

УДК 621.397

М.С. ЗРЯХОВ, Н.Н. ПОНОМАРЕНКО, В.В. ЛУКИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

СЖАТИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ AVIRIS

Исследована задача сжатия многоканальных изображений системы AVIRIS. Рассмотрены возможные варианты процедур сжатия, соответствующие различным практическим ситуациям, в частности, сжатие с предварительной фильтрацией и сжатие с постобработкой. Даны рекомендации по автоматическому выбору параметров сжатия. Показана целесообразность оценки дисперсии шума отдельно для каждого канала, а также совместного сжатия групп каналов.

дистанционное зондирование, сжатие изображений

Введение

Системы формирования изображений (СФИ) дистанционного зондирования (ДЗ) находят широкое применение в экологическом мониторинге, геологической разведке, топологической съемке, проведении научных и практических исследований. Одной из таких систем является многоканальная СФИ ДЗ авиационного базирования AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer), которая формирует многоканальные изображения (МКИ) видимого и инфракрасного диапазона с помощью бортового спектрометра. Основные характеристики системы AVIRIS следующие:

- 1) рабочий диапазон системы от 369 до 2507 нм;
- 2) спектральное разрешение – около 9 нм;
- 3) 224 канала;
- 4) динамический диапазон представления каждого пикселя в изображении – 16 бит;
- 5) высота полета носителя при формировании многоканального изображения – примерно 20 км;
- 6) стандартный размер каждого одноканального изображения 512×614 пикселей;
- 7) пространственное разрешение (размер пикселя изображения) – 17×17 м;
- 8) стандартный размер одного многоканального изображения – около 134 Мб.

Многоканальные СФИ существенно информативнее одноканальных, но при этом требуют больше ресурсов для передачи, обработки и хранения полученной информации.

В данной работе исследуется сжатие формируемых AVIRIS изображений, которое может осуществляться как на борту носителя (в случае передачи изображения на Землю по радиоканалу), так и на Земле (после приземления носителя и передачи данных в пункт обработки информации).

Методы сжатия, не предусматривающие внесения потерь в сжимаемые изображения, в случае сжатия изображений ДЗ малоэффективны, так как обеспечиваемые ими коэффициенты сжатия (КС) порядка 2 – 3,5 [1] не удовлетворяют ограничениям, накладываемым как пропускными способностями используемых каналов передачи данных, так и емкостями баз данных для хранения сжатых изображений.

Существующие методы сжатия изображений с потерями информации (например, стандарты JPEG [2] и JPEG2000 [3]), обеспечивающие приемлемые КС (до нескольких десятков раз), не учитывают ряд особенностей формирования и обработки многоканальных изображений ДЗ, таких как:

- 1) наличие на изображениях сигнально-зависимого шума, параметры которого могут меняться от канала к каналу [4, 5];

2) наличие корреляции между соседними каналами [5];

3) возможность применения предварительной фильтрации изображения или постобработки сжатого и декодированного изображения [6, 7].

Наличие этих особенностей, справедливых и для СФИ AVIRIS [5], требует разработки эффективных схем сжатия многоканальных изображений, способных, в частности, адаптивно выбирать параметры сжатия (в зависимости от характеристик шума, наличия предварительной фильтрации или постобработки) и сжимать несколько соседних каналов изображения с учетом существующей корреляции между ними.

Кроме того, желательно, чтобы метод сжатия изображений ДЗ за счет автоматического выбора оптимальных параметров сжатия обеспечивал максимальное (приемлемое) качество декодированного изображения. Как показано в наших предыдущих работах [6, 8, 9], для различных схем сжатия (с наличием или отсутствием предварительной фильтрации и постобработки) существуют различные методы выбора оптимальных параметров сжатия.

В данной работе авторами проанализирована эффективность и целесообразность применения той или иной схемы сжатия, показано значительное увеличение КС при совместном сжатии соседних каналов изображения и адаптивного учета характеристик шума для каждого канала.

