

## Обзор существующих алгоритмов сжатия данных, получаемых от многозональных сканирующих устройств

В. Р. Печкурова

*Московский государственный университет имени Н. Э. Баумана  
Москва, 105005, Россия*

*АО «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия  
E-mail: vika.florida@gmail.com*

Вопрос сжатия данных, получаемых от приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), не является новым в современном мире. Задачей правильной постановки этого вопроса, поиском ответов на него, поиском решения проблем, вытекающих из него, занимается достаточно большое количество инженеров и исследователей. Такой неподдельный интерес вызван увеличением обрабатываемых объёмов данных как на борту космических аппаратов ДЗЗ, так и на самой Земле. Увеличение объёмов данных, в свою очередь, связано с неминуемым ростом качества, расширением технических и программных возможностей аппаратов и приборов, исследующих Землю из космоса. В настоящий момент большая часть данных, получаемых от приборов ДЗЗ, ещё может отправляться без бортового сжатия на наземные пункты приёма, однако есть большая вероятность, что в будущем пропускная способность линии передачи данных не позволит пересылать сырые данные без обработки и дополнительного сжатия. Достаточно интересная область исследований связана именно с сжатием данных от многозональной сканирующей аппаратуры. Процедура сжатия может учитывать корреляцию данных разных секторов. В статье рассматриваются аспекты существующих алгоритмов сжатия данных применительно к многозональной сканирующей аппаратуре, гиперспектральным изображениям. Анализируются некоторые доступные источники с целью выявления настоящей и перспективной возможности сжатия данных на борту космических систем ДЗЗ.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, мульти- и гиперспектральные данные, многозональное сканирование, сжатие данных, сжатие мультиспектральных данных, сжатие без потерь

Одобрена к печати: 20.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-9-17

### Введение

Многие исследователи сходятся во мнении, что обработка изображений, и в частности сжатие их на борту, уже не является дополнительной функцией, а становится обязательной во всех будущих миссиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Печкурова, 2020; Lara, Wang, 2011).

Так, например, в работе (Zhou, 2012) предлагается проект интеллектуальной спутниковой системы ДЗЗ (FIEOS), в которой архитектура системы имеет полную динамическую бортовую систему датчиков наблюдения за Землёй, процессоры обработки данных и систему связи. Отмечается, что важнейшей компонентой для таких систем является их способность обрабатывать бортовые данные, поэтому система должна включать: процессор обработки изображений, управления данными, управления ресурсами; распределитель данных; контроллер служебных (сервисных) действий и датчиков. Также делается важное замечание, что при низком уровне обработки данных следует выполнять обязательное сжатие данных.

В статье (Raymond et al., 2002) выявляются потребности в интеллектуальной распределённой инфраструктуре космических аппаратов. Делается вывод, что для этого требуются значительные технологические достижения в области датчиков, управления данными и космических технологий. Подчёркивается, что для конструирования наноспутников необходима организация автономности обработки данных, что требует наличия высокоэффективных, маломощных вычислительных устройств. Для автономности и валидации алгоритмов нужен

высокий уровень планирования, диспетчеризации, диагностики неисправностей и восстановления, командования и управления, систем управления приборами, обработки научных данных, распределённого управления ресурсами и пр. Это всё, в свою очередь, требует развитой системы хранения и сжатия данных.

### Сжатие данных приборов ДЗЗ

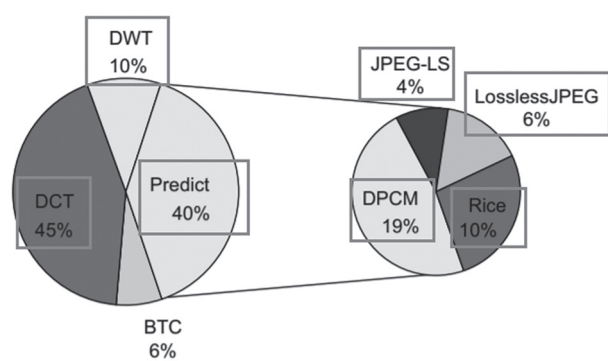
В ходе новых космических полётов возникает необходимость обработки большого объёма данных на борту из-за ограничений в полосе пропускания и времени передачи данных, увеличения пространственного разрешения и расширения спектральной чувствительности аппаратуры. Почти все современные спутники ДЗЗ работают по следующему принципу:

- 1) съёмка изображений,
- 2) хранение данных на борту,
- 3) передача изображений на наземную станцию во время сеанса связи.

