



Применение пространственного подхода для задачи архивации телеметрических данных

И. В. Богачев^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-8203-7779, ilya.bogachev@yahoo.com

А. В. Левенец^а, доктор техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-6973-6185

Д. П. Зайцев^а, лаборант, orcid.org/0009-0009-7241-0627

^аТихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035, РФ

Введение: для обработки данных телеметрии, которым в последние годы не уделялось достаточного внимания, существует ряд алгоритмов как специализированных, так и общего назначения, ни один из которых не показывает хотя бы приемлемую эффективность, и все имеют ряд фундаментальных ограничений. **Цель:** разработать эффективный алгоритм сжатия/восстановления наборов кадров телеметрических данных на основе пространственного подхода к их представлению и формата хранения их сжатого представления для задачи архивации. **Результаты:** предложен алгоритм сжатия наборов кадров телеметрических данных, представляющих собой трехмерные разностно-битовые матрицы, рассмотрены различные способы их отображения в тело фрактального куба. Для хранения сжатого представления данных разработан специализированный формат описания, который эффективно может быть применен в задаче архивации данных. Приведены оценки скорости и качества работы разработанного алгоритма, который по эффективности сравнился с алгоритмом, основанным на построении префиксных кодов Хаффмана, и с алгоритмом DEFLATE, входящим в состав утилиты WinRAR, который в свою очередь является фактическим отраслевым стандартом для решения задач сжатия и архивации. В результате доказано существенное превосходство разработанного алгоритма над алгоритмами Хаффмана и DEFLATE в скорости и коэффициенте сжатия. **Практическая значимость:** использование предложенного алгоритма может привести к значительным технико-экономическим выгодам для промышленных предприятий и улучшению эффективности работы систем передачи телеметрических данных. **Обсуждение:** основным недостатком разработанного алгоритма является нелинейная зависимость времени сжатия от размерности сжимаемых данных, являющаяся следствием как невозможности эффективно сегментировать данные для их раздельной обработки, так и необходимости в многопроходной обработке. Решение данных проблем открывает ряд перспективных направлений для дальнейшего развития алгоритма.

Ключевые слова – наборы кадров, телеметрические данные, обратимое сжатие, архивация, телеметрические системы.

Для цитирования: Богачев И. В., Левенец А. В., Зайцев Д. П. Применение пространственного подхода для задачи архивации телеметрических данных. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 2, с. 16–26. doi:10.31799/1684-8853-2025-2-16-26, EDN: NMLHJC

For citation: Bogachev I. V., Levenets A. V., Zaitsev D. P. Application of spatial approach to the problem of archiving measurement data. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 2, pp. 16–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-2-16-26, EDN: NMLHJC

Введение

В современном мире информация играет ключевую роль во многих сферах жизни общества, при этом темпы ее роста постоянно увеличиваются, что обусловлено развитием технологий и глобализацией. Ежедневно вырабатываются огромные объемы данных: видео, аудио, текстовые данные и многие другие их типы. Не являются исключением и данные, получаемые от систем телеметрии. Телеметрические данные играют критически важную роль в современном мире, предоставляя ценную информацию о том, как функционируют процессы и системы, позволяя принимать обоснованные решения и улучшать эффективность их работы.

Очевидно, что с ростом объемов генерируемых данных возникает необходимость их эффективного сжатия в целях как дальнейшей передачи по каналам связи, так и длительного хранения. Происходит неуклонный рост значимости

данной процедуры, поскольку, сокращая объемы данных, можно снизить технико-экономические затраты на их передачу, хранение и обработку и повысить производительность работы систем.

Однако стоит учесть, что разные типы данных требуют разных подходов к сжатию. Для изображений и видео обычно используются специализированные алгоритмы сжатия с потерями, такие как JPEG или H.264/AVC [1, 2]. Для текстовых данных зачастую привлекают универсальные алгоритмы сжатия без потерь, такие как LZW или DEFLATE, последний основан на комбинации алгоритмов LZ77 и Хаффмана [3–6]. В случае данных телеметрии лишь немногие универсальные алгоритмы показывают хотя бы приемлемую эффективность, при этом обращение к специализированным алгоритмам сильно ограничено в связи с их спецификой [6–19]. Предложенные в этих работах алгоритмы сжатия данных, полученные от беспроводных сенсорных сетей [6, 7, 19] и систем телеизмерения

[9–12], взятые для обработки данных ультразвукового исследования [15] и биомедицинских сигналов [13, 14] хорошо работают с телеметрическими данными только определенного типа или обладающими только определенными свойствами, что значительно сужает область их эксплуатации.

Таким образом, в настоящее время существует практическая необходимость в разработке эффективных алгоритмов сжатия телеметрических данных широкого спектра.

Представление кадров телеметрических данных

В данной работе предложен алгоритм обратимого сжатия телеметрических данных для задачи их архивации, основанный на пространственном подходе [20], идея которого заключается в представлении отсчетов данных в разностно-битовом виде с их последующей группировкой и расположением на поверхности или внутри тела некоторого пространственного объекта. Применение такого подхода позволяет производить более глубокий анализ данных с сохранением корреляционных связей как между отсчетами, полученными в один момент времени и объединенными в рамках единого кадра данных, так и между кадрами, полученными за все время работы системы и объединенными в наборы.

В качестве пространственного объекта для отображения данных был выбран фрактальный параллелепипед, при этом для переноса бит предлагается использовать способы последовательного и группового отображения.

Последовательный способ подразумевает отображение кадров друг за другом в глубину, в результате чего формируется трехмерная битовая матрица G_C (фрактальный параллелепипед) размерностью $n \times m \times l$, где l — количество кадров в наборе, n — разрядность отсчетов и m — количество отсчетов в кадре.

