

УДК 004.632.4

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБРАТИМОГО СЖАТИЯ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

М.А. Эльшафей, И.М. Сидякин, С.В. Харитонов, Д.С. Ворнычев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: elshafey.m@gmail.com; ivan.sidyakin@bmstu.ru; devilfess@mail.ru;
dm.s.vornychyev@gmail.com

Представлены результаты исследования методов обратимого сжатия телеметрической информации. Предложена схема обратимого сжатия, состоящая из двух основных элементов: декорреляции и энтропийного кодирования. Рассмотрены два основных алгоритма декорреляции, основанных на применении линейного предсказания и операции побитового “исключающего или”. Проведено сравнение эффективности указанных методов на основе оценки коэффициента усиления дисперсии и энтропии сигнала ошибки на выходе декоррелятора. В экспериментах использованы данные телеизмерений систем автоматического регулирования. Исследованы низкочастотные параметры таких систем (температура, давление и данные позиционирования). Для формирования потока телеметрической информации применен стандарт IRIG-106, широко использующийся в аэрокосмической промышленности. Рассмотрены различные структуры кадров этого стандарта, построенные на схемах коммутации каналов с одной и двумя ступенями коммутации. Исследованы несколько комбинаций методов декорреляции и энтропийного кодирования, включая арифметическое кодирование, методы Хаффмана и Райса. В соответствии с экспериментально полученными данными были сделаны выводы об эффективности применения этих методов для обратимого сжатия телеметрической информации. Выработаны рекомендации по разработке систем обратимого сжатия потока телеметрической информации, содержащего циклически повторяющиеся структуры данных.

Ключевые слова: телеметрическая информация, коммутация каналов, обратимое сжатие, сжатие без потерь, декорреляция, энтропийное кодирование, кодирование источника, коды Хаффмана, коды Райса, алгоритм Deflate, IRIG-106.

STUDY OF METHODS FOR LOSSLESS COMPRESSION OF THE TELEMETRY INFORMATION STREAM

M.A. Elshafey, I.M. Sidyakin, S.V. Kharitonov, D.S. Vornychyev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: elshafey.m@gmail.com; ivan.sidyakin@bmstu.ru; devilfess@mail.ru;
dm.s.vornychyev@gmail.com

Results of studying methods for the lossless compression of telemetry information are presented. The lossless compression scheme is offered that consists of two basic components: decorrelation and entropy coding. Two main decorrelation algorithms are considered that are based on linear prediction and bit-by-bit “exclusive-OR

operation". Efficiencies of the indicated methods are compared on the basis of estimation of the coefficient of enhancement of dispersion and entropy of the error signal at the output of decorrelator. The telemetry data of automatic control systems have been used in experiments. Low-frequency parameters (temperature, pressure, and positioning data) of these systems were used. To form the telemetry data stream, the IRIG-106 standard is applied that is widely used in the aerospace industry. Different frame structures of this standard are considered that are constructed on schemes of channel switching with one or two steps of switching. Several combinations of methods of decorrelation and entropy coding, including arithmetic coding, the Huffman and Rice methods are investigated. In accordance with experimental data, conclusions were drawn that using these methods is effective for the telemetry data lossless compression. The recommendations are developed on creating the systems of the lossless compression of a telemetry data stream containing the cyclically repeated data structures.

Keywords: telemetry information, channel switching, lossless compression, decorrelation, entropy coding, source encoding, Huffman codes, Rice codes, Deflate algorithm, IRIG-106.

Введение. Для сжатия телеметрической информации, как правило, применяют алгоритмы, обеспечивающие точное восстановление исходных данных в целях их обработки и анализа информации, содержащейся в них. Точное восстановление данных в том виде, в каком они были получены от объекта телеизмерений системой регистрации, необходимо для анализа нештатных ситуаций, восстановления сбойных участков в потоке телеметрической информации и других видов постобработки или обработки данных в режиме реального времени [1–7]. Эффективность методов обратимого сжатия во многом определяется свойствами кодируемой информации [8]. Алгоритмы, хорошо сжимающие текст, могут давать неудовлетворительные результаты при сжатии датчиковой информации. Алгоритмы, уступающие в эффективности при обработке входных стационарных данных, могут существенно улучшить показатели сжатия, если статистические характеристики входных данных быстро изменяются в процессе проведения эксперимента. В настоящей работе представлены результаты исследований, проведенных для разработки эффективного метода обратимого сжатия потока телеметрической информации в формате IRIG-106 [9]. Это открытый стандарт Telemetry Group, RCC, разработанный для применения в аэрокосмической промышленности и широко используемый в системах регистрации телеметрической информации различного назначения. Информация в потоке передается кадрами с фиксированной длиной и неизменной заранее определенной внутренней структурой. В кадре могут передаваться показания нескольких источников информации: оцифрованные показания аналоговых датчиков; показания цифровых приборов. Каждый источник передается в отдельном канале коммутатора системы регистрации телеметрической информации, текущее значение канала — в телеметрическом слове кадра, расположенном по заданному смещению от начала кадра. Все телеметрические