Такой подход вызвал потребность в большем количестве бортовых ресурсов хранения, главным образом, конечно, из-за больших объёмов данных, собираемых системами ДЗЗ. Как следствие, эти объёмы данных требуют значительного времени связи для передачи их на наземные комплексы приёма и обработки данных. Из-за ограниченного времени видимости спутника, ограничений пропускной способности линии для завершения передачи изображений, хранящихся на борту, может потребоваться более одного сеанса связи. Всё это и является причинами разработки систем для бортового сжатия изображений (Lara, Wang, 2011).

Использование сжатия изображений для миссий ДЗЗ помогает увеличить объём данных, который может быть сохранён и передан на Землю. Такой подход может стать отличным компромиссом между постоянно растущими объёмами записываемых данных, ограниченными ресурсами бортовой памяти и полосой пропускания линии связи. Поэтому сжатие становится очень важной функцией в программах обработки изображений спутниковых систем. Поскольку для данных ДЗЗ ухудшение их качества в большинстве случаев неприемлемо, то для анализа способов достижения этой цели исследованы некоторые методы и алгоритмы сжатия данных без потерь.

Наиболее распространённая архитектура для общей системы сжатия изображений состоит из пространственной декорреляции (уменьшения избыточности изображений), за которой следует квантование и энтропийное кодирование. Пространственная декорреляция (называемая также отбеливанием) часто применяется на стадии предварительной обработки и способствует значительному уменьшению избыточности (Меркушева, Малыхина, 2009). Энтропия, которая измеряет количество информации, содержащейся в источнике, даёт теоретическую границу оценки степени сжатия без потерь. Энтропия зависит от статистической природы источника. В зависимости от способа формирования кода энтропийные алгоритмы сжатия разделяют на статические, адаптивные, динамические (Попов, 2013).



Основные методы сжатия изображений

На основе методов, применяемых для пространственной декорреляции, система сжатия может использовать подходы, основанные на предсказании, дискретном косинусном преобразовании (*англ.* Discrete Cosine Transform — DCT), дискретном вейвлет-преобразовании (*англ.* Discrete Wavelet Transform — DWT). На *рисунке* представлена круговая диаграмма, которая наглядно демонстрирует частоту применения основных алгоритмов сжатия изображений в качестве теоретической базы для разработки новых алгоритмов сжатия данных.

Как видно из *рисунка*, большую часть этой базы составляют алгоритмы, основанные на преобразовании (DCT, DWT). Алгоритмы, основанные на предсказании, также занимают немалую нишу — порядка 40 %. Небольшой сектор в 6 % принадлежит алгоритму, основанному на блочном кодировании (*англ.* Block truncation coding — BCT). Из всех представленных на *рисунке* алгоритмов лишь BCT является алгоритмом сжатия с потерями (на *рисунке* названия алгоритмов сжатия данных без потерь заключены в рамку) (Yu et al., 2009).

Удаление какого-либо типа избыточности в изображении — это то, как достигается процесс сжатия. Под типом избыточности следует полагать, к примеру, пространственный тип избыточности, статический, спектральный и т.д. Пространственный тип избыточности подразумевает, что пиксельная информация может быть частично выведена из соседних пикселей. Статистическая избыточность подразумевает присваивание коротких кодовых слов высоковероятным символам, а длинных кодовых слов — маловероятным символам. Спектральная избыточность подразумевает наличие схожих данных в разных спектрах кадров одного положения.

Представление изображения с наименьшим возможным количеством битов без потери какой-либо информации ускоряет передачу данных и минимизирует требования к системе хранения. Этот процесс становится конечной целью сжатия изображений без потерь на спутниках (Karam, 2009). Однако сжатие — это процесс, который фактически может быть выполнен и как предварительная обработка (загрузка данных со спутника), и как постобработка (сохранение большего количества данных в ограниченном ресурсе хранения). Чтобы считаться обработкой без потерь, схема сжатия должна обеспечивать воспроизведение входного изображения при распаковке. Современные алгоритмы без потерь обычно достигают сжатия около 50 %.