В разделе 1 описываются возможные схемы сжатия изображений AVIRIS и предлагаемые оптимальные параметры сжатия для каждой схемы.

В разделе 2 рассматриваются возможные варианты совместного сжатия соседних каналов изображения, а также предлагается адаптивная процедура выбора количества совместно сжимаемых каналов.

И, наконец, в разделе 3 на примере четырех реальных изображений СФИ AVIRIS осуществляется анализ рассмотренных схем сжатия.

1. Возможные схемы сжатия

Все описываемые ниже схемы сжатия предусматривают автоматический выбор параметров сжатия, в частности, шага квантования QS. При этом выбор QS осуществляется на основании оцененной дисперсии шума (оценка с шапочкой) $\sigma^2(n)$, где n – номер канала изображения. В данной работе для оценки $\sigma^2(n)$ использован метод интерквантильной оценки дисперсии аддитивных помех, описанный в [10].

В качестве базового метода сжатия использован метод AGU [11], основанный на дискретном косинусном преобразовании (ДКП). Удобство использования данного метода сжатия состоит в том, что единственным входным параметром для него выступает шаг квантования QS. В то же время AGU при одинаковом качестве декодированных изображений обеспечивает более высокие КС, чем последний стандарт JPEG2000, основанный на дискретном вейвлетном преобразовании.

В зависимости от требований к функционированию СФИ ДЗ и ее аппаратных возможностей практически обоснованными выглядят три схемы сжатия изображений на борту ЛА. Рассмотрим их более подробно.

1.1. Без фильтрации. Эта процедура сжатия (рис. 1) оправдана, когда сжатие, передача изображений на Землю и их анализ должны осуществляться максимально оперативно. При этом ограничения по времени и ресурсы аппаратуры не позволяют осуществлять предварительную фильтрацию сжимаемых изображений или постобработку декодированных изображений.

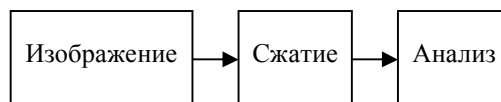


Рис. 1. Схема сжатия без фильтрации изображения

В соответствии с [12] шаг квантования (QS) при сжатии выбирается равным $4,5\sigma$.

1.2. С предварительной фильтрацией. Эта процедура (рис. 2, а) оправдана, когда ресурсы аппаратуры позволяют осуществлять предварительную фильтрацию изображения (на борту носителя ДЗ) до его сжатия. В этом случае может быть достигнуто наивысшее качество сжатых изображений, на 3 – 4 дБ выше [12], чем для процедуры, описанной в параграфе 1.1.

В соответствии с рекомендациями, данными в [13], для предварительной фильтрации используется ДКП-фильтр с жестким порогом, равным $2,6\sigma$. Как показано в [9], чтобы в результате сжатия качество отфильтрованного изображения не уменьшалось больше, чем на 0,5 – 1,5 дБ, QS при сжатии выбирается равным $1,3\sigma$.

1.3. С фильтрацией декодированного изображения на Земле. Применение этой процедуры сжатия и обработки (рис. 2, б) оправдано, когда нет возможности осуществлять предварительную фильтрацию изображения на борту носителя ДЗ до сжатия этого изображения, но есть возможность это делать перед анализом изображения (не требуется оперативный анализ изображения).

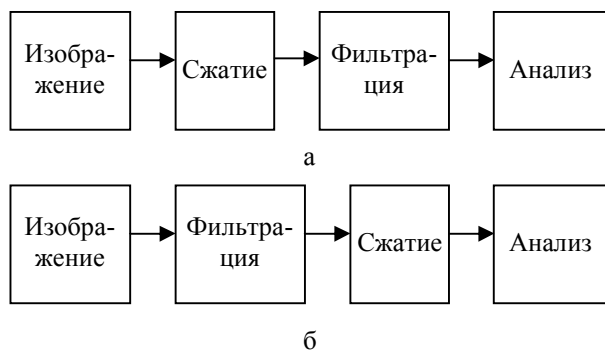


Рис. 2. Схемы сжатия:

а – с предварительной фильтрацией изображения;
б – с постобработкой изображения

В этом случае может быть достигнуто примерно такое же качество сжатых изображений, как и для процедуры, описанной в параграфе 1.2, но при несколько меньшей степени сжатия.

