

高光谱图像压缩质量评价技术研究进展

苏令华 万建伟

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要 众所周知,数据量的庞大,致使高光谱图像数据的应用受到很大限制。这种庞大的数据量对于许多情况,尤其对于卫星数据链路,由于受带宽和星上存储能力的局限,致使不能实时进行数据传输,因此必须使用有损压缩方式来减小高光谱图像的数据量。但由于有损压缩带来的信息丢失,对高光谱数据的不同后续应用影响不同,因此压缩图像的质量评价技术得到了广泛重视。为使人们对这一质量评价技术有一定了解,首先对高光谱图像压缩方法进行简单介绍;然后对现存的客观失真参数评价、应用算法统计结果评价、相似敏感度标准抽取评价等主要的压缩质量评价技术进行综述,同时比较它们的优缺点,并在此基础上,提出了一种基于最优性能的质量评估框架;最后对该技术今后的研究发展进行了展望。

关键词 压缩 高光谱图像 质量标准 评价

中图法分类号: TP751 TN919.81 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)08-1389-07

Review on Evaluation of Quality of Compressed Hyperspectral Image

SU Ling-hua, WAN Jian-wei

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Applications for hyperspectral image data are still in their infancy as handling the significant size of the data presents a challenge for the user community. In some cases, especially in satellite data link, limited by the available bandwidth and the onboard storage capacity, lossy compression techniques have to be used. Hyperspectral imagery applications appear different sensitivities to various of degradations caused by different lossy compression methods. The evaluation of quality of compressed hyperspectral images comes in growing interest over the past few years. In the paper we first reviewed some major hyperspectral image compression methods. Second we summarized the existing evaluation approaches including objective distortion criteria, statistical applications algorithms results evaluation and extraction of distortion criteria with same sensitivity. The merits and drawbacks of the approaches were discussed as well. Then a new evaluation scheme based on optimal performance is proposed. In the end, the future trend of the evaluation technique was pointed out, in personal opinion.

Keywords compression, hyperspectral image, quality criteria, evaluation

1 引言

高光谱分辨率遥感(hyperspectral remote sensing, HRS)将确定物质或地物性质的光谱与把握其空间和几何关系的图像革命性地结合在一起^[1],是 20 世

纪 80 年代遥感技术的最大成就之一。随着遥感仪器水平的发展,光谱成像仪获取的数据量越来越大,由此,海量数据的存储与传输已成为制约高光谱应用的瓶颈问题。尤其对于卫星数据链路,必须采用有损压缩的处理方式,才有可能完成实时的数据传输。十几年来,高光谱遥感数据压缩技术得到了国

基金项目:国防预研基金项目(41321090202)

收稿日期:2006-03-27;改回日期:2007-04-13

第一作者简介:苏令华(1979~),男。2003 年 3 月于空军工程大学获信号与信息处理专业硕士学位,现为国防科技大学在读博士研究生。主要研究方向为遥感图像处理、雷达信号处理。E-mail: sulinghua79@sina.com

内外学者的广泛关注。针对高光谱数据独有的相关性特点^[2],已有多种有别于 2 维图像压缩技术的新方案相继被提出。

压缩算法的多样性及其不断发展,又带来一个新的关键问题,即数据压缩并不是高光谱数据应用的最终目标,由于数据的 3 维特点又决定了其应用过程主要由机器算法实现,而非人眼的直观感知,在此情况下,究竟用什么样的指标来衡量压缩图像的质量?因此,高光谱图像压缩质量评价成为一项专门技术。

目前,高光谱数据应用主要涉及特征提取、目标分类与检测等信号处理技术,这些应用方向与数据压缩构成相辅相成的关系,这种关系一方面表现在不同的数据应用对数据压缩提出了不同的图像质量要求;另一方面,信号分析新技术的发展又可以不断降低对图像质量的依赖。同时,许多信号分析方法,如光谱分类(spectral classification)、主成分分析(principal component analysis, PCA)等也可以直接应用到高光谱数据的压缩或预处理。

显然,高光谱图像压缩质量的评价与高光谱数据的具体应用是密不可分的^[3]。本文在分析高光谱数据压缩技术的基础上,将重点介绍压缩质量评价技术的研究进展。

2 高光谱图像压缩

十几年来,在深入分析高光谱数据相关性的基础上,人们不断将信号处理的相关理论应用到光谱数据压缩的实践中,形成了一系列行之有效的压缩方法。概括起来,目前的压缩方法主要分为以下 3 类:基于预测的方法、基于变换的方法以及基于矢量量化的方法。现简要介绍如下:

(1) 基于预测的压缩技术是先直接利用空间或者谱带相邻像素之间的相关性,以某种顺序扫描图像;然后用已经编码过的邻近像素来预测当前像素,以得到比较容易压缩的去相关残差。不同预测方法的区别主要在于预测数据的选择不同。如今双向预测^[4]、多波段预测^[5]、自适应预测^[6]已成为其发展的趋势。另外,基于预测的方法还经常与聚类、波段重排等预处理步骤结合应用。

(2) 随着小波变换理论的飞速发展,并成功应用于 JPEG2000 标准,基于变换的高光谱数据压缩方法成为该领域研究的热点。有代表性的压缩方案

包括:①1 维 KL 变换(KLT)加 2 维离散余弦变换(DCT);②1 维 KLT 加 2 维小波变换;③1 维小波变换加 2 维小波变换;④3 维 DCT;⑤3 维小波变换。而码率的合理组织与分配则一直是变换类方法讨论的重点方向。

(3) 基于矢量量化(vector quantization, VQ)的压缩方案,理论上是以信息的高阶熵为下限,在高压缩率和平均失真之间获得最佳的折衷。其中,减小码书规模、缩短搜索时间一直是基于矢量量化类方法不懈研究的目标^[7]。

由于预测类方法压缩率有限,使变换类方法重建图像的失真分布具有较强的不确定性,而矢量量化类方法又运算量巨大,因此 3 种压缩思想又不断结合,如今已演变出许多混合的压缩框架^[8~10]。同时,诸如神经网络、分形编码等信号处理工具也不断融入压缩算法设计^[11],而基于内容的分块处理^[12,13]、波段分组^[14]等处理思路则使高光谱数据压缩方法速度更快、压缩率更高、鲁棒性更好。

3 高光谱图像压缩质量评价

进行高光谱图像压缩质量的评价是以评估有损压缩方案重建图像质量为目标,因其具有重大的现实意义而得到科技职能部门及学者、工程技术人员越来越多的关注。有些压缩软件在设计之初就具有压缩质量的评价功能^[15],而专门的谱相似性度量系统也在开发中^[16]。同时,压缩质量评价作为连接高光谱图像压缩技术与其后特征提取、目标分类、异常检测等应用的桥梁,随着这些相关领域的进展也逐步成为一项专门技术。

目前,高光谱图像压缩质量评价方法,大致可分为以下 3 类:(1)失真的客观参数标准;(2)压缩对特定后续应用性能影响的统计衡量;(3)与特定应用失真敏感度相似的参数组合提取。分别介绍如下。

3.1 客观失真参数标准

在高光谱图像有损压缩的研究过程中,客观失真参数最初沿用了 2 维静止图像的失真衡量标准。多数压缩方案在计算压缩率的同时,给出了它们的信噪比和峰值信噪比表现;随后,一系列专门针对高光谱数据谱向特点和视频编码的标准被引入到高光谱图像压缩质量评价中来。例如,Ryan 等人于 1998 年首次使用最大失真百分比(percentage maximum

absolute distortion, PMAD) 参数^[17]。Aiazzi 等人在文献[18]中引入了谱信息散度(spectral information divergence, SID)评价指标^[19]。

此处,只介绍一些见诸报道的客观失真参数标准,沿用文献[20]的符号表示和定义。设高光谱原始图像为 I ,重建图像为 $\tilde{I}$, $I(x, y, \lambda)$ 表示一个像素的像素值,其中 x, y, λ 分别表示行、列和波段序号。 n_x, n_y, n_λ 分别表示行、列和波段数, $0 \leq I(x, y, \lambda) \leq I_{\max}$ 。原始数据与重建数据的误差表示为 $e_I(x, y, \lambda) = I(x, y, \lambda) - \tilde{I}(x, y, \lambda)$ 。标准的 L_p 范数表示为

$$L_p(I) = \|I\|_p = \left(\sum_{x, y, \lambda} |I(x, y, \lambda)|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

客观失真参数标准包括以下 18 种:

(1) 均方误差 (MSE)

$$\text{MSE} = \frac{L_2^2(I - \tilde{I})}{n_x n_y n_\lambda} = \frac{1}{n_x n_y n_\lambda} \sum (e_I(x, y, \lambda))^2 \quad (2)$$

(2) 均方根误差 (RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} \quad (3)$$

(3) 信噪比 (SNR)

$$\text{SNR} = 10 \cdot \lg \frac{\text{mean}(I^2)}{\text{MSE} + \frac{1}{12}} \quad (4)$$

(4) 峰值信噪比 (PSNR)

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \lg \frac{I_{\max}^2}{\text{MSE} + \frac{1}{12}} \quad (5)$$

(5) 相关均方根误差 (RRMSE)

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{1}{n_x n_y n_\lambda} \sum \left(\frac{e_I(x, y, \lambda)}{I(x, y, \lambda)} \right)^2} \quad (6)$$

(6) 最大误差绝对值 (MAD)

$$\text{MAD} = L_\infty(I - \tilde{I}) = \max_{x, y, \lambda} \{ |e_I(x, y, \lambda)| \} \quad (7)$$

(7) 最大误差百分比 (PMAD)

$$\text{PMAD} = \max_{x, y, \lambda} \left\{ \frac{|e_I(x, y, \lambda)|}{I(x, y, \lambda)} \right\} \times 100 \quad (8)$$

(8) 平均误差绝对值 (MAE)

$$\text{MAE} = \frac{L_1(I - \tilde{I})}{n_x n_y n_\lambda} = \frac{1}{n_x n_y n_\lambda} \sum_{x, y, \lambda} |e_I(x, y, \lambda)| \quad (9)$$

高光谱图像特有的失真参数如下:此处,用 μ_u 和 σ_u^2 分别表示集合 U 的均值和方差,符号 $I(x, y, \cdot)$ 表示 $I(x, y, \cdot) = \{I(x, y, \lambda) \mid 1 \leq \lambda \leq n_\lambda\}$, 即

$I(x, y, \cdot)$ 为一个矢量:

(9) 最大谱向相似度 (MSS)

$$\text{MSS} = \max_{x, y} \left\{ \sqrt{\text{RMSE}_{x, y}^2 + (1 - \text{corr}_{x, y}^2)^2} \right\} \quad (10)$$

其中,

$$\text{RMSE}_{x, y} = \sqrt{\frac{1}{n_\lambda} \sum_{\lambda} (e_I(x, y, \lambda))^2} \quad (11)$$

$$\text{corr}_{x, y} = \frac{\sum_{\lambda} (I_c(x, y, \lambda)) (\tilde{I}_c(x, y, \lambda))}{(n_\lambda - 1) \sigma_{I(x, y, \cdot)} \sigma_{\tilde{I}(x, y, \cdot)}} \quad (12)$$

其中, $I_c(x, y, \lambda) = I(x, y, \lambda) - \mu_{I(x, y, \cdot)}$

$$\tilde{I}_c(x, y, \lambda) = \tilde{I}(x, y, \lambda) - \mu_{\tilde{I}(x, y, \cdot)}$$

(10) 最大谱向角度 (MSA)

$$\text{MSA} = \max_{x, y} (\text{SA}_{x, y}) \quad (13)$$

其中

$$\text{SA}_{x, y} = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{\lambda} I(x, y, \lambda) \tilde{I}(x, y, \lambda)}{\sqrt{\sum_{\lambda} I(x, y, \lambda)^2 \sum_{\lambda} \tilde{I}(x, y, \lambda)^2}} \right) \quad (14)$$

(11) 最大谱信息散度 (MSID)

$$\text{MSID} = \max_{x, y} \left\{ \sum_{\lambda} (p_\lambda - \tilde{p}_\lambda) \ln \left(\frac{p_\lambda}{\tilde{p}_\lambda} \right) \right\} \quad (15)$$

其中,

$$p_\lambda = I(x, y, \lambda) / \|I(x, y, \cdot)\|_1$$

$$\tilde{p}_\lambda = \tilde{I}(x, y, \lambda) / \|\tilde{I}(x, y, \cdot)\|_1$$

(12) 最小 Pearson 相关系数

$$\text{Pearson} = \min_{x, y} \{ \text{corr}(I(x, y, \cdot), \tilde{I}(x, y, \cdot)) \} \quad (16)$$