Типичная система кодирования без потерь для сжатия изображений (Karam, 2009) состоит из следующих компонент:

1. Преобразователь изображения — основан на применении обратимого преобразования к входным данным изображения. Как правило, включает разностное или предсказательное преобразование, унитарные преобразования (например, DCT), разложение сигнала по поддиапазонам (например, DWT), преобразования цветового пространства.
2. Кодер — система кодирования, которая обычно «берёт» преобразованные данные изображения и разбивает их на блоки, группируя соседние образцы данных, в которых каждый блок данных ассоциируется с символом. После группировки нескольких блоков данных вместе выявляется корреляция, которая может присутствовать между данными изображения. Это приводит к более высоким коэффициентам сжатия.
3. Кодер символов без потерь — генерирует двоичный битовый поток, присваивающий двоичные кодовые слова входным символам.

Для декодирования изображения выполняются обратные операции кодера.

Наиболее популярные схемы сжатия изображений без потерь могут быть классифицированы как статистические (например, алгоритм Хаффмана), словарные (например, алгоритм Лемпеля–Зива), структурированные универсальные коды (например, экспоненциальный код Голомба) (Karam, 2009).

Наиболее распространённые алгоритмы сжатия без потерь, используемые в космосе, были разработаны Комитетом JPEG (*англ.* Joint Photographic Experts Group) и Консультативным комитетом по системам космических данных (*англ.* Consultative Committee for Space Data Systems — CCSDS) (Lara, Wang, 2011). Ниже приводится их краткое описание.

- JPEG 2000 — широко используемый алгоритм сжатия без потерь, был создан Комитетом JPEG в 2000 г. с целью замены их оригинального стандарта JPEG на основе дискретного косинусного преобразования (созданного в 1992 г.) новым методом, разработанным на основе вейвлет-преобразования.
- Lossless JPEG — стандарт, разработанный Комитетом JPEG в качестве дополнения к JPEG в 1993 г., использует схему предсказаний, основанную на трёх ближайших соседях (верхний, левый и верхний левый), и энтропийное кодирование, которое применяется для определения ошибки предсказания.

- CCSDS Lossless Data Compression (CCSDS-LDC) создан Комитетом CCSDS в 1997 г., является рекомендуемым стандартом для сжатия данных без потерь и может рассматриваться как расширенный алгоритм Райса, который добавляет два варианта кодирования с низкой энтропией (Yeh et al., 2002).

Сжатие данных для изображений дистанционного зондирования является эффективным методом для хранения и приёма — передачи данных, поскольку они обладают немалой пространственной корреляцией. Кроме того, изображения, как результат многозональной съёмки, демонстрируют большую спектральную корреляцию. В связи с этим появились методы сжатия, использующие как пространственную, так и спектральную избыточность.

## Существующие методы и алгоритмы

Для задач передачи и последующего хранения аэрокосмических фотографий представляют интерес системы сжатия изображений, позволяющие значительно уменьшить требования к системам передачи данных, обеспечить большую эффективность работы с ними. Широко распространённые методики сжатия изображений с потерями (стандарты JPEG (Бахтин и др., 2014), lossy JPEG 2000 (Гершензон, Кучейко, 2006) и т. п.) малоприменимы для решения подобных задач, поскольку вносимые ими искажения делают невозможной дальнейшую математическую обработку изображений (Бабкин и др., 2004).

Сжатие без потерь как обычных, так и многоспектральных данных осуществляется за счёт анализа статистики кодируемого источника. Задача оценки статистики источника осложнена тем, что большинство источников визуальных данных содержат внутренние зависимости (являются источниками с памятью). Как описывалось ранее, для упрощения решения данной задачи зачастую используется следующий подход: сначала к источнику применяется декоррелирующее преобразование для учёта памяти источника (устранения имеющейся избыточности), затем кодирование источника без памяти. Типовая схема сжатия изображений на основе данного подхода включает решение нескольких подзадач:

- 1) декорреляция данных — устранение присутствующей в данных источника избыточности;
- 2) контекстное моделирование — разбиение исходного потока данных на подпотoki для оценки статистики источника с учётом оставшихся после предыдущего шага зависимостей;
- 3) кодирование источника — оценка распределения источника и построение наиболее эффективного кода для компактного представления его (источника) данных. Методы кодирования источника без памяти являются наиболее распространёнными и делятся на несколько классов.

