

文章编号 1004-924X(2009)11-2864-07

最佳递归双向预测的高光谱图像无损压缩

孙 蕾, 谷德峰, 罗建书

(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为了解决海量高光谱遥感图像对传输和存储带来的压力,提出一种基于最佳递归双向预测的高光谱图像无损压缩算法。首先根据高光谱图像各波段的谱间相关系数,选择相应的压缩方式。谱间相关系数 <0.9 的波段使用 bzip2 模式进行压缩。谱间相关系数 >0.9 的波段,则对参考波段进行单波段最佳前向预测,非参考波段采用最佳递归双向预测,并对预测残差采用 JPEG-LS 模式压缩。实验结果表明,对 AVIRIS 高光谱图像进行压缩,该算法的平均压缩比达到 3.217,优于其他无损压缩算法 0.09~1.374。该方法运算速度快,压缩效果好,很有应用前景。

关键词:高光谱图像;无损压缩;双向预测

中图分类号:TP751 文献标识码:A

Hyperspectral image lossless compression based on optimal recursive bidirectional prediction

SUN Lei, GU De-feng, LUO Jian-shu

(College of Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the transmission and storage problems resulting from massive hyperspectral remote sensing data, a lossless compression algorithm based on the optimal recursive bidirectional prediction for hyperspectral images is presented. Different compression models for each band are chosen according to their spectral correlation factors. If the spectral correlation factor is less than 0.9, the bzip2 compression model is chosen. Otherwise, the single band optimal previous prediction is performed on the reference band and the optimal recursive bidirectional prediction is performed on the non-reference band. Furthermore, the residual images are coded by JPEG-LS. The algorithms designed in this paper has been applied to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data, the result shows that the average compression ratio is 3.217, which is 0.09–1.374 higher than those from other lossless compression algorithms. This method is fast and works efficiently, so it can be widely used in practice.

Key words: hyperspectral image; lossless compression; bidirection prediction

1 引 言

高光谱图像通过光谱成像仪 (Imaging Spectrometer) 在航天或航空平台上以纳米级的波段分辨率对目标进行光谱成像获得。作为一种新的光谱成像技术,它把传统的二维成像遥感技术和光谱技术有机的结合在一起,在用成像系统获得被测物空间信息的同时,通过光谱仪系统把被测物的辐射分解成不同波长的谱辐射,能在一个光谱区间内获得每个像素几十甚至几百个连续的窄波段信息,因此它在农林业,环境监测,采矿业等各个方面具有广泛的应用前景^[1]。但是随着传感器空间和谱间分辨率的提高,高光谱图像数据量急剧增长,给传输和存储带来了巨大的压力,制约了它的应用,所以高光谱图像压缩技术成为一个亟须解决的问题。由于遥感信息非常宝贵,同时要求对信息恢复的准确程度较高,因而人们对于无损压缩给予更高的关注。

目前的高光谱图像无损压缩方法大致可以分为 3 类:预测,变换^[2-3],矢量量化。预测的方法是三种算法中运算量最小的,在有损压缩中预测编码的效率相对其他算法要低一些。但是在无损编码中,预测的方法原理简单,方法实现比较容易,特别是针对高光谱图像谱间相关性大的特点,预测能够有效地去除谱间冗余度。DCT,小波变换和 KL 变换都是图像压缩中常用的方法,但是对于高光谱图像无损压缩而言,变换的方法所花的时间较多,而且编码效率提高有限。矢量量化能大幅提升压缩效果,但是它的编码方法复杂,计算量随矢量维数的增加呈指数增长,为其推广到实际应用带来了一定的困难。因此,基于预测的压缩方法在高光谱无损压缩领域得到了广泛的应用。Mielikainen J 和 Toivanen P^[4]提出一种与聚类相结合的多线性回归预测压缩方法。Zhang J 和 Liu G^[5]提出基于波段重排和误差反馈预测的压缩方法。Miguel A C 等^[6]提出一种以压缩比