另外,引入传统图像中的失真参数 Q ,此处 Q 的定义为

$$Q(U, V) = \frac{4\sigma_{uv}\mu_u\mu_v}{(\sigma_u^2 + \sigma_v^2)(\mu_u^2 + \mu_v^2)} \quad (17)$$

其中, $\sigma_{u, v}$ 表示集合 U 和 V 的协方差。

具体应用到高光谱图像数据,可采用以下 3 个特殊参数标准来分别衡量数据在空间、谱向失真及其混合失真:

(13) 谱失真参数

$$Q_\lambda = \min_{x, y} \{ Q(I(x, y, \cdot), \tilde{I}(x, y, \cdot)) \} \quad (18)$$

(14) 空间失真参数

$$Q_{x, y} = \min_{\lambda} \{ Q(I(\cdot, \cdot, \lambda), \tilde{I}(\cdot, \cdot, \lambda)) \} \quad (19)$$

(15) 混合失真参数

$$Q_m = Q_\lambda \cdot Q_{x,y} \quad (20)$$

另外,还引入灰度图像中的保真度参数 F , 此处 F 定义为

$$F(U, V) = 1 - \frac{L_2^2(U - V)}{L_2^2(U)} \quad (21)$$

具体应用到高光谱图像数据,可以用以下 3 个特殊的参数标准来分别衡量数据在空间、谱向保真度及总体的保真度:

(16) 全局保真度参数

$$F = F(I, \tilde{I}) = 1 - \frac{\sum_{x,y,\lambda} [I(x,y,\lambda) - \tilde{I}(x,y,\lambda)]^2}{\sum_{x,y,\lambda} [I(x,y,\lambda)]^2} \quad (22)$$

(17) 谱保真度参数

$$F_\lambda = \min_{(x,y)} \{F(I(x,y, \cdot), \tilde{I}(x,y, \cdot))\} \quad (23)$$

(18) 空间保真度参数

$$F_{(x,y)} = \min_{\lambda} \{F(I(\cdot, \cdot, \lambda), \tilde{I}(\cdot, \cdot, \lambda))\} \quad (24)$$

以上参数中,式(1)~式(8)参数为常见的图像 2 维失真评价标准,式(9)~式(12)参数为高光谱图像特有的评价标准,而式(13)~式(18)参数为将 2 维图像标准扩展到高光谱图像得到的特殊参数标准。

计算上述客观失真参数,不仅操作比较简单,而且可以给出数值结果,这就从一个角度衡量了高光谱图像压缩方案的优劣。然而,面对高光谱数据的分类、特征提取、异常检测等特定应用,失真参数标准往往无法如实刻画压缩率、失真与应用性能之间的关系,甚至某些失真测度与特定应用的准确度之间并非单调。也就是说,一个特定的应用算法可能对某些性质的信息丢失反应非常敏锐,即信息量的轻微减少可能带来算法性能的急剧下降;而对另外一些类型的信息丢失,则算法可能在很宽的失真测度范围内保持平稳。如果千篇一律地采用某一种失真参数标准来衡量压缩算法优劣,则有失偏颇,甚至会对压缩图像的后续应用带来很大的被动。这样,评价的结果往往不具备太强的参考意义。

3.2 统计衡量标准

在客观失真参数参考性不强的情况下,一个自然的想法就是直接使用特定的数据应用算法来衡量

压缩方案优劣。由此,通过多次独立的应用算法仿真,用统计的方法来考察压缩方案在不同应用领域的性能表现,就成为最具现实意义的质量衡量标准。

分类和检测是高光谱数据应用广泛,且研究活跃的两个专题。而正交空间投影、独立分量分析等方法在这些领域得到了广泛应用^[21,22]。对压缩图像的质量进行统计衡量,也往往使用这两个领域的算法。

许多压缩算法在提出时,分类准确率就是一个性能指标^[23,24]。Minguillon 等人以两种分类树方法^[25]的分类准确率为指标^[26],以 CASI (compact airborne spectrographic imager) 成像仪收录的数据为实验图像,考核了 JPEG、矢量量化、零树编码,网格矢量量化及其衍生压缩方法的性能。Pal 等人以机载 AVIRIS 数据作为实验图像^[27],全面考核了使用 JPEG-2000 标准压缩高光谱图像对目标分类造成的影响。另外还对几种有监督、无监督分类方法,如 SAM (spectral angle mapper)、最小距离分类 (minimum distance classifier)、binary encoding、K-均值分类、GENIE (GENetic image exploitation) hybrid evolutionary classification、NDVI (normalized difference vegetation index) 分别进行了仿真,同时以比特率和分类准确率关系曲线为形式给出了仿真结果。Jonathon 等人亦于 2004 年,使用客观失真参数^[28]及两种分类方法^[29],同时使用 HYDICE 数据来考察 KLT + JPEG2000 压缩方案的性能,指出该种方案的码率分配思路较为合理,并认为压缩方案对异常检测的影响不大。

