

БОРТОВАЯ ОБРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ КОМПРЕССИИ

М.В. Гашников¹, Н.И. Глумов^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия,

² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Аннотация

Работа посвящена решению задачи бортовой обработки гиперспектральных данных с целью последующей передачи по каналам связи в системах дистанционного зондирования Земли. В качестве базового алгоритма сжатия данных, необходимого для сокращения объема передаваемой информации, предлагается использование адаптированного для бортовой обработки метода компрессии на основе иерархической сеточной интерполяции. В работе рассмотрена специфика формирования гиперспектрального изображения, с учетом которой разработан алгоритм стабилизации скорости формирования сжатых данных. Проведенные исследования показали, что предложенные алгоритмы имеют эффективность, достаточную для использования при передаче гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

Ключевые слова: гиперспектральные изображения, компрессия данных, метод иерархической сеточной интерполяции, бортовая обработка, стабилизация скорости формирования потока данных.

Цитирование: Гашников, М.В. Бортовая обработка гиперспектральных данных в системах дистанционного зондирования Земли на основе иерархической компрессии / М.В. Гашников, Н.И. Глумов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 543-551. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-543-551.

Введение

Гиперспектральные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1–3] необходимы для наблюдения и исследования изменений природной среды и хозяйственной деятельности под воздействием естественных и антропогенных факторов, мониторинга природных ресурсов, инженерной и транспортной инфраструктуры, предупреждения, оценки и минимизации последствий чрезвычайных ситуаций, повышения эффективности управления экономическими процессами и т.д. [4–11].

Разработка систем передачи таких данных является актуальной наукоёмкой задачей. Решение этой задачи неизбежно приводит к необходимости эффективного разрешения следующих проблем.

1. **Объём данных.** Гиперспектральные данные трехмерны, причем «спектральный размер» данных часто составляет сотни спектральных компонент. При этом «пространственный размер» этих данных нередко достигает десятков тысяч пикселей.
2. **Поток данных.** Данные ДЗЗ формируются на борту космического аппарата со скоростью, превышающей возможности канала связи для передачи информации без сжатия.
3. **Мало ресурсов.** Системотехнические характеристики (объем памяти, вычислительная мощность) аппаратуры, которая принимает, хранит и передает эти данные, серьезно ограничены.
4. **Канал связи.** Цифровой канал связи имеет фиксированную пропускную способность, как правило, недостаточную для передачи несжатых данных.
5. **Разрядность.** Гиперспектральные данные часто имеют большой диапазон значений, требующий использования разрядности выше стандартных 8 бит на отсчет.

6. **Уникальность информации.** Получить эту информацию повторно нельзя. Полный список задач, для решения которых она будет использована, неизвестен. Требования к качеству данных очень высокие.

7. **Представление информации.** Гиперспектральные данные ДЗЗ имеют специфику, обусловленную конструкцией датчиков. «Гиперспектральный куб» в устройстве регистрации образуется в «повернутом» виде.

Использование компрессии в таких условиях не имеет альтернативы. Перечисленные выше проблемы, возникающие при разработке систем передачи гиперспектральных ДЗЗ, порождают следующие (противоречивые) требования к методу компрессии в таких системах:

1. Стабилизация скорости формирования потока сжатых данных (управление коэффициентом сжатия).
2. Строгий контроль погрешности.
3. Обработка 16-битных данных.
4. Низкая вычислительная сложность.
5. Низкая структурная сложность.
6. Высокий коэффициент компрессии.

Задача компрессии многомерных сигналов, частным случаем которых являются гиперспектральные изображения, была поставлена в 60-х годах прошлого столетия, и с тех пор исследования в этой области по-прежнему продолжают [12–18]. Результатом стал обширный набор методов компрессии, условно подразделяемых на следующие классы:

- аппроксимационные методы, основанные на кодировании параметров аппроксимации сигнала;
- дифференциальные методы, в основе которых лежит предсказание отсчетов и последующее кодирование постинтерполяционных остатков;
- методы кодирования с преобразованием, в которых кодированию подвергается результат некото-

рого (обычно ортогонального) преобразования исходного сигнала;

- фрактальные методы и др.

Самым распространенным методом компрессии изображений (двумерных сигналов) является JPEG. Наиболее эффективным методом компрессии изображений на сегодняшний момент, по мнению авторов, можно считать JPEG-2000, основанный на вейв-летах. При компрессии видео (трехмерный сигнал) чаще всего используются методы группы MPEG.

Важной спецификой данных гиперспектральных изображений является то, что распространенные методы компрессии для них как минимум неэффективны либо даже неприменимы. Одномерные аппроксимационные методы, основанные на адаптивных выборках, недостаточно эффективны. Двумерные аппроксимационные методы, использующие сегментацию, чрезмерно сложны. Методы, основанные на дифференциальном кодировании, имеют недостаточно высокий коэффициент сжатия даже при компрессии однокомпонентных изображений. Методы кодирования с преобразованием и методы сжатия видео чрезмерно ресурсоемки и в большинстве своем не удовлетворяют критично важному требованию строгого управления погрешностью (в частности, не контролируют максимальную погрешность и не допускают обратимой компрессии). Кроме того, большинство известных методов не работают с 16-битными данными.

В работе [10] для хранения гиперспектральных изображений предложено использовать метод компрессии на основе иерархической сеточной интерполяции (ИСИ) [15, 19–20]. Метод ИСИ принадлежит к классам аппроксимационных и дифференциальных методов одновременно. При этом метод в значительной мере свободен от недостатков обоих классов, но при этом наследует их достоинства, необходимые именно для сжатия гиперспектральных изображений. В частности, метод ИСИ очень прост, достаточно эффективен, контролирует максимальную погрешность и работает с 16-битными данными.

