

基于多预测器的高光谱图像无损压缩*

苏令华,吕韶昱,万建伟

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 数据压缩是高光谱图像处理应用中的一个关键问题。在分析高光谱数据相关性特点的基础上,提出了一种方向可选的多预测器数据压缩框架。将新的框架应用于单波段和多波段的预测压缩方案,分别得到复杂性不同的两种无损压缩流程。计算机仿真结果表明了该框架的有效性。

关键词 高光谱图像;多预测器;聚类;预测;无损压缩

中图分类号:TP751.1;TN919.81 文献标识码:A

Lossless Compression of Hyperspectral Images Based on Multi-predictors

SU Ling-hua, LV Shao-yu, WAN Jian-wei

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Data compression is a key problem in the applications of hyperspectral images. Based on the correlation analysis of hyperspectral data, a multi-predictors compression scheme of hyperspectral images was presented. The new scheme was applied to single band and multi bands prediction. Two lossless compression methods with different complexity were achieved. Simulation results verify the effectiveness of the scheme.

Key words hyperspectral image; multi predictors; cluster; prediction; lossless compression

高光谱分辨率遥感(hyperspectral remote sensing)是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域,获取许多非常窄且光谱连续的图像数据,广泛应用于特征提取、目标分类等领域^[1],是 20 世纪 80 年代遥感技术的最大成就之一。随着光谱段的不断增加,成像光谱仪获取的数据量越来越大,这不仅给机载、星载数据的传输带来巨大压力,也使地面数据的存储与传输成为负担。因此,高光谱图像压缩也成为挑战性课题。光谱数据经常应用于特征提取、目标的分类与检测等领域,压缩的失真有可能在处理过程中被放大而带来不可知的后果,因此无损压缩成为首选的方案。本文主要讨论光谱数据的无损压缩。

高光谱数据可以看成三维图像立方体。在二维图像的基础上,增加了光谱维信息。其数据冗余一般分为空间相关性和谱间相关性。根据 Shannon 信息论,图像熵是图像无损压缩的极限,故无损压缩通常分为去相关和熵编码两个步骤。近年来,国内外学者提出了多种高光谱图像无损压缩方案,如预测^[2-3]、整数变换^[4-5]等。

基于预测的编码一直活跃于图像压缩领域。张晓玲^[6]提出一种自适应预测方法,采用了单个波段、共 13 个邻点作为预测数据。Mielikainen^[7]则采用了线性自回归模型实现了预测。本文在分析高光谱数据相关性的基础上,提出了一种预测器可选的压缩框架。在空间像素的行、列及两个对角方向邻点中选择其一作为预测数据。将该框架分别应用于单、多波段的三维预测,各波段预测残差采用算术编码。分别针对 224 波段 AVIRIS 数据、128 波段 OMIS-I 型数据和某 80 波段 PHI 数据进行了算法仿真,证实了算法的优越性。

* 收稿日期:2006-07-23
基金项目:国家部委基金资助项目(41321090202)
作者简介:苏令华(1979—),男,博士生。

1 高光谱数据的相关性特点

高光谱图像的空间相关性指每个谱段内某一像素与其相邻像素之间的相似性。图像的自相关函数定义为：

$$R(l, k) = \iint f(x, y)f(x+l, y+k) dx dy \quad (1)$$

其中 $f(x, y)$ 为图像的灰度值函数 将(1)式离散化和归一化之后 得到：

$$R(l, k) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \mu_f] [f(x+l, y+k) - \mu_f]}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \mu_f]^2} \quad (2)$$

其中 $M \times N$ 为图像大小 μ_f 为图像灰度均值。在固定 l, k 取值情况下 可以分别定义图像的行、列及对角相关性系数 分别为 $R(0, 1), R(1, 0), R(-1, -1), R(1, -1)$ 。

高光谱图像的谱间相关性是指各波段光谱图像在同一空间位置的像素具有相似性。定义互相关函数为：

$$\rho(l, k) = \iint [f(x+l, y+k) - \mu_f] [g(x, y) - \mu_g] dx dy \quad (3)$$

其中 $f(x, y)$ 为图像的灰度值函数 $g(x, y)$ 为标准图像或称图像模板 μ_f 为 $f(x, y)$ 的灰度均值 μ_g 为 $g(x, y)$ 的灰度均值。称 $\rho(l, k)$ 为 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的互相关函数。

