

文章编号 1004-924X(2006)03-0478-07

# 一种超光谱图像分层压缩方法

张雷<sup>1</sup>, 黄廉卿<sup>2</sup>, 赵唯佳<sup>3</sup>

(1. 沈阳航空工业学院 电子工程系, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**根据超光谱图像有很强谱间相关性的成像特点,设计了一种预测算法结合变换编码算法的图像分层压缩方法。采用几个相邻波段图像共享同一有损图像作为预测图像,克服了预测算法对传输误差的敏感性。预测图像是通过将原始图像进行局部熵为代价函数的二叉树分割后,再经小波变换得到的。用各个原始图像减去共享预测图像来去除谱间相关性,并得到相应残差图像,再对残差图像采用局部离散余弦基变换方法去除空间相关性,实现近无损压缩。研究结果表明,各波段峰值信噪比(PSNR)为40dB左右时,压缩比(CR)高于7.2,分层压缩方法具有很好的压缩效果。

**关键词:**信息光学;图像压缩;超光谱图像;图像分层

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A

## A multi-layered decomposition of hyper-spectral image compression

ZHANG Lei<sup>1</sup>, HUANG Lian-qing<sup>2</sup>, ZHAO Wei-jia<sup>3</sup>

(1. Department of Electron Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3. School of Photoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on the strong spectral correlation of a hyper-spectral image, a multi-layered decomposition compression method combined prediction algorithm with transform encoding algorithm was proposed. Taking the same loss image shared for several neighbor bands as the prediction image, the sensitivity of transmission error for prediction algorithm was improved. The loss image was created by using quad-tree partitioning of original image and compressing the input image with a wavelet basis. After calculating the residual image between the original and loss image data, the rid of the spectral correlation was obtained, and a local cosine transform was used for removing the spatial correlation of residual image. The experimental results indicate that the compression ratio (CR) of the image is higher than 7.2 when the Peak Signal Noise Ratio (PSNR) range is about 50 dB, which shows that the algorithm is efficient.

**Key words:** information optics; image compression; hyper-spectral image; multi-layered decomposition

收稿日期:2005-11-22; 修订日期:2006-04-12.

## 1 引言

成像光谱图像根据光谱通道数和光谱分辨率来划分多光谱、超光谱和超高光谱图像<sup>[1]</sup>,超光谱图像的光谱通道数为100~200,光谱分辨率10~100 nm。可以看出超光谱图像是一种三维立体图像,即在普通二维图像的基础上又多了一维光谱信息,因此超光谱图像数据存在空间相关和谱间相关,遥感图像信息十分宝贵,应尽可能采用无损压缩或近似无损压缩<sup>[2]</sup>。

传统的超光谱压缩方法是K-L(卡胡南-列夫)变换或DCT(离散余弦变换)及它们的改进方案<sup>[3]</sup>。随着小波技术的发展,Tseng<sup>[4]</sup>等提出三维小波变换(3D-DWT)结合分级树集合划分(SPIHT)的3D-SPIHT高效压缩方法,然而对于星载或机载实时性要求较高的压缩算法,采用3D-DWT变换时,对光谱维数据有两点要求,首先,为减小系统时延和所需存储量,光谱维一次选取数据的数量不是很多,这造成输入数据序列非常短,从而要求小波滤波器的阶数不能太高;其次,光谱维数据序列的每一点均来自原始图像上对应点,它们地位等同,所以在一维小波变换时要尽量避免边界点失真。因此选择在谱间采用预测编码技术,去除光谱维的谱间相关<sup>[5-6]</sup>,预测算法具有算法简单,易于硬件实现、无损或近无损压缩比高的优点,主要缺点是对传输误差敏感,单个比特的误码会造成连续波段图像失真。在实际预测编码系统中往往周期性地传输预测图像原始数据,这样会大幅降低图像的压缩比,本文借鉴Meyer图像分层压缩方法<sup>[7]</sup>,根据超光谱图像的成像特点,采用预测编码结合变换编码去除谱间相关性和空间相关性,有效地压缩超光谱遥感图像,且并具有较强的抗误码力。

