

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ПРИ КОМПРЕССИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

М.В. Гашников

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Проводится сравнительное исследование различных интерполяторов при иерархической компрессии гиперспектральных изображений. Рассматривается метод компрессии на основе иерархической сеточной интерполяции. Описываются стандартные интерполяционные схемы, а также предлагается ранговый интерполятор в рамках указанного метода. Проводятся вычислительные эксперименты на реальных изображениях 16-битных гиперспектрометров. Приводятся результаты сравнения рассмотренных интерполяторов в координатах «погрешность – коэффициент сжатия».

Ключевые слова: интерполяция, компрессия, гиперспектральное изображение, максимальная погрешность, вариационный ряд.

Введение

Область исследований, связанная с обработкой гиперспектральных изображений, привлекает всё большее внимание в последние годы [1-3]. Данные дистанционного зондирования такого типа находят всё большее применение в различных прикладных задачах [4-10]. Однако, одна из основных проблем, затрудняющих использование гиперспектральных изображений, заключается в их объеме. Одно такое изображение включает несколько сотен двумерных каналов размером в несколько тысяч пикселей по каждой координате, и таких изображений, как правило, одновременно используется сразу много.

Рост ёмкости каналов связи и цифровых носителей в настоящее время не успевает за ростом объемов гиперспектральных данных, поэтому единственно возможным практическим решением является использование методов компрессии [11-12] изображений. Проблема усложняется тем, что гиперспектральные данные часто являются 16-битными, в результате чего большинство популярных реализаций методов компрессии оказываются неприменимыми.

Одним из наиболее перспективных методов компрессии гиперспектральных изображений является метод [13-14] на основе иерархической сеточной интерполяции (ИСИ), использующий иерархическое прореживание изображения и интерполяцию отсчётов более прореженного изображения на основе отсчётов менее прореженного. Достоинства метода:

1. Высокая эффективность при низкой вычислительной сложности.
2. Независимая от требуемого разрешения скорость доступа к фрагментам за счёт иерархического представления сжатых данных.
3. Возможность строгого контроля [15] погрешности, в том числе квадратичной и максимальной погрешности, что особенно важно при работе с уникальными гиперспектральными данными (в том числе возможность сжатия без погрешности).

4. Возможность стабилизации скорости формирования потока сжатых данных, особенно актуальная для систем реального времени, в том числе для систем бортовой компрессии.
5. Возможность учёта взаимосвязей спектральных каналов, позволяющая использовать чрезвычайно высокую корреляцию спектральных компонент для повышения эффективности компрессии.
6. Возможность компрессии данных 16-битных спектрометров без существенной потери эффективности.

Одним из ключевых этапов метода ИСИ является этап интерполяции, поэтому актуальной является задача сравнительного исследования эффективности интерполяторов метода ИСИ, никак не исследованная в опубликованной литературе. В данной работе проводится сравнительное исследование различных схем интерполяции метода ИСИ, а также предлагается «ранговый» интерполятор, который ранее не использовался в составе этого метода.

Иерархическая компрессия

Метод компрессии на основе ИСИ использует специальное представление изображения $F = \{f(m, n)\}$ в виде безызбыточного квадродерева [13] из L масштабных уровней. Рассмотрим множество индексов $I_l^+ = \{(2^l m, 2^l n)\}$, т.е. множество индексов сетки отсчётов изображения, взятых с шагом 2^l . Множество I_{L-1} индексов отсчётов старшего масштабного уровня представляет собой просто сетку с шагом 2^{L-1} . Множество индексов I_l отсчётов любого «нестаршего» масштабного уровня представляют собой сетку с шагом «два в степени номер уровня», из которой исключены отсчёты вдвое более редкой сетки:

$$I_{L-1} = I_{L-1}^+, \quad I_l = I_l^+ \setminus I_{l+1}^+, \quad 0 \leq l < L.$$

Нетрудно видеть, что множество индексов изображения $I = \{(m, n)\}$ покрывается множествами индексов масштабных уровней, причём такое представление безызбыточно

$$I = \bigcup_{l=0}^{L-1} I_l, \quad I_j \cap I_k = \emptyset \quad \forall k \neq j$$

в отличие от покрытия множествами I_l^+ .