Групповой способ представления является модификацией последовательного, но различия заключаются в том, что каждые четыре кадра формируют группу, а каждая группа располагается последовательно друг за другом. При этом если рассматривать получившийся объект со стороны геометрии, то он останется все тем же параллелепипедом, а при рассмотрении со стороны битового отображения — трехмерной матрицей G_G размерностью $(n \times 2) \times (m \times 2) \times (l / 4)$.

Важно отметить, что в случае группового представления классический способ расположения бит в телеметрическом кадре (слева направо от старшего разряда к младшему и сверху вниз от первого отсчета к последнему) следует изме-

нить, так как при его использовании на текущей структуре будут нарушены корреляционные зависимости между кадрами. Чтобы не допустить этого, нужно отображать биты следующим образом:

- для первого кадра (верхнего левого) биты записываются, как и при классическом способе, по строкам сверху вниз и слева направо в каждой строке;

- для второго кадра (верхнего правого) биты записываются по строкам сверху вниз и справа налево в каждой строке;

- для третьего кадра (нижнего правого) биты записываются по строкам снизу вверх и слева направо в каждой строке;

- для четвертого кадра (нижнего левого) биты записываются по строкам снизу вверх и справа налево в каждой строке.

Также необходимо изменить и алгоритм преобразования данных в бинарный вид на более подходящий для полученной структуры, которое нужно производить следующим образом:

- 1) число представляется в бинарном виде в зависимости от знака по следующему принципу:

- a) если число является положительным, оно представляется в бинарном виде разности самого числа и единицы;

- b) если число является отрицательным, оно представляется в своем бинарном виде без учета знака;

- v) ноль представляется в бинарном виде без изменений, т. е. нулем;

- 2) к полученной бинарной последовательности младшим разрядом дописывается один бит, отвечающий за знак числа и равный:

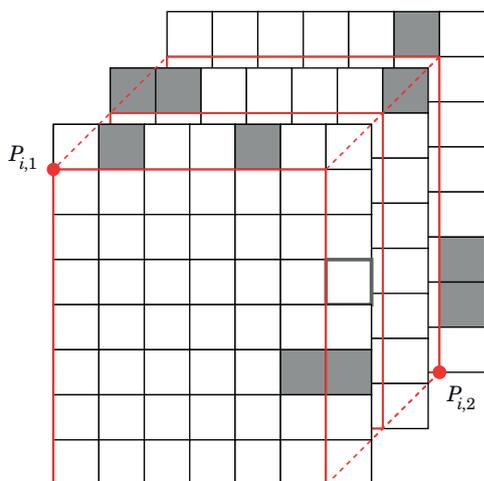
- a) нулю, если число отрицательное или равно нулю;

- b) единице, если число положительное.

Алгоритм сжатия, основанный на отображении данных в фрактальный параллелепипед

В основе данного алгоритма лежит поиск областей, сумма бит внутри которых больше некоторого порогового значения в теле фрактального параллелепипеда, образованного в ходе последовательного и группового способов отображения телеметрических кадров. При этом фиксировать обнаруженные области предлагается с использованием двух точек в системе координат фрактального параллелепипеда: $P_{i,1}[x_{i,1}, y_{i,1}, z_{i,1}]$ и $P_{i,2}[x_{i,2}, y_{i,2}, z_{i,2}]$ (где i — номер области), — как это представлено на рис. 1.

В качестве алгоритма поиска областей предлагается использовать подход, в основу которого положен алгоритм, разработанный Д. Каданом [21],



■ **Рис. 1.** Пример поиска области в теле фрактального параллелепипеда

■ **Fig. 1.** Example of searching for an area in the body of a fractal parallelepiped

изначально предназначенный для поиска максимальной суммы подмассива для заданного одномерного массива целых чисел. Тогда для поиска области с максимальной суммой в теле фрактального параллелепипеда нужно получить его взвешенное представление [20], после чего выявить вложенный параллелепипед с максимальной суммой значений всех его элементов в теле основного параллелепипеда. Для этого следует пройти по всем возможным вложенным параллелепипедам с подсчетом сумм значений входящих в них элементов.

Параллелепипед предлагается называть фрактальным, так как по окончании алгоритма поиска он разобьется на множество непересекающихся областей, обладающих свойством самоподобия, т. е. каждая область будет представлять собой все тот же фрактальный параллелепипед.

Следует отметить, что при групповом способе представления данных возможна ситуация, при которой количество кадров в наборе не равно числу, кратному четырем, вследствие чего объект, образованный после процедуры предварительной обработки, не будет являться параллелепипедом. Предлагается два варианта решения данной проблемы:

1) при формировании набора телеметрических кадров строго ограничивать количество кадров числом, кратным четырем;

2) ввести предшествующую первому шагу алгоритма поиска процедуру проверки количества кадров в наборе на соблюдение условия кратности четырем. В ситуации, когда условие соблюдается и количество кадров в наборе кратно четырем, выполняется описанный ранее алгоритм без каких-либо дополнительных операций. В случае, когда условие не соблюдается и коли-

чество кадров не кратно четырем, предлагается дополнить набор посредством дублирования последнего кадра до тех пор, пока условие кратности не выполнится.

Формат описания сжатых и архивированных данных

В результате работы алгоритма поиска областей весь набор кадров телеметрических данных разделится на три составляющие:

- список координат начала $P_{i,1}$ и конца $P_{i,2}$ найденных в ходе поиска областей;
- список координат бит, находящихся в найденных областях, значение которых равно единице ($P_{един,i}$);
- список бит, не вошедших ни в одну из областей.

Формирование структуры сжатых данных происходит путем представления каждой из составляющих в бинарном виде и их последующей записи в единую последовательность. Однако данный процесс отличается в зависимости от выбранного способа представления набора телеметрических кадров.