## 2 图像分层

Meyer图像分层压缩方法是在D. Marpe的有损加冗余(lossy-plus-residual)压缩方法<sup>[8]</sup>的基础上的进一步改进<sup>[9]</sup>。先对原始图像进行小波变换后,大压缩比的有损压缩,并对有损压缩进行重建获得的图像称为有损图像;原始图像减去有损图像得到冗余图像称为残差图像。然后对残差图

像进行局部余弦基变换、编码实现压缩的分层压缩方法。

图像分层是假设图像由有损与残差图像叠加构成,有损图像主要表现为图像整体变化性,例如图像的凸凹部分、边缘及分段光滑部分。残差图像是被图像边缘包围的纹理,具有周期变化性。图像分层实质上是通过两种不同的基函数变换实现的。

小波变换是一种全局变换,在时域和频域同时有良好的定位能力,有利于表现图像的整体,因此预测图像采用小波基变换的压缩方法。对于残差图像的周期信号,傅式变换效果要好于小波变换<sup>[5]</sup>,因此,残差图像采用局部余弦基变换的压缩方法。

## 3 超光谱遥感图像的分层压缩方法

根据超光谱遥感图像存在空间相关和谱间相关的特点,将超光谱遥感图像与Meyer的图像分层方法相结合,仍将图像分为有损图像和残差图像,根据图像分层理论,有损图像表现了图像的整体结构,残差图像表现图像局部纹理特征。本文选取超光谱图像Canal,如图1。



(1.1)843.8 nm



(1.2)853.4 nm

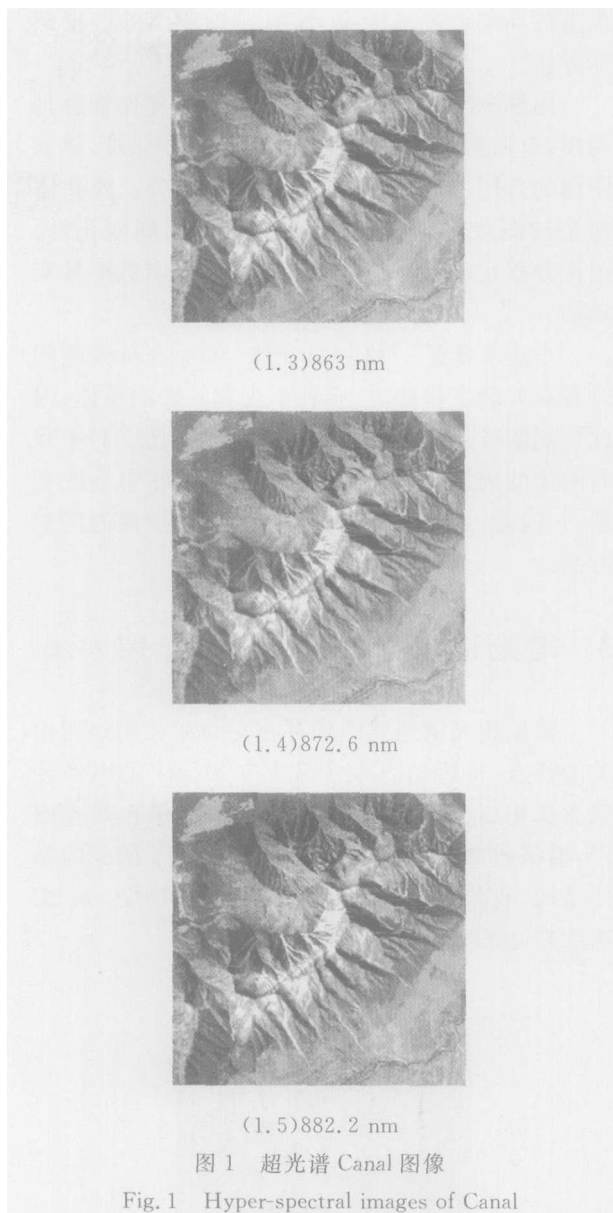


图 1.1 ~ 1.5 分别为第 50(波长 843.8 nm) ~ 54(波长 882.2 nm) 相邻波段图像。可以看出以上图像具有几乎完全相同的几何结构,同时相邻波段的图像同一位置像素灰度值变化很小,肉眼几乎无法识别。因此考虑选择有损图像作为预测图像,描述基本结构特征,减小相邻图像谱间结构相关性。