为权重的波段排序预测算法。张晓玲等^[7]提出基于神经网络的三维自适应预测压缩方法。孙蕾等^[8]提出一种基于多波段谱间预测的高光谱图像无损压缩方案。孙蕾等^[9]提出基于谱间预测和码流预分配的高光谱图像压缩算法。这些算法均在高光谱图像压缩方面取得了较好的效果。但是以上这些方法都是通过被预测波段以前的波段进行预测的,是单向预测方法。为了充分利用高光谱图像前后波段强烈的相关性,Rao A 和 Bhargava S^[10],陈雨时等^[11]均采用了双向预测的方法,Zhang Y 等^[12]和 Chen Y^[13]等采用了双向递归预测的方法进行高光谱图像压缩,他们算法是用于有损压缩的,并且取得了很好的压缩效果。因此为了克服单向预测无法充分利用高光谱图像前后波段强烈的相关性的缺点,本文将递归双向预测的方法引入到高光谱图像无损压缩算法。同样作为预测的方法,本文与^[8-9]的区别主要在于这两篇文献采用的是单向预测,而本文利用的是双向预测,该预测方式能够更好地利用相邻波段间的相关性,去除高光谱图像的谱间冗余,达到更好的压缩效果。

本文首先分析了高光谱图像谱间相关性,提出根据谱间相关系数选择压缩模式的编码系统框架。谱间相关系数 <0.9 的波段无须采用谱间预测,直接使用 bzip2 模式进行压缩。谱间相关系数大于等于 0.9 的波段,首先对参考波段进行单波段前向预测,然后对非参考波段采用双向递归预测,预测残差采用 JPEG-LS 进行压缩编码。用该算法对 AVIRIS 高光谱图像进行压缩,和现有的无损压缩算法比较表明,该算法具有很高的压缩效率。

2 光谱分析

记波段 i 的图像为 $f_i(x, y)$, 波段 $i+t$ 的图像为 $f_{i+t}(x, y)$ 。定义波段 i 与波段 $i+t$ 的互相关系数为:

$$\rho_i(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x, y) - u_i][f_{i+t}(x, y) - u_{i+t}]}{\sqrt{\left(\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_i(x, y) - u_i]^2\right) \left(\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_{i+t}(x, y) - u_{i+t}]^2\right)}}$$

其中, $u_i = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f_i(x, y)$, $u_{i+t} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f_{i+t}(x, y)$,

第 i 波段的谱间相关系数定义为第 i 波段图像与第 $i+1$ 波段图像的互相关系数。

图 1 为 AVIRIS 数据 Jasper Ridge 所有波段的谱间相关系数。可以看出大多数波段的谱间相关系数是 >0.9 的, 因而采用 DPCM 的谱间去相关方法可以获得高效压缩率。将 DPCM 方法运用于压缩的主要思想是: 差分信号 Δ_n 是离散输入信号 x_n 和预测器输出的估算值 \hat{x}_n 之差, 即 $\Delta_n = x_n - \hat{x}_n$, 如果 $|\Delta_n|$ 的值远远小于 $|x_n|$, Δ_n 就可以用较少的比特数表示, 从而达到压缩的效果。在此将用于预测的波段称为参考波段, 被预测的波段称为非参考波段。

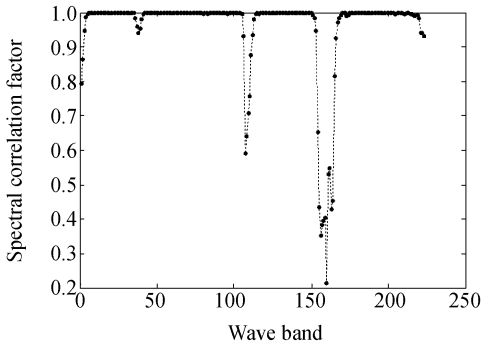


图 1 Jasper Ridge 的谱间相关系数

Fig. 1 Spectral correlation factor of Jasper Ridge

从图 1 还可以看到高光谱图像还存在少数波段, 他们的谱间相关系数非常小。不仅如此, 这些波段自身几乎被噪声控制, 如图 2 所示, Jasper Ridge 第 160 波段因为噪声影响, 几乎无法辨别地物形态。这样的波段无论是作为参考波段去预

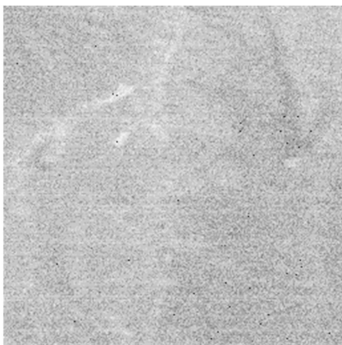


图 2 Jasper Ridge 第 160 波段局部图

Fig. 2 Part of Jasper Ridge in the 160th band

测别的波段, 或者被别的波段预测, 效果都非常差的, 而且还增加了计算量, 因此应该把它们分离出来单独编码。从经验得出, 如果谱间相关系数小于 0.9, 就不需要再采用预测的方法去除谱间相关了。这样的波段大约占有所有波段的 12%。

