

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ**

УДК 004.627 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.77.85

**Увеличение объемов передаваемой  
по космическим радиолиниям информации  
за счет применения алгоритмов сжатия**

**А. Е. Мордвинов**, *к. т. н., Mordvinov\_AE@spacecorp.ru*  
*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. С. Никитин**, *Nikitin.AS@spacecorp.ru*  
*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** С развитием спутниковых систем дистанционного зондирования Земли растут требования к скорости передачи данных, которая практически достигла границы Шеннона. Перспективным решением является применение на борту космических аппаратов алгоритмов сжатия передаваемых данных. Наибольший интерес для исследования представляет сжатие оптических снимков, поскольку они занимают наибольший объем передаваемой информации и хорошо поддаются сжатию, в том числе без потерь. На данный момент авторам статьи неизвестны эффективные алгоритмы сжатия оптических снимков, которые применялись бы на борту отечественных космических аппаратов. В таких алгоритмах должны учитываться функциональные особенности матриц оптико-электронной аппаратуры, структуры получаемых снимков и выдаваемых пакетов данных. Также должна применяться правильная комбинация методов сжатия, которая бы учитывала структуру данных на каждом этапе и обеспечивала требуемый баланс между степенью сжатия, скоростью сжатия, потребляемыми бортовыми ресурсами и сложностью реализации. Алгоритмы, применяемые в распространенных форматах медиаданных, этим требованиям не удовлетворяют. Алгоритмы, применяемые в некоторых зарубежных космических аппаратах, сжимают либо с потерями, либо с низкой степенью. Таким образом, необходим более глубокий анализ особенностей оптико-электронной аппаратуры, структур передаваемых данных, а также методов и алгоритмов их сжатия.

**Ключевые слова:** радиолиния, высокоскоростная радиолиния, бортовая аппаратура, ВРЛ, БА ВРЛ, бортовой радиотехнический комплекс (БРТК), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), спутниковые изображения, спутниковые снимки, алгоритмы сжатия снимков, алгоритмы сжатия изображений, сжатие снимков, сжатие изображений, информационная скорость радиолинии, скорость передачи данных

**Increasing the Volume of Information Transmitted through  
Space Radio Links by Implementing Compression Algorithms**

**A. E. Mordvinov**, *Cand. Sci. (Engineering), Mordvinov\_AE@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. S. Nikitin**, *Nikitin.AS@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** With the development of Earth remote sensing systems, requirements for the data transfer rate, which has almost reached the Shannon limit, become more demanding. A promising solution is the use of transmitted data compression algorithms on board the spacecraft. Of greatest interest for research is the compression of optical images, since they occupy the largest volume of transmitted information and lend themselves well to compression, including lossless compression. Currently, the authors of the article are not aware of efficient algorithms for compressing optical images that would be used onboard domestic spacecraft. Such algorithms must account for the functional features of the optoelectronic equipment matrices, the structure of the obtained images and the issued data packets. The right combination of compression methods, which would take into account the data structure at each stage and ensure the required balance between the compression ratio, compression rate, consumed onboard resources and implementation complexity, must also be applied. Algorithms used in common media data formats do not meet these requirements. The algorithms employed in some foreign spacecraft either compress with loss or with a low compression ratio. Thus, an in-depth analysis is required of the peculiarities of optoelectronic equipment, the structures of transmitted data, as well as of the methods and algorithms for their compression.

**Keywords:** radio link, high-speed radio link, onboard equipment, HSRL, HSRL OE, onboard radio engineering complex (OREC), Earth remote sensing (ERS), satellite imagery, satellite images, image compression algorithms, imagery compression algorithms, image compression, imagery compression, radio-link data rate, data transfer rate

## Введение

Требуемая скорость передачи данных в радиолинии определяется информационными потоками с целевой аппаратуры либо телеметрической системы космического аппарата (КА). С развитием современных КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) объемы получаемых снимков существенно возросли, а скорость их передачи достигла уже нескольких гигабит в секунду. Тенденцией развития группировок КА ДЗЗ является повышение информативности, оперативности, глобальности и непрерывности, что в будущем приведет к еще большему увеличению потоков передаваемой информации и, соответственно, увеличению требуемых от радиолинии скоростей передачи данных. С увеличением сложности бортовых систем растут и объемы телеметрируемых параметров, которые также потребуют от радиолинии повышения скорости передачи данных.

Скорость передачи данных по радиолинии прямо пропорциональна спектральной эффективности применяемых в ней сигнально-кодовых конструкций. Рассмотрим два основных пути повышения спектральной эффективности.