### 3.1 预测图像的构造与压缩

根据超光谱遥感图像的谱间相关性特点,构造预测图像基本思想是:在超光谱遥感图像相邻几个波段图像的相同区域内,基于局部熵为代价函数的四叉树分割方式<sup>[10-11]</sup>应基本相同。用四叉树分割方式构造相邻波段图像的预测图像,来减

小谱间相关性。基于该思想提出相邻五个波段共享一种四叉树分割预测图像方法。具体步骤如下:

首先选择相邻五个波段图像中的中间波段图像,然后对该图像进行从最大块(200 × 200)到最小块(4 × 4)的四叉树分割,选取局部熵作为代价函数。如果某块局部熵大于该块四叉树分割的四块局部熵之和,则继续分割,直到分割为最小块;接着将分割成大小不等的块进行小波变换,分别用不同的量化模板对各块量化并编码;最后对有损压缩进行重建得到的图像就是有损的预测图像。

选择五个相邻波段图像共享同一预测图像,这是因为超光谱图像相邻五个波段之间的相关系数不会明显下降,压缩系统时延和所需存储量能够接受,如果选择相邻波段图像少,会加大运算量,同时构造的预测图像增加。这样通过周期性地选择图像可以阻止误码向其它波段图像传递,另外对预测图像压缩可以提高图像的压缩比,克服了以往传输预测图像原始数据的缺点。

本文在构造预测图像时先采用四叉树分割后小波变换,而不是 Meyer 构造有损图像时直接采用小波变换方法,这是因为采用四叉树分割进行小波变换能使预测图像保持一定分辨率,例如通过对四叉树的枝剪可以描述图像某一位置上不同分辨率下的细节信息。对于一般遥感图像而言,结构、轮廓通常是无序的,对它们做四叉树分割后可以比较精确地定位图像的结构轮廓,更能有效地减小相邻图像谱间结构相关性。

选取 Shannon 局部熵作为代价函数。设  $z = h(x, y)$  为图像二维方向上的点  $(x, y)$  处的灰度值,对于一个  $N \times N$  的区域,定义  $H_{n \times n}$  为该区域的熵,即

$$H_n = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{i,j} \log p_{i,j}, \quad (1)$$

式中  $p_{i,j}$  为均方误差条件下  $h(i, j)$  的概率分布:

$$p_{i,j} = \frac{[h(i, j) - k]^2}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N [h(x, y) - k]^2}, \quad (2)$$

其中  $k$  为均值:

$$k = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N h(x, y)}{N \times N}, \quad (3)$$

如果  $N \times N$  是图像的一个局部区域,则称

$H_{n \times n}$ 为局部熵。局部熵反映了图像变化的激烈程度,通过  $N \times N$  区域局部熵  $H_{n \times n}$ 与分割的四个  $(\frac{N}{2} \times \frac{N}{2})$  区域局部熵  $H_{\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}}$ 之和比较,如果局部熵  $H_{n \times n}$ 大于四个局部熵  $H_{\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}}$ 之和进一步分割,可以在一个区域内把变化较为剧烈的目标分割出来,另外,局部熵是由二叉树分割块内多点数据的统计,对于单点噪声不敏感,所以五幅原始图像会有相同的二叉树分割方式,有利于更好地提取出图像结构信息。