Однако в отличие от систем хранения данных для использования метода ИСИ в системах передачи гиперспектральных данных ДЗЗ необходимо обеспечить возможность управления коэффициентом сжатия. В данной статье предлагается метод передачи гиперспектральных данных ДЗЗ на основе иерархической компрессии, включающий алгоритм стабилизации скорости потока сжатых данных.

Кроме того, гиперспектральные данные ДЗЗ, которые образуются и компрессируются на борту летательного аппарата, имеют ряд особенностей, влияющих на эффективность компрессии. Прежде всего, это касается отмеченной выше специфической ориентации гиперспектрального куба этих данных, более подробно описанной далее. Влияние этой особенности на эффективность метода компрессии, безусловно, нуждается в исследованиях. В данной работе проведены вычислительные эксперименты по исследова-

нию эффективности предложенной информационной технологии в указанных специфических условиях.

Иерархическая компрессия изображений

Основная идея метода на основе иерархической сеточной [15] интерполяции состоит в иерархическом прореживании двумерной сетки отсчетов изображения, интерполяционном восстановлении пропущенных отсчетов и статистическом кодировании интерполяционных остатков.

Метод ИСИ подробно описан в [19–20], детали реализации метода в контексте настоящего исследования неважны. Далее по тексту отмечаются только особенности, важные при использовании метода при передаче гиперспектральных данных ДЗЗ.

Стабилизация скорости формирования сжатых данных

Одна из важных особенностей использования метода ИСИ при передаче гиперспектральных данных ДЗЗ состоит в том, что метод контролирует максимальную погрешность [21]

$$\varepsilon_{\max} = \max_{m,n,s} |x^s(m,n) - \bar{x}^s(m,n)|, \quad (1)$$

где $x^s(m,n)$, $\bar{x}^s(m,n)$ – отсчеты спектральной компоненты номер s исходного и декомпрессированного изображений соответственно.

В свою очередь, это влечет за собой переменную скорость формирования потока компрессированных данных (нестабильный во времени коэффициент компрессии). Данный недостаток ограничивает непосредственное применение метода в системах формирования и обработки изображений реального времени с фиксированной пропускной способностью эксплуатируемых каналов связи, в том числе в системах передачи гиперспектральных данных ДЗЗ. Традиционно указанное препятствие устраняется путем буферизации выходных данных, т.е. использования буферной памяти (далее – буфера). При буферизации данные компрессируются порциями, причем для каждой порции выбираются управляющие параметры метода компрессии, не допускающие переполнения буфера. Для метода ИСИ функцию управляющего параметра выполняет максимальная погрешность (1). Для описания алгоритма управления буфером сначала построим математическую модель, дискретно описывающую во времени процесс буферизации данных.

Пусть регистрируемые данные, имеющие разрядность b^0 бит, подаются на вход процедуры компрессии порциями размера ΔN_{bit} бит. Пусть при компрессии порции номер t обеспечивается степень сжатия $B(t)$ бит/отсчет. Тогда в результате компрессии формируется количество информации $(B(t)/b^0)\Delta N_{bit}$ бит, которое записывается в буферную память, имеющую емкость N_{bit}^0 бит.

Пусть за время компрессии порции номер t из буфера в цифровой канал передачи данных забирается часть ранее компрессированных данных объемом $(B(t)/b^0)\Delta N_{bit}$ бит, где B^0 (бит/отсчет) – степень сжа-

тия, соответствующая пропускной способности канала. Тогда количество информации в буфере после обработки порции номер t может быть вычислено через количество информации, которое остается в буфере после обработки порции номер $(t-1)$:

$$N_{bit}(t) = N_{bit}(t-1) + (B(t)/b^0)\Delta N_{bit} - (B^0/b^0)\Delta N_{bit}. \quad (2)$$

Вместо $N_{bit}(t)$ удобно рассматривать относительную заполненность буфера $V(t) = N_{bit}(t)/N_{bit}^0$, для которой предыдущее выражение переписывается в виде:

$$V(t) = V(t-1) + (B(t) - B^0)/b^0 k_v, \quad (3)$$

где $k_v = N_{bit}^0 / \Delta N_{bit}$ – параметр буфера (отношение объема буфера к объему порции).

В качестве управляющего параметра для метода ИСИ будем использовать максимальную погрешность $\epsilon_{max}(t)$, задаваемую для каждой порции данных. Задача алгоритма стабилизации заключается в указании для каждой порции такой максимальной погрешности $\epsilon_{max}(t)$, чтобы обеспечить как можно меньшее значение усредненной по всем порциям погрешности $E\{\epsilon_{max}(t)\}$ и не допустить переполнения буфера:

$$\begin{cases} E\{\epsilon_{max}(t)\} \rightarrow \min; \\ V(t) \leq 1. \end{cases} \quad (4)$$

Известным способом решения [22] этой задачи является корректировка управляющего параметра непосредственно в зависимости от заполненности буфера:

$$\epsilon_{max}(t) = \epsilon_{max}(t-1) + [(V(t-1) - V_p) a_1], \quad (5)$$

где a_1 – экспериментально подбираемый параметр, обеспечивающий «инерционность» (плавное изменение) управляющего параметра, а $V_p \leq 1$ – пороговое значение, при превышении которого $\epsilon_{max}(t)$ увеличивается, а получаемая степень сжатия $B(t)$ уменьшается. Очевидным недостатком этого способа является то, что он не учитывает индивидуальных особенностей каждой сжимаемой порции данных.