Shen 等人以 HYDICE 的沙漠及森林成像数据作为实验图像^[30~32],分别实现了 Unmixing-Wavelet、KLT-Wavelet、3D Wavelets、KLT-TCQ、KLT-Scalar、KLT-Scalar-Collections 等 6 种压缩方案,并使用异常检测和地物检测^[33]的方法,在固定虚警率的情况下,统计不同压缩率下的检测概率,得到了 KLT 相对优于小波变换的结论,同时对小波变换在高光谱图像压缩领域的不足进行了讨论。

尽管统计衡量的方法能最真实可靠地反映压缩方案在不同应用领域的性能表现,然而这种方法的使用也受到很大限制,这些限制有:首先,特定应用环境下的分类、检测等算法往往需要大量的背景资料,例如,有监督分类算法的仿真,需要预先知道地面目标的真实分布情况,而检测算法则经常需要光谱数据库作为支撑,这些仿真过程不可避免地会受到季节、天

气状况等因素的影响;其次,算法仿真复杂度较高,需要了解、掌握多个领域的背景知识,才能如实重现应用算法,这就给专门研究压缩方案的人带来巨大的困难。另外,相较于 3.1 节提到的客观失真参数标准,统计衡量不是直观、普遍适用的衡量标准。

3.3 敏感度相似的失真参数组合提取

如今研究客观失真标准与应用领域统计准确度之间的关系,已成为高光谱图像压缩质量评价技术研究的又一个重要方向。

前文提到,不同思路的数据有损压缩方法,相较于原始数据,会带来不同类型的信息丢失,而一个特定应用算法对不同类型的信息丢失则有不同的“反应敏感度”。同时,在高光谱图像数据应用不断发展过程中,人们不断总结现阶段的研究成果,并将各个领域应用的算法思想进行归类,一些数据处理方法因得到广泛认可而成为经典。如果一个客观失真标准,对某种类型的信息丢失具有与典型应用算法相似的敏感度,或者两种敏感度之间的关系可以简单刻画,那么这个失真标准就成为该应用下的一个好的直观失真标准。通过这样的仿真过程,繁杂的具体统计衡量问题就被转化为一个针对典型算法的失真参数标准抽取问题,并可将抽取结果推广到应用领域。例如,Ryan 等人提出的最大失真百分比(PMAD)^[17],因为它能良好地描述所用分类算法的分类准确率对均值归一化矢量量化(mean-normalized vector quantization, M-NVQ)带来信息丢失的“敏感度”,因而成为该应用条件下,一个性能良好的压缩质量衡量标准。

Christophe 等人通过文献[20]、[34] 确立了这种关系曲线仿真技术。这些文献针对 3 种高光谱数据分类方法,即波谱角度填图(SAM)、马氏距离、最大似然分类(maximum-likelihood classification)进行仿真得到了 3.1 节所列各个客观失真参数标准与分类准确

率的关系曲线,通过比较可以抽取出目标分类应用条件下的性能相对优异的客观失真参数标准。

该文根据失真参数抽取的处理思路,全面考察几种压缩处理方案之后,在原始数据和压缩数据已知的情况下,虽然可以推论采用了何种压缩技术,但是这种方法并不能给压缩算法的设计给出指导性意见。

4 基于最优性能的质量评价

高光谱数据有别于其他遥感图像的独到之处在于其提供了地物的光谱特征,几乎所有的高光谱数据应用都可以归结为基于高维空间特征的目标检测与分类^[35],由此可见,对于压缩数据,其光谱特征是否保留应该是衡量压缩数据质量的关键因素。3.1 节介绍的第(9)~第(12)个参数都是基于谱向特征的失真参数,它们反映了压缩前后数据的客观变化,而具体的分类应用则反映了压缩对“解决现实问题”的影响。目标检测和分类算法不断向前发展,在监督分类方面,模糊分类、神经网络、专家系统已逐步引入,而支持向量机等则成为非监督分类研究的热点。这些算法基本上都是从光谱维或者特征空间对光谱数据进行分析 and 处理。