本文根据谱间相关系数大小, 选择两种模式对高光谱图像进行压缩。如果波段相关系数 < 0.9 , 选择 bzip2 模式进行压缩。否则, 对参考波段采用单波段最佳前向预测, 对非参考波段采用最佳递归双向预测, 预测残差采用 JPEG_LS 模式进行压缩。本文提出的算法的流程图如图 3 所示。其中, 递归双向预测模型将在第 3 节详细介绍, 最佳线性预测系数的求解将在第 4 节详细介绍。Bzip2 和 JPEG_LS 参见文献[14-15]。

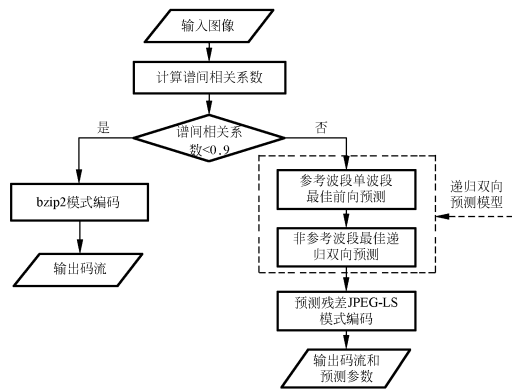


图 3 高光谱图像无损压缩系统

Fig. 3 Hyperspectral image lossless compression system

3 递归双向预测模型

双向预测首先在视频压缩中提出, H. 262 (MPEG-2) 给出了双向预测 I 帧, P 帧, B 帧的定义。本文基于高光谱图像压缩提出递归双向预测的 I 波段, P 波段及 B 波段定义, 建立了递归双向预测模型。只包含空间域编码的波段称为 I 波段, 对 I 波段或 P 波段前向预测得到的波段称为 P 波段, 对 I 波段, P 波段或 B 波段双向预测得到的波段称为 B 波段。递归双向预测模型包括单波段前向预测和递归双向预测两部分。其结构如图 4 所示。

递归双向预测和双向预测的本质区别在于: 递归双向预测的 B 波段可以由对 I 波段, P 波段

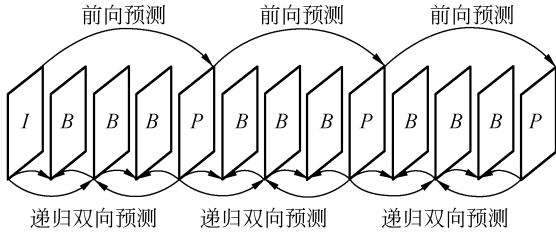


图 4 递归双向预测模型

Fig. 4 Model of recursive bidirection prediction

或 B 波段双向预测,而双向预测的 B 波段仅由对 I 波段或 P 波段双向预测得到。图 5 和图 6 是 5 波段的高光谱图像进行双向预测和递归双向预测的示意图。 f_1 和 f_5 为 P 波段, f_2, f_3, f_4 为 B 波段。在双向预测中, f_2, f_3, f_4 是由 f_1 和 f_5 预测的。在递归双向预测中, f_3 先由 f_1 和 f_5 预测出来,而后 f_2 由 f_1 和 f_3 预测, f_4 由 f_3 和 f_5 预测。以 f_2 为例, f_2 在双向预测中由 f_1 和 f_5 预测,在递归双向预测中由 f_1 和 f_3 预测, f_3 和 f_5 相比, f_3 更加靠近被预测波段 f_2 , 所以将取得更好的预测效果。预测得越精确,预测残差就越小,压缩比就会越高。

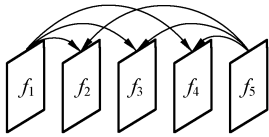


图 5 双向预测

Fig. 5 Bidirection prediction

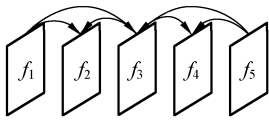


图 6 递归双向预测

Fig. 6 Recursive bidirection prediction

4 最佳线性预测

本节给出基于均方误差最小意义下的线性预测系数求解方法。

4.1 求解单波段前向预测系数

设 f 为参考波段图像, g 为被预测波段图像。为了使预测残差值尽可能的小,考虑二阶线性最

优预测器:

$$\hat{g}(i, j) = a \cdot f(i, j) + b, \quad (1)$$

其中, $f(i, j)$ 表示图像 f 第 i 行 j 列的像素灰度值, $\hat{g}(i, j)$ 表示用图像 f 预测图像 g 的第 i 行 j 列像素灰度值。 a, b 为用图像 f 预测图像 g 的灰度值的预测系数。