Оптимальные параметры сжатия для описанной процедуры нами в более ранних работах не исследовались, поэтому проведем такое исследование здесь.

На рис. 3 приведен график (интегральный для ряда тестовых изображений [14], при $\sigma^2=100$) зависимости качества изображения после постобработки от степени сжатия, определяемой отношением QS/ σ .

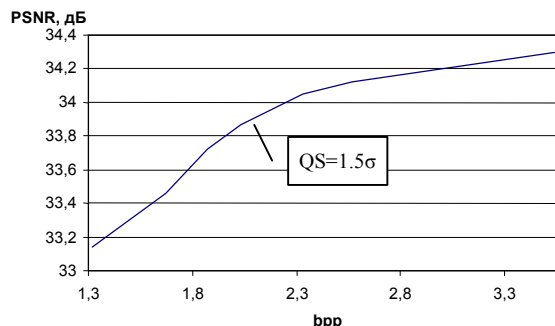


Рис. 3. Зависимость PSNR изображения после декодирования и фильтрации от bpp (bpp=8/КС)

В этом случае, условие уменьшения качества сжимаемого изображения не более чем на 0,5 – 1,5 дБ, по сравнению с максимально достижимым стабильно выполняется при $QS=1,5\sigma$.

2. Сжатие многоканальных изображений

Одной из основных особенностей сжатия многоканальных изображений системы AVIRIS является то, что дисперсия шума для разных каналов изображения может существенно отличаться [5]. Чтобы обеспечить качество изображения, приемлемое для последующего анализа, возможны две стратегии учета этой особенности. Для первой стратегии находится наименее зашумленный канал n_m (с наименьшим значением $\sigma^2(n_m)$). Шаг квантования QS для сжатия всех каналов выбирается в соответствии с условием $QS=4,5\sigma(n_m)$.

Для второй стратегии параметры сжатия для каждого канала устанавливаются независимо от других каналов в соответствии с оцененным для этого канала значением $\sigma^2(n) - QS_n=4,5\sigma(n)$. Эта стратегия позволяет добиться более высокой степени сжатия, поскольку КС при увеличении QS возрастает. В разделе 3 повышение степени сжатия будет количест-

венно оценено на примере сжатия реальных изображений.

При сжатии многоканальных изображений наряду с независимым сжатием каналов можно совместно сжимать группы, например, по 16 каналов, используя трехмерные варианты процедур сжатия вместо двумерных. Размер групп сжимаемых каналов, можно определять и адаптивно, исходя из значений минимальной $\sigma_{j\min}^2$ и максимальной $\sigma_{j\max}^2$ дисперсий в текущей группе с индексом j . Предложим для этого следующую процедуру:

1) выбираем размер N текущей группы j , равный 16 ($N_j=16$);

2) сравниваем $\sigma_{j\min}^2$ и $\sigma_{j\max}^2$:

3) если $\sigma_{j\min}^2$ и $\sigma_{j\max}^2$ отличаются в 2 раза и более и $N_j > 4$, то эта группа каналов не может сжиматься совместно и должна быть разбита на две равные подгруппы, затем переходим к пункту 4), в противном случае переходим к пункту 5);

4) выбираем первую подгруппу, присваиваем ей индекс j и переходим к пункту 2);

5) если $N_j=16$, то формируем новую группу из следующих 16 каналов в МКИ, если $N_j < 16$ – формируем новую группу, которая состоит из остатка каналов предыдущей исходной группы и следующих каналов МКИ, так, чтобы в текущей группе в сумме было 16 каналов и не содержалось каналов предыдущих групп.