Амплитуда

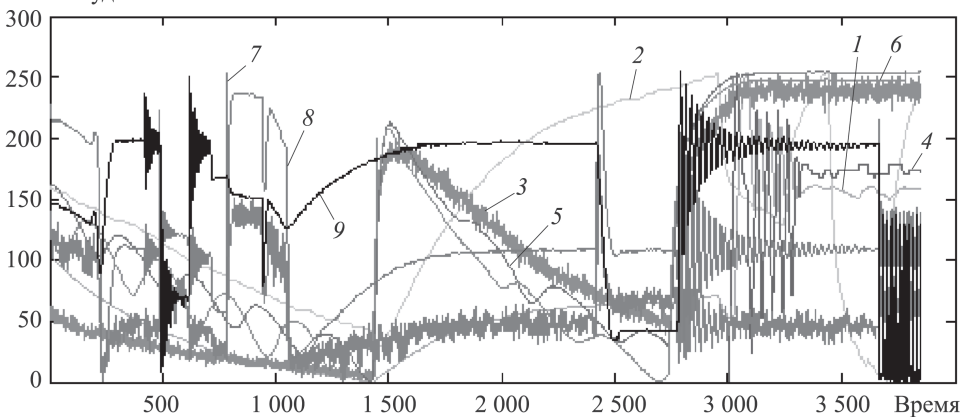


Рис. 1. Примеры исследуемых сигналов для температуры смешения (1), температуры входа (2) и выхода (3), угла (4), температуры выхода (5) и входа (6), датчика давления полупроводников (7), датчика давления (8) и датчика перемещения (9)

слова кадра имеют одинаковую разрядность. Кадр содержит дополнительную служебную информацию, необходимую для обнаружения битовых ошибок, кадровой синхронизации временной привязки и др.

Подготовка данных для проведения экспериментов. В кадр телеметрической информации были включены оцифрованные отсчеты аналоговых датчиков, измеряющих типичные для телеметрической системы параметры (температуру, давление, данные позиционирования), которые получены в лабораторных условиях. В качестве объектов телеизмерений использованы системы автоматического регулирования. Примеры исследуемых сигналов приведены на рис. 1. Для проведения экспериментов были разработаны схемы коммутации, на их основе сформированы потоки телеметрической информации.

Описание экспериментов. Процедуру обратимого сжатия телеметрической информации (рис. 2) предложено разделить на два основных этапа: 1) моделирование; 2) энтропийное кодирование [10–12].

На первом этапе достигается снижение корреляционных зависимостей в обрабатываемых данных — декорреляция. В основе различных методов декорреляции лежит способ предсказания значений входного сигнала X . Эффективность работы алгоритмов декорреляции можно оценить по двум показателям:

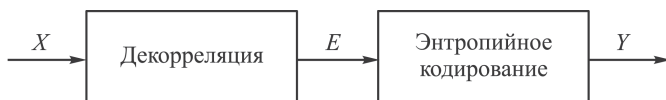


Рис. 2. Схема процедуры обратимого сжатия телеметрической информации

- 1) по отношению дисперсии исходных данных к дисперсии сигнала ошибки предсказания (E) σ_x^2/σ_e^2 (коэффициент усиления дисперсии);
- 2) по энтропии сигнала ошибки предсказания.

По результатам экспериментов вычислялись оценки этих значений. На практике для оценки эффективности алгоритма удобнее использовать энтропию, так как этот показатель не зависит от формы исходного сигнала [10].