Для решения первой подзадачи обычно применяются методы, относящиеся к классу алгоритмов дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (*англ.* Difference Pulse-Code Modulation — DPCM). Текущее обрабатываемое значение предсказывается по набору ранее обработанных данных. Далее вычисляется разность между результатом предсказания  $x_{пр}$  и текущим обрабатываемым значением  $x$ , а именно  $e = x - x_{пр}$ , где  $e$  — ошибка предсказания. В некоторых работах (Egorov et al., 2015; Gilmutdinov et al., 2014) было предложено использовать модель предсказания классификации активного уровня (*англ.* Active Level Classification Model — ALCM) (Speck, 1995) в рамках DPCM-класса. Данная модель предсказания показала лучшие результаты по сравнению с моделями MED (*англ.* Median Edge Detector), SICLIC (*англ.* Simple Inter-color Lossless Image Coder), JPEG-LS, JPEG-2K. В исследовании (Egorov et al., 2015) были проведены тесты на пяти наборах изображений, два из которых представляют непосредственный интерес для области дистанционного зондирования Земли. Первый — набор трёхканальных 8-битовых изображений Земли и космических объектов большого разрешения; второй — набор изображений компьютерной томографии в оттенках серого с глу-



биной цвета 10 бит. Второй набор представляет интерес, так как в данный момент аппаратура российского сегмента ДЗЗ, например космический аппарат «Метеор-М», проводит снимки с аналогичными характеристиками. Стоит отметить, что различные модели предсказателей, использовавшиеся для сжатия этих наборов данных, показали схожие результаты с небольшими отличиями: удалось добиться сжатия изображения примерно в три раза.

Также для решения второй и третьей подзадач эффективного кодирования получаемого потока декоррелированных данных (ошибок предсказания) (Егоров и др., 2017) использовалась схема, состоящая из двоичного арифметического кодирования и контекстного моделирования по двоичным уровням — Binary Layers Scanning (BLS) (Egorov et al., 2015; Gilmutdinov et al., 2014). Показано, что лежащий в основе предложенного метода сжатия способ кодирования изображений по двоичным уровням унарного кода не приводит к увеличению энтропии. Также было предложено несколько улучшений для схем контекстного моделирования модулей и знаков ошибок предсказания. Эффективность самой схемы и улучшений была продемонстрирована путём сравнения эффективности сжатия с предложенной ранее авторами схемой и другими известными алгоритмами сжатия на известных тестовых множествах изображений. Полученные результаты показали незначительную эффективность итогового решения по сравнению с алгоритмом JPEG 2000 и несколько большую эффективность по сравнению с алгоритмом JPEG-LS. Один из тестовых наборов, используемых для анализа эффективности алгоритмов, содержал орбитальные снимки поверхности Земли, снимки космических объектов и тел с представлением в 24 бита на пиксель (три 8-битных канала). Сжатие, проведённое с помощью предложенного алгоритма, показало результат в среднем порядка 7,9 бит на пиксель; для JPEG 2000 этот показатель составил около 8,2 бит на пиксель; для JPEG-LS — порядка 9 бит на пиксель.

Применение различных алгоритмов сжатия данных получило в настоящее время широкое распространение как для передачи изображений, так и для их хранения. Наиболее известными и универсальными алгоритмами сжатия изображений без потерь являются программные алгоритмы WinRar, WinZip, Adaptive Binary Optimization (ABO), GIF, Progressive Graphics File (PGF), PNG, Qbit Lossless Codec, TIFF, WMPhoto, RunLengthEncoding (RLE), LZW (Мальцев, Козин, 2016).