Для управления коэффициентом компрессии гиперспектральных изображений в данной работе предлагается адаптивный алгоритм стабилизации, который настраивается на особенности каждой компрессируемой порции данных [22]. Для определения максимальной погрешности $\epsilon_{max}(t)$ для каждой порции номер t используются статистические характеристики самой порции (дисперсия $D(t)$ и коэффициент корреляции $\rho(t)$ и оценка допустимой степени сжатия $\hat{B}(t)$ (в бит/отсчет)), обеспечивающей помещению сжатой порции данных в буфер:

$$\epsilon_{max}(t) = f(D(t), \rho(t), \hat{B}(t)). \quad (6)$$

Ограничивая в (3) заполненность буфера пороговой, получим:

$$\hat{B}(t) = B_0 + (V_p - V(t-1))k_v b^0. \quad (7)$$

Используя гипотезу, что распределение вероятностей некантованного разностного сигнала на каждом

иерархическом уровне является экспоненциальным, можно построить зависимость степени сжатия $\hat{B}(t)$ от статистических характеристик данных и задаваемой максимальной ошибки $\epsilon_{max}(t)$, которую при практическом применении следует заранее табулировать. Более целесообразным и адаптированным к реальным данным представляется применение аппроксимации зависимости (6) в некотором выбранном классе функций. В этом случае путем вычислительного эксперимента для большого набора различных порций реальных гиперспектральных изображений строятся таблицы значений $\epsilon_{max}(t)$, $D(t)$, $\rho(t)$ и соответствующих им получаемым в результате компрессии значений $B(t)$. По этой таблице значений аппроксимируется зависимость (6), т.е. вычисляются параметры функции, с помощью которой и производится вычисление требуемой $\epsilon_{max}(t)$. В качестве функции предлагается использовать линейную комбинацию степенных функций

$$\epsilon_{max}(t) = a_0 + a_1 D(t)^{k_1} + a_2 \rho(t)^{k_2} + a_3 \hat{B}(t)^{k_3}, \quad (8)$$

где a_i, k_i – параметры функции.

Таким образом, предлагаемый алгоритм стабилизации для каждой порции данных номер t включает следующие шаги:

- вычисления статистических характеристик $D(t), \rho(t)$;
- расчет оценки допустимого объема данных $\hat{B}(t)$ согласно (7);
- вычисление значения $\epsilon_{max}(t)$ согласно (8).

Достоинствами разработанного алгоритма являются простота реализации и выбор управляющего параметра с учетом статистических характеристик каждой компрессируемой порции данных.

Анализ характеристик гиперспектральных данных ДЗЗ

Гиперспектральное изображение представляет собой набор двумерных изображений размером $V \times H$ пикселей, каждое из которых получено для определенного диапазона спектра регистрируемого излучения. Такое изображение можно интерпретировать как «куб» данных размером $V \times H \times S$, где S – количество спектральных диапазонов (компонент) изображения.

Формирование гиперспектральных данных при передаче по каналам связи, в частности на борту летательного аппарата, обычно имеет специфику, обусловленную конструкцией датчиков, используемых для регистрации гиперспектральной информации. При этом на вход процедуры компрессии будут последовательно подаваться двумерные изображения, совокупность которых и составит собственно результирующие гиперспектральные данные. Специфика же заключается в том, что эти двумерные изображения не являются спектральными компонентами, как это обычно бывает при работе с гиперспектральными данными. Первое такое двумерное изображение содержит первые строки всех спектральных компонент, второе двумерное изображение содержит все вторые строки и т.д. Другими словами, «гипер-

спектральный куб» поступает на вход метода компрессии в «повернутом виде».

Такая особенность ориентации гиперспектрального куба не влечет за собой особых проблем при реализации метода компрессии, т.к. при количестве компонент в несколько сотен указанные двумерные изображения, состоящие из соответствующих строк исходных гиперспектральных данных, могут «рассматриваться» методом компрессии как обычные двумерные изображения. Таким образом, вместо гиперспектрального изображения, состоящего из S компонент размера $V \times H$ пикселей, метод компрессии получит гиперспектральное изображение, состоящее из V компонент размера $S \times H$.

Указанная особенность может не учитываться при реализации метода компрессии, но должна учитываться при проведении вычислительных экспериментов, т.к. при повороте гиперспектрального куба внутрикомпонентные и межкомпонентные характеристики изображения могут измениться, что, безусловно, должно повлиять на эффективность метода сжатия.

В качестве тестовых изображений использовались фрагменты космических снимков спектрометра AVIRIS, размещенные в открытом доступе [23]. Пространственный размер всех тестовых изображений: $V \times H = 1086 \times 614$ пикселей, количество спектральных компонент $S = 224$. На описание яркости каждого пикселя в каждой компоненте отводится два байта (16 бит). Таким образом, «спектральный портрет» каждого пикселя задают 224 16-битных целых числа, а «трехмерный куб» гиперспектрального изображения составляет 298 728 192 байта (примерно 300 МБ). На рис. 1 показаны примеры компонент тестовых изображений.