При компрессии методом ИСИ масштабные уровни обрабатываются последовательно, начиная со старшего уровня номер $(L-1)$. Доля отсчётов старшего уровня в общем объеме данных пренебрежимо мала, поэтому для его сжатия можно использовать любой тривиальный алгоритм. Общая схема сжатия произвольного нестаршего масштабного уровня номер l показана на рис. 1 и включает следующие этапы.

1) Интерполяция. Для каждого отсчёта $f(m, n)$ масштабного уровня номер l на основе уже прошедших компрессию и восстановление отсчётов $\bar{f}(m, n)$ вычисляется интерполированное значение

$$\hat{f}(m, n) = P\left(\{\bar{f}(j, k), (j, k) \in I_{l+1}^+\}, (m, n) \in I_l\right).$$

Интерполяция производится на основе восстановленных, а не исходных значений яркости для того, чтобы обеспечить идентичность интерполированных значений при компрессии и при декомпрессии.

2) Вычисление разностного сигнала (постинтерполяционных остатков)

$$\delta(m,n) = f(m,n) - \hat{f}(m,n), (m,n) \in I_1,$$

которое декорелирует сигнал, что в результате позволяет повысить эффективность компрессии.

3) Квантование равномерной шкалой

$$\bar{\delta}(m,n) = \left[\frac{|\delta(m,n)| + \varepsilon_{\max}}{2\varepsilon_{\max} + 1} \right] \text{sign}(\delta(m,n)), (m,n) \in I_1,$$

где [...] – знак выделения целой части числа. Такое квантование обеспечивает управление максимальной [16] погрешностью ε_{\max}

$$\varepsilon_{\max} = |f(m,n) - \bar{f}(m,n)|.$$

4) Упаковка квантованного разностного сигнала $\bar{\delta}$ в архив либо канал связи.



Рис. 1. Схема компрессии произвольного нестаршего масштабного уровня методом ИСИ

5) Восстановление значений

$$\bar{f}(m,n) = \hat{f}(m,n) + \bar{\delta}(m,n)(2\varepsilon_{\max} + 1), (m,n) \in I_l,$$

которые будут использованы для интерполяции при компрессии следующего масштабного уровня номер $(l-1)$. На этом описание процедуры компрессии закончено.

При декомпрессии квантованный разностный сигнал извлекается из архива (или канала связи) и распаковывается, после чего производятся этапы восстановления и интерполяции, идентичные соответствующим этапам компрессии.

Интерполяция при иерархической компрессии

Для интерполяции в методе ИСИ обычно используются простые схемы [17], основанные на усреднении по ближайшим отсчётам уже обработанных более прореженных масштабных уровней. Эти схемы различаются количеством опорных отсчётов и последовательностью интерполяций. Формулы для описания этих схем громоздки, но вполне ясны из рис. 2, поэтому здесь приводятся только формулы для интерполятора, изображённого на рис. 2в:

$$\begin{aligned} 4\hat{f}(2^l(2m+1), 2^l(2n+1)) = \\ f(2^{l+1}(m+1), 2^{l+1}(n+1)) \\ + f(2^{l+1}(m+1), 2^{l+1}n) \\ + f(2^{l+1}m, 2^{l+1}(n+1)) \\ + f(2^{l+1}m, 2^{l+1}n), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4\hat{f}(2^{l+1}m, 2^l(2n+1)) = \\ f(2^{l+1}m, 2^{l+1}(n+1)) \\ + f(2^{l+1}m, 2^{l+1}n) \\ + f(2^{l+1}(m-1), 2^l(2n+1)) \\ + f(2^{l+1}(m+1), 2^l(2n+1)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4\hat{f}(2^l(m+1), 2^{l+1}n) = \\ f(2^{l+1}(m+1), 2^{l+1}n) \\ + f(2^{l+1}m, 2^{l+1}n) \\ + f(2^l(2m+1), 2^{l+1}(n-1)) \\ + f(2^l(2m+1), 2^{l+1}(n+1)). \end{aligned}$$