Пункты с 2) по 5) выполняются до тех пор, пока все каналы в МКИ не будут разбиты по группам. Возможные размеры групп равны 4, 8 и 16, что удобно для использования быстрых алгоритмов.

На рис. 4 приведен график оценки дисперсии шума для каналов гиперспектрального изображения lu_19 и результат адаптивной разбивки каналов на группы.

Хорошо видно, что дисперсия шума существенно отличается для разных каналов, и наряду с участками медленно изменяющейся дисперсии, где при-

меняется сжатие групп по 16 каналов, существует достаточно большое число участков с быстроменяющейся дисперсией, где сжатие осуществляется группами по 8 и 4 канала.

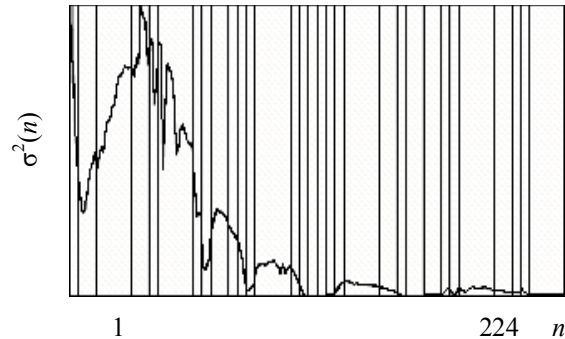


Рис. 4. Значения оценок дисперсий для lu_19

3. Анализ эффективности предложенных схем сжатия

Исследование эффективности рассмотренных схем сжатия осуществлялось для 4-х реальных многоканальных (224 канала) изображений AVIRIS (рис. 6) размером 512×614 пикселей (2 байта на пиксель).

При совместном сжатии группы каналов изображения выполнялась их предварительная декорреляция с помощью одномерного ДКП (размерность ДКП соответствует числу каналов в группе) между соответствующими пикселями каналов. Затем для сжатия каждого декоррелированного таким образом канала применялся двумерный вариант кодера AGU.

При совместном сжатии группы каналов QS выбирался на основании оцененной $\sigma^2(n_m)$ для наименее искаженного канала из этой группы.

В табл. 1 приведены КС для рассмотренных схем сжатия многоканальных изображений. Обратим внимание на то, что сравнивать между собой КС для разных схем сжатия не вполне корректно, поскольку каждая схема адаптирована под определенную (рассмотренную выше) задачу. Тем не менее, для каждой из предложенной схемы можно сравнить между собой варианты ее реализации, поскольку качество восстановленных данных в этом случае сравнимо.

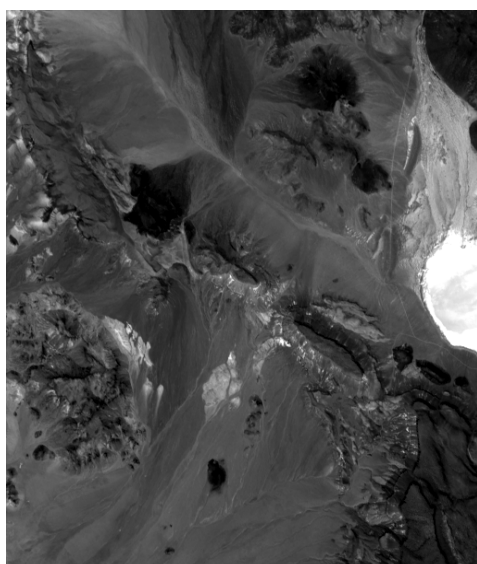
Были рассмотрены несколько вариантов реализации каждой из трех схем сжатия.

Во-первых: сжатие осуществлялось поканально, по 16 каналов и с адаптивным выбором размера группы сжимаемых совместно каналов.

Во-вторых, QS выбирался на основании минимальной оцененной $\sigma^2(n_m)$ по всем каналам и независимо для каждого канала или группы каналов.

По данным табл. 1 можно сделать несколько важных выводов.