设图像的大小为 $M \times N, M$ 表示图像的长, N 为宽。则整幅图像的预测误差平方均值为:

$$\epsilon^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (g(i, j) - a \cdot f(i, j) - b)^2. \quad (2)$$

要使预测均方差达到最小,则必须满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial \epsilon^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial \epsilon^2}{\partial b} = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

最后解出 a 和 b 的值:

$$\begin{cases} a = \frac{r(f, g) - u(f)u(g)}{r(f, f) - u^2(f)} \\ b = u(g) - \frac{r(f, g) - u(f)u(g)}{r(f, f) - u^2(f)} u(f) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } r(f, g) &= \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j)g(i, j), u(f) \\ &= \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j). \end{aligned}$$

4.2 求解递归双向预测系数

式(1)可以表示成 $\hat{g}(i, j) = a \cdot f(i, j) + b \cdot h(i, j)$, 其中, $h(i, j) = 1, i = 0, \dots, M-1, j = 0, \dots, N-1$ 。因此,采用一个波段的图像做线性预测相当于引进了另一个像素值全为 1 波段作为预测波段。充分考虑被预测波段与相邻的前后波段都有相关性,引入双向预测:设 f_1, f_2 为参考波段图像, g 为被预测波段图像。为了使预测残差值尽可能的小,考虑二阶线性最优预测器:

$$\hat{g}(i, j) = a \cdot f_1(i, j) + b \cdot f_2(i, j), \quad (5)$$

其中, $f_k(i, j)$ 表示图像 f_k 第 i 行 j 列的像素灰度值, $k = 1, 2, \hat{g}(i, j)$ 表示用图像 f 预测图像 g 的第 i 行 j 列像素灰度值。 a, b 为用图像 f_1, f_2 预测图像 g 的灰度值的预测系数。

设图像的大小为 $M \times N, M$ 表示图像的长, N 为宽。则整幅图像的预测误差平方均值为:

$$\epsilon^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (g(i, j) - a \cdot f_1(i, j) - b \cdot f_2(i, j))^2. \quad (6)$$

要使预测均方差达到最小,则必须满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial \epsilon^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial \epsilon^2}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

最后解出 a 和 b 的值:

$$\begin{cases} a = \frac{r(g, f_2)r(f_1, f_2) - r(g, f_1)r(f_2, f_2)}{r(f_1, f_2)r(f_1, f_2) - r(f_2, f_2)r(f_1, f_1)} \\ b = \frac{r(g, f_1)r(f_1, f_2) - r(g, f_2)r(f_1, f_1)}{r(f_1, f_2)r(f_1, f_2) - r(f_2, f_2)r(f_1, f_1)} \end{cases}, (8)$$

$$\text{其中, } r(f, g) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} f(i, j)g(i, j)。$$

5 试验结果

为了和其他文献编码结果进行比较,本文选用了 JPL 实验室的 AVIRIS 高光谱遥感图像序列 Jasper Ridge, Lunar Lake 和 Cuprite。每个图像序列被分成若干块,除了最后一块可能少于 512 行,其他块的大小均为 $614 \times 512 \times 224$ (列 \times 行 \times 波段),每个像素用 16 bit 存储。三幅图像第一块图像第 128 波段的图像和解压缩后的图像如图 7 所示。