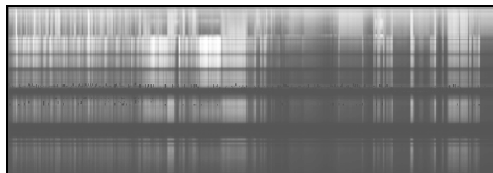
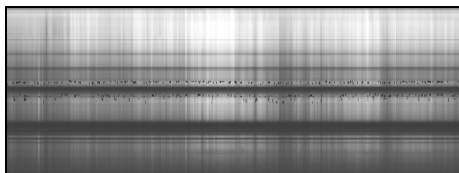


Рис. 2. Компоненты 570, 1068 компрессируемого на борту летательного аппарата («повернутого») гиперспектрального куба

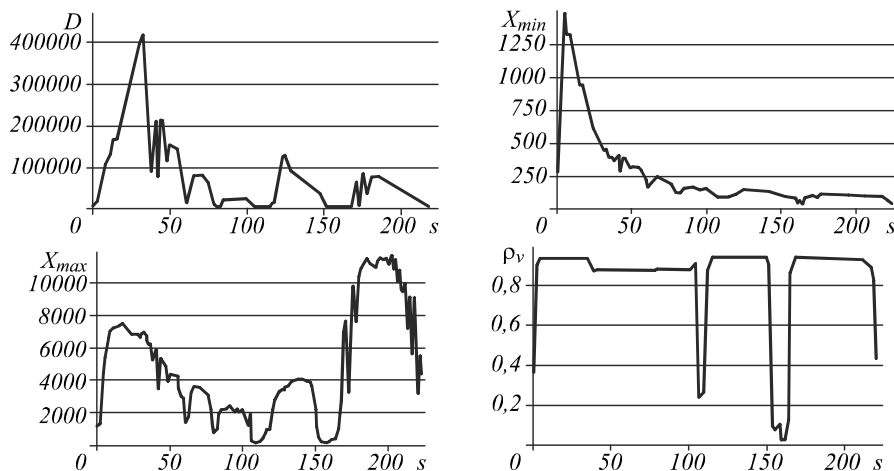


Рис. 3. Характеристики «повернутого» гиперспектрального куба в его «естественном» состоянии, предназначенном для использования и просмотра в банке данных на Земле: дисперсия D , диапазон значений $[X_{min}, X_{max}]$, коэффициент корреляции по вертикали ρ_v

Как будет показано далее, количество сильно зашумленных компонент невелико, но на рисунках специально приведены сильно отличающиеся друг от друга, в том числе сильно зашумленные компоненты.

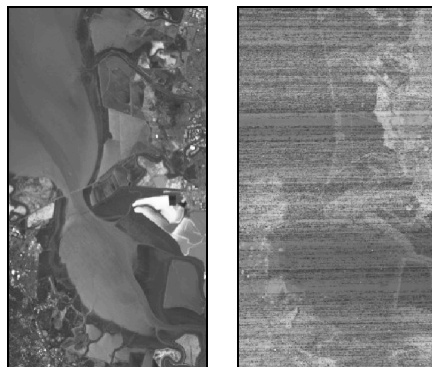


Рис. 1. Компоненты №24, 107 «неповернутого» гиперспектрального куба в его «естественном» состоянии, предназначенном для использования и просмотра в банке данных на Земле

Результаты анализа таких гиперспектральных изображений приведены в [10]. Некоторые из этих результатов в качестве базы для сравнения показаны на рис. 3. Однако, как уже было отмечено выше, такие гиперспектральные изображения с точки зрения компрессии и передачи данных не являются данными ДЗЗ (они «не повернуты»).

В данной работе для исследования эффективности метода компрессии ИСИ при передаче гиперспектральных данных ДЗЗ указанные изображения были «повернуты» описанным выше образом, в результате чего их размер составил $V \times H = 224 \times 614$ пикселей, количество компонент $S = 1086$ (см. рис. 2). Количество рядов на представление пикселя не изменилось.

Для анализа тестовых гиперспектральных изображений были вычислены оценки следующих внутрикомпонентных характеристик этих изображений: среднего E , дисперсии D , минимума X_{min} , максимума X_{max} , коэффициента корреляции по вертикали ρ_v и горизонтали ρ_h . Кроме внутрикомпонентных характеристик, был также оценен коэффициент корреляции между соседними компонентами ρ_l . Для всех этих характеристик построены графики зависимости от номера компоненты s .

В данной работе приводятся только результаты, выявляющие отличия характеристик «повернутых» и «неповернутых» гиперспектральных изображений. Причём рассматриваются именно характеристики, влияющие на эффективность компрессии. Типичные результаты показаны на рис. 4.

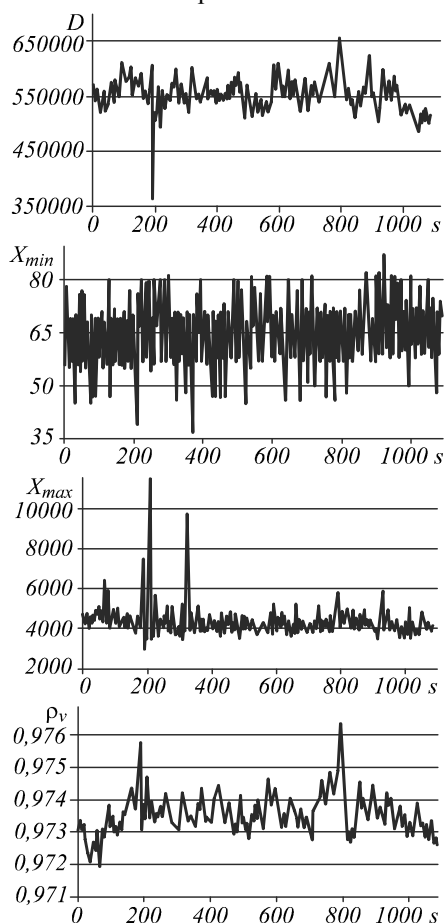


Рис. 4. Характеристики компрессируемого на борту летательного аппарата («повернутого») гиперспектрального куба: дисперсия D , диапазон значений $[X_{min}, X_{max}]$, коэффициент корреляции по вертикали ρ_v .