При сжатии отдельных изображений, что в случае гиперспектральных видеоданных соответствует сжатию каждого изображения зарегистрированного «гиперкуба» в отдельности, коэффициент сжатия составляет единицы. При совместном сжатии нескольких изображений, зарегистрированных в нескольких спектральных каналах, коэффициент сжатия может быть увеличен в 1,5–2 раза при учёте межканальной корреляции (Motta et al., 2006).

Недостатком многих алгоритмов сжатия изображений, не позволяющим достичь высоких коэффициентов сжатия многоспектральных и гиперспектральных данных, является то, что в них для сжатия используются различные переходы в цветоразностном пространстве, что плохо работает в случае совместного сжатия изображений, зарегистрированных в различных спектральных каналах. Кроме того, в большинстве алгоритмов сжатия изображений, адаптированных для сжатия многоспектральных и гиперспектральных видеоданных, многомерные спектральные данные рассматриваются как набор независимых двумерных изображений в пространственных координатах, а взаимосвязь данных по третьей — спектральной — координате не учитывается.

Анализ показывает, что имеет место значительная корреляция спектральных характеристик большинства природных и техногенных объектов и типов подстилающей поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах по длине волны. Данные, зарегистрированные в соседних спектральных каналах, сильно коррелированы между собой (Мальцев, Козин, 2016), и, как уже упоминалось выше, такая корреляция может позволить увеличить коэффициент сжатия до двух раз.

Алгоритм сжатия мультиспектральных данных на основе прогрессивного кодирования длин серий канальных разностей, предложенный в работе (Садик и др., 2016), показывает лучший результат, чем прогрессивное поканальное кодирование длин серий. В ходе исследования установлено, что коэффициент сжатия разностного спектрального канала составляет

2,45 раза, что в 1,8 раза выше по сравнению с прогрессивным канальным кодированием длин серий.

Трёхмерные вейвлет-методы привлекательны тем, что они обеспечивают все преимущества полнофункционального кодера, включая возможность использования вейвлет-преобразований для сжатия изображений без потерь, как это сделано в работе (Penna et al., 2006).

Следует отметить, что производительность кодирования без потерь на основе такого преобразования хуже (Penna et al., 2006), чем у методов, основанных на предсказании; однако в некоторых случаях гибкость кодера без потерь может перевесить небольшую потерю производительности.

В методике (Penna et al., 2006) применяется гибридное трёхмерное преобразование с использованием спектрального прямоугольного преобразования в качестве многокомпонентного расширения к JPEG 2000. Этот метод может быть использован для сжатия как на борту, так и на наземной станции. Основное различие между этими двумя приложениями заключается в требованиях к буферизации/хранению памяти и вычислительной мощности рабочих машин. Предложенный метод работает значительно лучше, чем остальные анализируемые в работе методы для 3D-сжатия. В исследовании делается вывод, что хотя целочисленные преобразования обеспечивают лишь незначительное снижение производительности при сжатии с потерями, они не настолько эффективны, как методы на основе дифференциальной импульсно-кодовой модуляции в случае без потерь. Тем не менее они часто используются на практике (как в JPEG 2000) и обычно демонстрируют меньшую сложность, чем адаптивные методы DPCM, такие как ACAP и ASAP.

## Заключение

В данный момент российский сегмент аппаратов ДЗЗ в большей своей части не применяет алгоритмы сжатия данных, однако уже имеется некоторая теоретическая база, основанная на российских и зарубежных исследованиях. Стоит отметить, что появление отработанных и отестированных алгоритмов сжатия, вероятно, внесёт значительный вклад в развитие всей области в целом за счёт увеличения информативности потока данных ДЗЗ.

Алгоритмы сжатия многоспектральных данных непременно могут и должны находить применение как в системах бортового сжатия данных непосредственно на самих аппаратах, так и в центрах приёма данных дистанционного зондирования Земли при их архивации. К примеру, за несколько лет до запуска в 1997 г. межпланетной станции «Кассини» было решено, что такие «крупные» и дорогостоящие миссии не должны быть во главе, т.е. необходимо брать ориентир на уменьшение различных характеристик (Stolorz et al., 1997). Одним из способов такого уменьшения обязательно должно было стать проведение масштабной работы в области бортового сжатия данных. То есть мы видим, что данная тема не нова и к её становлению и развитию есть все предпосылки: существует некоторая теоретическая база, на борту уже имеются необходимые вычислительные ресурсы для реализации алгоритмов сжатия данных, специалисты задумываются об этом и профессионально подготовлены для работы в данной области.