由于先验背景知识的缺乏,并且鉴于由成像条件、时机等因素给高光谱数据带来的不确定性^[36],因此采用无监督分类来衡量压缩数据质量就成为自然而合理的选择。前文提到,由于不同的数据压缩方法对光谱特征造成的损伤也不尽相同,且不同的失真参数可能得到不同的结论,因此如何将分类与谱特征进行有机的结合呢?本文提出一种基于最优性能的光谱数据压缩质量评价方法,用于寻找无监督分类与光谱特征参数结合的切入点。在采用以光谱特征为分类依据的多个分类结果中,可以择其最优的结果来评价压缩方案的性能。其流程见图 1。

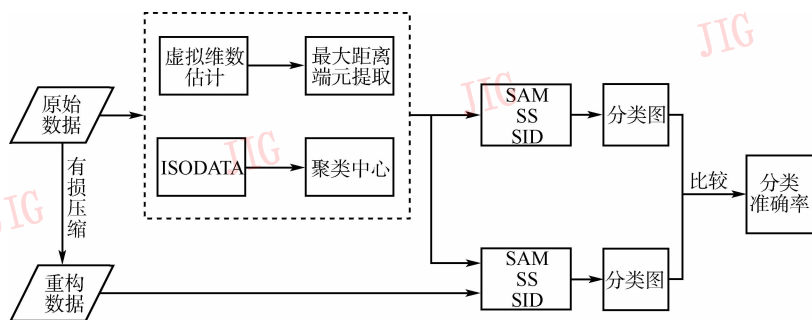


图 1 最优性能评价框图

Fig. 1 The evaluation diagram based on optimal performance

首先,估计原始成像数据的虚拟维数(virtual dimensionality, VD)^[37]。虚拟维数完全依据数据中的可分谱向特征数目来对数据维数进行界定。VD 确定之后,先使用最大距离法提取出数据的端元矢量^[35],作为分类的中心矢量;然后,对原始数据及压缩重建数据,分别应用波谱角度填图、谱相似度(SS)、谱信息散度(SID)作为判别依据,通过分别进行分类来得到压缩前后的分类图,并在不同压缩率下,对分类图进行比较,即可以得到 3 组分类准确率;最后选择其中准确率最高的一组作为该数据压缩方案的评价结果。在该评价框架中,由于 ISODATA (iterative self-organizing data analysis techniques algorithm) 可以自动确定一个相对合理的聚类数,因此 VD 估计及端元提取可以用 ISODATA 作为一种备选方案。

经过该质量评价方法的评估,有损压缩可接受的压缩比就得以确定。同时,对不同的压缩方法,可以比较它们的优劣。

5 展 望

如今高光谱数据应用尚处于起步阶段,且压缩质量评价技术目前还没有形成成熟的体系,更没有万能的的标准可循。目前,压缩质量评价标准存在以下问题:(1)简单的客观失真标准并不“客观”,质量评价必须考虑数据的后续应用已经成为共识;(2)光谱数据应用算法的不断发展及其复杂性给统计衡量带来更多困难;(3)失真参数组合提取的方法,其优势在于分析失真特点和推论可能采用的压缩方法,而并不能给压缩算法研究给出指导性意见。

在有损压缩和目标检测、分类等应用算法紧密结合的今天,有以下几个发展趋势值得重视:一是由于在某些应用背景下,高光谱数据的重建不再成为必需,压缩质量的评价随之要在压缩域展开;二是小目标及异常的探测日益获得重视,而压缩数据异常检测一直被认为不具备仿真的稳定性,因此如何建立一个可靠的框架用来衡量压缩对异常检测的影响,是一个难点;另外,由于越来越多的压缩方法采用分类、端元提取等预处理步骤,因此质量评价应该考虑到此类压缩天生的“优越性”。

总结现存的有损压缩方法的处理思想,寻找它们在信息丢失方面的共性,探讨客观失真标准同数据应用之间的关系,应该是推动高光谱数据压缩质

量评价技术的一个很好的思路。相信作为连接压缩与应用的桥梁,质量评价技术会在发展中不断完善。

参考文献 (References)