Для алгоритма сжатия телеметрических данных, основанного на их отображении в теле фрактального параллелепипеда последовательным способом, процедуру формирования структуры описания сжатых данных можно описать с помощью следующей последовательности шагов:

- 1) определение количества бит, которое нужно выделить для хранения числа найденных областей;
- 2) определение количества бит, которое нужно выделить для хранения значений пары координат одной области;
- 3) определение количества бит, которое нужно выделить под хранение числа бит, находящихся в найденных областях, значение которых равно единице;
- 4) определение бит, которые не вошли ни в одну из найденных областей;
- 5) запись бит в определенном порядке.

Количество бит, которое нужно выделить для хранения числа найденных областей, определяется по формуле

$$Q_q = 1 + \lfloor \log_2(q - 1) \rfloor, \quad (1)$$

где q — количество найденных областей.

Количество бит, выделяемых для хранения числа бит, имеющих значение логической единицы в найденных областях, определяется по формуле

$$Q_g = 1 + \lfloor \log_2(g - 1) \rfloor, \quad (2)$$

где g — количество единичных бит в найденных областях.

Количество бит, которое нужно выделить для хранения значений одной координаты по осям X , Y и Z , определяется по следующим формулам:

$$Q_X = 1 + \lceil \log_2(n - 1) \rceil; \quad (3)$$

$$Q_Y = 1 + \lceil \log_2(m - 1) \rceil; \quad (4)$$

$$Q_Z = 1 + \lceil \log_2(l - 1) \rceil. \quad (5)$$

Для алгоритма сжатия телеметрических данных, основанного на их отображении в телефрактального параллелепипеда последовательным способом, порядок записи бит представлен на рис. 2, а.

Декодирование данных из сжатого формата происходит с учетом того, что количество кадров в наборе и отсчетов в кадре заранее определено, а также известна разрядность данных. При этом выполняется следующая последовательность шагов:

1) строится пустая трехмерная матрица $G_{\text{вос}}$ размерностью $n \times m \times l$;

2) считываются биты, хранящие количество найденных областей, после чего считываются биты, хранящие значения координат найденных областей. На основе полученной информации происходит восстановление найденных областей в матрице $G_{\text{вос}}$;

3) считываются биты, хранящие количество единичных бит, находящихся в найденных об-

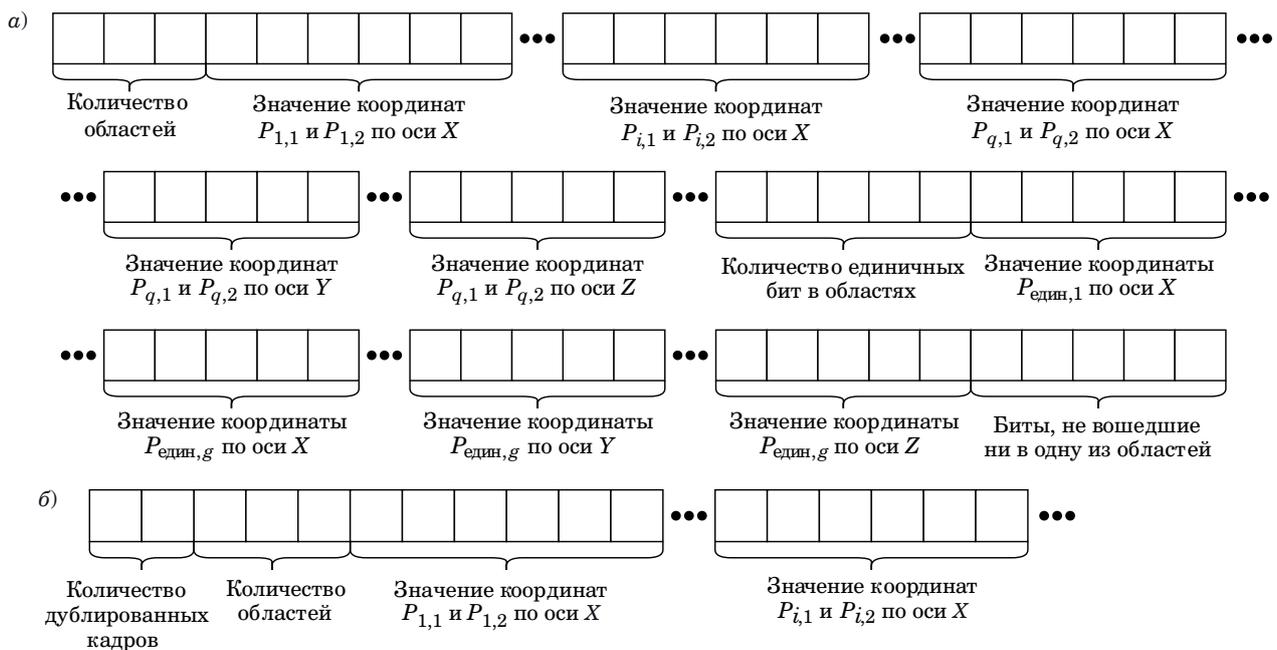
ластях, после чего считываются биты, хранящие значения их координат. На основе полученной информации производится восстановление единичных бит, находящихся в найденных областях;

4) последовательно считываются биты несжатых данных и записываются в оставшиеся свободными элементы матрицы $G_{\text{вос}}$;

5) выполняются процедуры обратного преобразования данных из бинарного вида в десятичный и обратного дельта-кодирования.

Для алгоритма сжатия телеметрических данных, основанного на их отображении в телефрактального параллелепипеда групповым способом, процедура формирования структуры описания сжатых данных дополняется шестым шагом, который необходим для учета ситуации, при которой количество кадров в наборе не равно числу, кратному четырем. На данном шаге к полученной результирующей бинарной последовательности в начало добавляются несколько бит, отведенных для хранения числа дублирований последнего кадра набора (рис. 2, б).

