

文章编号 1004-924X(2013)08-2201-08

利用线性预测与查表法的高光谱图像压缩

宋金伟*, 张忠伟, 陈晓敏

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘要:提出了一种线性预测和多谱带查表相结合的高光谱图像无损压缩算法。首先,根据高光谱图像谱带间具有强相关性的特点,建立基于 Yule-Walker 方程的线性预测模型,其中方程系数矩阵为非 Toeplitz 形式的对称矩阵,需要使用改进的 Levinson 算法进行求解。其次,针对校正后的高光谱图像具有稀疏直方图的特点,提出了多谱带查表法,对线性预测的结果进行修正,去除这些图像中因校正引起的信息冗余;而对未校正图像,则不使用该步骤处理。最后,使用熵编码器对预测误差进行编码。分别使用自适应算术编码和 Golomb-Rice 编码作为熵编码器进行了测试,结果表明:本文算法具有较高的压缩比,压缩效果好于国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)的标准算法。

关键词:高光谱图像;无损压缩;线性预测;多谱带查表法;Yule-Walker 方程;Levinson 算法

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.2201

Hyperspectral imagery compression via linear prediction and lookup tables

SONG Jin-wei*, ZHANG Zhong-wei, CHEN Xiao-min

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: songjinwei1983@gmail.com

Abstract: A lossless compression scheme consisting of a linear prediction and multiband lookup tables was proposed to compress the airborne hyperspectral imagery efficiently. Firstly, based on the Yule-Walker equation, a linear prediction model whose equation coefficient matrix is a non-Toeplitz type covariance matrix and it should be solved by an extension form of Levinson algorithm was established by exploiting the strong correlation of spectral bands of hyperspectral imagery. Then, a multiband lookup table algorithm was adopted to refine the prediction result based on the calibrated hyperspectral imagery containing a sparse histogram induced by calibration techniques. However, for the uncalibrated imagery, the multiband lookup tables could be neglected. Finally, the prediction residuals were sent to the entropy encoder. In the experiment, the Adaptive Arithmetic Code and Golomb-Rice Code were both tested as the entropy encoder. The experimental results show that the proposed scheme has a higher compression ratio and the compression effect is better than that of the standard from Consultative Committee for Space Data System(CCSDS).

Key words: hyperspectral imagery; lossless compression; linear prediction; multiband lookup table; Yule-Walker equation; Levinson algorithm

收稿日期:2013-01-18;修订日期:2013-03-20.

基金项目:中国科学院空间科学与应用研究中心“五个重点培育方向”资助项目(No. Y22113D81S)

1 引言

高光谱成像仪拍摄的图像是地物在不同波段电磁波(红外、可见光以及紫外波段)上的成像序列,该序列包含几百甚至上千幅图像。这些图像既包含了地物的地形地貌空间信息,也包含了地物的光谱信息,为识别地物的物理和化学成分提供了便利,因此,高光谱图像被广泛应用于军事、海洋、大气以及资源环境等领域。不过,由于其包含的信息量非常大也给存储和传输带来了较大压力,必须通过压缩技术缓解这一问题。由于高光谱图像不仅供人眼判断,还需要借助机器算法对蕴含信息进行识别,所以目前多优先考虑无损压缩^[1-2]。

与二维图像的压缩算法不同,高光谱图像在光谱域具有更强的相关性,可以通过特殊的算法达到更高的压缩比。Rayn M J 使用向量量化算法将光谱信息作为向量实现光谱域的去相关^[3]。Wu X L 对 CALIC 图像压缩算法进行了改进,将光谱域信息作为上下文,从而取得了较好的压缩效果^[4]。Magli E 又在 Wu X L 所提算法的基础上进行了改进,并引入 Kalman 滤波以进一步提高压缩比^[5]。Bruno A 等通过先做模糊聚类再进行预测的方法取得了较高的压缩比^[6-7]。Mielikainen J 等使用 Linde-Buzo-Gray 算法先对高光谱图像无监督聚类,再使用回归算法估计各个类别的预测系数,实现了无损压缩^[8]。汤毅等使用 C 均值聚类后,再使用最小二乘法估计预测系数^[9],并进行了实验验证。实验结果表明,聚类算法能够充分利用高光谱图像的光谱特征,得到极高的压缩比,但是此类方法复杂度较高,需要先获取聚类信息,适合于线下压缩,不适合卫星或飞行器上的实时压缩。Lin C. 和李进等采用 Wiener 滤波器对光谱域去相关,取得较好的效果^[10-11]。宋娟等分别采用分类预测与陪集码实现了高光谱图像的无损压缩^[12-13]。张威等将位平面编码引入高光谱图像压缩中,实现分层压缩算法^[14-15]。尹传历和李嘉全在嵌入式系统上实现了基于位平面的高光谱图像压缩算法^[16]。粘永健和万建伟等对高光谱图像压缩算法进行了总结,并提出按块划分图像,再用波段分组以及最小二乘法预测当前谱带的压缩技术^[17-18]。Cizicki M 等在图像处理