- 1 Pu Rui-liang, Gong Peng. Hyperspectral Remote Sensing and Its Application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.]
- 2 Liu Heng-shu, Peng Feng-hua, Huang Lian-qing. Feature analysis of hyperspectral images [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 392 ~ 395. [刘恒殊, 彭风华, 黄廉卿. 超光谱遥感图像特征分析 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 392 ~ 395.]
- 3 Zhang Ye, Zhang Jun-ping. Remote sensing hyperspectral image processing techniques [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(1): 6 ~ 13. [张晔, 张钧萍. 遥感超谱 (Hyperspectral) 图像处理技术 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(1): 6 ~ 13.]
- 4 Zhang Y, Jin M, Zhang J P. Hyperspectral image compression based on recursive bidirection prediction/JPEG [J]. Chinese Journal of Electronics, 2002, 9(3): 235 ~ 241.
- 5 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.
- 6 Zhang Xiao-lin, Shen Lan-sun, Zhang Pei-qiang. Lossless compression of hyperspectral image based on 3-D adaptive prediction [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 957 ~ 959. [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 Qian Shen-en. Hyperspectral data compression using a fast vector quantization algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1791 ~ 1798.
- 8 Aboussleman G P, Marcellin M W, Reagan J T. Compression of hyperspectral imagery using the 3-D DCT and hybrid DPCM/DCT [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 26 ~ 34.
- 9 Fu Wen-xiu, Wang Shi-gang, Gao Yan-mei, et al. Application of SPIHT with vector quantization to compression of multispectral image [J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(6): 109 ~ 114. [付文秀, 王世刚, 高燕梅等. 结合矢量量化的 SPIHT 算法用于多光谱图像压缩 [J]. 通信学报, 2004, 25(6): 109 ~ 114.]
- 10 Yan Jing-wen, Shen Gui-ming, Hu Xiao-yi, et al. 3D multispectral imagery data compression based on KLT/WT and VQ with spectral-feature-coding [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(4): 290 ~ 294. [闫敬文, 沈贵明, 胡晓毅等. 基于 KLT/WT 和谱特征矢量量化三维谱向数据压缩 [J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 290 ~ 294.]
- 11 Feng Yan, He Ming-yi, Wei Jiang. Lossless compression of multispectral remote sensing image based on neural network [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(1): 42 ~ 46. [冯燕, 何明一, 魏江. 基于神经网络的多光谱遥感图像无损压缩 [J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1): 42 ~ 46.]
- 12 Petrou M, Hou P, Kamata S, et al. Region-based image coding with multiple algorithms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 562 ~ 570.