1. Расширение выделенного частотного диапазона (полосы пропускания) позволит повысить скорость битового потока, не применяя более сложную сигнально-кодовую конструкцию, чем хорошо освоенная 32АФМ. Однако в хорошо освоенном  $X$ -диапазоне частот ГКРЧ позволяет использовать полосу пропускания около 375 МГц, расширение которой не допускается. Можно увеличить ширину полосы пропускания, перейдя в набирающий популярность  $Ka$ -диапазон частот, однако широкополосных ламп бегущей волны, применяемых в бортовых передатчиках, на сегодняшний день еще не существует. Стоит отметить и частичное отсутствие необходимой электронно-компонентной базы  $Ka$ -диапазона, а также слабо развитую наземную инфраструктуру.

2. Применение более сложных сигнально-кодовых конструкций позволит повысить скорость битового потока, но приведет к увеличению требуемого отношения энергии полезного сигнала к спектральной плотности мощности шума  $E_b/N_0$  у поверхности Земли, а следовательно, и к увеличению

эффективной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ). Для хорошо освоенной кодовой конструкции 32АФМ 9/10 спектральная эффективность равна 4,453027 бит/с·Гц, а требуемое отношение сигнал/шум соответственно равно 15,98 дБ. Увеличение скорости битового потока на 20% потребует использования кодовой конструкции со спектральной эффективностью не хуже 5,34363 бит/с·Гц, что соответствует созвездию 64АФМ 9/10 и отношению сигнал/шум 18,51 дБ. Таким образом, ЭИИМ придется увеличить практически в 2 раза, что приведет к значительному увеличению энергетических и массогабаритных характеристик бортовой аппаратуры радиолинии.

Таким образом, спектральная эффективность технически реализуемых радиолиний практически достигла предела Шеннона. Альтернативным путем повышения информационной скорости в радиолинии является внедрение алгоритмов сжатия данных в цифровую часть системы, что позволит избежать значительного увеличения энергетических и массогабаритных характеристик аналогового тракта и увеличить объем передаваемой информации в 1,2–10 раз.

На сегодняшний день существует огромное множество методов и конкретных алгоритмов сжатия данных. В наземной технике большинство из них получили весьма широкое распространение: в компьютерах, сети Интернет, факсах, смартфонах, плеерах, радиостанциях, фотоаппаратах, видеокameraх и т.п. Однако в космической технике существующие алгоритмы сжатия данных широкого распространения не получили. Из нескольких тысяч запущенных КА только несколько десятков из них применяют в бортовой аппаратуре радиолинии какие-либо алгоритмы сжатия информации. Причин, по которым сжатие информации до сих пор не получило широкого распространения, несколько.

1. Одной из основных технических характеристик радиолинии считается вероятность появления ошибки на бит принятой информации, возникновение которой в пакете сжатой информации ведет к ее размножению при декодировании и искажению информации всего сжатого пакета.

2. Обработка высокоскоростных потоков информации (более 1 Гбит/с) требует соответствующих

вычислительных ресурсов, которые для бортовой аппаратуры весьма ограничены по сравнению с наземной.

3. Внедрение дополнительных бортовых приборов/модулей сжатия информации может понизить общую надежность бортовой аппаратуры радиолинии, а также ведет к увеличению ее стоимости, веса и энергопотребления *при прочих равных условиях*.

Тем не менее вопросами сжатия на борту КА целевой и телеметрической информации интересуются многие специалисты космической отрасли. На сегодняшний день электронно-компонентная база уже достигла того минимального уровня, который позволил бы реализовать на борту КА сжатие данных и повысить скорость передачи информации. В мире уже существуют некоторые КА, в которых применяется сжатие данных, однако их количество мало.

Таким образом, внедрение на борт отечественных космических аппаратов устройств сжатия данных является актуальной и необходимой областью исследования.

## Выбор источника данных для сжатия

Рассмотрим основные источники информации, требующие ее передачи по радиоканалу.

Ни один современный космический аппарат не обходится без телеметрических комплексов. Телеметрическая информация (ТМИ) характеризуется небольшими объемами и, соответственно, низкими требованиями к скорости радиолинии [1]. Для передачи ТМИ используются низкоскоростные радиолинии со скоростью передачи до нескольких десятков мегабит в секунду [2]. Сжатие ТМИ оправдывает себя не всегда, однако изучается многими специалистами [3, 4].