单元上使用多线程实现了基于 JPEG 的超光谱图像压缩算法^[19]。CCSDS 的 Kiely A 等使用带符号的最小均方误差(Signed Least Mean Square, SLMS)滤波器实现了光谱域的线性预测^[20-21],这种算法速度较快、效果好,适合实现星上实时压缩,国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data System, CCSDS)于 2012 年将该算法列为推荐标准,以蓝皮书形式发表^[2]。

Mielikainen J. 和 Huang B. 等提出了一类低复杂度的算法——查表类算法,这种算法针对机载红外/可见光成像仪(Air-borne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)校正图像产生的图像测试集合取得了极高的压缩比^[1,22],经分析,这是 AVIRIS 校正图像因为校正算法的缘故导致图像的直方图具有“锯齿”状的特点(也称为稀疏直方图),一些算法可以利用这一特点实现压缩比的进一步提高,比如 Kiely A 等提出的两种算法(TSP-W1 和 TSP-W2)^[20], Lin C 等提出的向后查找法(BPS)^[10,23]以及李进等提出的双向查表法^[11]。不过 TSP-W 与 BPS 都存在复杂度较高的问题,查表法虽然使用内存空间较大,但复杂度较低,运行速度快。

本文提出一种适合星上应用的高光谱实时无损压缩算法,并且具有较高压缩比。该算法采用自行设计的线性滤波器进行线性预测,去除了光谱域的相关性。针对 AVIRIS 校正图像数据,本文通过引入多谱带查表法结合上述滤波器,实现了压缩比的进一步提高。

2 使用线性滤波器去除相关性

2.1 线性预测模型的建立

高光谱图像可以看成三维数据,或者多张二维图像组成的数据。因为是对同一地物的成像,因此相邻的二维图像之间具有极强的相关性^[19-20]。本文的线性预测模型选取当前像素的部分邻域做相关性分析。邻域的选取如图 1 所示,其中白色方框表示的像素被用于相关性估计,灰色方框表示当前像素以及前 n 个谱带中与当前像素对应的像素,数字表示该邻域压缩的顺序。当前像素表示为 $s_c(x, y)$ 或者 $s_c(t)$,其中 $t = N_x \cdot y + x$, N_x 是图像的宽度。

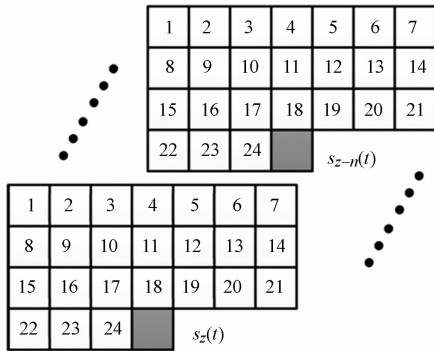


图 1 用于相关性估计的像素

Fig. 1 Pixels chosen for relative estimation

因为前 n 个谱带和当前谱带 z 具有较强的相关性,故有:

$$\delta_z(t) = d_z(t) + f_{n,1}d_{z-1}(t) + \dots + f_{n,n}d_{z-n}(t), \quad (1)$$

其中, $\delta(t)$ 表示预测误差, $f_{n,i} (i=1, \dots, n)$ 表示预测系数, $d_{z-i}(t) = s_{z-i}(t) - \bar{s}_{z-i}(t)$, 称为局部误差。

$$\bar{s}_z(t) = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T s_z(\tau), \quad (2)$$