Исходя из того, что при групповом способе отображения телеметрические кадры группируются по четыре штуки, можно сделать вывод, что возможное количество дублированных кадров варьируется от нуля в лучшем случае до трех в худшем. Вследствие чего для минимизации объема результирующей последовательности при кодировании числа дублированных кадров предлагается выделять именно два бита.



■ **Рис. 2.** Порядок записи сжатого набора кадров телеметрических данных при последовательном (а) и групповом (б) способе отображения

■ **Fig. 2.** The order of recording a compressed set of telemetry data frames with a sequential (а) and group (б) display method

Количество бит, необходимых для хранения числа найденных областей, а также количество бит, выделяемых для хранения числа единичных бит в этих областях, определяется по формулам (1) и (2) соответственно.

Однако стоит заметить, что формулы (3)–(5), по которым определяется количество бит, необходимое для хранения значений одной координаты по осям X , Y и Z , в данном случае нужно изменить в соответствии с размерностью матрицы G_G следующим образом:

$$Q_X = 1 + \lfloor \log_2((n \cdot 2) - 1) \rfloor;$$

$$Q_Y = 1 + \lfloor \log_2((m \cdot 2) - 1) \rfloor;$$

$$Q_Z = 1 + \left\lfloor \log_2 \left(\left(\frac{l+d}{4} \right) - 1 \right) \right\rfloor,$$

где d — количество дублированных кадров.

Процедура декодирования данных из сжатого формата при групповом способе отображения кадров имеет всего два отличия:

- 1) на первом шаге строится трехмерная матрица $S_{G_{вос}}$ размерностью $(n \times 2) \times (m \times 2) \times ((l + d) / 4)$;
- 2) после процедур обратного преобразования данных из бинарного вида в десятичный и обратного дельта-кодирования выполняется удаление дублированных кадров.

Применение предложенных выше форматов описания сжатых данных возможно только при условии, что при декодировании заранее известны такие показатели, как количество кадров в закодированном наборе, количество отсчетов в кадре (т. е. количество источников, с которых отправлялись данные), а также разрядность этих данных. Вследствие чего они не подходят для сжатия телеметрических данных в целях их архивации.

Для задачи сжатия телеметрических данных в целях их архивации нужно дополнить бинарные последовательности, полученные в ходе работы предложенных выше процессов формирования структуры описания сжатых данных, информацией о параметрах системы: количестве кадров в наборе, количестве отсчетов в кадре и их разрядности, — а также информацией о использованном методе сжатия, необходимой для полного восстановления данных. Следует учитывать, что при

декодировании архивированных данных эта информация заранее не известна. Для кодирования каждого из параметров предлагается выделить по десять бит и вставить их в начало последовательности. Поскольку в работе показаны два варианта способа представления данных для одного алгоритма сжатия, для кодирования выбранного алгоритма хватит двух бит, которые нужно поставить в начало последовательности. Сформированную данным способом группу бит предлагается называть «служебной частью». Таким образом, служебная часть будет сформирована из последовательности бит, показанной на рис. 3.

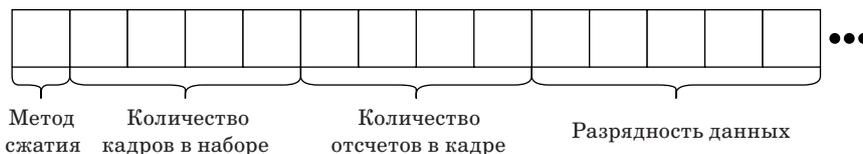
Полученную бинарную последовательность, состоящую из служебной и описательной частей, надо закодировать в соответствии с расширенной восьмибитной таблицей ASCII. Вследствие чего полностью заархивированный файл будет состоять из однобайтовых символов, что в свою очередь говорит о том, что в худшем случае он получит семь избыточных бит по сравнению с еще не архивированной бинарной последовательностью. Стоит заметить, что такое преобразование необходимо в целях последующего сравнения результатов кодирования предложенного в работе алгоритма с уже известными алгоритмами сжатия, и данный этап можно пропустить в случае передачи данных по каналам связи систем телеметрии.

Предложенный алгоритм является асимметричным, так как процесс разархивации затрачивает в разы меньше времени и необходимых системных ресурсов в сравнении с процессом сжатия, при этом включая в себя две стадии: обработку архивированного формата данных и восстановление исходных данных.

Стадия обработки подразумевает декодирование с выявлением основных параметров, необходимых для восстановления исходных телеметрических данных, таких как применяемый алгоритм сжатия и размерность исходной фигуры.

Обработка архивированного формата данных состоит из следующих шагов:

- 1) выполняется восстановление бинарной последовательности путем представления каждого символа архивированного файла в двоичный вид в соответствии с таблицей ASCII;
- 2) определяется алгоритм сжатия путем извлечения из полученной бинарной последовательности первых двух бит;



■ **Рис. 3.** Порядок записи бит служебной части данных при архивации
 ■ **Fig. 3.** The order of recording the bits of the service part of the data during archiving

3) определяется количество кадров в наборе, количество отсчетов в кадре, а также разрядность данных, т. е. определяется размерность исходной фигуры на основе следующих 30 бит последовательности по 10 на каждый параметр путем преобразования данных из двоичной системы счисления в десятичную.

По окончании обработки архивированного формата становятся известны параметры системы, необходимые для корректного декодирования данных из сжатого формата и восстановления исходных телеметрических данных, описанных ранее для каждого из алгоритмов сжатия.

Исследование эффективности работы алгоритма

Исследование предлагаемого в работе алгоритма сжатия было проведено с использованием шести наборов кадров телеметрических данных, из которых:

– четыре набора содержали реальные данные, полученные от различных предприятий энергетики Дальнего Востока;

– два набора содержали данные, искусственно сгенерированные генератором случайных чисел по нормальному закону распределения.