Выбор шага квантования независимо для каждого канала изображения позволяет при сохранении приемлемого качества изображений обеспечивать увеличение коэффициента сжатия от 2 до 4 раз в зависимости от изображения и используемой схемы сжатия.



а



б



в



д

Рис. 5. Изображения системы ДЗ AVIRIS (1-е каналы): а – lu_19, б – mo_1, в – mo_2, г – mo_3

Учет корреляции между каналами при совместном сжатии групп из 16 каналов позволяет повысить КС в 1,4 – 1,8 раза по сравнению с отдельным поканальным сжатием. Адаптивный выбор размера

групп совместно сжимаемых каналов обеспечивает наивысшие КС (в 1,5 – 2 раза выше, чем для отдельного сжатия каналов). Схема сжатия с предварительной фильтрацией на борту системы ДЗ обес-

печивает более высокие КС, чем для процедуры сжатия, описанной в подразделе 1.3, но при этом реализация такой схемы требует разработку и установку на борту носителя СФИ ДЗ специализированных процессоров (вычислительная сложность процедуры фильтрации существенно выше вычислительной сложности процедуры сжатия). В связи с этим, интересным представляется тот факт, что схема сжатия, предусматривающая постобработку декодированных изображений на Земле, обеспечивает незначительное уменьшение КС (в 1,1 – 1,5 раза) по

сравнению с достигаемыми КС для схемы, описанной в подразделе 1.2 при сравнимом качестве декодированных изображений. В то же время практическая реализация этой схемы является значительно более простой алгоритмически и не требует разработки специализированной аппаратуры.

И, наконец, из данных табл. 1 следует, что предложенные автоматические схемы сжатия позволяют при приемлемом качестве декодированных изображений обеспечивать сжатие изображений СФИ AVIRIS в 5 – 20 раз.

Таблица 1

КС для рассмотренных схем сжатия многоканальных изображений

Процедура	Оценка дисперсии	Сжатие	Коэффициент сжатия			
			lu 19	mo 1	mo 2	mo 3
Без фильтрации	Минимальная по всем каналам	поканальное	3,99	3,08	3,05	3,48
		по 16 каналов	6,57	5,00	4,85	5,34
	Для каждого канала отдельно	поканальное	14,71	18,30	5,05	7,16
		по 16 каналов	26,34	19,88	9,34	13,62
		адаптивное	34,11	31,76	10,86	15,08
Фильтрация на Земле	Минимальная по всем каналам	поканальное	2,87	2,36	2,35	2,60
		по 16 каналов	4,03	3,37	3,30	3,53
	Для каждого канала отдельно	поканальное	6,32	7,18	3,38	4,25
		по 16 каналов	9,65	9,63	4,98	6,11
		адаптивное	12,66	14,09	5,49	6,64
Предварительная фильтрация на борту носителя системы ДЗ	Минимальная по всем каналам	поканальное	3,46	2,83	2,41	2,92
		по 16 каналов	5,15	4,03	3,31	3,99
	Для каждого канала отдельно	поканальное	8,23	9,82	3,46	4,77
		по 16 каналов	13,79	12,84	4,98	7,05
		адаптивное	18,45	19,81	5,63	7,66

Поскольку существующие методы сжатия изображений без потерь информации позволяют сжимать изображения AVIRIS до 3,5 раз при значительных вычислительных затратах [1, 15], то переход на использование предложенных схем сжатия выглядит более чем оправданным.

Заключение

В результате проведенных исследований предложен ряд эффективных процедур автоматического сжатия многоканальных изображений СФИ AVIRIS, позволяющих достичь КС порядка 5 – 20 раз при приемлемом качестве декодированных изображений.

Показана важность адаптивного выбора параметров сжатия независимо для каждого канала изображения, а также учета при сжатии наличия корреляции между соседними каналами изображения.

Предложенные процедуры сжатия могут использоваться не только для кодирования изображений системы формирования изображений AVIRIS, но и для кодирования изображений других многоканальных систем формирования изображений, основанных на схожих принципах работы.