Применение алгоритмов сжатия данных на борту аппаратов многозонального сканирования может усовершенствовать уже имеющуюся аппаратуру, повысить её эффективность и актуальность. Результаты внедрения такого подхода, извлечённые знания, полученные навыки непременно станут хорошей основой для создания качественных бортовых систем обработки данных нового поколения.

## Литература

1. Бабкин В. Ф., Книжный И. М., Хрекин К. Е. Сжатие многоспектральных изображений для задач дистанционного зондирования Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 330–332.

2. *Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю.* Анализ технических характеристик, ограничивающих пропускную способность радиолинии Космос–Земля // 8-я Всероссийская конф. «Радиолокация и радиосвязь»: сб. тр. 24–26 нояб. 2014, Москва. М., 2014. С. 145–149.
3. *Гершензон В.Е., Кучейко А.А.* Стандартизация оборудования станций приема данных дистанционного зондирования Земли // *Пространственные данные*. 2006. № 1. С. 33–43.
4. *Егоров Н.Д., Новиков Д.В., Гильмутдинов М.Р.* Метод сжатия изображений без потерь с помощью контекстного кодирования по двоичным уровням // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 6(91). С. 96–106. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.96.
5. *Мальцев Г.Н., Козинев И.А.* Передача гиперспектральных видеоданных дистанционного зондирования Земли по радиоканалам с ограниченной пропускной способностью // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 2(81). С. 74–83. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.2.74.
6. *Меркушева А.В., Мальхина Г.Ф.* Методы и алгоритмы разделения смеси сигналов. I. Применение декорреляции и статистик второго порядка // *Научное приборостроение*. 2009. Т. 19. № 2. С. 90–103.
7. *Печкурова В.Р.* Актуальность анализа алгоритмов сжатия данных, получаемых от многозональных сканирующих устройств области космических исследований дистанционного зондирования Земли // *Научный аспект*. 2020. Т. 17. № 2. С. 2147–2155.
8. *Попов А.В.* Алгоритмы энтропийного кодирования при сжатии спектра телевизионного сигнала // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. 2013. № 4. С. 43–46.
9. *Садик Б.Дж., Бобов М.Н., Цветков В.Ю., Аль-Байати А.Э.К., Абдулхуссейн Х.М.А.* Сжатие мульти-спектральных изображений на основе прогрессивного кодирования длин серий // *Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы международного научно-техн. семинара*. Минск, 2016. С. 51–55.
10. *Egorov N., Novikov D., Gilmutdinov M.* Performance Analysis of Prediction Methods for Lossless Image Compression // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2015. V. 40. P. 169–178. DOI: 10.1007/978-3-319-19830-9\_16.
11. *Gilmutdinov M., Egorov N., Novikov D.* Lossless Image Compression Scheme with Binary Layers Scanning // 14<sup>th</sup> Intern. Symp. Problems of Redundancy in Information and Control Systems. 2014. P. 47–51. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.96.
12. *Karam L.J.* Lossless Image Compression // *The Essential Guide to Image Processing* / ed. Bovik A. Academic Press, 2009. P. 385–419.
13. *Lara R., Wang Y.* Lossless Compression On-Board Remote Sensing Satellites // 2011 Intern. Conf. Future Computer Science and Education. 2011. P. 650–653. DOI: 10.1109/ICFCSE.2011.162.
14. *Motta G., Rizzo F., Storer J.A.* Hyperspectral Data Compression. N.Y.: Springer Science and Business Media, 2006. 421 p. DOI: 10.1007/0-387-28600-4.
15. *Penna B., Tillo T., Magli E., Olmo G.* Progressive 3-D Coding of Hyperspectral Images Based on JPEG 2000 // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2006. V. 3. No. 1. P. 125–129. DOI: 10.1109/LGRS.2005.859942.
16. *Raymond C., Bristow J., Schoeberl M.R.* Needs for an Intelligent Distributed Spacecraft Infrastructure // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* Toronto, Ontario, Canada, 2002. V. 1. P. 371–374. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025043.
17. *Speck D.* Fast Robust Adaptation of Predictor Weights from Min/Max Neighboring Pixels for Minimum Conditional Entropy // *Signals, Systems and Computers: Conf. Record of the 29<sup>th</sup> Asilomar Conf.* 1995. V. 1. P. 234–238. DOI: 10.1109/ACSSC.1995.540547.
18. *Stolorz P., Gor V., Doyle R., Chapman C., Gladstone R., Merline W., Stern A.* New directions in science-enabling autonomy for planetary missions // 1997 IEEE Aerospace Conf. Snowmass at Aspen, CO, USA, 1997. V. 1. P. 387–399. DOI: 10.1109/AERO.1997.574427.
19. *Yeh P.-Sh., Moury G.A., Armbruster P., Day J.H.* The CCDS Data Compression Recommendations: Development and Status // *Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering*. 2002. V. 4790. P. 302–313.
20. *Yu G., Vladimirova T., Sweeting M.* Image compression systems on board satellites // *Acta Astronautica*. 2009. V. 64. P. 988–1005. DOI: 10.1016/j.actaastro.2008.12.006.
21. *Zhou G.* Future Intelligent Earth Observing Satellite System (FIEOS): Advanced System of Systems // *System of Systems*. 2012. V. 6. P. 99–107. DOI: 10.5772/27723.