其中 $\bar{s}_z(t)$ 表示谱带 z 中选取的像素的平均值, 如图 1 所示 $T=24$ 。将公式(1)两边分别乘以 $d_{z-i}(t)$ 并求期望, 则有:

$$E[d_z(t)d_{z-i}(t)] + f_{n,1}E[d_{z-1}(t)d_{z-i}(t)] + \dots + f_{n,n}E[d_{z-n}(t)d_{z-i}(t)] = E[\delta_z(t)d_{z-i}(t)]. \quad (3)$$

预测误差 $\delta(t)$ 可以看成服从高斯分布的白噪声, 则有:

$$E[\delta_z(t)d_{z-i}(t)] = \begin{cases} \sigma_n^2, & i=0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

设

$$r_{i,j} = r_{j,i} = E[d_{z-i}(t)d_{z-j}(t)] = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T [s_{z-i}(\tau) - \bar{s}_{z-i}(t)][s_{z-j}(\tau) - \bar{s}_{z-i}(t)]. \quad (5)$$

使用式(3)和式(4)可以得到:

$$\begin{bmatrix} r_{0,0} & r_{0,1} & \dots & r_{0,n} \\ r_{1,0} & r_{1,1} & \dots & r_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n,0} & r_{n,1} & \dots & r_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ f_{n,1} \\ \vdots \\ f_{n,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

公式(6)可以表示为矩阵形式:

$$\mathbf{R}_{0,n} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{f}_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 \\ \mathbf{0}_n^T \end{bmatrix}. \quad (7)$$

公式(7)与 Yule-Walker 方程十分相似, 但是非 Toeplitz 形式的对称矩阵, 所以公式(7)不能用传统的 Levinson 算法求解, 可以使用改进的 Levinson 算法求解。

2.2 改进的 Levinson 算法

传统 Levinson 算法是一种递推算法, 其主要思想是将公式(7)拆分成 2 个低阶方程, 并用这 2 个方程的解推导出公式(7)的解。这 2 个低阶方程可以用同样的方式拆分求解。改进的 Levinson 算法仍沿用这一思路^[24], 公式(7)拆分为:

$$\mathbf{R}_{0,n-1} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{f}_{n-1}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{n-1}^2 \\ \mathbf{0}_{n-1}^T \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{1,n} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{n-1}^T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n-1}^T \\ \beta_{n-1}^2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式(8)和式(9)分别表示 $n-1$ 阶前向预测和后向预测方程。 σ_{n-1}^2 和 β_{n-1}^2 分别表示 $n-1$ 阶前向预测误差和后向预测误差。公式(7)的解为:

$$f_{n,n} = k_{f,n} = -\mathbf{r}_{0,1:n} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{n-1}^T \\ 1 \end{bmatrix} / \beta_{n-1}^2, \quad (10)$$

$$\mathbf{f}_n^T = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{n-1}^T \\ 0 \end{bmatrix} + k_{f,n} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{n-1}^T \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\sigma_n^2 = \sigma_{n-1}^2 - k_{f,n}^2 \beta_{n-1}^2. \quad (12)$$

其中, $\mathbf{r}_{0,1:n} = [r_{0,1} \ r_{0,2} \ \dots \ r_{0,n}]$ 。

与式(7)对应的 n 阶后向预测方程为

$$\mathbf{R}_{0,n} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_n^T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n^T \\ \beta_n^2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其解为:

$$b_{n,n} = k_{b,n} = -\mathbf{r}_{0,n-1:n} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{f}_{n-1}^T \end{bmatrix} / \sigma_{n-1}^2, \quad (14)$$

$$\mathbf{b}_n^T = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{b}_{n-1}^T \end{bmatrix} + k_{b,n} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{f}_{n-1}^T \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\beta_n^2 = \beta_{n-1}^2 - k_{b,n}^2 \sigma_{n-1}^2. \quad (16)$$

采用数学归纳法与矩阵分块可以证明式(10)~式(12)和式(14)~式(16)。将式(7)的解 \mathbf{f}_n^T 带入到式(1)中可求得预测误差 $\delta_z(t)$ 。