预测图像描述原始图像结构特征,是一种粗糙的逼近,可以进行大压缩比有损压缩,预测图像实现时选用阶次为 4 的 Daubechies 小波基,按照分割大小不同的块分别进行三次小波变换,然后进行游程编码,得到大压缩比的有损压缩。

用图(1.3)构造相邻波段图像(1.1)、(1.2)、(1.4)、(1.5)的预测图像,如图 2 所示,由图可见预测图像描述了相邻波段原始图像的基本结构。

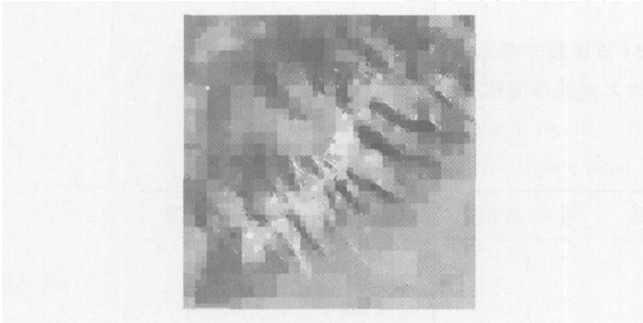
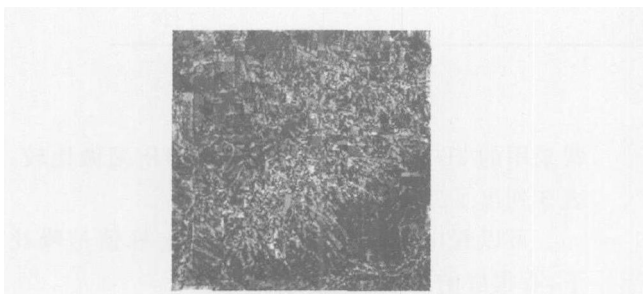


图 2 预测图像

Fig.2 Prediction image

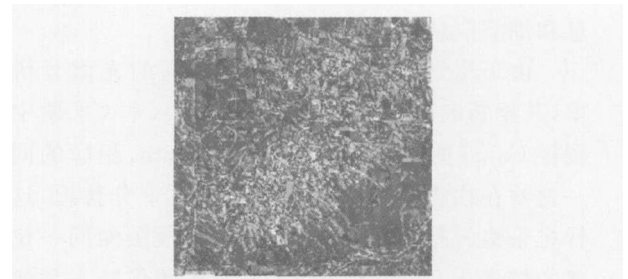
### 3.2 残差图像的构造与压缩

残差图像是用原始图像减去预测图像得到的,相应的五个相邻波段图像减去预测图像分别得到五个残差图像,如图 3 所示。



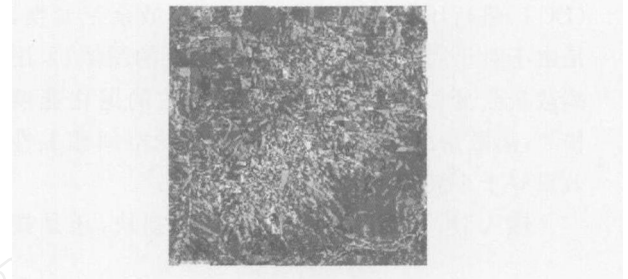
(3.1) 第 50 波段残差图像

(3.1) Residual image of 50<sup>th</sup> band



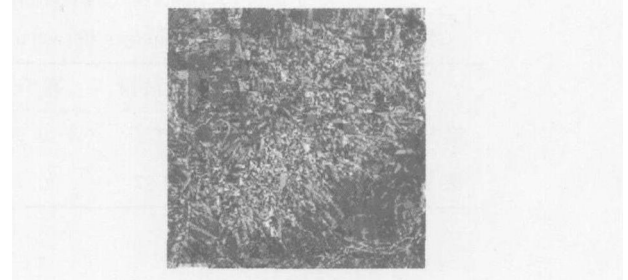
(3.2) 第 51 波段残差图像

(3.2) Residual image of 51<sup>th</sup> band



(3.3) 第 52 波段残差图像

(3.3) Residual image of 52<sup>th</sup> band



(3.4) 第 53 波段残差图像

(3.4) Residual image of 53<sup>th</sup> band



(3.5) 第 54 波段残差图像

(3.5) Residual image of 54<sup>th</sup> band

图 3 残差图像

Fig.3 Residual image.