## A review of existing compression algorithms for data received from multispectral scanning devices

V. R. Pechkurova

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*

*JSC Russian Space Systems, Moscow 111250, Russia*

*E-mail: vika.florida@gmail.com*

The issue of compression of data received from remote sensing devices is not new. A large number of engineers and researchers work on its correct formulation, seek ways to address it and search for solutions to problems arising from it. This genuine interest is caused by the increase in the amount of data processed, both on board the spacecrafts and on the ground. The increase in data volumes, in turn, is associated with the inevitable increase in quality, expansion of technical and software capabilities of devices and devices that explore the Earth from space. At the moment, most of the data received from remote sensing devices can still be sent without on-board compression to ground reception points; however, there is a high probability that in the future the data transmission line capacity will not allow sending raw data without processing, without additional compression. An interesting area of research is related specifically to data compression from multispectral scanning equipment. This type of compression can take into account the correlation of data from different sectors. The paper discusses aspects of existing data compression algorithms for multispectral scanning equipment and hyperspectral images. Some available sources are analyzed in order to identify the current and future possibilities of data compression on board space-based remote sensing systems.

**Keywords:** remote sensing, satellite, multi- and hyperspectral data, multispectral scanning, data compression, compression of multispectral data, lossless compression

Accepted: 21.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-9-17

### References

1. Babkin V. F., Knizhnyi I. M., Khrekin K. E., Multispectral image compression for remote sensing of the Earth from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 330–332 (in Russian).
2. Bakhtin A. A., Omel'yanchuk E. V., Semenova A. Yu., Analysis of technical characteristics that limit the bandwidth of the Space-Earth radio line), *8-ya Vserossiiskaya konferentsiya "Radiolokatsiya i radiosvyaz"* (8<sup>th</sup> All-Russia Conf. "Radar and Radio Communication"), Proc. Conf., 24–26 Nov. 2014, Moscow, Moscow, 2014, pp. 145–149 (in Russian).
3. Gershenson V. E., Kucheiko A. A., Standardization of equipment for remote sensing data reception stations, *Prostranstvennyye dannye*, 2006, No. 1, pp. 33–43 (in Russian).
4. Egorov N. D., Novikov D. V., Gilmutdinov M. R., Lossless image compression method using context-based binary encoding, *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2017, No. 6(91), pp. 96–106 (in Russian), DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.96.
5. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Transmission of hyperspectral video data of remote sensing of the Earth over radio channels with limited bandwidth, *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2016, No. 2(81), pp. 74–83 (in Russian), DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.2.74.
6. Merkusheva A. V., Malykhina G. F., Methods and algorithms for separating a mixture of signals. I. application of decorrelation and second-order statistics, *Nauchnoe priboroostroenie*, 2009, Vol. 19, No. 2, pp. 90–103 (in Russian).
7. Pechkurova V. R., Relevance of the analysis of data compression algorithms obtained from multispectral scanning devices in the field of space research of remote sensing of the Earth, *Nauchnyi aspekt*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 2147–2155 (in Russian).
8. Popov A. V., Entropy coding algorithms for compression of the TV signal spectrum, *T-Comm — Telekomunikatsii i Transport*, 2013, No. 4, pp. 43–46 (in Russian).
9. Sadik B. Dzh., Bobov M. N., Tsvetkov V. Yu., Al'-Baiati A. E. K., Abdulkhussein Kh. M. A., Compression of the multispectral images based on the progressive run length encoding, *Telekommunikatsii: seti i tekhnologii, algebraicheskoe kodirovanie i bezopasnost' dannykh* (Telecommunication: Networks and Technologies,