Наборы реальных данных (НРД) включали в себя от 10 до 20 тысяч кадров, состоящих из восьмиразрядных отсчетов, полученных от 32 до 56 источников, при этом наборы искусственно сгенерированных данных (НИСД) состояли строго из 64 кадров, каждый из которых включал в себя строго 32 восьмибитных отсчета.

Стоит отметить, что, несмотря на то, что все исследования проводились лишь на восьмибитных данных, предложенный в работе алгоритм сжатия не имеет подобного ограничения и способен обрабатывать данные любой разрядности. Также важно заметить, что применение процедуры дельта-кодирования проводилось над всеми наборами данных, что обусловлено необходимостью проведения их исследования в равных

■ **Таблица 1.** Исследование пространственного алгоритма сжатия

■ **Table 1.** Research of spatial compression algorithm

Алгоритм сжатия	Параметр	Количество кадров в выборке	Набор данных					
			НРД1	НРД2	НРД3	НРД4	НИСД1	НИСД2
ФП-П	Коэффициент сжатия, ед.	8	13,31	4,56	10,85	8,59	6,75	5,97
		16	14,58	4,64	14,08	10,17	7,90	6,55
		32	19,68	4,85	16,38	10,95	8,44	6,85
		64	23,10	4,88	18,70	11,66	8,70	5,62
	Время сжатия, с	8	0,44	0,86	0,62	0,11	0,42	0,46
		16	0,12	0,43	0,23	0,74	0,13	0,12
		32	0,82	2,60	1,12	2,91	0,41	0,67
		64	4,19	24,13	6,21	9,29	2,11	3,91
ФП-Г	Коэффициент сжатия, ед.	8	12,02	4,36	10,85	8,77	6,65	5,79
		16	14,58	4,56	13,39	10,17	7,67	6,39
		32	19,12	4,69	15,64	10,97	8,65	6,71
		64	22,64	4,75	18,66	12,11	8,92	5,57
	Время сжатия, с	8	0,42	0,68	0,64	0,15	0,45	0,43
		16	0,16	0,27	0,35	0,51	0,17	0,16
		32	0,60	0,97	0,79	1,47	0,58	0,59
		64	1,92	5,63	2,78	5,17	1,61	1,93

условиях, при этом очевидно, что данная процедура не может повысить эффективность сжатия НИСД.

Представим результаты исследования эффективности работы предложенного алгоритма сжатия, основанного на отображении телеметрических данных в тело фрактального параллелепипеда последовательным (ФП-П) и групповым (ФП-Г) способом (табл. 1), при этом оценивались коэффициент сжатия и время сжатия.

Анализируя результаты, представленные в табл. 1, можно сделать вывод, что вне зависимости от количества кадров в выборке и степени стационарности исследуемых наборов наибольшие коэффициенты сжатия показывает алгоритм, основанный на представлении кадров в теле ФП-П. Однако стоит заметить, что по данному критерию ФП-Г проигрывает лишь в незначительной степени. То же самое касается и времени сжатия.

Рассматривая результаты, полученные на наборах с реальными и искусственно сгенерированными данными, можно увидеть, что во втором случае коэффициенты и время сжатия в разы меньше, что можно объяснить большим динамическим диапазоном и отсутствием аномальных значений, вызванных случайными погрешностями в наборах данных при разностном представлении кадров, по сравнению с первым.

Важно заметить, что предложенный алгоритм показывает повышение коэффициента сжатия с увеличением количества кадров в выборке, при этом затрачиваемое на сжатие время значительно возрастает. На рис. 4, а и б приведены графики зависимости времени сжатия и коэффициента сжатия от количества кадров в сжимаемом наборе для алгоритма ФП-П.

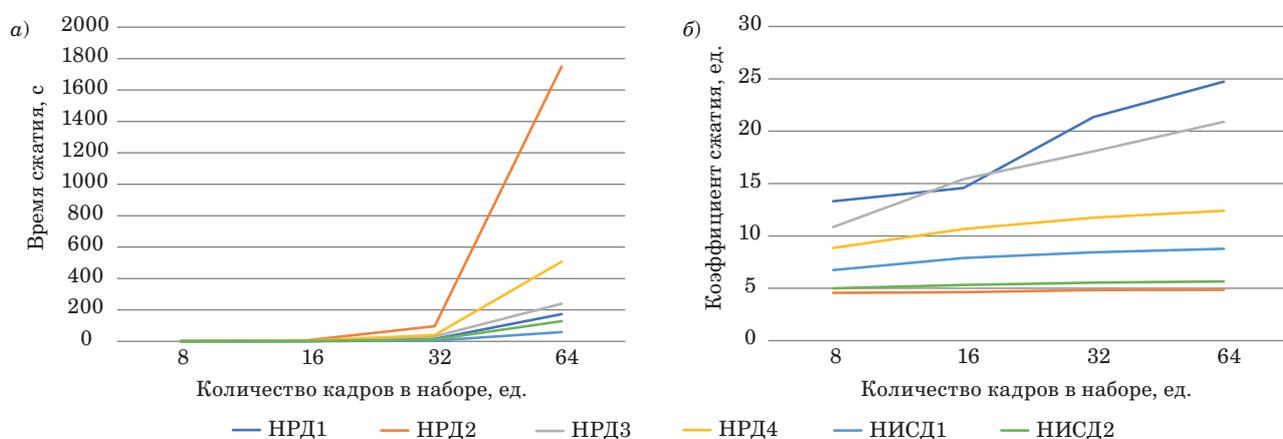
Анализ графиков позволяет утверждать, что с увеличением количества кадров в сжимаемом наборе возрастает время сжатия, причем стоит заметить, что если при увеличении объема кадров в наборе с восьми до 16 наблюдается незначительное увеличение времени сжатия, то при переходе с 16 до 32 и с 32 до 64 время сжатия возрастает на порядок. Вследствие чего можно сделать вывод, что зависимость времени сжатия от количества кадров в сжимаемом наборе носит экспоненциальный характер. При этом зависимость коэффициента сжатия от количества кадров в сжимаемом наборе носит окололинейный характер.

