

## Адаптивная интерполяция многомерных сигналов при компрессии на борту летательного аппарата

Н.И. Глумов<sup>1,2</sup>, М.В. Гашников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 4430011

**Аннотация.** Рассматривается компрессия многомерных сигналов на борту летательного аппарата. Данные таких сигналов описываются гиперкубом, который повернут специальным образом. Для компрессии такого гиперкуба используется иерархический метод компрессии. В качестве одного из этапов этого метода используется адаптивный алгоритм интерполяции. Адаптивный алгоритм автоматически переключается между различными функциями интерполятора в каждой точке сигнала. Проведены вычислительные эксперименты на реальных многомерных сигналах. Вычислительные эксперименты подтвердили, что применение адаптивного интерполятора позволяет повысить коэффициент компрессии «повёрнутого» гиперкуба, соответствующего гиперспектральным многомерным сигналам.

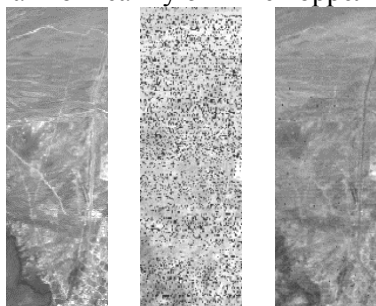
### 1. Введение

Постоянно растущий интерес к прикладным задачам в области обработки многомерных сигналов [1-4] обуславливает актуальность исследований в этом направлении. Одной из главных проблем при этом является объём информации, соответствующий многомерным сигналам. Например, гиперспектральные ДДЗ [1,3], как один из видов многомерного сигнала, содержат до нескольких сотен широкоформатных компонент высокой разрядности. При бортовой компрессии эту информацию нужно передавать через канал связи ограниченной пропускной способности. В такой ситуации использование компрессии [5-8] является единственным возможным решением.

В настоящее время известно множество методов компрессии: вейвлетные [9], спектральные [10], фрактальные [11] и т.д. Однако все они весьма ограниченно применимы при бортовой компрессии из-за высокой вычислительной сложности и сложности контроля погрешности в пространственной области. Кроме того, гиперкуб многомерного сигнала при получении гиперспектральных данных часто бывает «развёрнут» (см. рисунок 1-2) специфическим образом: первая компонента содержит первые строки исходных компонент, вторая компонента – вторые строки и т.д. Нетрудно видеть, что это приводит к возникновению анизотропных корреляционных особенностей в сечениях сигнала.

В описанных условиях хорошо зарекомендовал себя метод компрессии многомерных сигналов, основанный на иерархической сеточной интерполяции [12-13]. Наиболее сложным этапом этого метода компрессии, в значительной степени определяющим эффективность метода в целом, является интерполятор многомерного сигнала. В данной работе для интерполяции

специфически «развёрнутых» многомерных сигналов, соответствующих гиперспектральным ДДЗ, предлагается адаптивный интерполятор, основанный на гибридной технологии. Эта технология сочетает в себе авторегрессионное предсказание компонент сигнала и адаптивную параметризованную интерполяцию внутри компонент, что позволяет эффективным образом использовать описанную выше корреляционную анизотропность многомерного сигнала.



**Рисунок 1.** Компоненты № 10, 100, 120 «неповёрнутого» гиперспектрального куба, соответствующего «естественному» состоянию многомерного сигнала, допускающего обработку и визуализацию в наземном репозитории данных.



**Рисунок 2.** Пример компоненты «повёрнутого» гиперспектрального куба, соответствующего компрессируемому на борту многомерному сигналу.

Для исследования предложенного многомерного интерполятора производятся вычислительные эксперименты на реальных многомерных сигналах.