Levinson 算法的优势在于求解过程以递推的方式进行, 不必对矩阵求逆, 这样就避免了对含有奇异矩阵的方程求解^[24]。在递推过程中当 σ_{n-1}^2 和 β_{n-1}^2 的值小于指定门限 Th 时就可以结束当前像素的预测, 节省运算时间。这一过程如图 2 所示。

每次获得的第 i 阶前向与后向预测方程的

解,都存储在内存的树形结构中,用于递推 $i+1$ 阶前向和后向预测方程。递推过程如图 3 所示,其中 ${}^k f_i^T$ 和 ${}^k b_i^T$ 的角标 i, k 分别对应角线上如图 4 所示的子矩阵构成的前向预测和后向预测方程的阶数,以及子矩阵的排列顺序(从左上到右下)。灰色框的系数代表每次增加新预测谱带后要求的新解。

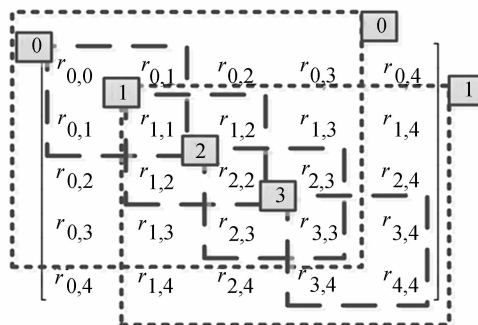


图 4 2×2 和 4×4 子矩阵的顺序

Fig. 4 Orders of 2×2 and 4×4 sub-matrices

对于未校正图像, $\delta_z(t)$ 将被直接送入熵编码器。对于校正图像,因为校正算法的原因,其直方图呈现“锯齿状”,可以使用多谱带查表法对 $\delta_z(t)$ 的值进行修正,使压缩比更高。

3 利用校正特征的多谱带查表法

查表法具有较低的复杂度,对 AVIRIS 校正图像取得了较好的压缩效果^[1,11,22]。当使用多个表时需要预先估计一个预测初值 $\tilde{s}_z(t)$, 上文中线性预测器的预测结果将作为查表的预测初值:

$$\tilde{s}_z(t) = \bar{s}_z(t) + f_{n,1} d_{z-1}(t) + \dots + f_{n,n} d_{z-n}(t) \quad (17)$$

多谱带查表法的过程如下:采用前 N 个谱带作为索引,每个谱带索引 M 个表。

查表后的预测值为:

$$\hat{s}_z(t) = \operatorname{argmin}_{m,n} \{ T_{m,n}[s_{z-n}(t)] - \tilde{s}_z(t) \} \quad (18)$$

其中, $m=1, \dots, M; n=1, \dots, N$ 。

预测后对每一个表进行更新:

$$T[s_{z-n}(t)] = T_{m-1,n}[s_{z-n}(t)] \quad (19)$$

$$T_{1,n}[s_{z-n}(t)] = s_z(t) \quad (20)$$

将预测误差 $\delta_z(t) = s_z(t) - \hat{s}_z(t)$ 送入熵编码器编码。

4 实验结果与讨论

本文测试图像为校正和未校正的 AVIRIS 图像,图像均包含 224 个谱带,每个谱带含 512 lines,每行有 614 pixels。其中校正图像采用 16 bit 带符号整型表示,未校正图像采用 16 bit 无符