由图可见各个残差图像包含了大量的纹理信息和细节信息。

由于超光谱成像光谱仪有很高的光谱分辨率,其相邻波段的中心波长相差很小,本文实验中图像 Canal 的光谱分辨率仅为 10 nm,相应的同一地物在相邻波段的光反射强度也十分接近,这样在采集的超光谱图像中,相邻波段图像同一位置的像素灰度值相差很小,所以各图像减去预测图像后,都能有效降低残差图像信息熵,各个残差图像之间的谱间统计相关性同时减少。

对各个残差图像进行离散余弦变换方式(DCT)进行压缩。变换方法选取离散余弦变换,是由于对于周期信号,例如纹理丰富的图像,采用离散余弦变换的系数要比小波系数的退化速度快<sup>[8]</sup>,离散余弦变换去除残差图像的空间相关性效果好于小波变换。

输入 DCT 变换的残差图像分割块,还是按

照构造预测图像时二叉树分割成大小不等的块,这是由于构造预测图像时量化尺度不同,残差图像引入了预测图像的量化噪声,在残差图像中各块分割连接处有边界,如果重新分块,在此边界处 DCT 变换的系数较大,不利于压缩。

图像进行局部离散余弦变换后,为尽量减小压缩带来的损失,对局部余弦变换系数的量化只作取整运算,编码采用算术编码方式。

## 4 实验结果

根据所提出的新的压缩方法,分别将第 52 波段与第 50~54 波段超光谱原始图像之间的谱间相关系数、及残差图像之间的谱间相关系数进行计算,如表 1 所示。第 100~104 波段的原图像之间和残差图像之间的相关系数计算结果如表 2 所示。

表 1 第 52 波段分别与第 50~54 波段超光谱原始图像之间的谱间相关系数及残差图像之间的谱间相关系数

Tab. 1 Spectral correlation coefficients of original images and residual images between 52<sup>th</sup> band and 50<sup>th</sup>~54<sup>th</sup> bands

相关系数	第 50 波段	第 51 波段	第 52 波段	第 53 波段	第 54 波段
第 52 波段原始图像	0.9975	0.9988	1	0.9995	0.9995
第 52 波段残差图像	0.7567	0.7768	1	0.7528	0.7771

表 2 第 100~104 波段的原图像之间和残差图像之间的相关系数

Tab. 2 Spectral correlation coefficients of original images and residual images between 102<sup>th</sup> band and 100<sup>th</sup>~104<sup>th</sup> bands

相关系数	第 100 波段	第 101 波段	第 102 波段	第 103 波段	第 104 波段
第 102 波段原始图像	0.9966	0.9994	1	0.9992	0.9973
第 102 波段残差图像	0.7012	0.7583	1	0.7718	0.7236

从表 1、表 2 可以看出,相邻波段残差图像谱间相关性有效地降低了。

分别对超光谱 Canal 图像的 50~54 波段和 100~104 波段数据进行分层压缩和解压缩,与通

常采用的 3D-SPIHT 进行压缩和解压缩做比较,表 3 列出了二者性能的统计参数。

可以看出采用分层压缩在一定峰值信噪比下,有很好的压缩结果。

表 3 压缩图像的峰值信噪比(PSNR)、压缩比(CR)