В проведенных исследованиях сравнивались следующие основные подходы к декорреляции данных: различные варианты линейного предсказания и применение операции “исключающее или” для телеметрических слов соседних кадров в потоке. Схема декорреляции на основе линейного предсказания подробно описана, например, в работах [10–12]. Значение дискретного, квантованного по уровню сигнала отсчета x_i предсказывается по известным значениям предыдущих отсчетов x_{i-1}, x_{i-2}, \dots этого сигнала. На каждом шаге ошибка предсказания рассчитывается по формуле

$$e_i = x_i - Q \left\{ \sum_{j=1}^p \hat{a}_j x_{i-j} \right\}, \quad (1)$$

где \hat{a}_j — коэффициенты фильтра предсказателя. Предсказатель реализуется с помощью цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой и передаточной функцией $\hat{A}(z)$. Значения коэффициентов фильтра предсказателя \hat{a}_j требуются для восстановления последовательности x_i по известным значениям ошибки e_i . Коэффициенты фильтра вычисляют из условия минимизации суммы квадратов ошибок предсказания.

Согласно предложенной схеме сжатия, сигнал ошибки, т.е. разность предсказанного и реального значений на входе декоррелятора, поступает на вход энтропийного кодера. В экспериментах были использованы несколько методов энтропийного кодирования: метод Хаффмана [13]; арифметическое кодирование [14–18]; метод Райса [19]; алгоритм Deflate [20, 21], основанный на кодах Хаффмана. В качестве критерия оценки алгоритма сжатия применяли коэффициент сжатия — отношение размера исходных данных к размеру данных на выходе системы сжатия.

Два варианта различных структур кадра телеметрической информации, которые использовались в экспериментах, показаны на рис. 3. Первый вариант структуры кадра состоит из девяти каналов, подключенных к источникам датчиковой информации. Дополнительно кадр содержит служебную информацию, обеспечивающую кадровую синхронизацию в потоке телеметрической информации. Такая струк-

SYNC_F	Данные 1	Данные 2	Данные 3	Данные 4	Данные 5	Данные 6	Данные 7	Данные 8	Данные 9
SYNC16	Тсм	Твх	Твых	угол	Тв вых	Тв вх	Дат давл полу	Дат давл	Дат перемещ

а

SYNC_F	SYNC_SF1	Данные 1	Данные 2	Данные 3	Данные 4	Данные 5	Данные 6
SYNC16	C1	Тсм	Твх	Твых	Тв вых	угол	Дат давл полу
SYNC16	C2	Тсм	Твх	Твых	Тв вх	угол	Дат давл полу
SYNC16	C3	Тсм	Твх	Твых	Дат давл	угол	Дат давл полу
SYNC16	C4	Тсм	Твх	Твых	Дат перемещ	угол	Дат давл полу

б

Рис. 3. Структуры кадра телеметрической информации при одно- (а) и двухступенчатой (б) схемах коммутации

тура кадра может быть получена при одноступенчатой схеме коммутации каналов с единственным (основным) коммутатором.

Второй вариант кадра имеет более сложную структуру, полученную с помощью двухступенчатой схемы коммутации. На рис. 3, б представлены четыре последовательно передаваемых кадра IRIG-106. В четвертом канале основного коммутатора передаются значения каналов коммутатора второй ступени. Таким образом, полный цикл опроса всех параметров занимает четыре кадра основного коммутатора. За этот цикл каналы основного коммутатора опрашиваются четыре раза.

Разрядность телеметрических слов кадра составляет 8 бит, в которых сохраняется один квантованный отсчет сигнала датчика, приведенный к шкале 0–255.

Пример гистограммы распределения значений телеметрических слов в исследуемых потоках телеметрической информации приведен на рис. 4. Согласно этой гистограмме, значения распределены по всей шкале. Гистограмма имеет несколько выраженных пиков, типичных для телеметрической информации, в которой контролируемые параметры долгое время сохраняют значения, близкие к постоянным, и немного отклоняются от них под воздействием шумов.