## 2. Авторегрессионное предсказание компонент многомерного сигнала

Рассмотрим многомерный ( $D$ -мерный) сигнал

$$X = \{x(d_0, d_1, \dots, d_{D-1})\} \tag{1}$$

как набор  $(D-1)$  мерных компонент

$$X^t = \{x^t(d_1, \dots, d_{D-1})\} = \{x(t, d_1, \dots, d_{D-1})\}, 0 \leq t < T \tag{2}$$

Часто эти компоненты высококоррелированы (см. рисунки 1-2), например, при обработке гиперспектральных ДДЗ (для гиперспектрального сигнала такого вида  $D = 3$ , а  $T$  совпадает с количеством спектральных компонент). Для учёта взаимозависимости компонент будем использовать линейную авторегрессионную модель:

$$P^t = k_1 X^{t-1} + k_2 X^{t-2} + \dots + k_N X^{t-N} \tag{3}$$

где  $P$  – предсказанная компонента многомерного сигнала  $X$ ,  $k_i$  – коэффициенты регрессии,  $N$  – количество опорных компонент, используемых для предсказания. Эти коэффициенты находятся из условия минимизации квадратичной погрешности между исходной и предсказанной компонентами:

$$\varepsilon_t^2 = E \left\{ \left( X^t - \sum_{i=1}^N k_i X^{t-i} \right)^2 \right\} \rightarrow \min_{\{k_i\}} \tag{3}$$

Дисперсия разностной компоненты

$$R^t(d_1, \dots, d_{D-1}) = X^t(d_1, \dots, d_{D-1}) - P^t(d_1, \dots, d_{D-1}), 1 \leq t < T \tag{4}$$

как правило, существенно меньше, чем дисперсия исходной компоненты  $X^t$ , а распределение вероятностей более неравномерно, что делает разностные компоненты (4) гораздо более предпочтительными для некоторых типов обработки, например для компрессии.

### 3. Иерархическая компрессия многомерных сигналов

Разностные компоненты (4) декоррелированы, благодаря чему их можно обрабатывать независимо. В данной работе эти разностные компоненты сжимаются с помощью иерархического метода компрессии [12-13], который использует безызбыточное иерархическое представление многомерного сигнала  $\mathbf{X} = \{x(\vec{d})\}$  в виде набора из  $L$  масштабных уровней  $\mathbf{X}_l$ :

$$\mathbf{X} = \bigcup_{l=0}^{L-1} \mathbf{X}_l, \quad \mathbf{X}_l = \{x(\vec{d}) : \vec{d} \in I_l\}, \quad (5)$$

где  $I_l$  - множество индексов отсчётов для масштабного уровня  $\mathbf{X}_l$ :

$$I_{L-1} = \{2^{L-1}\vec{d}\}, \quad I_l = \{2^l\vec{d}\} \setminus \{2^{l+1}\vec{d}\}, \quad 0 \leq l < L. \quad (6)$$

Масштабный уровень номер  $(L-1)$  представляет собой прореженную «сетку» отсчётов сигнала с шагом  $2^{(L-1)}$  по каждой из координат, а любой другой уровень (номер  $l$ ) это сетка отсчётов с шагом  $2^l$ , из которой исключены все отсчёты вдвое более прореженной сетки.

При компрессии масштабные уровни сжимаются последовательно в порядке уменьшения их номеров. При этом более прореженные уровни интерполируются на основе отсчётов менее прореженных уровней. Так как постинтерполяционные остатки обладают свойствами, аналогичными свойствам разностей (4), их кодирование гораздо более эффективно, чем кодирование исходных отсчётов.

### 4. Адаптивная интерполяция многомерных сигналов при компрессии

Наиболее важным этапом иерархической компрессии является интерполятор. В данной работе компрессии подвергаются компоненты (4) размерности на единицу меньшей, чем исходный сигнал. Таким образом, для трёхмерных ДЗЗ интерполятор будет работать с двумерными данными, поэтому далее, для упрощения изложения, опишем двумерный вариант адаптивного интерполятора.

Для обеспечения низкой вычислительной сложности иерархической компрессии для интерполяции часто используются тривиальные схемы, основанные на усреднении по ближайшим отсчётам более прореженных масштабных уровней. Приведём пример такой схемы интерполяции:

$$\hat{x}_l^{(1)}(2m+1, 2n+1) = \frac{1}{4}(\bar{x}_{l+1}(m, n) + \bar{x}_{l+1}(m+1, n) + \bar{x}_{l+1}(m, n+1) + \bar{x}_{l+1}(m+1, n+1)), \quad (7)$$

где  $\bar{x}_{l+1}(m, n)$  это отсчёты более прореженного масштабного уровня, уже прошедшие компрессию и декомпрессию.