Литература

1. Aiazzi B., Alba P., Alparone L., Baronti S. Lossless compression of multi-/hyperspectral imagery based

on a 3-d fuzzy prediction // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – Sept. 1999. – Vol. 37. – P. 2287-2294.

2. Öktem R. Transform Domain Algorithms for Image Compression and Denoising // Thesis for the degree of Doctor of Technology. – Tampere University of Technology (Tampere, Finland), 2000. – 142 p.

3. Taubman D., Marcellin M. JPEG 2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice. – [Electronic resource]. – Boston: Kluwer, cop. 2002. – 1 electronic optical disc (CD-ROM); – System requirements: IBM-compatible PC; Windows 98 or higher; 128 MB RAM; hard disk with 700 MB free space; CD-ROM player.

4. Lukin V.V., Abramov S.K., Vozel B., Chehdi K. A method for blind automatic evaluation of noise variance in images based on bootstrap and myriad operations // Proceedings of SPIE/EUROPTO Symp. On Satellite Remote Sensing. – Bruges, Belgium, SPIE Vol. 5982. – 2005. – P. 299-310.

5. Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Kaarna A. Preliminary Automatic Analysis of Characteristics of Hyperspectral AVIRIS Images // 11th Int. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET*06). – Kharkiv, Ukraine, June 26-29, 2006. – P. 158-160.

6. Зряхов М.С., Лукин В.В. Автоматическое сжатие предварительно отфильтрованных изображений // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 3 (15). – С. 11-20.

7. Ponomarenko M. Partition Scheme Based High Quality Image Compression. – Tampere: Tampere University of Technology, 2005. – 85 p.

8. Ponomarenko N., Lukin V., Zriakhov M., Egiazarian K., Astola J. Lossy compression of images with additive noise // Proceedings of International Conference on “Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems”. – Antwerpen, Belgium, September, 2005. – P. 381-386.

9. Зряхов М.С., Лукин В.В. Обеспечение заданного качества при сжатии изображений с потерями // Радиотехника. – Х.: ХНУРЭ, 2005. – Вып. 143. – С. 76-82.

10. Lukin V., Abramov K., Zelensky A., Astola Jaakko T. Use of Minimal Inter-Quantile Distance Estimation in Image Processing // Proceedings of SPIE. – Sep. 2006. – Vol. 6315. – P. 112-123.

11. AGU-DCT Based High Quality Image Compression. – [Electronic resource]. – Ponomarenko N.N. personal page; – program (1 file «agu.zip»: 40 Kb); – Tampere: Finland, cop. 2006; – Mode of access to a site: <http://www.cs.tut.fi/~karen/aguCoder.htm>.

12. Ponomarenko Nikolay, Zriakhov Mikhail, Lukin Vladimir V., Astola Jaako, Egiazarian Karen O., Estimation of Accessible Quality in Noisy Image Compression // Proceedings of European Signal Processing Conference. – Italy, Sept. 2006. – P. 273-276.

13. Egiazarian K., Astola J., Helsengius M., Kuosmanen P. Adaptive Denoising and Lossy Compression of Imaging in Transform Domain // J. Electron. Imag. – 1999. – Vol. 8. – P. 233-245.

14. Набор тестовых изображений: Lenna, Barbara, Baboon, Goldhill, Peppers. – [Электронный ресурс] Персональная страница Пономаренко Н.Н.; – Электрон. граф. дан. (1 файл «testset.zip»: 1,1 Мб); – Тампере: Финляндия, изгот. 2006; – Режим доступа к сайту: <http://www.cs.tut.fi/~karen/aguCoder.htm>.

15. Toivanen Pekka, Kubasova Olga, Mielikainen Jarno. Correlation-Based Band-Ordering Heuristic for Lossless Compression of Hyperspectral Sounder Data // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – January 2005. – Vol. 2, №.1. – P. 50-54.

Поступила в редакцию 16.11.2006

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. А.Н. Роечко, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.