В сфере ДЗЗ достаточно важную роль играют радиолокационные комплексы. В частности, радиолокаторы с синтезированной апертурой [5]. Обработка первичной (сырой) радиолокационной информации (РЛИ) является достаточно сложной процедурой, требующей участия человека, поэтому непосредственно на борту КА ее не применяют [6]. Первичная РЛИ характеризуется шумоподобным

видом, наивысшей энтропией и большими объемами, для передачи которых используются высокоскоростные радиолинии со скоростью передачи до нескольких гигабит в секунду [7]. Сжатие первичной РЛИ сильно затруднено и в большинстве случаев не оправдывает своего применения.

Не менее важную роль в сфере ДЗЗ играют оптико-электронные комплексы [5, 8]. Спутниковые снимки оптического диапазона характеризуются меньшей энтропией и большими объемами, для передачи которых используются также высокоскоростные радиолинии со скоростью передачи до нескольких гигабит в секунду. Сжатие спутниковых изображений определенно оправдывает свое применение, однако массовых успехов в данном направлении пока не наблюдается.

Поскольку ТМИ не требует от радиолинии высоких скоростей передачи, первичная РЛИ без предварительной обработки сжатию практически не поддается, а оптические снимки занимают наибольший объем всей передаваемой с отечественных КА ДЗЗ информации, то наибольший интерес для исследования сжатия представляют именно оптические снимки.

## Специфика получения оптических снимков

Оптическое сканирование (зондирование) подстилающей поверхности Земли выполняется оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) КА. В современной ОЭА основным фоточувствительным элементом является матрица с одной или несколькими линейками ПЗС ВЗН [8]. Количество линеек обозначим  $L$ . Каждая линейка состоит из набора  $M$  фотоприемников (пикселей) и чувствительна только к заданному спектральному диапазону длин волн  $\lambda$ , который может быть как широким, так и узким (с конкретной длиной волны). При этом обязательно, что количество пикселей для всех линеек одинаково. За каждый такт сканирования для каждого пикселя каждой линейки выполняется экспонирование (накопление заряда, пропорционального мощности светового потока) спроецированного оптикой изображения подстилающей поверхности, а также  $Q$ -разрядное аналого-цифровое