Такая схема очень проста, однако не учитывает локальные особенности сигнала, примером которых могут служить протяжённые структуры «бортовых» ДЗЗ [14], хорошо различимые на рисунке 2. Поэтому в данной работе для компрессии таких ДЗЗ используется адаптивный интерполятор, который, кроме функции (7), использует ещё две интерполирующие функции, повышающие точность интерполяции на контурах за счёт усреднения «вдоль» них:

$$\hat{x}_l^{(0)}(2m+1, 2n+1) = \frac{1}{2}(\bar{x}_{l+1}(m, n) + \bar{x}_{l+1}(m+1, n+1)) \quad (8)$$

$$\hat{x}_l^{(2)}(2m+1, 2n+1) = \frac{1}{2}(\bar{x}_{l+1}(m+1, n) + \bar{x}_{l+1}(m, n+1)) \quad (9)$$

Выбор интерполирующей функции для каждого отсчёта осуществляется посредством параметризованного решающего правила:

$$\hat{x}_l(m, n) = \hat{x}_l^{(j)}(m, n), \quad j = \begin{cases} 0, & \mu_l(m, n) < \alpha; \\ 1, & \alpha \leq \mu_l(m, n) \leq \beta; \\ 2, & \mu_l(m, n) > \beta; \end{cases}$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  это параметры (пороги переключения между интерполирующими функциями), которые можно выбирать исходя из минимизации погрешности интерполяции либо энтропии квантованных постинтерполяционных остатков, а  $\mu_l(m, n)$  это признак, показывающий выраженность и направление контура в локальной окрестности текущего отсчёта:

$$\mu_l(2m+1, 2n+1) = \left| \bar{x}_{l+1}(m, n) - \bar{x}_{l+1}(m+1, n+1) \right| - \left| \bar{x}_{l+1}(m, n+1) - \bar{x}_{l+1}(m+1, n) \right|. \quad (10)$$

Большие по модулю значения признака (140) соответствуют отсчётам, через которые проходит достаточно выраженный участок контура. В этих ситуациях интерполяция (8-9) «вдоль» этого контура предпочтительна. Близкие к нулю значения признака (10) соответствуют отсчётам, находящимся на относительно гладких участках сигнала, для которых «усредняющая» интерполяция (7) работает точнее за счёт усреднения неизбежно присутствующих шумов.

Оптимизация адаптивного интерполятора по параметрам  $\alpha$ ,  $\beta$  производится отдельно [15] для каждой реализации сигнала (точнее, отдельно для каждого иерархического уровня сигнала).

### 5. Экспериментальное исследование адаптивного интерполятора

Предложенная гибридная интерполяционная схема, включающая межкомпонентный аппроксиматор и внутрикомпонентный адаптивный интерполятор, была реализована программно и встроена в иерархический метода компрессии. На базе этой программной реализации было проведено исследование эффективности предложенного интерполятора на тестовых многомерных данных гиперспектрометра AVIRIS [18] (см. рисунок 1), «развернутых» специфичным для бортовой компрессии образом (см. пример на рисунке 2).

В качестве меры эффективности адаптивного интерполятора использовался выигрыш  $G$  в размере архива (в %), который обеспечивался заменой усредняющего интерполятора (7) на адаптивный интерполятор:

$$G = 100\% \cdot (S_{new} - S_{base}) / S_{base}, \quad (11)$$

где  $S_{base}$ ,  $S_{new}$  – размеры архива при использовании усредняющего и адаптивного интерполяторов соответственно. Строилась зависимость этой величины от квадратичной погрешности  $\varepsilon^2$ , вносимой при компрессии. Типичные результаты показаны в таблице 1. Нетрудно видеть, что адаптивный интерполятор обеспечивает заметный выигрыш у усредняющего интерполятора.