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что «повернутые» тестовые изображения менее «удобны» для сжатия, чем «неповернутые» изображения по следующим причинам:

1. Дисперсия «повернутых» изображений гораздо больше, чем у «неповернутых».
2. Дисперсия «повернутых» изображений велика на всех компонентах. У «неповернутых» изображений дисперсия на многих компонентах снижалась

(разное количество информации на разных длинах волн). При «повороте» изображений этот эффект пропадает: высокоинформативные компоненты перемешиваются с низкоинформативными.

3. Естественно, то же самое происходит и с диапазоном значений компонент: «повернутые» изображения имеют большой диапазон на всех компонентах.
4. Коэффициент корреляции по вертикали для «повернутых» изображений уменьшается (горизонтальный коэффициент корреляции изменяется слабо, поэтому результаты его измерения не приводятся).

В результате коэффициент сжатия «повернутых» изображений может оказаться хуже, чем у «неповернутых». Для выяснения этого вопроса были проведены вычислительные эксперименты (см. далее).

Влияние размера блоков на компрессию

При использовании метода ИСИ изображение сжимается блоками размера $V_b \times H_b$. Размер блока определяет необходимый объём памяти, что является одним из ключевых параметров системы передачи гиперспектральных данных ДЗЗ. Поэтому в рамках данной работы было проведено специальное исследование по выяснению влияния указанных параметров.

Для тестовых изображений были построены зависимости коэффициента сжатия от размера блока, некоторые типичные результаты показаны на рис. 5. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

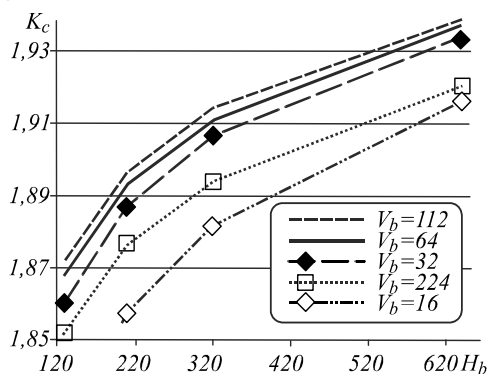


Рис. 5. Зависимость коэффициента сжатия K_c от горизонтального размера блока H_b (каждая кривая соответствует своему вертикальному размеру блока V_b)

– вытянутые по горизонтали блоки являются более предпочтительными. Это объясняется более высоким коэффициентом корреляции по горизонтали. Рекомендуется использовать большой горизонтальный размер блоков (до 2000), так как это удобно еще и с точки зрения способа формирования изображения в системах передачи данных;

– наилучшие значения вертикального размера блока лежат в диапазоне 32–112. Выбор блоков с вертикальным размером 16 или 224 при большом горизонтальном размере ухудшает ситуацию незначительно. Отметим, что особенно важным для систем передачи данных является возможность уменьшения именно вертикального размера блока.

Оценка эффективности компрессии гиперспектральных данных ДЗЗ

Для оценки эффективности компрессии были построены зависимости коэффициента компрессии от максимальной и квадратичной погрешностей (типичные результаты см. на рис. 6). Эксперименты проводились для «повёрнутых» изображений, т.е. для реальных гиперспектральных данных ДЗЗ.

При этом для использования взаимозависимости спектральных компонент использовались различные алгоритмы аппроксимации компонент, разработанные в [10]. Результаты независимой компрессии компонент также приведены на рис. 6.

Из графиков видно, что предлагаемый метод компрессии на основе ИСИ имеет достаточно высокую эффективность при обработке реальных гиперспектральных данных ДЗЗ, даже без использования аппроксимации компонент. Даже в наихудших ситуациях метод обеспечивает коэффициент сжатия около двух при нулевой погрешности.

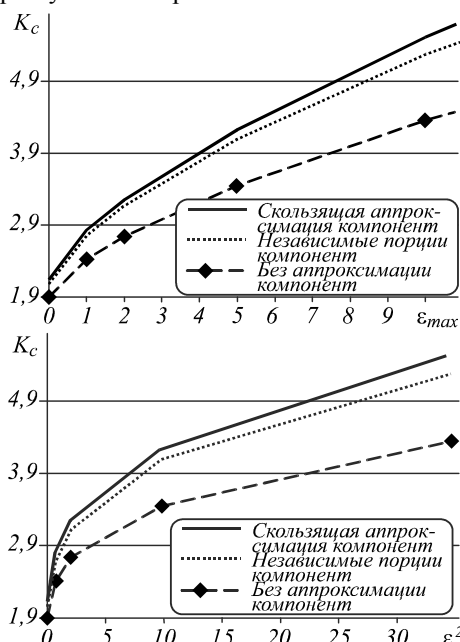


Рис. 6. Усредненный по пяти гиперспектральным изображениям ДЗЗ коэффициент сжатия K_c в зависимости от максимальной погрешности ϵ_{max} и квадратичной погрешности ϵ^2

Можно рекомендовать использование этого метода в системах передачи гиперспектральных изображений.