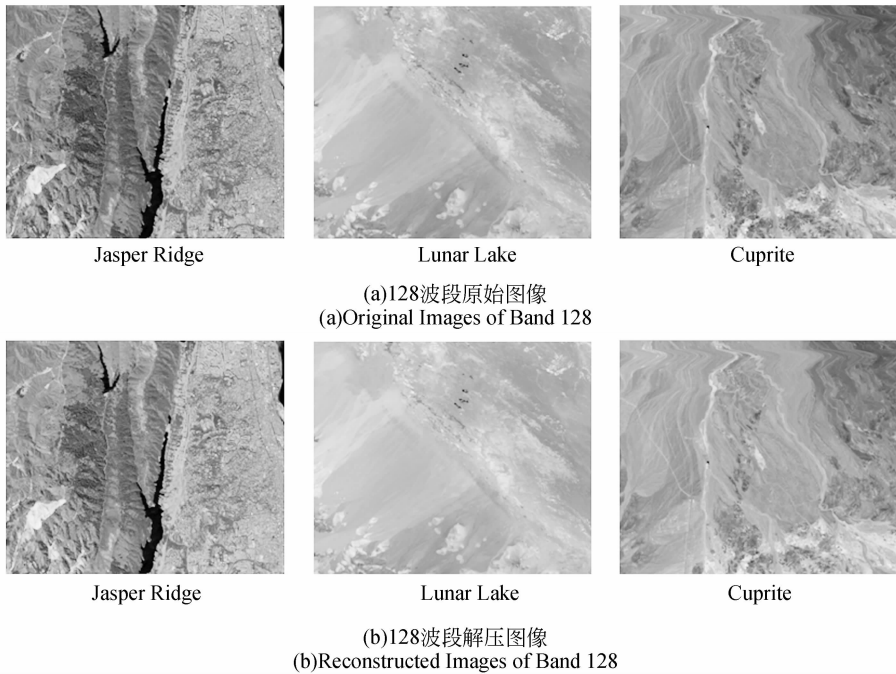


图 7 第 128 波段原始图像和解压图像比较

Fig. 7 Comparison of original images and reconstructed images of Band 128

由于是无损压缩,原始图像和解压图像的每个像素值都是完全一样的,因此从图像上来看没

有任何区别。表 1 列出了本算法与其他算法压缩性能的比较结果。

表 1 本文算法和其他算法压缩性能比较

Tab. 1 Performance comparison between proposed method and other methods

	Jasper Ridge	Lunar Lake	Cuprite	平均压缩比
JPEG-LS	2.00	1.99	2.09	2.027
JPEG2000	1.80	1.82	1.91	1.843
多波段预测 ^[8]	3.14	3.04	3.05	3.077
Reordering ABPCNEF ^[5]	3.18	3.16	3.24	3.193
文献 ^[6]	3.18	3.21	3.23	3.208
本文	3.27	3.16	3.22	3.217

JPEG-LS 和 JPEG2000 都是图像压缩的标准,在无损压缩方面 JPEG-LS 表现得更优秀,但是它们都是针对单幅图像而言的,没有充分利用到高光谱图像的谱间相关性,因此对高光谱图像压缩的效果不尽人意。多波段预测方法选取了被预测波段的前几个波段作为参考波段,但是这也是一种前向预测,没有用到被预测波段后面波段的相关性。文献[5]和文献[6]的算法都用到了波段重排,波段重排可以优化谱间去相关的效果,但是运算复杂度也随之增加。本文的算法根据相关系数的大小来选择不同的压缩方式。相关性弱的波段单独使用 bzip2 模式进行编码,同时还省掉了用于波段间预测的运算量。相关性强的波段充分考虑到被预测波段和前后波段都具有强烈的相关性,采用递归双向预测的方式去除谱间相关性。

参考文献:

- [1] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
TONG Q X, ZHANG B, ZHENG L F. *Hyperspectral Remote Sensing and Its Multidisciplinary Applications*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [2] 张雷,黄廉卿,赵唯佳. 一种超光谱图像分层压缩方法[J]. 光学精密工程, 2006,14(3):478-484.
ZHANG L, HUANG L Q, ZHAO W J. A multi-layered decomposition of hyper-spectral image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3): 478-484. (in Chinese)
- [3] 苏令华,李纲,衣同胜,等. 一种稳健的高光谱图像压缩方法[J]. 光学精密工程, 2007,15(10):1609-1615.
SU L H, LI G, YI T SH, *et al.*. A robust hyperspectral image compression method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(10):1609-1615. (in Chinese)
- [4] MIELIKAINEN J, TOIVANEN P. Clustered DPCM for the lossless compression of hyperspectral images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003,41(12):2943-2946.
- [5] ZHANG J, LIU G Z. An efficient reordering prediction-based lossless compression algorithm for hyperspectral images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007,4(2):283-287.
- [6] MIGUEL A C, ASKEW A R, CHANG A, *et al.*.