Результаты исследований алгоритма декорреляции на основе регрессионной модели в комбинации с несколькими методами энтро-

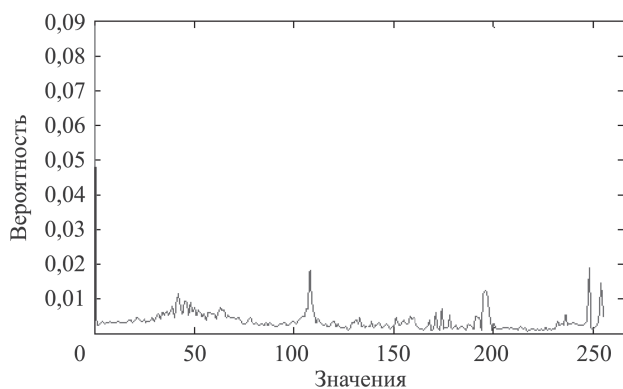


Рис. 4. Гистограмма распределения значений телеметрических слов в исследуемых потоках телеметрической информации

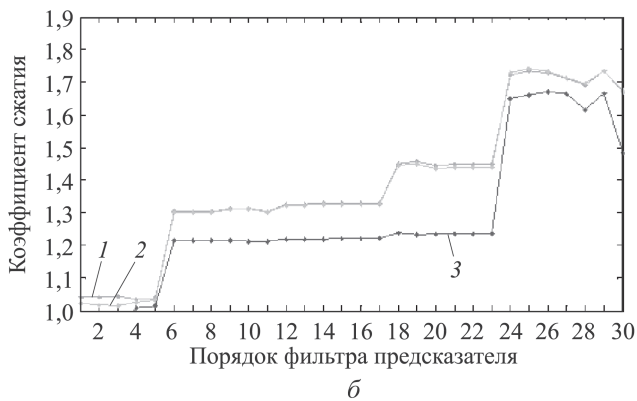


Рис. 5. Результаты исследований алгоритма декорреляции на основе регрессионной модели в комбинации с методами Хаффмана (1), арифметического кодирования (2) и Райса (3) при одно- (а) и двухступенчатой (б) схемах коммутации в виде зависимостей коэффициента сжатия от порядка фильтра предсказателя

пийного кодирования для двух схем коммутации в виде зависимостей коэффициента сжатия от порядка фильтра предсказателя показаны на рис. 5. В соответствии с полученными данными коэффициент сжатия резко возрастает, когда порядок фильтра становится равным числу слов в циклически повторяющейся структуре потока информации. В первом случае (рис. 5, а) эта длина равна длине кадра основного коммутатора, а во втором (рис. 5, б) — числу слов, содержащихся в четырех кадрах основного коммутатора.

Пример гистограммы распределения значений ошибок предсказания, полученных в экспериментах с одноступенчатой схемой коммутации каналов, приведен на рис. 6. Гистограмма имеет выраженный пик в области нуля, позволяющий качественно оценить эффективность работы фильтра предсказателя.

Для оценки эффективности промежуточного этапа сжатия (декорреляции) использовались два параметра: коэффициент усиления дисперсии и энтропия ошибки на выходе фильтра предсказателя. Численные результаты этого эксперимента при дисперсии исходного сигнала

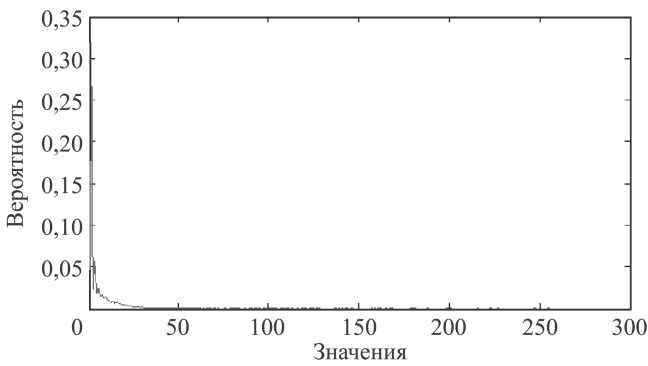


Рис. 6. Гистограмма распределения значений ошибок предсказания фильтра девятого порядка, полученных в экспериментах с одноступенчатой схемой коммутации каналов

$\sigma_x^2 = 6085,77$ и энтропии 7,45 в зависимости от порядка фильтра приведены ниже:

	1	2	8	9	18
σ_e^2	5565	5599	4394	78	82
σ_x^2/σ_e^2	1,10	1,10	1,38	77,70	73,83
Энтропия сигнала ошибки	7,78	7,86	7,71	3,06	3,79

Результаты исследования нескольких комбинаций декоррелятора на основе метода линейного предсказания и методов энтропийного кодирования приведены ниже (фильтр девятого порядка для потока слов телеметрической информации):

	Метод Хаффмана	Арифметическое кодирование	Метод Райса	Метод Zlib
Коэффициент сжатия	2,64	2,59	2,13	1,56

Приведен коэффициент сжатия, полученный методом Zlib, который построен на основе алгоритма Deflate и адаптивного варианта метода Хаффмана. Метод Zlib представлен как образец хорошо оптимизированного и широко применяемого метода сжатия информации общего назначения, в котором, однако, не используются априорные сведения о структуре кодируемых данных.