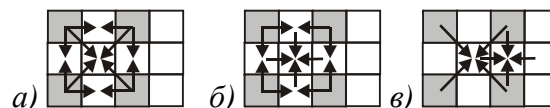


Рис. 2. Расположение опорных отсчётов и последовательность обработки для интерполяторов: (а) «Косой крест», (б) «Прямой крест», (в) «Два креста»

Кроме перечисленных на рис. 2 интерполяторов в данной работе предлагается использовать в рамках иерархической компрессии также «ранговый» интерполятор. Расположение опорных отсчётов и последовательность интерполяций в нём используются

те же самые, что у интерполятора «Два креста» (см рис. 2в). Собственно алгоритм интерполяции заключается в построении вариационного ряда [6] по опорным отсчётам, отбрасывании двух его крайних элементов и усреднении по оставшимся. Описанное усечение вариационного ряда обеспечивает уменьшение влияния шумов, отсчёты которых, как правило, попадают на края вариационного ряда и отбрасываются.

Экспериментальные исследования

Все рассмотренные алгоритмы были реализованы программно. Разработанное программное обеспечение было использовано для проведения вычислительных экспериментов на серии реальных изображений 16-битных гиперспектрометров SpecTIR [18] и AVIRIS [19]. Фрагменты компонент одного из изображений показаны на рис. 3-4 (специально выбраны примеры сильно различающихся компонент со слабым и сильным шумом).

Были проведены эксперименты по поиску наилучших параметров метода ИСИ, а также построены графики зависимости коэффициента сжатия от максимальной и квадратичной погрешностей. Эти результаты будут подробно представлены в докладе, здесь же ввиду ограничений на объем публикации приводится только один из типичных результатов исследования интерполяторов (см. рис. 5), полученный для приведённого тестового изображения.

Исходя из полученных результатов, были сделаны следующие выводы:

1. При компрессии гиперспектральных изображений методом ИСИ наибольшую эффективность показали интерполяторы «два креста» и «ранговый». Интерполяторы «прямой крест» и «косой крест» заметно проигрывают.
2. Линейный интерполятор «два креста» и нелинейный «ранговый интерполятор» показали практически совпадающие результаты. Следовательно, ключевыми характеристиками интерполятора являются расположение опорных отсчётов и последовательность интерполяций, а не вид интерполирующей функции.
3. «Ранговый интерполятор», предложенный в данной работе для использования в рамках иерархической компрессии, показал результаты, близкие к наилучшим, что позволяет сделать заключение о перспективности нелинейных схем интерполяции для метода ИСИ.

Заключение

В данной работе было проведено сравнительное исследование различных интерполяционных схем при компрессии гиперспектральных изображений. В качестве метода компрессии гиперспектральных изображений был рассмотрен метод ИСИ. Исследования эффективности производились на реальных изображениях 16-битных гиперспектрометров. Получены зависимости коэффициента сжатия от максимальной погрешности при использовании различных интерполяторов. Произведено сравнение трёх усредняющих схем интерполяции, а также предложенной к использованию в рамках

метода ИСИ ранговой схемы. Выявлены ключевые особенности интерполяторов, влияющие на эффективность компрессии.

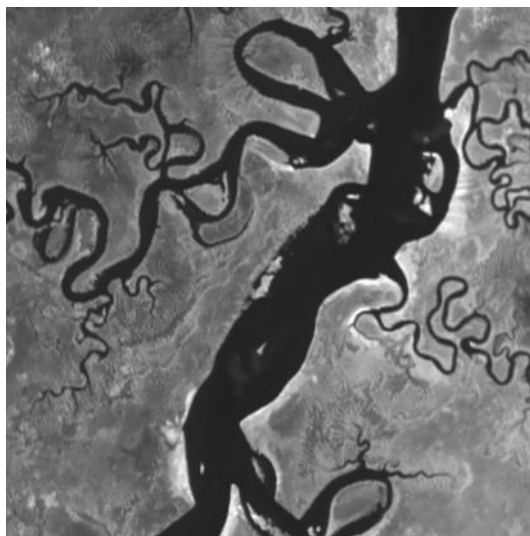


Рис. 3. Фрагмент компоненты №70 изображения гиперспектрметра СпеТIR «Gulf of Mexico Wetland Sample»