该算法不需要使用复杂的波段重排,而且平均压缩比超越了其他文献的结果,因此在实际应用中具有广阔的应用前景。

6 结 论

本文提出一种高光谱图像无损压缩算法。该算法充分考虑了光谱图像本身的特性,少数相关性弱的波段对其单独编码,既减少了运算量,又提高了压缩效率。同时,采用最佳双向递归预测去除谱间相关性,实验结果表明这种去相关的方法要优于前向预测。因此该算法在压缩性能和运算速度上都具有很大的优势,其平均压缩比达到 3.217,优于其他无损压缩算法 0.09~1.374,值得应用和推广。

Predictive coding of hyperspectral images[C]. *Data Compression Conference, Snowbird, UT, USA, IEEE Computer Society*, 2004: 469-478.

- [7] 张晓玲,沈兰荪,张培强. 基于三维自适应预测的高光谱图像压缩算法[J]. 电子学报, 2004,32(6): 957-959
ZHANG X L, SHEN L S, ZHANG P Q. Lossless compression of hyperspectral image based on 3-D adaptive prediction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(6):957-959. (in Chinese)
- [8] 孙蕾,罗建书. 基于多波段谱间预测的高光谱图像无损压缩算法[J]. 电子与信息学报,2007,29(12): 2876-2879.
SUN L, LUO J SH. Hyperspectral image lossless compression algorithm based on multi-band prediction[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(12): 2876-2879. (in Chinese)
- [9] 孙蕾,罗建书,谷德峰. 基于谱间预测和码流预分配的高光谱图像压缩算法[J]. 光学精密工程,2008, 16(4):752-757.
SUN L, LUO J SH, GU D F. Hyperspectral image compression algorithm based on prediction between bands and rate pre-allocation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008(16):752-757. (in Chinese)
- [10] RAO A K, BHARGAVA S. Multispectral data compression using bidirectional interband prediction [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 385-397.
- [11] 陈雨时,张晔,张钧萍. 基于线性模型最优预测的

高光谱图像压缩[J]. 南京航空航天大学学报, 2007,39(3):368-372.

CHEN Y SH, ZHANG Y, ZHANG J P. Hyperspectral image compression by using linear model based on optimal prediction[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007,39(3):368-372. (in Chinese)

- [12] ZHANG Y, JIN M. Hyperspectral image compression based on recursive bidirection prediction/JPEG [J]. *Pattern Recognition*, 2000,33:1851-

1861.

- [13] CHEN Y S, ZHANG Y, ZHANG J P, *et al.*. Optimal recursive bidirection prediction for hyperspectral image compression [J]. *Journal of Physics*, 2006,48:313-317.

- [14] SEWARD J. The bzip2 and libbzip2 official homepage[OL]. <http://sources.redhat.com/bzip2/>.

- [15] HP Labs LOCO-I/JPEG-LS Home Page[OL]. <http://www.hpl.hp.com/loco>.

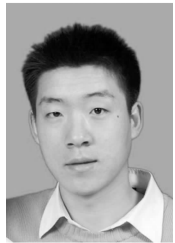
作者简介:



孙 蕾(1980—),女,湖北武汉人,博士,主要从事小波分析及其在图像处理中的应用方面的研究。E-mail: bangbangbing1999@163.com



罗建书(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事小波分析及其应用,电磁拓扑等方面的研究。E-mail: ljsh3115@sina.com



谷德峰(1980—),男,博士,主要从事现代统计方法与编队卫星状态测量方面的研究。E-mail: gudefeng05@163.com

● 下期预告

高集成度新型摆镜驱动模块的研制

汪逸群¹, 颜昌翔¹, 谢 涛², 刘长顺¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 吉林省农业机械研究院, 吉林 长春 130032)

研制了一种高集成度的摆镜驱动模块,可用作空间光学遥感器摆镜机构的动力单元。基于光、机、电一体化的设计理念,选择了合适的步进电机、研制了大速比的谐波减速器和 16 位光电编码器来构成紧凑型的驱动模块。随后对该模块的轴系精度、位置精度和速度精度分别进行了分析和测试,测试结果为轴系径向跳动 $<3 \mu\text{m}$,端面跳动 $<1 \mu\text{m}$,定位精度 $<40''$, $0.1^\circ/\text{s}$ 时相对速度精度为 19%, $5^\circ/\text{s}$ 时相对速度精度为 6.8%。试验结果表明该驱动模块重量轻、输出力矩大、传动精度高,满足摆镜机构对驱动系统的指标要求。