Основываясь на данных результатах, можно прийти к выводу, что использование пространственных алгоритмов сжатия на наборах с количеством кадров, превышающим 16 единиц, является нерациональным.

Для качественной оценки предложенного алгоритма сжатия были проведены исследования применения на тестовых наборах алгоритма, основанного на кодировании Хаффмана, а также алгоритма DEFLATE, реализованного в утилите WinRAR, являющейся фактическим лидером в области архивации данных [22].

Важно отметить, что при использовании алгоритмов Хаффмана и DEFLATE над тестовыми наборами проводилась предварительная обработка, а именно процедура дельта-кодирования. Результаты исследований представлены в табл. 2.

По результатам, представленным в табл. 2, можно сделать вывод, что использование алгоритма DEFLATE позволяет получить большие коэффициенты сжатия, в свою очередь алгоритм Хаффмана имеет выигрыш во времени сжатия. Стоит заметить, что использование как алгорит-



■ **Рис. 4.** Зависимость времени сжатия (а) и коэффициента сжатия (б) от количества кадров в сжимаемом наборе для ФП-П

■ **Fig. 4.** Dependence of compression time (a) and compression ratio (b) on the number of frames in the compressed set for a compression algorithm based on mapping telemetry data into the body of a fractal parallelepiped in a sequential way

■ **Таблица 2.** Сравнение эффективности сжатия алгоритмом Хаффмана и DEFLATE
 ■ **Table 2.** Comparison of compression efficiency of the Huffman algorithm and DEFLATE

Алгоритм сжатия	Параметр	Набор данных					
		НРД1	НРД2	НРД3	НРД4	НИСД1	НИСД2
Хаффмана	Коэффициент сжатия, ед.	3,90	2,55	3,85	3,68	3,02	2,58
	Время сжатия, с	0,11	0,51	0,12	0,14	0,16	0,37
DEFLATE	Коэффициент сжатия, ед.	7,54	2,96	7,06	6,82	3,23	2,19
	Время сжатия, с	0,56	0,58	0,70	0,59	0,55	0,68

ма Хаффмана, так и DEFLATE является наиболее эффективным для стационарных наборов кадров.

Сравнение результатов обеих таблиц приводит к выводу, что алгоритм сжатия на основе пространственного подхода обеспечивает бóльший коэффициент сжатия: в среднем в 2,1 раза по сравнению с DEFLATE и в 2,9 раза по сравнению с алгоритмом Хаффмана. При этом по скорости работы предложенный алгоритм выигрывает у DEFLATE в среднем в 3,5 раза и в среднем в 1,2 раза у алгоритма Хаффмана. Однако стоит учитывать, что сравнение происходило на относительно малой выборке данных, состоящей из 16 кадров.

Важно заметить, что предлагаемый метод сжимает данные из наборов НИСД лучше, чем алгоритм Хаффмана. Причина заключается в том, что согласно принципам пространственного подхода набор исходных данных преобразуется в битовую последовательность, которая сворачивается в пространственный объект, при определенных условиях имеющий более упорядоченный вид, чем исходный набор данных. В свою очередь это позволяет получать более высокие значения коэффициента сжатия по сравнению с алгоритмами, которые учитывают энтропию данных, представленных классическим способом.

Таким образом, результаты, полученные в ходе проведенных исследований, позволяют сделать вывод, что предложенный в работе специализированный алгоритм пространственного сжатия превосходит популярные в настоящее время алгоритмы универсального назначения при задаче архивации телеметрических данных.

Заключение

В результате проведенного исследования разработан основанный на пространственном подходе алгоритм архивации телеметрических данных, использование которого может привести к значительному снижению требований к объемам хранилищ данных или к увеличению коли-

чества хранимых данных. Рассмотрены различные подходы к сжатию данных и показано, что пространственный подход позволяет достичь значительного результата в задаче сжатия и архивации телеметрических данных, выигрывая по коэффициенту сжатия у алгоритма DEFLATE в среднем в 2,1 и по скорости сжатия – 3,5 раза.

Полученные результаты демонстрируют, что использование пространственного подхода к представлению данных может быть эффективным способом решения проблемы избыточности телеметрических данных. Однако следует отметить, что для более широкого применения данного метода необходимы дополнительные исследования и оптимизация алгоритма. Так, необходим более эффективный способ поиска областей, чем подход, основанный на использовании алгоритма Кадана.

Таким образом, данная работа может послужить основой для дальнейших исследований в области сжатия и обработки телеметрических данных с использованием пространственного подхода, а также может быть полезной для разработчиков телеметрических систем и инженеров, работающих в промышленности.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-20063, <https://rscf.ru/project/24-21-20063/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (соглашение № 113С/2024).

Литература

1. Быковский П. С., Ляшенко В. А., Липницкий А. А., Пак М. А. Анализ алгоритмов сжатия изображений JPEG И JPEG 2000. *Актуальные научные исследования в современном мире*, 2020, № 6-2 (62), с. 23–32. EDN: SDACKV
2. Deepa Mathew, Binish M. C., Vijoy A. Jose. Computationally efficient intra and inter mode decision in