Метод Хаффмана и арифметическое кодирование демонстрируют схожие результаты, немного лучшие, чем метод Райса. Однако следует учесть, что метод Райса эффективен в условиях, когда статистические характеристики изменяются очень быстро, за несколько кадров в потоке телеметрической информации. Метод Zlib очевидно проигрывает, оставляя область для исследований, направленных на разработку эффективных алгоритмов сжатия телеметрической информации, учитывающих особенности представления этого вида информации.

В рассмотренном методе декорреляции на основе линейного предсказания на вход декоррелятора передавались телеметрические слова в порядке их следования в потоке телеметрической информации. Можно предположить, что между отсчетами одного и того же параметра в соседних кадрах существуют сильные корреляционные зависимости, а между соседними словами в потоке телеметрической информации такие зависимости отсутствуют. Повышение порядка фильтра для выявления указанных зависимостей приводит к увеличению сложности вычислений. Это хорошо работает для одноступенчатой схемы коммутации, но в более сложной структуре с двухступенчатой схемой коммутации такой прямолинейный подход неэффективен. Декорреляция каналов кадра и применение методов линейного предсказания к каждому каналу не упрощает вычисления, при этом согласно результатам экспериментов позволяет улучшить характеристики декоррелятора. Следует отметить, что использование фильтров первого порядка для предсказания значений каждого канала достаточно эффективно. Дальнейшее увеличение порядка фильтра предсказателя снижает оценку энтропии несущественно. Поэтому в качестве альтернативы методу декорреляции, основанному на линейном предсказании, можно предложить более простой метод снижения корреляционных зависимостей соседних кадров в потоке телеметрической информации. Для пары телеметрических слов, расположенных на одинаковых позициях в соседних кадрах, выполняется побитовая операция “исключающее или”. Результат операции передается на вход энтропийного кодера. Экспериментально полученная гистограмма распределения значений ошибки на выходе построенного по этому принципу декоррелятора представлена на рис. 7.

Основные экспериментально полученные результаты, позволяющие провести сравнительную оценку эффективности трех различных методов декорреляции, приведены в табл. 1. Два метода, с которыми

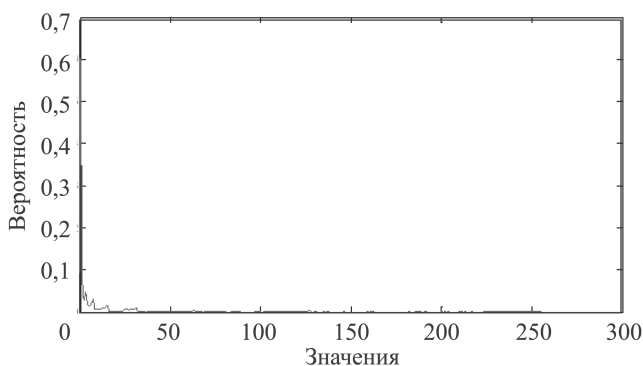


Рис. 7. Экспериментально полученная гистограмма распределения значений ошибки на выходе метода декорреляции с помощью операции “исключающее или”

осуществлялось сравнение, основаны на модели линейного предсказания. В первом методе применялись фильтры предсказателя девятого порядка для одноступенчатой схемы коммутации и 24 порядка для двухступенчатой схемы коммутации. На вход фильтра подавались слова в порядке их следования в потоке телеметрической информации. Во втором методе предварительно выполнялась операция извлечения (декоммутации) каналов из кадров IRIG-106, а затем — процедура декорреляции каждого канала. В эксперименте для всех каналов использовались фильтры первого порядка.

