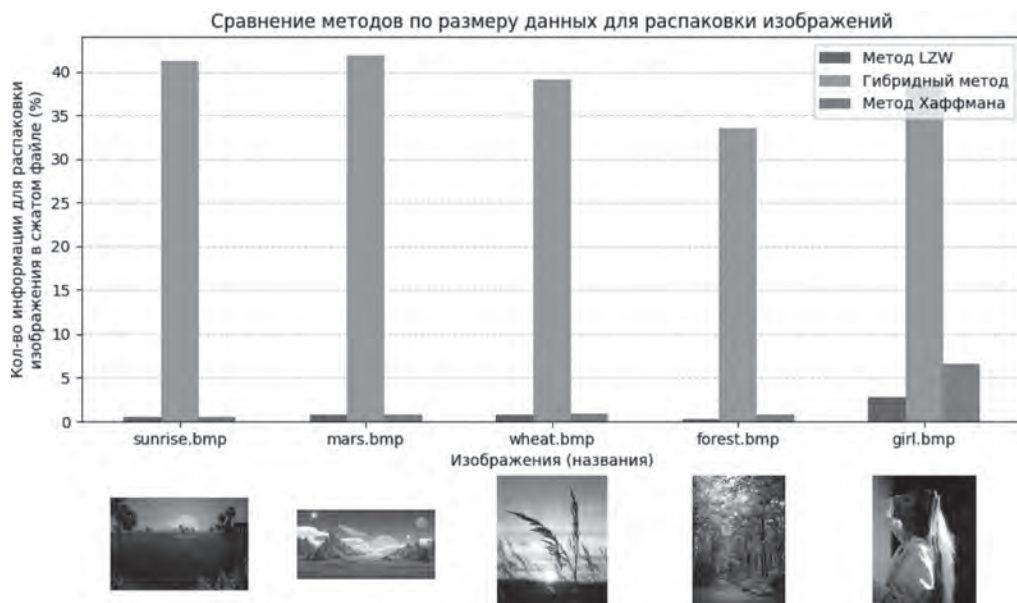


Рисунок 5. Сравнение методов сжатия статических изображений без потерь по количеству информации для распаковки

Источники:

sunrise.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/landscape-illustration-of-rural-land-agriculture-grassland--710583647464282760/>,

mars.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/79727855892992149/>;

wheat.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/871094752914032380/>;

forest.bmp – URL: <https://ru.pinterest.com/pin/tiro-vertical-de-um-belo-caminho-coberto-de-rvores-de-outono-em-um-parque-com-dois-bancos-na-frente--602286150157857413/>;

girl.bmp – выполнена авторами.

Как видно из полученных результатов, гибридный метод сжатия, сочетающий в себе алгоритмы LZW и Хаффмана, требует больше информации для распаковки изображения по сравнению с другими методами. Это связано с необходимостью сохранения данных, используемых на обоих этапах сжатия. Например, после применения LZW сохраняются уникальные пиксели изображения и размер кода LZW, а на этапе Хаффмана добавляется таблица частот символов и количество байтов, необходимых для сохранения частоты одного символа. Каждый из этих компонентов увеличивает объем метаданных. Как видно из Таблицы 2, для гибридного метода доля информации для распаковки составляет 33,50 ... 41,81 %, тогда как для методов LZW и Хаффмана этот показатель не превышает 6,59 %.

Несмотря на большой объем метаданных в сжатом файле, гибридный метод обеспечивает более стабильный результат сжатия за счет сильных сторон обоих алгоритмов. LZW эффективно сжимает повторяющиеся последовательности (например, однородные участки изображений), а метод Хаффмана оптимизирует кодирование частых символов. Это позволяет гибриднему методу адаптироваться к разным типам изображений, минимизируя зависимость от их структуры. Например, для изображения *forest.bmp* гибридный

Метод сжатия статических изображений на основе
алгоритма Хаффмана

метод показывает степень сжатия 54,23 %, что лучше, чем у LZW (44,52 %), и близко к результату Хаффмана (67,77 %). Для изображения *mars.bmp* метод LZW демонстрирует степень сжатия 84,61 %, что значительно лучше, чем у метода Хаффмана (71,59 %). Гибридный метод показывает промежуточный результат (78,30 %), сохраняя универсальность.