- H.264/AVC. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 171, pp. 360–368. doi:10.1016/j.procs.2020.04.037
3. **Hilal H. Nuha, Hassan Rizky Putra Saillellah, Ahmed Abo Absa.** Huffman tree compression and Lempel – Ziv coding using Java. *2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, Kingdom of Bahrain (Hybrid), 11–12 December 2024, 2024, 5 p. doi:10.1109/DASA63652.2024.10836416
 4. **Бакулина М. П.** Эффективное сжатие без потерь больших массивов информации данных. *Проблемы информатики*, 2022, № 4 (57), с. 63–69. doi:10.24412/2073-0667-2022-4-63-69, EDN: HIQWPK
 5. **Сидякин И. М.** Произвольный доступ к данным архивов телеметрической информации. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2013, № 10, с. 343–354. doi:10.7463/1013.0616065, EDN: RSLHQP. <http://technomag.bmstu.ru/doc/616065.html> (дата обращения: 05 августа 2023).
 6. **Chen S., Liu J., Wang K., Wu M.** A hierarchical adaptive spatio-temporal data compression scheme for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2019, vol. 25, pp. 429–438. <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1570-6>
 7. **Chen C., Zhang L., Tiong R. L. K.** A new lossy compression algorithm for wireless sensor networks using Bayesian predictive coding. *Wireless Networks*, 2020, vol. 26, no. 8, pp. 5981–5995. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02425-w>
 8. **Бакулина М. П.** Эффективное сжатие изображений на основе кодирования низкоэнтропийных источников. *Автоматрия*, 2011, т. 47, № 1, с. 59–66. EDN: NEJTOZ
 9. **Ломтев Е. А., Мясникова М. Г., Мясникова Н. В., Цыпин Б. В.** Совершенствование алгоритмов сжатия-восстановления сигналов для систем телеизмерений. *Измерительная техника*, 2015, № 3, с. 11–15. EDN: TORCTX
 10. **Орешко В. В.** Алгоритмы устранения избыточности информации, передаваемой от бортовых телеметрических систем на Землю. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, № 2, с. 85–94. doi:10.17238/issn2409-0239.2017.2.85, EDN: ZIBDFR
 11. **Тулкбаев Е. Т.** Эффективные методы сжатия телеметрической информации для наземных комплексов управления. *Вестник науки и образования*, 2017, № 10 (34), с. 14–20. EDN: ZMIRMZ
 12. **Байбекова Ф. Н., Подольцев В. В., Беспалова Н. М., Сологубова Л. А.** Обзор способов снижения избыточности телеметрической информации. *Радиопрмышленность*, 2019, № 2, с. 8–16. EDN: HUSNKK
 13. **Capurro I., Lecumberry F., Martin A., Ramirez I., Rovira E., Seroussi G.** Efficient sequential compression of multichannel biomedical signals. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 904–916. doi:10.1109/JBHI.2016.2582683
 14. **Huang C.-W., Ding J.-J.** Efficient EEG signal compression algorithm with long length improved adaptive arithmetic coding and advanced division and encoding techniques. *23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Proceedings, Shanghai, China, 2018, 5 p. doi:10.1109/ICDSP.2018.8631886
 15. **Zhang X., Saniie J.** Unsupervised learning for 3D ultrasonic data compression. *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Xi'an, China, 2021, 3 p. doi:10.1109/IUS52206.2021.9593654
 16. **Shi X., Zhang Y., Dong X.** Evaluation of BAQ on Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter data compression. *22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, Poznan, Poland, 2018, 2 p. doi:10.23919/MIKON.2018.8405306
 17. **Bose R., Pathak S.** Combined data encryption and compression using chaos functions. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2004, vol. 5561, pp. 164–175. doi:10.1117/12.561800
 18. **Candes E. J., Wakin M. B.** An introduction to compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, vol. 25, no. 2, pp. 21–30. doi:10.1109/MSP.2007.914731
 19. **Marco F. D., Godwin Sh., Antonio O.** Signal compression in wireless sensor networks. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2012, vol. 370, pp. 118–135. doi:10.1098/rsta.2011.0247
 20. **Богачев И. В., Левенец А. В., Чье Е. У.** Алгоритмы предварительной обработки и обратимого сжатия телеметрических кадров на основе геометрического подхода к представлению данных. М., Русайнс, 2021. 166 с.
 21. **Le N. P., Alouini M.-S.** Performance analysis of RIS-Aided THz wireless systems over α - μ fading: An approximate closed-form approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 1328–1343. doi:10.1109/JIOT.2023.3288588
 22. **Salomon D.** *Data Compression: The Complete Reference*. Fourth ed. Springer, 2007. 241 p.

UDC 004.627

doi:10.31799/1684-8853-2025-2-16-26

EDN: NMLHJC

Application of spatial approach to the problem of archiving measurement dataI. V. Bogachev^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-8203-7779, ilya.bogachev@yahoo.comA. V. Levenets^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-6973-6185D. P. Zaitsev^a, Laboratory Assistant, orcid.org/0009-0009-7241-0627^aPacific National University, 136, Tihookeanskaya St., 680035, Khabarovsk, Russian Federation

Introduction: In the case of telemetry data, which has received little attention in recent years, there are a number of both specialized and general-purpose algorithms available for processing it, yet none of these have demonstrated even acceptable performance and have a number of fundamental limitations. **Purpose:** To develop an efficient algorithm for compressing/restoring measurement data frame sets based on a spatial approach to their representation, and a format for storing their compressed representation for the archiving task. **Results:** We propose an algorithm for compressing measurement data frame sets which are three-dimensional difference-bit matrices, and consider various methods for displaying them in the body of a fractal cube. To store a compressed data representation, we develop a specialized description format that can be implemented effectively in the task of archiving them. We give the estimates of the speed and quality of the developed algorithm, the efficiency of which is compared with both the algorithm based on the construction of Huffman codes and the DEFLATE algorithm, which is part of the WinRAR utility, the latter, in its turn, being the de facto industry standard for solving compression and archiving problems. We prove that the developed algorithm is significantly superior to the Huffman and DEFLATE algorithms in both speed and compression ratio. **Practical relevance:** The use of the proposed algorithm can lead to significant technical and economic benefits for industrial enterprises and improve the efficiency of telemetry data transmission systems. Discussion: The main disadvantage of the developed algorithm is the nonlinear dependence of the compression time on the dimension of the compressed data, which is a consequence of both the impossibility of effectively segmenting the data for their separate processing and the need for multi-pass processing. Solving these problems opens up a number of promising directions for further development of the algorithm.