- Algebraic Coding and Data Security), Proc. Intern. Scientific and Technical Seminar, Minsk, 2016, pp. 51–55 (in Russian).
10. Egorov N., Novikov D., Gilmutdinov M., Performance Analysis of Prediction Methods for Lossless Image Compression, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2015, Vol. 40, pp. 169–178, DOI: 10.1007/978-3-319-19830-9\_16.
  11. Gilmutdinov M., Egorov N., Novikov D., Lossless Image Compression Scheme with Binary Layers Scanning, *14<sup>th</sup> Intern. Symp. Problems of Redundancy in Information and Control Systems*, 2014, pp. 47–51, DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.96.
  12. Karam L.J., Lossless Image Compression, In: *The Essential Guide to Image Processing*, Bovik A. (ed.), Academic Press, 2009, pp. 385–419.
  13. Lara R., Wang Y., Lossless Compression On-Board Remote Sensing Satellites, *2011 Intern. Conf. Future Computer Science and Education*, 2011, pp. 650–653, DOI: 10.1109/ICFCSE.2011.162.
  14. Motta G., Rizzo F., Storer J.A., *Hyperspectral Data Compression*, New York: Springer Science and Business Media, 2006, 421 p., DOI: 10.1007/0-387-28600-4.
  15. Penna B., Tillo T., Magli E., Olmo G., Progressive 3-D Coding of Hyperspectral Images Based on JPEG 2000, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, Vol. 3, No. 1, pp. 125–129, DOI: 10.1109/LGRS.2005.859942.
  16. Raymond C., Bristow J., Schoeberl M.R., Needs for an Intelligent Distributed Spacecraft Infrastructure, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Toronto, Ontario, Canada, 2002, Vol. 1, pp. 371–374, DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1025043.
  17. Speck D., Fast Robust Adaptation of Predictor Weights from Min/Max Neighboring Pixels for Minimum Conditional Entropy, *Signals, Systems and Computers: Conf. Record of the 29<sup>th</sup> Asilomar Conf.*, 1995, Vol. 1, pp. 234–238, DOI: 10.1109/ACSSC.1995.540547.
  18. Stolorz P., Gor V., Doyle R., Chapman C., Gladstone R., Merline W., Stern A., New directions in science-enabling autonomy for planetary missions, *1997 IEEE Aerospace Conf.*, Snowmass at Aspen, CO, USA, 1997, Vol. 1, pp. 387–399, DOI: 10.1109/AERO.1997.574427.
  19. Yeh P.-Sh., Moury G.A., Armbruster P., Day J.H., CCSDS data compression recommendation: development and status, *Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering*, 2002, Vol. 4790, pp. 302–313.
  20. Yu G., Vladimirova T., Sweeting M., Image compression systems on board satellites, *Acta Astronautica*, 2009, Vol. 64, pp. 988–1005, DOI: 10.1016/j.actaastro.2008.12.006.
  21. Zhou G., Future Intelligent Earth Observing Satellite System (FIEOS): Advanced System of Systems, *System of Systems*, 2012, Vol. 6, pp. 99–107, DOI: 10.5772/27723.