Таким образом, компромисс между объемом метаданных и универсальностью делает гибридный метод более эффективным для задач, где важна стабильность, а не абсолютная минимизация размера файла.

Литература

1. Тропченко А.Ю. Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео. СПб. : ИТМО, 2009. 108 с.
2. Лежнев В.Г., Марковский А.Н. Математические алгоритмы сжатия изображений. Краснодар : Кубанский гос. ун-т, 2015. 55 с.
3. Фролов А. Форматы JPEG, BMP, Gif и их особенности // Системный администратор. 2024. № 10 (263). С. 48–50. EDN AEQJNQ.
4. Бакулина М.П. Повышение эффективности сжатия изображений на основе метода RLE // Проблемы информатики. 2023. № 4 (61). С. 73–77. DOI: 10.24412/2073-0667-2023-4-73-77. EDN QBTMBL.
5. Виноградова М.С., Ткачева О.С. Сжатие данных. Алгоритм Хаффмана // Modern European Research. 2022. Т. 1. № 3. С. 60–69. EDN GBZVGC.
6. Равский А.А., Левенец А.В. Современные тенденции развития алгоритмов сжатия // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2021. № 3 (62). С. 29–36. EDN BBHXC.
7. Kaur H. Image Compression Techniques with LZW method // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2022. Vol. 10. No. 1. Pp. 1773–1777. DOI: 10.22214/ijraset.2022.39999. EDN UVGHJM.

References

1. Tropchenko A.Yu. (2009) *Metody szhatiya izobrazhenii, audiosignalov i video* [Methods of image, audio signals and video compression] St. Petersburg : ITMO University Publ. 108 p. (In Russian).
2. Lezhnev V.G., Markovskiy A.N. (2015) *Matematicheskie algoritmy szhatiya izobrazhenii* [Mathematical algorithms for image compression]. Krasnodar : Kuban State University Publ. 55 p. (In Russian).
3. Frolov A. (2024) JPEG, BMP, Gif formats and their features. *Sistemnyi administrator* [System administrator]. No. 10 (263). Pp. 48–50. (In Russian).
4. Bakulina M.P. (2023) Increasing Efficiency of Image Compression Based on the RLE Method. *Problems of Informatics*. No. 4 (61). Pp. 73–77. DOI: 10.24412/2073-0667-2023-4-73-77. (In Russian).
5. Vinogradova M.S., Tkacheva O.S. (2022) Data Compression. Huffman Algorithm. *Modern European Research*. Vol. 1. No. 3. Pp. 60–69. (In Russian).
6. Ravskiy A.A., Levenets A.V. (2021) Modern Trends in the Development of Data Compression Algorithms. *Bulletin of Pacific National University*. No. 3 (62). Pp. 29–36. (In Russian).
7. Kaur H. (2022) Image Compression Techniques with LZW method. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Vol. 10. No. 1. Pp. 1773–1777. DOI: 10.22214/ijraset.2022.39999

Поступила в редакцию: 16.05.2025

Received: 16.05.2025

Поступила после рецензирования: 02.06.2025

Revised: 02.06.2025

Принята к публикации: 15.06.2025

Accepted: 15.06.2025

Рыбаков Алексей Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий, доцент кафедры технологий материалов и промышленной инженерии, Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева, город Астрахань. ORCID: 0000-0003-1192-0913, AuthorID: 705151, SPIN-код: 3828-4760
Электронный адрес: rybakov_alex@mail.ru

Aleksey V. Rybakov

Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of information technologies, Associate Professor at the Department of materials technology and industrial engineering, Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan. ORCID: 0000-0003-1192-0913, SPIN-code: 3828-4760, AuthorID: 705151
E-mail address: rybakov_alex@mail.ru

Гладышев Михаил Дмитриевич

аспирант, Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева; инженер-конструктор ООО «СМЕЛКОМ РОБОТИКС», город Астрахань. ORCID: 0000-0002-5330-3369, SPIN-код: 9940-5947, AuthorID: 1144318

Электронный адрес: mih.gladishev@gmail.com

Mikhail D. Gladyshev

Postgraduate, Astrakhan Tatishchev State University; Design Engineer of SMELCOM ROBOTICS LLC., Astrakhan. ORCID: 0000-0002-5330-3369, SPIN-code: 9940-5947, AuthorID: 1144318

E-mail address: mih.gladishev@gmail.com

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ ИСПЫТАНИЙ ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Аннотация. Статья посвящена разработке виртуальной среды испытаний подводного робототехнического комплекса с использованием цифрового двойника. Представлена архитектура системы, реализующая моделирование поведения подводного робототехнического комплекса, визуализацию в Unity и запуск тестовых сценариев. Описаны алгоритмы управления, обработки сенсорных данных и оценки поведения в условиях подводной среды. Работа направлена на повышение точности, надёжности и эффективности автономного функционирования подводного робототехнического комплекса за счёт предварительной виртуальной отладки.