Исследование алгоритма стабилизации скорости формирования сжатых данных

Для исследования алгоритма стабилизации скорости формирования сжатых данных путем предсказания управляющего параметра алгоритма в зависимости от статистических характеристик данных и текущего состояния буфера был проведен вычислительный эксперимент, состоящий из двух этапов:

- 1). определение параметров зависимости (8);
- 2). оценка результатов применения (8) для тестовых изображений.

На первом этапе последовательно производилось сжатие блоков всех слоев тестовых изображений со значениями управляющего параметра от 0 до 20, рассчитывались статистические характеристики и регистрировалась полученная степень сжатия. Размер блока был выбран равным 112×614 отсчетов, т.е. из каждого слоя вырезалось по 2 блока. Таким образом были получены более 40000 векторов $(\epsilon_{max}, D, \rho, B)$, по которым были определены оптимальные параметры зависимости (8):

$$\epsilon_{max}(t) = -96,4 + 7,71D(t)^{-0,62} + 75,14\rho(t)^{0,01} - 3,61\hat{B}(t)^{6,5} \quad (9)$$

При этом значение среднеквадратичного отклонения рассчитываемого значения $\epsilon_{max}(t)$ от задаваемого $\hat{\epsilon}_{max}(t)$ на каждом блоке составило 0,66, что характеризует высокую точность аппроксимации. На рис. 7 показана гистограмма распределения отклонения ошибки $\Delta\epsilon = \hat{\epsilon}_{max}(t) - \epsilon_{max}(t)$, показывающая что в 98,0% случаев отклонение ошибки составило $|\Delta\epsilon| \leq 1$.

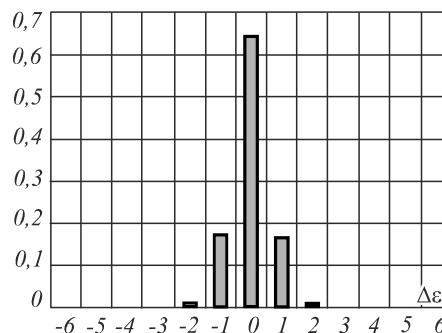


Рис. 7. Гистограмма распределения отклонения ошибки $\Delta\epsilon = \hat{\epsilon}_{max}(t) - \epsilon_{max}(t)$

На втором этапе производилась компрессия всех блоков тестовых изображений со значениями управляющего параметра согласно (9). Оценивалось отклонение получаемой степени сжатия $B(t)$ от требуемой $\hat{B}(t)$. Среднеквадратичное отклонение степени сжатия составило 0,28 бит/отсчет. На рис. 8 показана гистограмма распределения отклонения степени сжатия $\Delta B = \hat{B}(t) - B(t)$, показывающая, что в 95,1% случаев отклонение степени сжатия составило $|\Delta B| \leq 0,2$ бит/отсчет.

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность реализации алгоритма стабилизации скорости формирования сжатых гиперспектральных данных в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

Заключение

В работе предложен метод передачи гиперспектральных данных ДЗЗ на основе иерархической компрессии. Метод удовлетворяет специфическим требованиям систем передачи данных. В частности, метод содержит алгоритм стабилизации скорости формирования потока сжатых данных.

Для оценки эффективности метода были проведены вычислительные эксперименты на реальных гиперспектральных данных ДЗЗ. Проведен анализ особенностей этих данных, понижающих эффективность компрессии. Показано, что предложенный метод имеет эффективность, достаточную для использования при передаче гиперспектральных данных ДЗЗ, несмотря на указанные особенности данных.

Путём проведения вычислительного эксперимента подтверждена возможность реализации алгоритма стабилизации скорости формирования сжатых гиперспектральных данных ДЗЗ в условиях ограниченной емкости буферной памяти и пропускной способности канала связи.

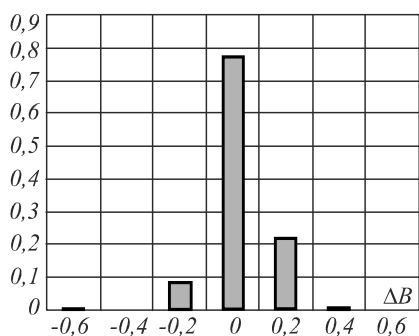


Рис. 8. Гистограмма распределения

отклонения степени сжатия $\Delta B = \hat{B}(t) - B(t)$

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-31-00014) «Создание лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли».