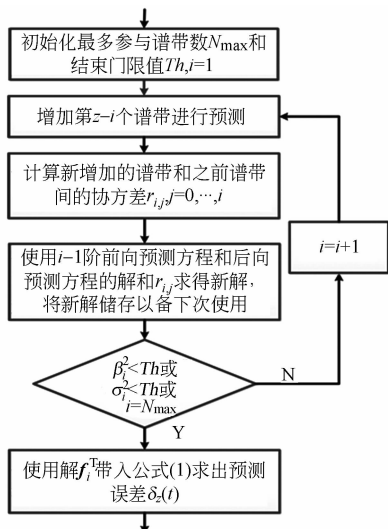


图 2 Levinson 算法的预测过程

Fig. 2 Prediction process of Levinson algorithm

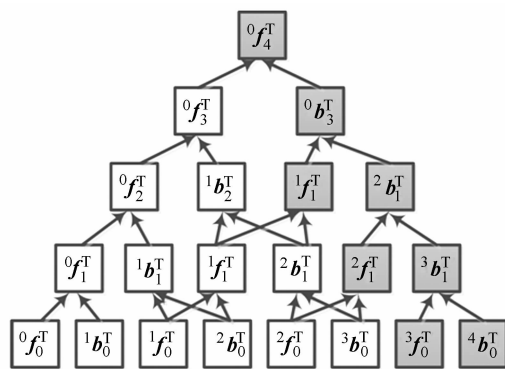


图 3 Levinson 算法的求解过程

Fig. 3 Solution process of Levinson algorithm

改进的 Levinson 算法与高斯消去法的复杂度都是 $O(n^3)$, 但高斯消去法需要选择主元, 这导致了算法复杂度的提高。当矩阵是奇异矩阵时高斯消去法无法像改进的 Levinson 算法一样可以直接输出低阶前向预测的解。

对于第一幅图像, 无法进行光谱域的去相关, 可以直接由 $\delta_1(t) = s_1(t) - \tilde{s}_1(t)$ 得到预测误差。

号整型表示,图像按照谱带顺序排列,形成三维的数据阵列。

实验使用 CCSDS 算法和本文提出的线性预测算法(简称 LP 算法)对比,熵编码器分别采用算数编码(Arithmetic Code,简称 AC.)和 Golomb-Rice 编码(简称 RC.),同时为了说明本算法的有效性,与现有的算法(CMP^[9],DSC^[13],JPEG-LS^[18,21],Diff. JPEG-LS^[18,21],3D-SPIHT^[18],MP^[18],SLSQ-OPT^[20],LUT 类^[1,22])进行了对比。表 1 为采用 AVIRIS 校正图像的压缩效果,表 2 为采用 AVIRIS 未校正图像的结果。

表 1 AVIRIS 校正图像压缩效果对比

Tab. 1 Comparison of compression performance for calibrated AVIRIS images (bit/pixel)

测试算法	Jasper Ridge	Low Altitude
SLSQ-OPT	4.96	5.27
JPEG-LS	8.00	7.44
Diff. JPEG-LS	5.93	6.40
3D-SPIHT	5.77	5.99
DSC	5.46	5.73
MP	5.33	5.82
CMP	5.21	5.53
CCSDS (RC.)	4.95	5.03
CCSDS (AC.)	4.86	4.94
CCSDS+MLUT (AC.)	4.36	4.63
本文 LP (RC.)	4.94	5.02
本文 LP (AC.)	4.84	4.92
本文 LP+MLUT (AC.)	4.17	4.32

表 2 AVIRIS 未校正图像压缩结果

Tab. 2 Comparison of compression performance for uncalibrated AVIRIS images (bit/pixel)

测试算法	16 比特无符号整型未校正图像 Yellow Stone				
	Sc0	Sc3	Sc10	Sc11	Sc18
LUT	7.14	6.91	6.26	6.69	7.20
LAIS-LUT	6.78	6.60	6.00	6.30	6.82
JPEG-LS	9.18	8.87	7.32	8.50	9.30
JPEG-LS. Diff	6.98	6.86	6.19	6.51	6.96
CCSDS (RC.)	6.18	6.04	5.62	5.87	6.23
CCSDS (AC.)	6.13	6.00	5.55	5.79	6.14
本文 LP (RC.)	6.10	5.98	5.50	5.81	6.08
本文 LP (AC.)	6.05	5.95	5.45	5.73	6.01

从表 1 和表 2 可以看出:本文 LP 算法比 CCSDS 的压缩效果好,这是因为 LP 算法采用的

滤波器比 CCSDS 采用的 SLMS 滤波器收敛速度更快,使预测误差的方差更小。

AVIRIS 校正图像具有稀疏直方图,表现在图像的直方图在局部具有较大的峰值,直方图曲线呈现“锯齿”状。AVIRIS 未校正的 Yellow Stone 图像不包含校正特征,直方图较为平滑,使用 MLUT 压缩比很低甚至不能提高,反而增加了复杂度,所以实验只针对 AVIRIS 校正图像进行多谱带查表法的测试。