Keywords – frame sets, measurement data, reversible compression, archiving, telemetry systems.

For citation: Bogachev I. V., Levenets A. V., Zaitsev D. P. Application of spatial approach to the problem of archiving measurement data. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 2, pp. 16–26 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-2-16-26, EDN: NMLHJC

Financial support

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 24-21-20063 (<https://rscf.ru/project/24-21-20063/>) and the Ministry of Education and Science of the Khabarovsk Territory (agreement No. 113C/2024).

References

- Bykovsky P. S., Lyashenko V. A., Lipnitsky A. A., Pak M. A. Analysis of JPEG and JPEG 2000 image compression algorithms. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire* [Current Scientific Research in the Modern World], 2020, no. 6-2 (62), pp. 23–32 (In Russian). EDN: SDACKV
- Deepa Mathew, Binish M. C., Bijoy A. Jose. Computationally efficient intra and inter mode decision in H.264/AVC. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 171, pp. 360–368. doi:10.1016/j.procs.2020.04.037
- Hilal H. Nuha, Hassan Rizky Putra Sailellah, Ahmed Abo Absa. Huffman tree compression and Lempel – Ziv coding using Java. *2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 2024, 5 p. doi:10.1109/DASA63652.2024.10836416
- Bakulina M. P. Efficient lossless compression of large information arrays. *Problemy informatiki* [Problems of Informatics], 2022, no. 4 (57), pp. 63–69 (In Russian). doi:10.24412/2073-0667-2022-4-63-69, EDN: HIQWPK
- Sidyakin I. M. Random access to telemetry data files compressed with deflate algorithm. *Science and Education: Scientific Publication of Bauman Moscow State Technical University*, 2013, no. 10, pp. 343–354 (In Russian). doi:10.7463/1013.0616065, EDN: RSLHQP. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/616065.html> (accessed 5 August 2023).
- Chen S., Liu J., Wang K., Wu M. A hierarchical adaptive spatio-temporal data compression scheme for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2019, vol. 25, pp. 429–438. <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1570-6>
- Chen C., Zhang L., Tiong R. L. K. A new lossy compression algorithm for wireless sensor networks using Bayesian predictive coding. *Wireless Networks*, 2020, vol. 26, no. 8, pp. 5981–5995. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02425-w>
- Bakulina M. P. Efficient image compression by coding of low-entropy sources. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 59–66 (In Russian). EDN: NEJTOZ
- Lomtev E. A., Myasnikova M. G., Myasnikova N. V., Tsy-pin B. V. Measurements in information technologies: improvement of signal compression-restoration algorithms for remote measurement systems. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 250–255. EDN: TORCTX
- Oreshko V. V. Algorithms for elimination of the redundancy of the information transmitted from onboard telemetry system to the Earth. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 85–94 (In Russian). doi:10.17238/issn2409-0239.2017.2.85, EDN: ZIBDFR
- Tulekbayev Ye. T. Effective methods of compression of telemetric information for land complexes of management. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2017, no. 10, pp. 14–20 (In Russian). EDN: ZMIRMZ
- Baybekova F. N., Podoltsev V. V., Bespalova N. M., Sologubova L. A. Overview of the ways to reduce telemetric information redundancy. *Radio Industry*, 2019, no. 2, pp. 8–16 (In Russian). EDN: HUSNKK
- Capurro I., Lecumberry F., Martin A., Ramirez I., Rovira E., Seroussi G. Efficient sequential compression of multichannel biomedical signals. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 904–916. doi:10.1109/JBHI.2016.2582683
- Huang C.-W., Ding J.-J. Efficient EEG signal compression algorithm with long length improved adaptive arithmetic coding and advanced division and encoding techniques. *23rd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, Proceedings, Shanghai, China, 2018, 5 p. doi:10.1109/ICDSP.2018.8631886
- Zhang X., Saniie J. Unsupervised learning for 3D ultrasonic data compression. *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Xi'an, China, 2021, 3 p. doi:10.1109/IUS52206.2021.9593654
- Shi X., Zhang Y., Dong X. Evaluation of BAQ on Tiangong-2 interferometric imaging radar altimeter data compression. *22nd International Microwave and Radar Conference*

- (MIKON), Poznan, Poland, 2018, 2 p. doi:10.23919/MIKON.2018.8405306
17. Bose R., Pathak S. Combined data encryption and compression using chaos functions. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2004, vol. 5561, pp. 164–175. doi:10.1117/12.561800
 18. Candes E. J., Wakin M. B. An introduction to compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, vol. 25, no. 2, pp. 21–30. doi:10.1109/MSP.2007.914731
 19. Marco F. D., Godwin Sh., Antonio O. Signal compression in wireless sensor networks. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2012, vol. 370, pp. 118–135. doi:10.1098/rsta.2011.0247
 20. Bogachev I. V., Levenets A. V., Chie E. U. *Algoritmy predvaritel'noj obrabotki i obratimogo szhatiya telemetricheskikh kadrov na osnove geometricheskogo podhoda k predstavleniyu dannyh* [Algorithms for Pre-Processing and Reversible Compression of Telemetry Frames Based on a Geometric Approach to Data Representation]. Moscow, Rusajns Publ., 2021. 166 p. (In Russian).
 21. Le N. P., Alouini M.-S. Performance analysis of RIS-Aided THz wireless systems over α - μ fading: An approximate closed-form approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 1328–1343. doi:10.1109/JIOT.2023.3288588
 22. Salomon D. *Data Compression: The Complete Reference*. Fourth ed. Springer, 2007. 241 p.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>