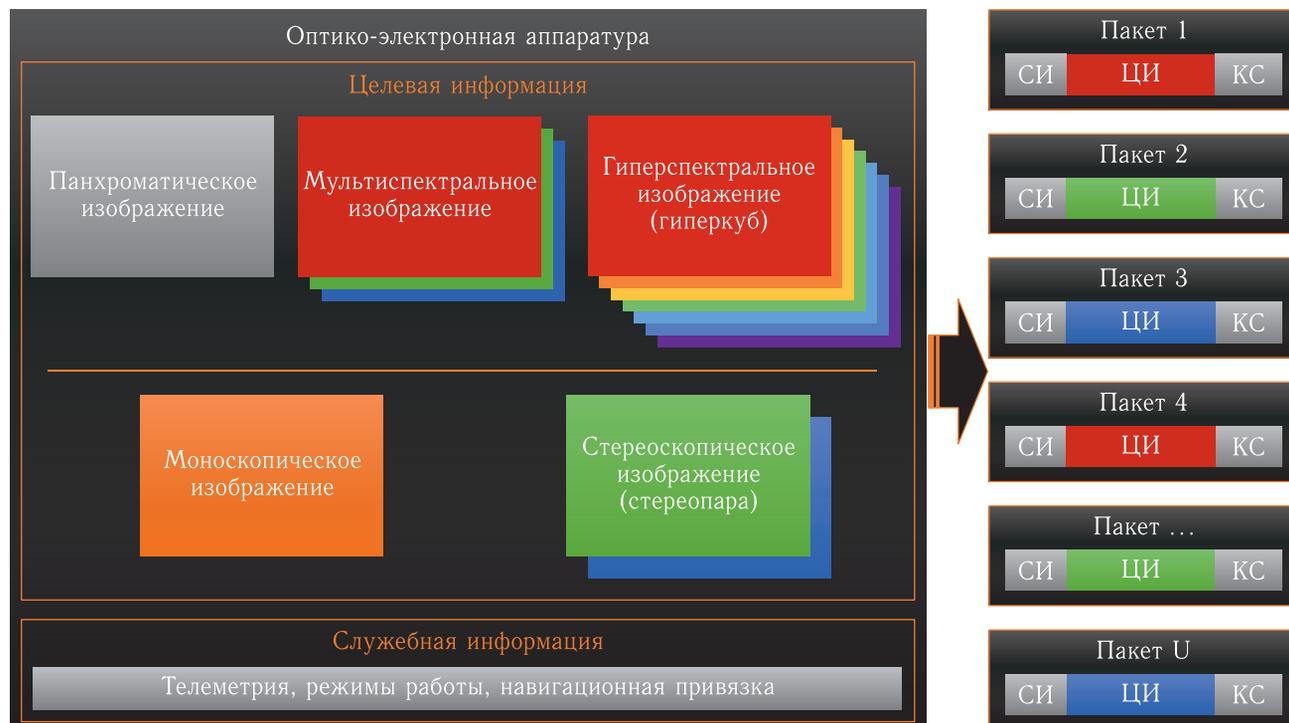


Рис. 1. Структуры снимков и выходной информации ОЭА

преобразование формируемого сигнала, амплитуда которого соответствует величине накопленного заряда. В результате на выход ОЭА со всех  $L$  линеек по  $L$  каналам поступают пакеты цифровых данных, каждый из которых содержит в себе  $Q$ -разрядные значения яркости пикселей очередной строки изображения. Количество строк в изображении обозначим  $N$  (определяется длиной снимаемого маршрута). Таким образом, каждое изображение, полученное любой линейкой матрицы, характеризуется номером канала  $1-L$ , диапазоном  $\lambda$ , разрядностью  $Q$ , шириной  $M$  и высотой  $N$ .

Получаемые линейками изображения являются растровыми, с непрерывным тоном, природного происхождения. На таких изображениях отсутствуют области с абсолютно равными значениями пикселей, как это бывает в компьютерной графике. Пиксели любых объектов и условных границ между ними (облаков, водоемов, полей, гор, объектов инфраструктуры и т. п.) всегда имеют некоторый градиент и в зависимости от координат принимают различные значения. Дополнительные отличия вносят и шумы самой аппаратуры. Таким образом, получаемые изображения обладают характер-

ной избыточностью и соответствуют количественным данным с памятью (последовательности зависимых значений какой-либо величины).

Непосредственно же целевой информацией ОЭА считаются снимки или маршруты (рис. 1). В зависимости от применяемого в матрице набора линеек и их спектральной чувствительности получаемые снимки делятся на панхроматические (ПХ), мультиспектральные (МС) и гиперспектральные (ГС), а также моноскопические (МНС) и стереоскопические (СтС) [8]. ПХ-снимок представляет собой одно изображение, полученное в одном конкретном спектральном диапазоне, поэтому его можно считать одноканальным ( $L = 1$ ). МС-снимок представляет собой набор из нескольких изображений, полученных в разных спектрах, например  $RGB$ , поэтому его можно считать многоканальным ( $L \approx 3-100$ ). ГС-снимок отличается от МС только большим количеством используемых спектральных диапазонов ( $L > 100$ ). СтС-снимок обычно представляет собой набор из двух изображений (стереопару), поэтому его также можно рассматривать как многоканальный ( $L = 2$ ). Поскольку МС-, ГС- и СтС-снимки состоят не из одного

изображения, а из нескольких, то, помимо избыточности в каждом отдельном изображении снимка, можно учесть и межканальную избыточность [9].

Крайне важно отметить, что выходные пакеты ОЭА содержат в себе не только часть изображения, но и служебную информацию; сами изображения полученного в соответствующих спектрах маршрута могут иметь не только разное разрешение  $M \times N$ , но и разную глубину цвета  $Q$ , а их суммарный объем для одного маршрута может достигать нескольких терабайт. Более того, в ОЭА может применяться не одна, а несколько матриц с боковыми и продольными сдвигами относительно друг друга, что приводит к кратному увеличению количества получаемых изображений [8].

Специальные алгоритмы сжатия изображений, применяемые в таких форматах, как JPEG, JPEG-2000, PNG, TIFF и т.п., не предназначены для работы с отдельными строками изображения, особенно разбитыми на несколько пакетов, дополненных чужеродной служебной информацией. Данные алгоритмы не могут эффективно работать и с изображениями, компоненты цветового пространства (спектральные диапазоны) которых различаются разрешением  $M \times N$ . Также данные алгоритмы не подразумевают эффективной работы со спектральными диапазонами, количество которых больше  $L = 4$ , поскольку обычно используются цветовые пространства  $RGB$ ,  $YUV$  или  $СМУК$  [9]. Так, наиболее привлекательный для специалистов в области геопространственных данных формат JPEG-2000 подразумевает устранение межканальной избыточности только для трех каналов  $RGB$  [10, 11].

Алгоритмы сжатия, применяемые в таких форматах, как ZIP, RAR, BZip2 и т.п., предназначены для сжатия разнородных данных, структура которых отличается и заранее непредсказуема. Например, это могут быть тексты, видео, аудио, графика, изображения или же служебные файлы. Данные алгоритмы универсальны, заложенная математическая модель входных данных не соответствует изображениям, поэтому их эффективность также является низкой [12].