Литература

1. **Chang, C.-I.** Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis / C.-I Chang. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 1164 p. – ISBN: 978-0-471-69056-6.
2. **Шовенгердт, Р.А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – пер. с англ. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с. – ISBN: 978-5-94836-244-1.
3. **Chang, C.-I.** Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification / C.-I Chang. – New York: Springer Science+Business Media, 2003. – 372 p. – ISBN 978-1-4419-9170-6.
4. **Borengasser, M.** Hyperspectral Remote Sensing – Principles and Applications / M. Borengasser, W. Hungate, R. Watkins. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 128 p. – ISBN 978-1-56670-654-4.
5. **Chang, C.-I.** Hyperspectral data exploitation: theory and applications / C.-I Chang. – Wiley-Interscience, 2007. – 440 p. – ISBN: 978-0-471-74697-3.
6. **Gashnikov, M.** Regional Geographic Information Systems for Gas Network Monitoring / M. Gashnikov, N. Glumov, V. Myasnikov, A. Chernov, E. Ivanova // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2015. – Vol. 25(3). – P. 418-422. – DOI: 10.1134/S1054661815030062.
7. **Chanussot, J.** Foreword to the Special Issue on Hyperspectral Image and Signal Processing / J. Chanussot, M.M. Crawford, B.-Ch. Kuo // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 48(11). – P. 3871-3876. – DOI: 10.1109/TGRS.2010.2085313.
8. **Chang, C.** Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery / C. Chang, Sh. Chiang // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2002. – Vol. 40(6). – P. 1314-1325. – DOI: 10.1109/TGRS.2002.800280.
9. **Benz, U.C.** Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information / U.C. Benz, P. Hofmann, G. Willhauck, I. Lingenfelder, M. Heynen // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 58(3-4). – P. 239-258. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002.
10. **Гашников, М.В.** Иерархическая компрессия в задаче хранения гиперспектральных изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 482-488.
11. **Gashnikov, M.** Hyperspectral images repository using a hierarchical compression / M. Gashnikov, N. Glumov // Posters Proceedings of 23-rd International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG 2015). – Czech Republic, Plzen, June 8-12. – 2015. – P. 1-4. – ISBN 978-80-86943-67-1. – ISSN 2464-4617.
12. **Salomon, D.** Data Compression. The Complete Reference / D. Salomon. – 4th ed. – London: Springer-Verlag, 2007. – 1118 p. – ISBN: 978-1-84628-602-5. – DOI: 10.1007/978-1-84628-603-2.
13. **Ватолин, Д.** Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 384 с. – ISBN: 5-86404-170-X.
14. **Pratt, W.K.** Digital image processing / W.K. Pratt. – 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 807 p. – ISBN: 978-0-47176-777-0. – DOI: 10.1002/0470097434.
15. **Soifer, V.A.** Computer Image Processing, Part II: Methods and algorithms / A.V. Chernov, V.M. Chernov, M.A. Chicheva, V.A. Fursov, M.V. Gashnikov, N.I. Glumov, N.Yu. Ilyasova, A.G. Khramov, A.O. Korepanov, A.V. Kupriyanov, E.V. Myasnikov, V.V. Myasnikov, S.B. Popov, V.V. Sergeev, V.A. Soifer. – Saarbrücken, Germany: VDM Verlag, 2010. – 584 p. – ISBN: 978-3-63917-545-5.
16. **Гашников, М.В.** Параметризация нелинейного предсказателя Грехэма при компрессии цифровых изображений / М.В. Гашников // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 225-231. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-225-231.
17. **Woods, E.** Digital Image Processing / E. Woods, R. Gonzalez. – 3th ed. – Prentice Hall, 2007. – 976 p. – ISBN 978-0-13168-728-8.
18. **Wallace, G.** The JPEG Still Picture Compression Standard / G. Wallace // Communications of the ACM. – 1991. – Vol. 34(4). – P. 30-44. – DOI: 10.1109/30.125072.
19. **Гашников, М.В.** Иерархическая сеточная интерполяция при сжатии гиперспектральных изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 87-93.
20. **Gashnikov, M.** Hierarchical GRID Interpolation under Hyperspectral Images Compression / M. Gashnikov, N. Glumov // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23(4). – P. 246-253. – DOI: 10.3103/S1060992X14040031.
21. **Lin, S.** Error Control Coding: Fundamentals and Applications, second edition / S. Lin, D. Costello. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2004. – 1260 p. – ISBN: 978-0130426727.
22. **Gashnikov, M.** Stabilization of the Compressed Data Formation Rate in Hierarchical Image Compression / M. Gashnikov, N. Glumov, V. Sergeev // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2007. – Vol. 17(1). – P. 79-81. – DOI: 10.1134/S1054661807010087.
23. AVIRIS Data – Ordering Free AVIRIS Standard Data Products [Электронный ресурс]. – URL: http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html (дата обращения 1.07.2016).

Сведения об авторах

Гашников Михаил Валерьевич, 1975 года рождения, в 1998 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ), кандидат наук, доцент. В настоящее время работает доцентом кафедры геоинформатики и информационной безопасности Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: сжатие изображений, обработка космических снимков, геоинформационные технологии. Имеет более 80 публикаций, в том числе более 30 статей и две монографии (в соавторстве). E-mail: mgash@smr.ru.

Глумов Николай Иванович, родился в 1962 году. В 1985 году окончил Куйбышевский авиационный институт. В 1994 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук. В настоящее время работает заведующим научно-исследовательской лабораторией прорывных технологий дистанционного зондирования Земли Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва и старшим научным сотрудником в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Круг научных интересов включает обработку изображений и распознавание образов, компрессию изображений, моделирование систем формирования цифровых изображений. Имеет свыше 100 публикаций, в том числе более 40 статей, две монографии (в соавторстве). E-mail: nglu@smr.ru.

Поступила в редакцию 5 июля 2016 г. Окончательный вариант – 19 августа 2016 г.

ONBOARD PROCESSING OF HYPERSPECTRAL DATA IN THE REMOTE SENSING SYSTEMS BASED ON HIERARCHICAL COMPRESSION

M.V. Gashnikov¹, N.I. Glumov^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

Abstract

The article is devoted to solving the problem of onboard processing of hyperspectral data for subsequent transmission via the communication channels in systems of remote sensing. A compression method based on the hierarchical grid interpolation is used as the basic algorithm of data compression necessary to reduce the amount of transmitted information. In this article, the method is adapted for onboard data processing. The specificity of hyperspectral imaging is taken into account when developing an algorithm of stabilization of the rate of compressed data formation. Computational experiments show that the efficiency of the proposed algorithms is sufficient for the transmission of hyperspectral remote sensing data under the limited capacity of the buffer memory and the communication channel bandwidth.