Таблица 1

Сравнение эффективности методов декорреляции для одно- (числитель) и двухступенчатой (знаменатель) схем коммутации

Параметр	Фильтр 9/24 порядка для потока слов телеметрической информации	Фильтр первого порядка для каждого канала	Операция “исключающее или”
Энтропия исходного сигнала	7,45/7,26		
Коэффициент усиления декоррелятора σ_x^2/σ_e^2	77,70/28,31	40,84/40,84	9,54/7,47
Энтропия сигнала ошибок	3,06/4,57	3,34/3,34	2,90/3,41

Результаты работы перечисленных методов обратимого сжатия телеметрической информации, представляющих собой различные комбинации методов декорреляции и энтропийного кодирования, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Эффективность методов обратимого сжатия телеметрической информации для одно- (числитель) и двухступенчатой (знаменатель) схем коммутации

Значения коэффициента сжатия

Метод Хаффмана	Арифметическое кодирование	Метод Райса	Алгоритм Deflate	Метод Zlib	
<i>Фильтр 9/24 порядка для потока слов телеметрической информации</i>					
2,64/1,72	2,59/1,73	2,13/1,65	2,39/1,63	1,56/1,27	
<i>Фильтры первого порядка для каждого канала</i>					
2,45/2,45	2,40/2,40	1,96/1,96	2,46/2,14		
<i>Операция “исключающее или”</i>					
2,77/2,43	2,72/2,32	1,67/1,58	2,30/2,03		

Выводы. Анализ результатов проведенных экспериментов позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование априорных сведений о структуре потока телеметрической информации позволяет повысить эффективность обратимого сжатия этих данных. Если применяется схема коммутации каналов

с фиксированной структурой кадров, то для декорреляции можно использовать линейный фильтр, порядок которого равен длине цикла опроса каналов схемы коммутации.

2. Если телеметрический кадр имеет более сложную структуру, построенную, например, на основе двухступенчатой схемы коммутации, то декорреляция каналов по отдельности существенно увеличивает коэффициент сжатия. При этом в обработке появляется дополнительная операция декоммутации каналов.

3. Покадровая декорреляция данных в потоке телеметрической информации с помощью операции “исключающее или” упрощает вычисления и для двух рассмотренных схем коммутации каналов демонстрирует лучший результат. Этот метод предпочтителен в случае, когда схема коммутации каналов в потоке известна.

4. Метод Хаффмана в проведенных экспериментах позволил определить лучшие значения коэффициента сжатия.

5. Разделение входных данных на блоки позволяет отчасти компенсировать изменение во времени статистических характеристик исследуемого потока телеметрической информации. Изменение размеров блоков увеличивает коэффициент сжатия.

Основные результаты работы. Предложена общая схема обратимого сжатия телеметрической информации, состоящая из декорреляции и энтропийного кодирования. На основе анализа структуры и статистических характеристик потока данных телеметрической информации разработаны альтернативные подходы к решению задачи обратимого сжатия телеметрической информации. Для проведения экспериментов в среде MATLAB реализованы необходимые процедуры. В экспериментах с реальными данными получены численные результаты, позволяющие сделать выводы об эффективности предложенных методов и разработать рекомендации для создания системы обратимого сжатия телеметрической информации.

Дальнейшее направление исследований. Характеристики регистрируемых параметров и даже структура потока телеметрической информации может быстро изменяться в процессе работы. В связи с этим представляет интерес исследование адаптивных методов декорреляции и энтропийного кодирования телеметрической информации, в частности, возможности динамической подстройки параметров декоррелятора и выбора модели, описывающей статистические параметры сигнала ошибки на входе энтропийного кодера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fout N., Ma Kwan-Liu. An Adaptive prediction-based approach to lossless compression of floating-point volume data // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2012. Vol. 18. No. 12. P. 2295–2304.