Описанные тонкости делают использование классических алгоритмов сжатия неэффективным, а иногда и вовсе непригодным. Особенно если

информацию требуется передать без потерь, в реальном времени или только частично (конкретные изображения отснятого маршрута).

## Способы сжатия снимков

Можно выделить два способа сжатия выходных данных ОЭА, отличающихся друг от друга сложностью реализации и степенью сжатия (рис. 2).

В первом случае реализуется пакетное сжатие данных. На вход кодировщика поступают либо пакеты данных, содержащие части строк изображения вместе со служебной информацией, либо только строки изображения. При этом данные могут как поступать из ОЭА в реальном времени, так и считываться из записанных в запоминающем устройстве (ЗУ) файлов. Преимущества — простота реализации, возможность потокового сжатия данных без отделения служебной информации от строк изображения. Недостатки — неполная декорреляция изображений/снимков и низкая степень сжатия, поскольку междустрочная и межканальная избыточность не устраняется.

Во втором случае реализуется групповое сжатие данных. Кодировщик накапливает пакеты, относящиеся либо к отдельному изображению, либо к отдельному МС-, ГС-, СтС-снимку, и сжимает их совместно, с предварительным устранением междустрочной или межканальной избыточности соответственно. Междустрочная избыточность, как было отмечено ранее, характерна для всех изображений природного происхождения. Межканальная же избыточность характерна для изображений, полученных в разных спектрах, но для одной и той же подстилающей поверхности. При этом важно помнить, что разрешения изображений разных спектров могут отличаться друг от друга — может потребоваться приведение всех изображений снимка к единому разрешению (например, путем применения интерполяционных сплайнов) или же более элегантное решение. В данном случае, если данные поступают из ОЭА в реальном времени, то для группового сжатия потребуется их оперативная буферизация, а служебную информацию потребуется выдавать отдельно. Компромиссным решением является работа с уже записан-

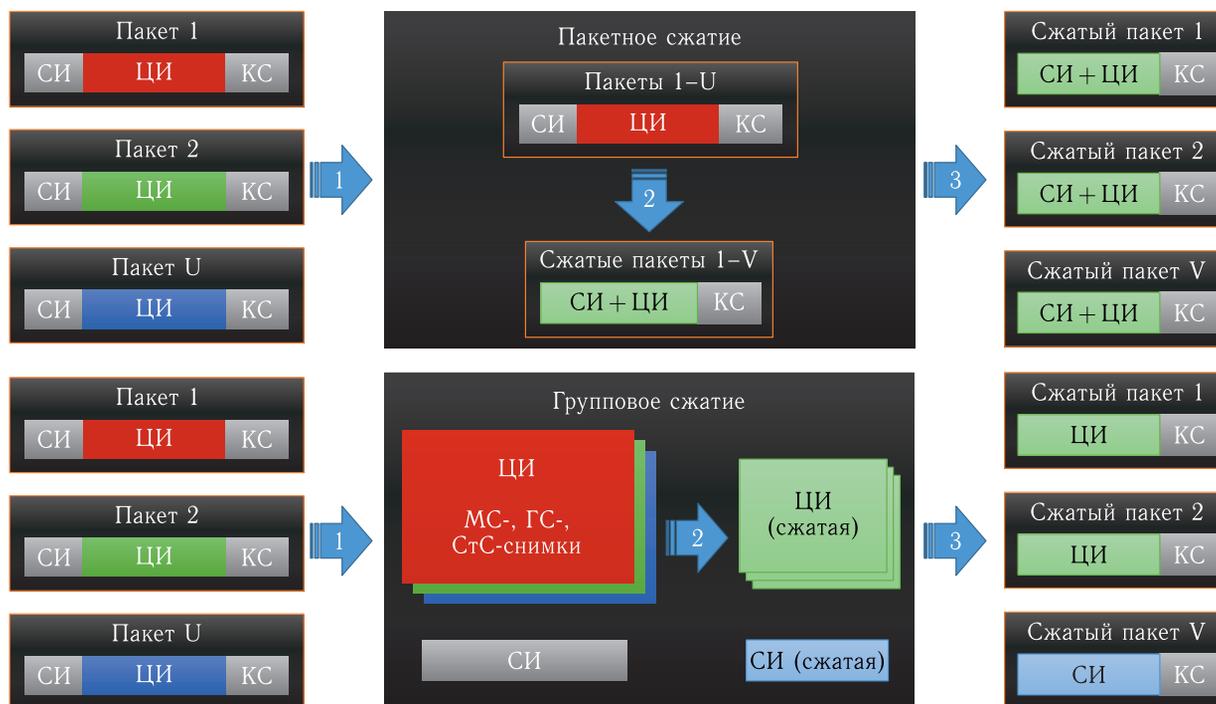


Рис. 2. Способы сжатия целевой информации ОЭА

ными в ЗУ данными и запись сжатых данных в свободное пространство ЗУ. Данный способ обладает высокой сложностью реализации, высоким уровнем декорреляции и высокой степенью сжатия.