- 13 Wang Cao-hui. Fast multi-level clustering lossless compression algorithm for remotely sensed images [J]. *Journal of Image and Graphic*, 2003, **8**(A)(7):843 ~ 848. [王朝晖. 多层次快速聚类的遥感图像无损压缩[J]. *中国图象图形学报*, 2003, **8**(A)(7):843 ~ 848.]
- 14 Zhang Pei-qiang, Chai Yan, Zhang Xiao-ling, *et al.* Lossless compression of hyperspectral image based on 3D-SPIHT using band classification[J]. *Journal of Image and Graphic*, 2005, **10**(4):425 ~ 430. [张培强, 柴焱, 张晓玲等. 基于波段分组的 3D-SPIHT 高光谱图像无损压缩方法[J]. *中国图象图形学报*, 2005, **10**(4):425 ~ 430.]
- 15 Chen Hai-peng. Remote Sensing Image Compression Based on JPEG 2000[D]. Dissertation for Master of Wuhan University, 2005. [陈海鹏. 基于 JPEG2000 的遥感影像压缩研究[D]. 武汉:武汉大学硕士学位论文, 2005.]
- 16 Du Pei-jun, Tang Hong, Fang Tao. Algorithms for spectral similarity measure in hyperspectral RS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(2):112 ~ 115. [杜培军, 唐宏, 方涛. 高光谱遥感光谱相似性度量算法与若干新方法演剧[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006, **31**(2):112 ~ 115.]
- 17 Ryan M J, Arnold J F. A suitable distortion measure for the lossy compression of hyperspectral data [A]. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing* [C], Seattle, WA, USA, 1998:2056 ~ 2058.
- 18 Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, *et al.* Tradeoff between radiometric and spectral distortion in lossy compression of hyperspectral imagery [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Mathematics of Data/Image Coding, Compression, and Encryption, with Applications* [C], Bellingham, WA, USA, 2004, VI:141 ~ 152.
- 19 Chang Chein-I. An information-theoretic approach to spectral variability, similarity, and discrimination for hyperspectral image analysis [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, **46**(5):1927 ~ 1932.
- 20 Christophe E, Leger D, Mailhes C. Quality criteria benchmark for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(9):2103 ~ 2114.
- 21 Chang Chein-I. Orthogonal subspace projection (OSP) revisited: a comprehensive study and analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(3):502 ~ 518.
- 22 Zheng Sheng-gen, Wang Xiao-min, Fan Rui-bin, *et al.* Remote image classification based on independent component analysis [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(2):150 ~ 157. [曾生根, 王小敏, 范瑞彬等. 基于独立分量分析的遥感图像分类技术[J]. *遥感学报*, 2004, **8**(2):150 ~ 157.]
- 23 Sunghyun L, Kwang H S, Chulhee L. Principal component analysis for compression of hyperspectral images [A]. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing* [C], Seoul, South Korea, 2001:97 ~ 99.
- 24 Luigi Dragotti P, Poggi G, Ragozini A R P. Compression of multispectral image by three-dimensional SPIHT algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(1):416 ~ 428.
- 25 Minguillon J, Pujol J, Serra-Sagrista J, *et al.* Influence of lossy compression on hyperspectral image classification [A]. In: *Proceedings of Second International Conference on Data Mining* [C], Cambridge, UK, 2000:545 ~ 554.
- 26 Minguillon J, Pujol J, Serra-Sagrista J, *et al.* Adaptive lossy compression and classification of hyperspectral images [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing* [C], Genova, Italy, 2001, VI:214 ~ 225.
- 27 Pal M D, Brislawn C M, Brumby S P. Feature extraction from hyperspectral images compressed using the JPEG-2000 standard [A]. In: *Proceedings of Fifth IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation* [C], San Fe, NM, USA, 2002:168 ~ 172.
- 28 Jonathan K Su, Su May Hsu, Orloff S. Assessment of effects of lossy compression of hyperspectral image data [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery* [C], Bellingham, WA, USA, 2004, X:402 ~ 413.
- 29 Congalton R G, Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principals and practice* [M]. London, UK: Lewis Press, 1999.
- 30 Shen S S, Beard B S. Effects of hyperspectral compression on nonliteral exploitation [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Imaging Spectrometry* [C], San Diego, California, USA, 1998, IV:191 ~ 199.
- 31 Shen S S, Kasner J H. Effects of 3D wavelets and KLT based JPET-2000 hyperspectral compression on exploitation [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Imaging Spectrometry* [C], Chantilly, VA, USA, 2000, VI:167 ~ 176.
- 32 Shen S S, Kasner J H, Wilkinson T S. New hyperspectral compression options in JPEG-2000 and their effects on exploitation [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Imaging Spectrometry* [C], Chantilly, VA, USA, 2002, VII:154 ~ 165.
- 33 Shen S S. Multiband sensor system design tradeoffs and their effects on remote sensing and exploitation [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Imaging Spectrometry* [C], Chantilly, VA, USA, 1997, III:296 ~ 307.
- 34 Christophe E, Leger D, Mailhes C. Comparison and evaluation of quality criteria for hyperspectral imagery [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Image Quality and System Performance* [C], San Jose, California, USA, 2005, II:204 ~ 213.
- 35 Geng Xiu-rui. Target Detection and Classification for Hyperspectral Imagery [D]. Dissertation for doctor of Chinese Academy of Sciences, 2005. [耿修瑞. 高光谱遥感图像目标检测与分类技术研究[D]. 北京:中国科学院博士学位论文, 2005.]
- 36 Cheng Ji-cheng, Guo Hua-dong, Shi Wen-zhong, *et al.* The Uncertainty Problem of Remotely Sensed Data [M]. Beijing: Science Press, 2004. [承继成, 郭华东, 史文中等. 遥感数据的不确定性问题[M]. 北京:科学出版社, 2004.]
- 37 Bharath Ramakrishna, Jing Wang, *et al.* Spectral/Spatial hyperspectral image compression in conjunction with virtual dimensionality [A]. In: *Proceedings of SPIE Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery* [C], Bellingham, WA, USA, 2005, XI:772 ~ 781.