2. *Arcangelp J.-P., Crochemore M., Hourcastagnou J.-N., Pin J.E.* Compression for an effective management of telemetry data // SPACEOPS'92 Conference Proceedings. NASA Technical Documents: nasa_techdoc_19940019483. 1992. P. 823–830.
3. *Martinez Heras J.-A., Evans D., Timm R.* Housekeeping telemetry compression: when, how and why bother // First International Conference IEEE On Advances In Satellite And Space Communications. 2009. P. 35–40.
4. *Lossless Data compression.* Report concerning space data system standard. Informational report CCSDS 120.0-G-3 Green Book. April 2013. Iss. 3.
5. *Staudinger P., Staudinger N., Hershey J., Grabb M., Joshi N., Ross F., Nowak T.* Lossless compression for archiving satellite telemetry data // IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2000. Vol. 2. P. 299–304.
6. *Maluf D.A., Tran P.B., Tran D.* Effective data representation and compression in ground data systems // IEEE Aerospace Conference. 2008. 7 p.
7. *Yongfeng Ren, Xiaohua Liu, Wenqiang Xu, Wendong Zhang.* Multi-Channel data structure and real-time compression algorithm research // IEEE A & E Systems Magazine. 2009. P. 1–7.
8. *Konecki M., Kudelic R., Lovrencic A.* Efficiency of lossless data compression // Proceedings of the 34th International Convention MIPRO, Opatija, Croatia. 2011. P. 810–815.
9. *Telemetry Standards.* IRIG Standard 106-13. Secretariat range commanders council US Army white sand missile range, New Mexico 88002-5110. 2013. URL: <http://www.irig106.org/docs/106-13>.
10. *Giridhar Mandyam, Giridhar M., Neeraj Magotra, Samuel D.* Stearns. Lossless waveform compression // Citeseer. 2004. 32 p.
11. *Hans M., Schafer R.W.* Lossless compression of digital audio. Technical report. Hewlett-Packard Company. 1999. 37 p.
12. *Robinson T.* Simple lossless and near lossless waveform compression. Technical Report CUED/F-INFENG/TR.156. Cambridge University Engineering Department. 1994. 16 p.
13. *Huffman D.A.* A method for the construction of minimum-redundancy codes // Proceedings of the I.R.E. 1965. P. 1098–1101.
14. *Rissanen J.G., Langdon G.Jr.* Arithmetic Coding // IBM Develop. Vol. 23. No. 2. 1979. P. 149–162.
15. *Howard P.G., Vitter J.S.* Analysis of arithmetic coding for data compression // IEEE Computer Society/NASA/CESDIS. Data Compression Conference, Snowbird, Utah 1991 and Information Processing and Management. Vol. 28. No. 6. 1992. P. 749–763.
16. *Howard P.G., Vitter J.S.* Arithmetic coding for data compression // Information Processing And Management. 1994. 8 p.
17. *Stems S.D.* Arithmetic coding in lossless waveform compression // IEEE Transactions On Signal. Processing. Vol. 43. No. 8. 1995. P. 1874–1879.
18. *Moffat A., Neal R.M., Witten I.H.* Arithmetic coding revisited // Data Compression Conference. Proceedings ACM Transactions on Information Systems. Vol. 16. No. 3. 1998. P. 256–294.
19. *Rice R.F.* Some practical universal noiseless coding techniques. Technical Report. Jet Propulsion Laboratory Jpl-79-22. 1979. 130 p.
20. *Salomon D., Motta G.* Handbook of data compression. N.Y.: Springer-Verlag, 2010. P. 399–410.
21. *Gailly J.-L., Adler M.* Zlib software copyright 1995–2012. URL: <http://www.zlib.net>.
22. *Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В.* Случайные процессы. Оптимальная фильтрация, экстраполяция и моделирование. М.: Радио и связь, 2004. Т. 3. 408 с.
23. *Мановцев А.П.* Основы теории радиотелеметрии. М.: Энергия, 1973. 592 с.
24. *Дядюнов А.Н., Онищенко Ю.А., Сенин А.И.* Адаптивные системы сбора и передачи аналоговой информации. М.: Машиностроение, 1988. 287 с.