ющиеся между собой по рассмотренным характеристикам. Конкретная реализация тех или иных методов и является основой любого алгоритма сжатия. Рассмотрим эти методы подробнее.

## Эффективность сжатия снимков

Основными характеристиками любого алгоритма сжатия являются степень сжатия, скорость сжатия, количество потоков, уровень потерь, объем оперативной памяти, сложность реализации. Данные характеристики могут быть использованы как для сравнения алгоритмов между собой, так и для выбора критериев эффективности.

Для эффективного сжатия снимков непосредственно на борту КА в большинстве случаев требуется их предварительная буферизация (которую проще всего реализовать в ЗУ), а также специальные алгоритмы сжатия, реализующие тот или иной способ и метод сжатия с учетом выбранных критериев эффективности и рассмотренных особенностей ОЭА и структуры формируемых ею данных.

Для каждого типа данных, их структуры и рядности существуют свои методы сжатия, отлича-

## Методы сжатия данных

В первую очередь все методы и конкретные алгоритмы сжатия делятся на две группы по типу потерь: без потерь и с потерями. В основном нас будут интересовать методы сжатия без потерь, поскольку в формируемых ОЭА пакетах информации содержится не только часть изображения, но и служебная информация, потеря которой недопустима. Потери в качестве изображения в большинстве случаев также неприемлемы [5].

По типу обработки данных методы бывают преобразующими и статистическими (энтропийными).

Преобразующие методы в основном служат для преобразования и декорреляции данных. С помощью данных методов качественные данные можно преобразовать в количественные, устранить избыточность данных (избавиться от памяти источника) и получить более удачное распределение веро-

ятности элементов (понизить энтропию). Наиболее известные представители данной группы — методы Зива–Лемпеля (LZ77, LZ78, LZH, LZW), преобразование Барроуза–Уилера (BWT), перемещение стопки книг (MTF), дискретное вейвлет-преобразование (DWT), преобразование Фурье (FT), частным случаем которого является дискретное косинус-преобразование (DCT), разделение мантисс и экспонент (SEM), субполосное кодирование (SC), линейно-предсказывающее кодирование (LPC), которое иногда путают с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией (DPCM), кодирование длин серий (RLE) и другие [12].

Статистические же методы оперируют вероятностями элементов (частотами их встречи) и осуществляют сжатие поступающих данных на основе собранной статистики и полученного распределения. Наиболее известными представителями данной группы являются методы Хаффмана (HUFF), арифметическое кодирование (ARIC) и методы контекстного моделирования, в которые входят наиболее распространенные методы предсказания по частичному совпадению (PPM) и динамическое марковское сжатие (DMC) [12].

## Комбинирование методов сжатия данных

Чем выше энтропия поступающих данных, тем ниже их избыточность, тем сложнее и слабее их можно сжать. Для получения наиболее оптимального результата сжатие следует применять в несколько этапов (от 1 до 3), на каждом из которых используется свой метод сжатия, учитывающий параметры данных, поступающих с предыдущего этапа.

Количественные данные с памятью лучше всего сжимать путем декорреляции данных с получением более удачного распределения вероятности встречи элементов и использования полученного распределения для более эффективного энтропийного сжатия на втором этапе.

Качественные данные лучше всего сжимать путем составления словаря. Сжатие происходит за счет записи в выходной поток ссылок на «слова», вместо записи самих «слов» (словами являются уникальные последовательности элементов). Коли-

чественные данные таким способом тоже поддаются сжатию, однако с меньшей эффективностью.

Разнородные данные, когда на вход кодировщика могут поступать как качественные, так и количественные данные, лучше всего сжимать методами контекстного моделирования путем оценки вероятности появления нового элемента в зависимости от элементов, непосредственно ему предшествующих (контекста). Контекстом может быть не только элемент или слово, но даже и набор качественно разных объектов. В отличие от простого статистического кодирования контекстное моделирование работает с условными вероятностями встречи элементов вместо безусловных, что дает более точные оценки и, как следствие, лучшие результаты. Данный способ можно считать инвариантным к типу входных данных.