Keywords: hyperspectral images, data compression, method of hierarchical grid interpolation, on-Board processing, stabilization of the rate of data stream formation.

Citation: Gashnikov MV, Glumov NI. Onboard processing of hyperspectral data in the remote sensing systems based on hierarchical compression. *Computer Optics* 2016; 40(4): 543-551. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-543-551.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 14-31-00014.

References

- [1] Chang C. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2013. ISBN: 978-0-471-69056-6.
- [2] Schowengerdt RA. *Remote Sensing – Models and Methods for Image Processing*. New York: Academic Press; 1997.
- [3] Chang C. *Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification*. New York: Springer Science+Business Media; 2003. ISBN 978-1-4419-9170-6.
- [4] Borengasser M., Hungate W, Watkins R. *Hyperspectral Remote Sensing – Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press; 2004. ISBN 978-1-56670-654-4.
- [5] Chang C. *Hyperspectral data exploitation: theory and applications*. Wiley-Interscience; 2007. ISBN: 978-0-471-74697-3.
- [6] Gashnikov MV, Glumov NI, Myasnikov VV, Chernov AV, Ivanova EV. *Regional Geographic Information Systems for Gas Network Monitoring. Pattern Recognition and Image Analysis* 2015; 25(3): 418-422. DOI: 10.1134/S1054661815030062.
- [7] Chanussot J, Crawford M, Kuo B. Foreword to the Special Issue on Hyperspectral Image and Signal Processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2010; 48(11): 3871-3876. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2085313.
- [8] Chang C, Chiang S. Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2002; 40(6): 1314-1325. DOI: 10.1109/TGRS.2002.800280.
- [9] Benz U, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I, Heynen M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2004; 58(3): 239-258. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002.

- [10] Gashnikov MV, Glumov NI. Hierarchical compression for hyperspectral image storage. *Computer Optics* 2014; 38(3): 482-488.
- [11] Gashnikov MV, Glumov NI. Hyperspectral images repository using a hierarchical compression. 23-rd International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision proceeding 2015; 1-4. ISBN 978-80-86943-67-1. ISSN 2464-4617.
- [12] Salomon D. Data Compression. The Complete Reference. London: Springer-Verlag; 2007. ISBN: 978-1-84628-602-5. DOI: 10.1007/978-1-84628-603-2.
- [13] Vatolin D, Ratushnyak A, Smirnov M, Yukin V. Data compression methods. Archive program architecture, image and video compression [In Russian]. Moscow: "DIALOG-MIFI" Publisher; 2002. ISBN: 5-86404-170-X.
- [14] Pratt W. Digital image processing. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2007. ISBN: 978-0-47176-777-0. DOI: 10.1002/0470097434.
- [15] Soifer VA, Chernov AV, Chernov VM, Chicheva MA, Fursov VA, Gashnikov MV, Glumov NI, Ilyasova NY, Khramov AG, Korepanov AO, Kupriyanov AV, Myasnikov EV, Myasnikov VV, Popov SB, Sergeyev VV. Computer Image Processing, Part II: Methods and algorithms. Ed by Soifer VA. VDM Verlag; 2010.
- [16] Gashnikov MV. Parameterization of nonlinear Greham predictor for digital image compression. *Computer Optics* 2016; 40(2): 225-231. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-225-231.
- [17] Woods E, Gonzalez R. Digital Image Processing. 3ed. Prentice Hall; 2007. ISBN 978-0-13168-728-8.
- [18] Wallace G. The JPEG Still Picture Compression Standard. *Communications of the ACM* 1991; 34(4): 30-44. DOI: 10.1109/30.125072.
- [19] Gashnikov MV, Glumov NI. Hierarchical grid interpolation for hyperspectral image compression. *Computer Optics* 2014; 38(1): 87-93.
- [20] Gashnikov MV, Glumov NI. Hierarchical GRID Interpolation under Hyperspectral Images Compression. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* 2014; 23(4): 246-253. DOI: 10.3103/S1060992X14040031.
- [21] Lin S, Costello D. Error Control Coding: Fundamentals and Applications, second edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc; 2004. ISBN: 978-0130426727.
- [22] Gashnikov MV, Glumov NI, Sergeyev VV. Regional Geographic Information Systems for Gas Network Monitoring. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2007; 17(1): 79-81. DOI: 10.1134/S1054661807010087.
- [23] AVIRIS Data – Ordering Free AVIRIS Standard Data Products. Jet Propulsion Laboratory. Source: (http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html).

Authors' information

Mikhael Valeryevich Gashnikov (b. 1975) graduated from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), holds a candidate's degree in Engineering. Currently he is an associate professor at the Geoinformatics and Information Security sub-department at Samara National Research University. He has 80 scientific publications, including 30 scientific papers and 2 monographs (with coauthors). His research interests currently focus on image compression, space image processing, and geoinformation technologies. E-mail: mgash@smr.ru.

Nikolay Ivanovich Glumov (b. 1962) graduated with honours (1985) from S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute. He received his Candidate in Technics (1994) degree from Samara State Aerospace University (SSAU). He is the head of research laboratory of advanced technologies of remote sensing at Samara National Research University and the senior researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS. His current research interests include image processing and pattern recognition, images compression, digital images forming systems modelling. He has more than 100 publications, including more than 40 scientific papers, 2 monographs (in co-authorship). E-mail: nglu@smr.ru.

Received July 5, 2016. The final version – August 18, 2016.