Рис. 4. Фрагмент компоненты №119 изображения гиперспектрметра СпеТIR «Gulf of Mexico Wetland Sample»

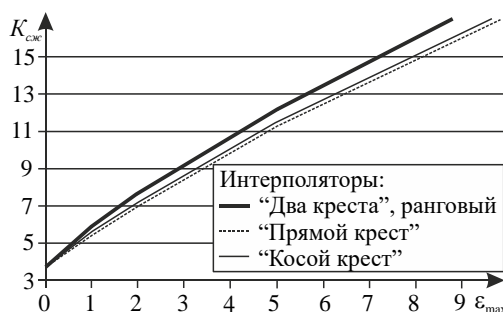


Рис. 5. Зависимость коэффициента сжатия от максимальной погрешности для компрессии гиперспектрального изображения методом ИСИ при использовании различных интерполяторов

В дальнейшем планируется развитие нелинейных схем интерполяции, показавших свою эффективность при иерархической компрессии гиперспектральных изображений. Также перспективным представляется исследование вопроса об адаптивном выборе различных схем интерполяции для различных спектральных компонент, т.к. характеристики этих компонент существенно различаются.

Благодарности

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

Литература

1. Chang, C. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*. / C. Chang. – Wiley Press, 2013. – 1164 p.
2. Chang, C. *Hyperspectral data exploitation: theory and applications* / C. Chang. – Wiley-Interscience, 2007. – 440 p.
3. Borengasser, M. *Hyperspectral Remote Sensing – Principles and Applications* / M. Borengasser, W. Hungate, R. Watkins. – CRC Press, 2004. – 128 p.
4. Benz, U. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information / U. Benz, P.Hofmann, G.Willhauck, I.Lingenfelder, M.Heynen // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 58(3). – P. 239-258.
5. 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.
6. Soifer, V. *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. Khrarov, A.O. Korepanov, A.V. Kupriyanov, E.V. Myasnikov, V.V. Myasnikov, S.B. Popov, V.V. Sergeyev, V.A. Soifer. – VDM Verlag. – 2010. – 584 p.
7. 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.
8. Anderson, J. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data / E.Hardy, J.Roach, R.Witme, J. Anderson. – US Government Printing Office. – 1976. – 964 p.
9. Chang, C. *Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification* / C. Chang. – Springer, 2003. – 372 p.
10. 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
11. Salomon, D. *Data Compression. The Complete Reference*. / D. Salomon. – Springer-Verlag, 4ed, 2007. – 1118 p.
12. Woods, E *Digital Image Processing* / E. Woods, R. Gonzalez // Prentice Hall, 3ed, 2007. –976 p.
13. Gashnikov, M Hierarchical GRID Interpolation under Hyperspectral Images Compression / M.Gashnikov, N.Glumov // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2014. – № 23(4). – P. 246-253. – ISSN 1060-992X
14. Гашников, М.В. Иерархическая компрессия в задаче хранения гиперспектральных изображений / М.В.Гашников, Н.И.Глумов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – № 38(3). – С. 482-488.
15. Lin, S. *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, second edition / S. Lin, D. Costello. – New Jersey: Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs, 2004. – 1260 p.
16. Pratt, W. *Digital image processing*. / W. Pratt. – Wiley, 4ed, 2007. – 807 p.
17. Гашников, М.В. Иерархическая сеточная интерполяция при сжатии гиперспектральных изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – № 38(1). – С. 87-93. – ISSN 0134-2452.
18. *SpecTIR Data – Advanced Hyperspectral and Geospatial Solutions* / Corporate Headquarters SpecTIR Remote Sensing Division [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.spectir.com/free-data-samples> (дата обращения 10.02.2016).
19. *AVIRIS Data – Ordering Free AVIRIS Standard Data Products* / Jet Propulsion Laboratory [Электронный ресурс]. – URL: http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html (дата обращения 12.02.2016).