Ключевые слова: робототехника, подводный робототехнический комплекс, моделирование, цифровой двойник, тестирование.

Для цитирования: Рыбаков А.В., Гладышев М.Д. Создание виртуальной среды испытаний подводного робототехнического комплекса на основе цифрового двойника // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 2. С. 158 – 164. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.02.P.158

CREATION OF A VIRTUAL TESTING ENVIRONMENT FOR AN UNDERWATER ROBOTIC COMPLEX BASED ON A DIGITAL TWIN

Abstract. The article addresses the development of a virtual testing environment for an underwater robotic complex using a digital twin. The article presents an architecture of the system that implements modeling of the underwater robotic complex behavior, visualization in Unity and launching test scenarios. Algorithms

for control, processing of sensory data and behavior assessment in underwater conditions are described. The work is aimed at improving the accuracy, reliability and efficiency of autonomous operation of the underwater robotic complex due to preliminary virtual debugging.

Keywords: robotics, underwater robotic complex, modeling, digital twin, testing.

For citation: Rybakov A.V., Gladyshev M.D. (2025) Creation of a virtual testing environment for an underwater robotic complex based on a digital twin. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management*. No. 2. Pp. 158 – 164. DOI: 10.18137/RNU.V9I187.25.02.P.158 (In Russian).

Современные автономные *подводные робототехнические комплексы* (далее – ПРТК) находят широкое применение в инженерных задачах, связанных с прокладкой подводных линий связи, мониторингом морского дна, инспекцией объектов и обслуживанием глубоководной инфраструктуры. Их функционирование сопряжено с воздействием факторов нестабильной подводной среды: высокой инерционностью, ограниченной видимостью, невозможностью прямой радиосвязи, а также значительным влиянием внешних возмущений (течения, неоднородность плотности воды, изменения освещения, геометрии дна). Всё это существенно затрудняет процессы испытаний, отладки и верификации алгоритмов управления, делая невозможным полное тестирование решений исключительно в физической среде.

Цифровой двойник (далее – ЦД) в контексте ПРТК представляет собой синтетическую модель, объединяющую математическое описание динамики робота, структуру его системы управления, а также каналы связи с сенсорными данными и внешней средой [1–3]. Использование цифрового двойника позволяет в условиях цифровой симуляции протестировать функциональные блоки автономного комплекса, оценить корректность выполнения алгоритмов позиционирования, траекторного управления, реакции на сбои сенсоров и внешние возмущения [4–6]. Кроме того, цифровая среда позволяет проводить многовариантное тестирование с заданным набором начальных условий и сценариев, что важно для системного анализа устойчивости и надёжности поведения ПРТК.

Сложность подводной среды, ограниченность доступа к реальным объектам, высокая стоимость натурных экспериментов и важность безопасности при выполнении миссий формируют актуальный научно-практический запрос на разработку интегрированной цифровой среды, обеспечивающей виртуальное тестирование автономных подводных систем с высокой степенью достоверности.

Цель исследования – разработка и описание архитектуры виртуальной среды испытаний подводного робототехнического комплекса на основе цифрового двойника, включающей в себя механизмы сценарного тестирования, моделирования поведения в условиях подводной среды и систему оценки отклонений между цифровой и реальной моделью.

Для достижения указанной цели в рамках статьи решаются следующие задачи:

- формализация архитектуры цифровой среды с позициями теории управления;
- описание структуры цифрового двойника ПРТК и его интеграции с сенсорными данными;
- разработка сценариев тестирования автономного поведения;
- построение критериев оценки соответствия поведения цифровой и физической моделей;
- проведение анализа и визуализации поведения робота в виртуальной среде с использованием Unity.