REFERENCES

- [1] Fout N., Ma Kwan-Liu. An Adaptive Prediction-Based Approach to Lossless Compression of Floating-Point Volume Data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, vol. 18, no. 12, pp. 2295–2304.
- [2] Arcangel J.-P., Crochemore M., Hourcastagnou J.-N., Pin J.E. Compression for an Effective Management of Telemetry Data. *SPACEOPS'92 Conference Proceedings*, NASA Technical Documents: nasa_techdoc_19940019483, 1992, pp. 823–830.
- [3] Martinez Heras J.-A., Evans D., Timm R. Housekeeping Telemetry Compression: When, How And Why Bother. *First International Conference IEEE On Advances In Satellite And Space Communications*. 2009, pp. 35–40. DOI: 10.1109/SPACOMM.2009.30
- [4] Lossless Data Compression. *Green Book*, Report Concerning Space Data System Standard, Informational Report CCSDS 120.0-G-3, April 2013, iss. 3.
- [5] Staudinger P., Staudinger N., Hershey J., Grabb M., Joshi N., Ross F., Nowak T. Lossless Compression For Archiving Satellite Telemetry Data. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, vol. 2, pp. 299–304.
- [6] Maluf D.A., Tran P.B., Tran D. Effective Data Representation and Compression in Ground Data Systems. *IEEE Aerospace Conference*, 2008, pp. 1–7.
- [7] Yongfeng Ren, Xiaohua Liu, Wenqiang Xu, Wendong Zhang. Multi-Channel Data Structure and Real-Time Compression Algorithm Research. *IEEE A&E Systems Magazine*, 2009, pp. 1–8.
- [8] Konecki M., Kudelic R., Lovrencic A. Efficiency of Lossless Data Compression. *2011 Proceedings of the 34th Int. Convention MIPRO*, Opatija, Croatia, 2011, pp. 810–815.
- [9] Telemetry Standards. *IRIG Standard 106-13*. Secretariat Range Commanders Council Us Army White Sand Missile Range, New Mexico 88002-5110, 2013. Available at: <http://www.irig106.org/docs/106-13> (accessed 04.04.2014).
- [10] Mandyam G., Magotra N., Stearns S.D. Lossless Waveform Compression. Citeseer, 2004. 32 p.
- [11] Hans M., Schafer R.W. Lossless Compression of Digital Audio. Technical Report, Hewlett-Packard Company, 1999. 37 p.
- [12] Robinson T. Simple Lossless and Near Lossless Waveform Compression. Technical Report CUED / F-INFENG / TR.156, Cambridge University Engineering Department, 1994. 16 p.
- [13] Huffman D.A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. *Proc. I.R.E.*, 1965, pp. 1098–1101.
- [14] Rissanen J.G., Langdon G. Jr. Arithmetic Coding. *IBM Develop.*, 1979, vol. 23, no. 2, pp. 149–162.
- [15] Howard P.G., Vitter J.S. Analysis of Arithmetic Coding for Data Compression. *IEEE Computer Society/NASA/CESDIS, Data Compression Conference*, Snowbird, Utah 1991 and Inf. Process. and Manag., 1992, vol. 28, no. 6, pp. 749–763.
- [16] Howard P.G., Vitter J.S. Arithmetic Coding For Data Compression. *Information Processing and Management*, 1994. 8 p.
- [17] Stems S.D. Arithmetic Coding In Lossless Waveform Compression. *IEEE Transactions on Signal. Processing*, 1995, vol. 43, no. 8, pp. 1874–1879.
- [18] Moffat A., Neal R.M., Witten I.H. Arithmetic Coding Revisited. *Data Compression Conference. Proc. ACM Trans. on Inf. Systems*, 1998, vol. 16, no. 3, pp. 256–294.
- [19] Rice R.F. Some Practical Universal Noiseless Coding Techniques. Technical Report. Jet Propulsion Laboratory Jpl-79-22, 1979. 130 p.
- [20] Salomon D., Motta G. Handbook of Data Compression. N.Y., Springer-Verlag, 2010, pp. 399–410.
- [21] Gailly J.-L., Adler M. Zlib Software Copyright 1995–2012. Available at: <http://www.zlib.net> (accessed 01.04.2014).

- [22] Tikhonov V.I., Shakhtarin B.I., Sizykh V.V. Sluchaynye protsessy. Optimal'naya fil'tratsiya, ekstrapolyatsiya i modelirovanie. T. 3 [Stochastic processes. Optimal filtering, extrapolation and modeling. Vol. 3]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 2004. 408 p.
- [23] Manovtsev A. P. Osnovy teorii radiotelemetrii [Fundamentals of the theory radio telemetry]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 592 p.
- [24] Dyadyunov A.N., Onishchenko Yu.A., Senin A.I. Adaptivnye sistemy sbora i peredachi analogovoy informatsii [Adaptive system for collecting and transfer of analog information]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 287 p.

Статья поступила в редакцию 21.02.2014

Мохамед Абдельмонеим Таха Эльшафеи — аспирант кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор научной работы в области систем регистрации телеметрической информации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

M.A. Elshafey — post-graduate of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a publication in the field of systems of telemetry data processing.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Иван Михайлович Сидякин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области систем регистрации телеметрической информации.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

I.M. Sidyakin — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of systems of telemetry data recording.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергей Викторович Харитонов — аспирант кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области управления теплоэнергетическими установками.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.V. Kharitonov — post-graduate of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of four publications in the field of control of heat-and-power installations.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Дмитрий Сергеевич Ворнычев — аспирант кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы в области управления теплоэнергетическими установками.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

D.S. Vornychyev — post-graduate of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a publication in the field of control of heat-and-power installations.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.