将(3)式离散化、归一化 固定 $l=0, k=0$ 并记波段 j 图像为 $f_j(x, y)$ 波段 $j-1$ 图像为 $f_{j-1}(x, y)$ 可定义波段 j 的谱相关系数为：

$$\rho_j = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_j(x, y) - \mu_j] [f_{j-1}(x, y) - \mu_{j-1}]}{\sqrt{\left\{ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_j(x, y) - \mu_j]^2 \right\} \left\{ \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f_{j-1}(x, y) - \mu_{j-1}]^2 \right\}}} \quad (4)$$

其中 μ_j, μ_{j-1} 分别为第 j 和第 $j-1$ 波段的灰度均值。

国内许多学者对光谱图像的相关性特点进行了分析^[8-9] 普遍的结论认为 在目前的成像仪空间分辨率及谱间分辨率条件下 高光谱图像的空间相关性弱于普通图像的空间相关性 而谱间相关性大大强于 RGB 彩色图像。由此 在光谱图像的预测编码领域 采用空谱联合预测逐渐成为共识。

值得指出的是 高光谱图像的谱间相关性 可分为统计相关性和结构相关性。其中统计相关性由光谱分辨率决定 而结构相关性来源于成像地物在物理结构上的相似性。本文提出的框架正是基于光谱图像的这一特点。

2 基于多预测器的三维预测

由于成像仪空间分辨率通常在 10m 至几十 m 对于不同的成像区域 在形状、走向方面有所区别。例如公路、河流、梯田等 在图像上可能形成线状或窄条状分布 由此高光谱图像呈现出复杂的轮廓。在空间行、列及对角方向的相关性存在差异 单独采用任何一个方向邻点作为预测数据 都有可能达不到预期的压缩效果。

基于以上的考虑 提出一种方向可选的多预测器预测框架 并将其应用到三维预测。本文的讨论在光栅扫描、因果预测的前提下进行。

2.1 单波段预测

在采用单波段预测的情况下 可以给出一种简单、实时实现的四选一结构。图 1 给出了像素的因果邻点示意图。四个预测器为：

$$\begin{cases} \hat{X}_k^1 = X_{k-1} + A_k - A_{k-1} \\ \hat{X}_k^2 = X_{k-1} + B_k - B_{k-1} \\ \hat{X}_k^3 = X_{k-1} + C_k - C_{k-1} \\ \hat{X}_k^4 = X_{k-1} + D_k - D_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

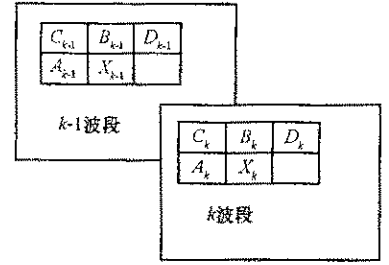


图1 像素 X_k 因果邻点示意图

Fig.1 Causal neighbors of pixel X_k

将高光谱数据像素表示成 $\rho(b, i, j)$ 其中 b, i, j 分别表示波段和行、列序号, 设光谱数据共 B 个波段. 对某一个特定的空间位置 (i, j) , 预测器选取的准则为:

$$\min \left(\sum_{b=2}^B ab [\rho(b, i, j) - \hat{\rho}(b, i, j)] \right) \quad (6)$$

即该空间位置在各个波段的误差绝对值之和最小, 式中 $\hat{\rho}(b, i, j)$ 表示像素 $\rho(b, i, j)$ 的预测值.

每个空间位置的预测器选择标识 d 采用 delta 编码, 作为附加数据传输.

2.2 多波段预测

当采用多个波段进行预测时, 预测器系数不采用固定值, 而作为附加数据传输, 对每个像素传递一组预测系数得不偿失. 将各空间位置在不同波段的灰度值作为一个矢量, 采用 K-means 聚类方法进行聚类预处理. 在完成聚类、得到分类图的前提下, 可对各个分类分别选取样本, 训练得到预测系数.

在本文提出的方向可选框架下, 分别选择当前像素的左、上、左上、右上四个方向相邻位置及本空间位置的多个波段像素作为预测数据, 分别训练预测系数. 图2给出了采用当前位置的左邻点及本空间位置, 共3个预测波段, 7个预测点的选择示意图.