На практике поэтапное сжатие данных несколькими методами находит отражение в алгоритмах широко распространенных файловых форматов: JPEG (DCT + HUFF), JPEG-2000 (DWT + ARIC), PNG (LZ77 + HUFF), ZIP (LZ77 + HUFF), TIFF (RLE, LZW, LZ77, ZIP, JPEG, JBIG, CCITT Group 3, CCITT Group 4), Bzip2 (BWT + MTF + HUFF), 7z (PPMd, LZMA2, Bzip2, ZIP), MP3 (FT + SC + HUFF) и т. д.

Важно отметить, что ни один из данных алгоритмов не учитывает той специфики ОЭА, о которой говорилось в разделе «Специфика получения оптических снимков», и не может быть применен на борту КА в чистом виде. Сравним данные алгоритмы с алгоритмами, примененными в реальных миссиях.

## Апробированные алгоритмы космического назначения

NASA в своих марсианских миссиях Spirit и Opportunity для сжатия ПХ-изображений, получаемых с кадровых матриц ПЗС бортовых видеокамер марсоходов, применила алгоритм ICER [13, 14]. В его основе, как и в основе JPEG-2000, лежит преобразование DWT с последующим энтропийным кодированием ARIC. В отличие от JPEG-2000 ICER лучше сжимает ПХ-изображения, нежели MC-. Арифметическое кодирование в ICER используется целочисленное, более удобное

для радиационно стойких DSP-процессоров (в то время как в JPEG-2000 используется кодирование с плавающей точкой). Причем, помимо арифметического кодирования, ICER может применять коды Голомба при  $m = 5$  (один из вариантов SEM). Преимуществом данных алгоритмов является хорошая степень сжатия (до 1,9 без потерь, до 100 со значительными потерями) и возможность предварительного просмотра данных путем чтения низкочастотной составляющей из начала файла. Недостатком же является высокая вычислительная сложность вейвлет-преобразований, а также возможность их применения только к полноценным изображениям, полученным классической ПЗС-матрицей или сформированным из строк ПЗС ВЗН матрицы непосредственно на борту КА.

В КА ДЗЗ ALOS и SPOT-5 для сжатия ПХ- и МС-изображений, а также данных с радиолокаторов и радиометров применены алгоритмы на основе DCT [15, 16]. С наибольшей вероятностью присутствует и энтропийное сжатие методом HUFF или ARIC, поскольку само по себе DCT никакого сжатия не дает. *Режим сжатия без потерь данными аппаратами не поддерживается*, а степень сжатия с потерями сопоставима с алгоритмами JPEG и WebP, в основе которых лежит тот же самый DCT. Так, для JPEG степень сжатия может достигать 50 при значительных потерях информации. Потеря информации является существенным и неприемлемым недостатком данных алгоритмов.

В некоторых КА ДЗЗ серий ALOS, SPOT и «Ресурс» для сжатия с потерями изображений и сигналов применен алгоритм на основе DPCM (ДИКМ) [17]. Режим сжатия без потерь таким методом не поддерживается [19], сжатие достигается за счет умышленной потери данных (исключения из выходных пакетов ОЭА заданного числа пикселей в допущении, что разница их соседних значений незначительна). Практическая степень сжатия с потерями достигает 3 раз. Преимущество метода — в его неоспоримой простоте, недостаток — в гарантированной потере информации.

Перспективный алгоритм сжатия данных без потерь описан в книге CCSDS 120.0-G-3 для космических информационных систем [19]. Заключается он в комбинации дельта-кодирования LPC и адаптивного кодера SEM. Преобразование LPC

позволяет получить показательное распределение для  $Q$ -разрядных элементов, а SEM кодирует старшие разряды преобразованных элементов гамма-кодами Элиаса (чем чаще встречается старший разряд, тем короче его сжатый код). Преимуществами алгоритма являются его простота и возможность применения непосредственно к пакетам выходных данных ОЭА сразу же после их получения независимо от наличия в них служебной информации. Недостатком является то, что получить достойную степень сжатия (до 5 раз) можно только для снимков с невысокой степенью энтропии. Средняя степень сжатия колеблется от 1,2 до 2,6 раз.

Таким образом, на сегодняшний день на борту КА не реализован ни один алгоритм, который позволил бы сжимать полученные ПЗС ВЗН матрицей снимки эффективно и без потерь.

## Заключение

Проведенный обзор показал, что повышение скорости передачи информации по радиоканалу обработанными техническими решениями ограничено физически и практически достигло своей границы Шеннона. На сегодняшний день в отечественной космонавтике отсутствуют готовые технические решения по эффективному сжатию без потерь целевой информации, в то время как в зарубежных странах некоторый задел уже накоплен. Проведенный анализ специфики оптико-электронной аппаратуры, формируемых ею данных и существующих алгоритмов сжатия позволяет сделать вывод, что эти алгоритмы неэффективны для применения в космической технике.