**Таблица 1.** Выигрыш адаптивного интерполятора у усредняющего интерполятора.

$\varepsilon^2$	0.00	0.66	1.99	9.81	34.82	126.82	271.50
$G, \%$	13.09	17.95	20.98	24.95	25.05	22.72	19.67

### 6. Заключение

Рассмотрена компрессия многомерных сигналов, которые описываются гиперкубом, повёрнутым специфическим для бортовой обработки образом. Для компрессии такого гиперкуба использован иерархический метод компрессии. В качестве одного из этапов этого метода использован адаптивный алгоритм интерполяции, основанный на автоматическом переключении между различными интерполирующими функциями в каждой точке сигнала. Проведены вычислительные эксперименты на реальных многомерных сигналах, которые подтвердили, что применение адаптивного интерполятора позволяет повысить коэффициент компрессии «повёрнутого» гиперкуба, соответствующего гиперспектральным многомерным сигналам.

### 7. Литература

- [1] Chang, C. Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis / C. Chang. – NJ: A John Wiley & Sons, 2013. – 1164 p.
- [2] Даджион, Д. Цифровая обработка многомерных сигналов / Д. Даджион, Р. Мерсеро. – М: Мир, 1988. – 487 с.

- [3] Schowengerdt, R. Remote sensing: models and methods for image processing / R. Schowengerdt. – Academic Press, 2007. – 558 p.
- [4] Woods, J. Multidimensional Signal, Image, and Video Processing and Coding / J. Woods. – Academic Press, 2011. – 616 p.
- [5] Rehman, M. Image compression: A survey / M. Rehman, M. Sharif, M. Raza // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014. – Vol. 7(4). – P. 656-672.
- [6] Bookstein, A. Compression, information theory and grammars: a unified approach / A. Bookstein, S.T. Klein // ACM Trans. Inf. Systems. – 1990. – Vol. 8. – P. 27-49.
- [7] Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
- [8] Woods, E. Digital Image Processing / E. Woods, R. Gonzalez. – Prentice Hall, 2007. – 976 p.
- [9] Fouad, M.M. A Lossless Image Compression Using Integer Wavelet Transform with a Simplified Median-edge Detector Algorithm / M.M. Fouad // International Journal of Engineering & Technology (IJET-IJENS). – 2015. – Vol. 15(04), – P. 155604-7373.
- [10] Plonka, G. Fast and numerically stable algorithms for discrete cosine transforms / G. Plonka, M. Tasche // Linear Algebra and its Applications. – 2005. – Vol. 394(1). – P. 309-345.
- [11] Muruganandham, A. Adaptive fractal image compression using PSO. / A. Muruganandham, R.W. Banu // Procedia Computer Science. – 2010. – Vol. 2. – P. 338-344.
- [12] Сергеев, В.В. Информационная технология компрессии изображений в системах оперативного дистанционного зондирования / М.В. Гашников, Н.И. Глумов, В.В. Сергеев // Известия Самарского научного центра РАН, 1999. – Т. 1. – С. 99-107.
- [13] 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.
- [14] AVIRIS Data – Ordering Free AVIRIS Standard Data Products. Jet Propulsion Laboratory [Electronic resource]. – Access mode: [http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free\\_data.html](http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html) (01.11.2018).
- [15] 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.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-01-00667, 16-29-09494.

# Adaptive interpolation of multidimensional signals for compression on board an aircraft

N.I. Glumov<sup>1,2</sup>, M.V. Gashnikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** The compression of multidimensional signals on board an aircraft is considered. The data of such signals are described by the hypercube, which is rotated in a special way. To compress this hypercube, a hierarchical compression method is used. An adaptive interpolation algorithm is used as one of the stages of this method. The adaptive algorithm automatically switches between different interpolation functions at each point of the signal. Computational experiments on nature multidimensional signals were carried out. Computational experiments have confirmed that the use of the adaptive interpolator allows increasing the compression ratio of the “rotated” hypercube corresponding to hyperspectral multidimensional signals.