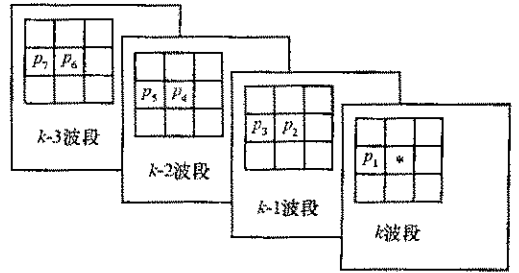


图2 预测点选择示意图

Fig.2 The selection of prediction data

假定采用 K 点预测, 设当前点为 p_0 , 预测点为 p_1, p_2, \dots, p_K , 预测系数表示成 $A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_K]$, 则预测公式可写为矢量乘积形式:

$$p_0 = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_K \ \mathbf{I}] [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_K]^T \quad (7)$$

假设选择 L 个点训练, 整理预测矩阵:

$$\Phi = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{2,1} & \dots & p_{K,1} \\ p_{1,2} & p_{2,2} & \dots & p_{K,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1,L-1} & p_{2,L-1} & \dots & p_{K,L-1} \\ p_{1,L} & p_{2,L} & \dots & p_{K,L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

设 $G = \begin{bmatrix} p_{0,1} \\ p_{0,2} \\ \vdots \\ p_{0,L-1} \\ p_{0,L} \end{bmatrix}$ 则预测值 $\hat{G} = \Phi \cdot A$.

预测的目标在于使 $(\hat{G} - G)^T (\hat{G} - G)$ 最小化, 故:

$$A = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T G \quad (9)$$

对不同分类、不同波段可分别得到 4 组预测系数, 表示为 $A_{c,b,d}$, 其中 c 表示分类编号, b 表示波段序号, d 表示预测器的方向选择标识. 对某个特定空间位置, 预测器的选取仍遵循 (6) 式的准则.

多波段的压缩过程完成后, 各空间位置的分类标识、预测器选择标识分别进行 delta 编码, 与预测系数一起构成了附加数据.

3 实验结果与分析

为验证本文所提算法的有效性,应用 MATLAB 仿真软件,分别针对 224 波段 AVIRIS 数据、128 波段 OMIS-I 型数据及 2000 年吴淞江航线 80 波段 PHI 记录数据进行仿真实验。三种成像仪原始数据各像素均量化为 12bit,存为 2B。国家“863”信息获取与处理主题提供了 OMIS-I 型光谱仪飞行数据。

基于飞行数据的噪声水平及运算量考虑,三种高光谱数据中,对 AVIRIS 数据取前 64 个波段,图像大小为 512×614 ,OMIS-I 型的 River9、L2rec、Sea2 数据,选择第 2~57 个,共 56 个波段,Desert1-1、Sand2 数据,选择第 10~43 个,共 34 个波段,图像大小为 512×536 ,PHI 数据为所记录的 80 个波段,图像大小为 500×400 。图 3 给出了一个波段的实验图像。

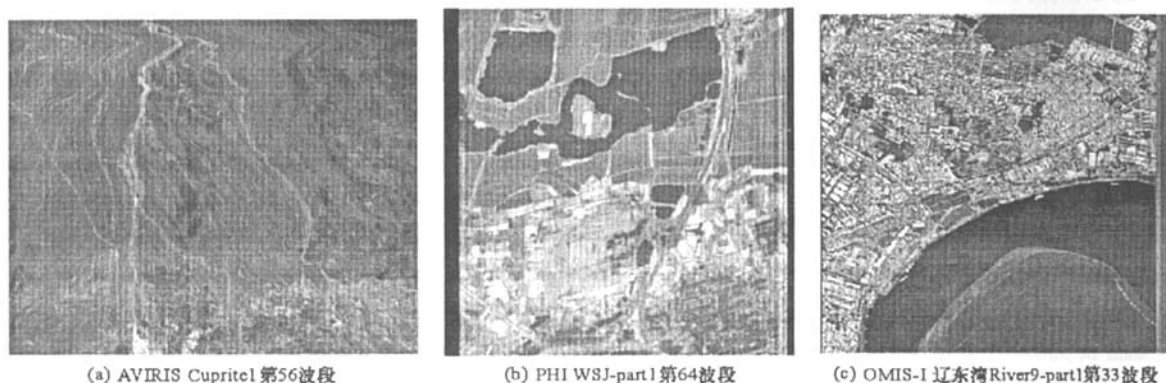


图 3 实验图像

Fig. 3 The experiment images

分别采用 2.1 节的压缩流程,与采用固定方向预测以及直接使用当前位置的前一波段灰度值预测进行了性能比较,如表 1 所示。其中,单预测器比特率是从四个固定方向中选取的一个最优结果。可见,采用多预测器可选的框架,在这种简单、可实时压缩的方案中,对绝大多数高光谱图像取得了很好的效果。实验选用的 PHI 数据,行相关性强烈,采用多预测器框架效果不够明显。

如果根据谱间相关性特点,进行波段重新排序,可以进一步改善压缩效果。

表 1 多预测器与单预测器压缩效果比较(压缩后,比特/像素)