在本文实验中 MLUT 算法采用 5 个谱带作为索引,每个谱带索引 4 个表。使用 MLUT 后,预测误差的分布发生了变化,如图 5 所示,这样的分布更适合算数编码^[10]。

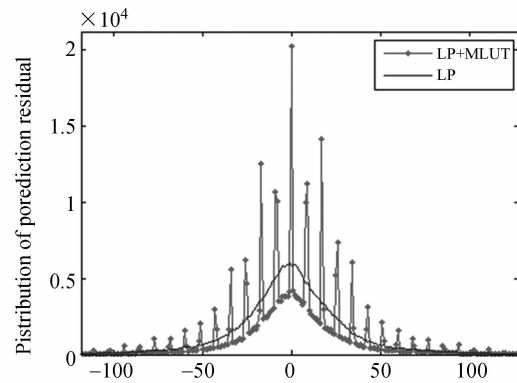


图 5 使用 MLUT 算法和不使用 MLUT 算法的预测分布(Jasper Ridge 图像第 33 谱带的直方图对比)

Fig. 5 Distribution of prediction residual with and without MLUT algorithms (comparison of histograms for 33th band in JasperRidge)

为验证本文无损压缩算法,在解压后,将原始图像和解压后的图像进行了比对,结果显示二者完全相同,所以高光谱图像的信息并未损失。

表 3 算法所用时间

Tab. 3 Time consumption of testing algorithms (ms/band)

算法	时间
LP	977
CCSDS	629
MLUT	212

表 3 显示了 LP 算法、CCSDS 算法和 MLUT

算法的时间开销。本文实验运行的环境为: Intel (R) Core(TM) i3-2100 CPU, 主频为 3.10 GHz, 4 GB 内存, Windows 7 操作系统。虽然本文算法时间开销大于 CCSDS 算法, 但能够提供更高的压缩比, 与 MLUT 结合后的结果也更好。

5 结 论

本文提出了一种线性预测(LP 算法)与多谱带查表法(MLUT)相结合的高光谱图像无损压缩算法。基于特殊的 Yule-Walker 方程模型的线性预测算法, 采用改进的 Levinson 递推算法求

解, 取得了较好的预测结果。针对 AVIRIS 校正图像中的稀疏直方图特征, 本文将线性滤波器的预测值作为预测初值, 并使用多谱带查表法进一步提高压缩比。实验结果显示, 本文提出的 LP 算法的预测效果优于 CCSDS 算法, 压缩效果较 CCSDS 算法每像素平均降低 0.06 bit。使用 MLUT 算法后, AVIRIS 校正图像每像素平均降低了 0.5 bit。鉴于 LP 能提供更高的压缩比, 因此具有较好的实用性, 通过结合复杂度较低的 MLUT 算法, 能够以较快的速度提高校正图像的压缩比。

参考文献:

- [1] MIELIKAINEN J. Lossless compression of hyperspectral images using lookup tables [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2006, 13(3): 157-160.
- [2] CCSDS. Lossless multispectral & hyperspectral image compression 123.0-B-1 [S]. CCSDS: CCSDS, 2012.
- [3] RYAN M J, ARNOLD J F. Lossy compression of hyperspectral data using vector quantization [J]. *Remote Sensing Environ.*, 1997, 61(3): 419-436.
- [4] WU X L, MEMON N. Context-based lossless inter-band compression-Extending CALIC [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(6): 994-1001.
- [5] MAGLI E. Multiband lossless compression of hyperspectral images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(4): 1168-1178.
- [6] AIAZZI B, ALBA P, ALPARONE L, et al.. Lossless compression of multi/hyper-spectral imagery based on a 3-D fuzzy prediction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2287-2294.
- [7] AIAZZI B, ALPARONE L, BARONTI S, et al.. Crisp and fuzzy adaptive spectral predictions for lossless and near-lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4): 532-536.
- [8] 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.
- [9] 汤毅, 辛勤, 李纲, 等. 基于内容的高光谱图像无损压缩 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 668-674.
TANG Y, XIN Q, LI G, et al.. Lossless compression of hyperspectral images based on content [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 668-674. (in Chinese)
- [10] LIN C C, HWANG Y T. Lossless compression of hyperspectral images using adaptive prediction and backward search schemes [J]. *Journal of Information Science and Engineering*, 2011, 27(2): 419-435.
- [11] 李进, 金旭龙, 李国宁. 适用于星上应用的高光谱图像无损压缩算法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, (33): 2264-2269.
LI J, JIN X L, LI G N. Lossless compression of hyperspectral image for space-borne application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, (33): 2264-2269. (in Chinese)
- [12] 宋娟, 吴成柯, 张静, 等. 基于分类和陪集码的高光谱图像无损压缩 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1): 231-234.
SONG J, WU CH K, ZHANG J, et al.. Lossless compression of hyperspectral images based on classification and coset coding [J]. *Journal of Elec-*

- tronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 231-234. (in Chinese)
- [13] 宋娟, 李云松, 吴成柯, 等. 基于 L_∞ 最小搜索和陪集码的高光谱图像无损及近无损压缩 [J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1551-1555.
- SONG J, LI Y S, WU CH K, *et al.*. Lossless and near-lossless compression of hyperspectral images based on search for L_∞ minimum and coset coding [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1551-1555. (in Chinese)
- [14] 张威, 田峰. 超光谱图像分层无损压缩方案 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(12): 2499-2503.
- ZHANG W, TIAN F. Layered lossless compression scheme of hyperspectral image [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2011, 32(12): 2499-2503. (in Chinese)
- [15] 张威, 田峰. 机载遥感系统超光谱图像分层近无损压缩 [J]. 计算机科学, 2012, 39(7): 293-312.
- ZHANG W, TIAN F. Layered near-lossless compression scheme of hyperspectral image in airborne remote sensing system [J]. *Computer Science*, 2012, 39(7): 293-312. (in Chinese)
- [16] 尹传历, 李嘉全. 基于位平面的嵌入式超光谱图像压缩系统 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(2): 245-249.
- YIN CH L, LI J Q. Embedded hyperspectral image compression system based on bit-plane [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 245-249. (in Chinese)
- [17] 万建伟, 粘永健, 苏令华, 等. 高光谱图像压缩技术研究进展 [J]. 信号处理, 2010, 26(9): 1397-1407.
- WAN J W, NIAN Y J, SU L H, *et al.*. Research progress on hyperspectral imagery compression technique [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(9): 1397-1407. (in Chinese)
- [18] 粘永健, 辛勤, 汤毅, 等. 基于多波段预测的高光谱图像分布式无损压缩 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 906-912.
- NIAN Y J, XIN Q, TANG Y, *et al.*. Distributed lossless compression of hyperspectral images based on multi-band prediction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 906-912. (in Chinese)
- [19] CIZNICKI M, KUROWSKI K, PLAZA A. Graphics processing unit implementation of JPEG2000 for hyperspectral image compression [EB/OL]. (2012-06) <http://spiedigitallibrary.org/> on 12/11/2012 Terms of Use: <http://spiedl.org/terms>.
- [20] KIELY A B, KLIMESH M A. Exploiting calibration-induced artifacts in lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2672-2678.
- [21] SANCHEZ J E, AUGÉ E, SANTALO J, *et al.*. Review and implementation of the emerging CCSDS recommended standard for multispectral and hyperspectral lossless image coding [C]. 2011 *First International Conference on Data Compression, Communications and Processing*, 2011.
- [22] MIELIKAINEN J, TOIVANEN P. Lossless compression of hyperspectral images using a quantized index to lookup tables [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 474-478.
- [23] LIN C C, HWANG Y T. An efficient lossless compression scheme for hyperspectral images using two-stage prediction [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 7(3): 558-562.
- [24] PORSANI M, ULRICH T J. Levinson type extensions for non toeplitz systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(2): 366-375.

作者简介:



宋金伟(1983—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,2006年、2009年于中国农业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事高光谱图像数据处理方面的研究。E-mail: songjinwei1983@gmail.com



张忠伟(1975—),男,河南武陟人,博士,副研究员,2000年于西北大学获得硕士学位,2005年于西安交通大学获得博士学位,研究方向为在轨高速信号处理和综合电子技术研究。E-mail: zhweizh@nssc.ac.cn

导师简介:



陈晓敏(1951—),女,上海人,研究员,博士生导师,主要从事空间综合电子技术的研究。E-mail: chenxm@nssc.ac.cn

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)