Таким образом, требуется более глубокий и детальный анализ структур передаваемых данных, а также способов, методов и алгоритмов их сжатия, что подразумевает математическое моделирование каналов передачи данных и анализ эффективности применяемых алгоритмов сжатия. Требуется разработка наиболее эффективных алгоритмов, учитывающих специфику бортовой аппаратуры космического назначения, а также экспериментальная обработка возможных технических решений на соответствующих испытательных макетах.

Решение поставленных задач позволит расширить область применения алгоритмов сжатия

данных и применить их в отечественной космонавтике, получить комплексное представление о бортовом устройстве сжатия и наземном декодере, сформировать научно-технический задел по созданию радиолиний, обладающих большей скоростью передачи информации по сравнению с классическими архитектурами.

## Список литературы

1. Бровкин А. Г., Бурдыгов Б. Г., Гордийко С. В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учеб. пособ. Под ред. А. С. Сырова. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
2. СТО ГК РОСКОСМОС 1019-2019. Стандарт организации. Аппаратура бортовая автоматических космических аппаратов. Информационное взаимодействие. Низкоскоростная радиолиния.
3. Эльшафеи М. А., Сидякин И. М., Харитонов С. В., Ворнычев Д. С. Информатика и вычислительная техника. Исследование методов обратимого сжатия телеметрической информации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение, 2014, №3. С. 92–104.
4. Мамедов Т. Т., Губайдуллин И. Р., Косарев Д. И., Орешко В. В. Применение вейвлет-преобразований для анализа и сжатия телеметрических данных вибрационных процессов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 4. С. 59–65.
5. Булавицкий В. Ф., Жукова Н. В. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территории. Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2016. 113 с.
6. Неронский Л. Б., Михайлов В. Ф., Брагин И. В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. Учеб. пособ. СПб.: СПбГУАП, 1993. 174 с. <https://techlibrary.ru/> (Дата обращения 04.02.2021).
7. СТО ГК РОСКОСМОС 1018-2019. Стандарт организации. Аппаратура бортовая автоматических космических аппаратов. Информационное взаимодействие. Высокоскоростная радиолиния.
8. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
9. Сэлмон Д. Мир программирования. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
10. Acharya Tinku, Ping-Sing Tsai. JPEG2000 Standard for image compression. Concepts, Algorithms and VLSI Architectures. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2005. 162 p.
11. High Throughput JPEG 2000 (HTJ2K) and the JPH file format: a premier // ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG1/ Document № 87018.
12. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиватора, сжатие изображений и видео. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 384 с.
13. Kiely A., Klimesh M. The ICER Progressive Wavelet Image Compressor. IPN Progress Report 42-155. November 15, 2003. 46 p. [https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress\\_report/42-155/155J.pdf](https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-155/155J.pdf) (Дата обращения 04.02.2021).
14. Kiely A., Klimesh M. Preliminary Image Compression Results from the Mars Exploration Rovers. IPN Progress Report 42-156. February 15, 2004. 8 p. [https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress\\_report/42-156/156I.pdf](https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-156/156I.pdf) (Дата обращения 04.02.2021).
15. Osawa Yuji. Optical and microwave sensors on japanese mapping satellite — ALOS. ALOS Project Team, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505, Japan. 4 p. <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm1/papers/57.pdf> (Дата обращения 04.02.2021).
16. Lier P., Moury G., Lattry C., Cabot F. Selection of the SPOT-5 Image Compression Algorithm // Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3439, 70. 12 p. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3439/0000/Selection-of-the-SPOT5-image-compression-algorithm10.1117/12.325660.short?SSO=1> (Дата обращения 04.02.2021).
17. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Стратилатов Н. Р. и др. Космический аппарат «Ресурс-П» // Интернет-журнал «Геоматика», 2010, №4. С. 23–26. [https://sozond.ru/upload/iblock/c54/2010\\_04\\_004.pdf](https://sozond.ru/upload/iblock/c54/2010_04_004.pdf) (Дата обращения 04.02.2021).
18. Манохин А. Е. Радиотехнические системы передачи информации. Конспект лекций. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 81 с. <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/11784/1/Manohin.pdf> (Дата обращения 04.02.2021).
19. The Consultative Committee for Space Data Systems. Report Concerning Space Data System Standards. Lossless data compression. Informational report. CCSDS 120.0-G-3. Green book. April 2013.