Tab. 1 The comparison between single and multi predictors (bpp after compression)

	AVIRIS		OMIS-I					PHI
	Cuprite	Moffett	River9	Desert1-1	Sand2	Sea2	L2rec	WSJ
单预测器	5.71	6.02	6.52	6.93	6.80	6.39	6.91	4.82
多预测器	5.44	5.74	6.21	6.62	6.36	6.24	6.87	4.80
前一波段	5.42	6.50	6.84	7.43	6.48	6.81	7.01	5.03

采用 2.2 节的压缩流程,通过考察 K-Means 聚类类别数与最终压缩率之间的关系曲线,选择类别数 $C=16$,预测系数量化为 16 位,使用 3 个预测波段,共 7 个预测点。将多预测器框架与固定方向预测进行了性能比较,如表 2 所示。其中,单预测器比特率是从四个固定方向中选取的一个最优结果。通过比较可以发现,采用多个波段数据进行预测时,由于采用了像素分类、统计训练预测系数等一系列处理,多预测器框架的优越性受到了限制。但相比于固定方向预测,多预测器仍然可以将压缩率稳定提高 2% 左右。稍意外的是,吴淞江航线的 PHI 图像,采用聚类-训练-预测的压缩流程,压缩效果反而大大差于 2.1 节的简单预测流程。

表2 多预测器与单预测器压缩效果比较(压缩后,比特/像素)

Tab.2 The comparison between single and multi predictors (bpp after compression)

	AVIRIS		OMIS-I					PHI
	Cuprite	Moffett	River9	Desert1-1	Sand2	Sea2	L2rec	WSJ
单预测器	5.08	5.21	5.93	5.59	5.43	6.13	5.61	5.46
多预测器	4.96	5.14	5.82	5.50	5.33	6.01	5.55	5.33

4 结论与讨论

本文结合高光谱数据的空间相关性、谱间统计相关性与结构相关性特点,提出了一种预测器方向可选的高光谱数据无损压缩框架。采用单波段预测流程时,多预测器结构可以显著提高压缩率。采用多波段预测流程时,由于接受了统计训练的预测系数,多预测器结构的优越性受到抑制,但相比于单方向预测,仍然可以取得明显效果。

基于以上结果,本文所提压缩方案可在以下几个方面进一步研究(1)行之有效的聚类方法,离线聚类的可实施性与鲁棒性(2)在多波段条件下,不使用聚类,采用自适应预测系数的可能性。

参考文献:

- [1] 吴昊, 郝文贤, 匡纲要. 一种基于混合概率 PCA 模型的高光谱图像非监督分类方法[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 61-64.
- [2] Aiazzi B, Alpa P, et al. Lossless Compression of Multi/Hyper-spectral Imagery Based on a 3-D Fuzzy Prediction[J]. IEEE Transactions on Geosci. and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2287-2294.
- [3] 毋立芳, 沈兰荪, 张晓玲. 基于三维上下文预测的遥感图像无损压缩[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6A(11): 1107-1110.
- [4] 冯燕, 何明一, 贾应彪. 基于整数小波变换的机载多光谱图像无损压缩[J]. 计算机工程与应用, 2003(36): 55-57.
- [5] Hsieh S H. A Fast Adaptive Lifting Method for Lossless Hyperspectral Data Compression[C]//Applications of Digital Image Processing XXVII Processing of SPIE, SPIE Bellingham, WA, 2004, 5558: 664-675.
- [6] 张晓玲, 沈兰荪, 张培强. 基于三维自适应预测的高光谱图像无损压缩算法[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 957-959.
- [7] Mielikainen J, Toivanen P. Clustered DPCM for the Lossless Compression of Hyperspectral Images[J]. IEEE Transactions on Geosci. Remote Sensing, 2003, 41(12): 2943-2946.
- [8] 孙蕾. 高光谱图像无损压缩技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [9] 刘恒殊. 超光谱遥感图像压缩算法的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2002.

(上接第43页)

参考文献:

- [1] 王可, 劳光亮, 等. 微秒针刺延期药的研制[J]. 火工品, 1997(3): 12-16.
- [2] 陈冬群. 动态级联型螺线管爆磁压缩发生器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [3] 肖绍清, 林大泽, 陈怀宇, 等. FDG-1型非电高精度毫秒雷管[J]. 火工品, 1993(1): 6-11.
- [4] 马宏萱, 姜玉琴, 焦彦玲, 等. LD-14小型桥丝史电雷管的研究[J]. 火工品, 1995(2): 14-18.