Tab.3 Peak signal noise ratios and compression ratios of compressed images

图像名称	压缩图像峰值信噪比(PSNR)		压缩比(CR)		
	分层压缩(PSNR)	3D-SPIHT(PSNR)	残差图像(CR)	分层压缩(CR)	3D-SPIHT(CR)
50 <sup>th</sup> band	45.34 dB	41.14 dB	7.28		
51 <sup>th</sup> band	44.57 dB	47.04 dB	8.15		
52 <sup>th</sup> band	49.18 dB	46.47 dB	7.35	8.10	7.31
53 <sup>th</sup> band	43.84 dB	40.44 dB	7.62		
54 <sup>th</sup> band	38.77 dB	49.95 dB	8.77		
100 <sup>th</sup> band	44.11 dB	41.55 dB	7.54		
101 <sup>th</sup> band	41.17 dB	42.57 dB	8.21		
102 <sup>th</sup> band	41.94 dB	43.36 dB	7.66	7.83	7.11
103 <sup>th</sup> band	36.62 dB	42.64 dB	7.56		
104 <sup>th</sup> band	36.02 dB	40.87 dB	6.33		

## 5 结 论

根据超光谱遥感图像特点,考虑到压缩系统实时性要求,结合图像分层压缩的方法,设计了一种把几个相邻波段图像分为共享有损图像和残差图像的分层方法,共享有损图像作为预测图像,描述了原始图像基本结构特征,用原始图像减去预测图像来减小谱间相关系数,得到的各个残差图像包含了大量的纹理和细节信息。这样既克服了

预测编码对传输误差的敏感性,又能有效地压缩图像。本文提出的图像分层算法采用预测编码与变换编码相结合的方式,实验结果表明,通过对预测图像和残差图像的分层压缩,在一定峰值信噪比下,有很好的压缩效果。随着超光谱图像压缩研究的深入进行,多种方法结合使用的趋势越来越明显,很少有用单纯一种方法完成整个压缩过程的。在以后的研究中,应注意借鉴吸收各种方法的长处。

## 参考文献:

- [1] 肖功海,舒嵘.显微高光谱成像系统的设计[J].光学精密工程,2004,10(2):188-192.  
XIAO G J, SHU R. Design of microscopic hyperspectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004,10(2):188-192. (in Chinese)
- [2] 刘恒殊,彭风华.超光谱遥感图像特征分析[J].光学精密工程,2001,10(1):94-97.  
LIU H SH, PENG F H. Feature analysis of hyperspectral images[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001,10(1):94-97. (in Chinese)
- [3] HOFFMAN R N, JOHNSON D W. Application of EOFs to multispectral imagery: data compression and noise detection for AVIRIS[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, (32):25-34.
- [4] TSENG Y H. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet transformation[J]. *Personal Communication*, June, 2002.
- [5] FRY T W. *Hyperspectral image compression on reconfigurable platforms*[M]. Master Thesis, Electrical Engineering, University of Washington, 2001.
- [6] KIM Y, PEARLMAN W A. *Lossless volumetric medical image compression*[D], Ph.D Thesis, Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, 2001.
- [7] MEYER F G, AVERBUCH A Z. Multi-layered image representation: application to image compression[C]. *IEEE Trans. Image Processing*, May 2002.
- [8] MARPE D. A two-layered wavelet based algorithm for efficient lossless and lossy image compression[J]. *IEEE*

*Trans. Circ. & Sys. for Video Tech*, 2000, 10:5-15.

- [9] MEYER F G. Image compression with adaptive local cosines : A comparative study[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, 5:792-800.
- [10] 倪林. 多波段遥感图像的快速分形编码[J]. 电子学报 2002, 7(30) :1079-1082.  
NIL. Fast fractal coding of multispectral remote sensing images[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 7(30) :1079-1082. (in Chinese)
- [11] 尤克非, 明德烈. 基于局部熵和四叉树结构的地形简化算法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(10) :1083-1088.  
YOU K F, MING D L. Real-time terrain simplification algorithm based on local entropy and quadtree structure [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(10) :1083-1088. (in Chinese)

作者简介:张 雷(1972 - ),男,吉林白山人,博士,研究方向为超光谱图像压缩算法及实时图像处理硬件实现。Email: zhangl\_72@yahoo.com.cn

www.cnki.net