

基于FastICA的高光谱图像压缩技术

辛 勤, 粘永健, 万建伟, 何 密

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

【摘要】提出了一种基于快速独立分量分析(FastICA)的高光谱图像压缩算法。首先引入虚拟维数算法估计图像中的目标端元个数,进而提取出感兴趣的目标端元矢量,并初始化快速独立分量分析的混合矩阵;利用最小噪声分量变换对原始数据进行降维,从降维后的主分量中提取独立分量;对独立分量进行恒虚警率检测与形态学滤波,实现目标分割。对高光谱图像进行谱间Karhunen-Loeve变换,利用比例位移法对感兴趣目标的小波系数进行提升,最后对各主分量进行最优码率的SPIHT压缩。实验结果表明,该方法在获得较高压缩性能的同时能够有效地保留感兴趣的目标。

关键词 高光谱图像; 独立分量分析; 有损压缩; 目标检测

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.05.014

Compression Technique for Hyperspectral Imagery Based on FastICA

XIN Qin, NIAN Yong-jian, WAN Jian-wei, and HE Mi

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

Abstract Efficient compression for hyperspectral imagery has been the research focus for the development of remote sensing technique. The small targets information protection during the compression process without any preknowledge should be necessarily considered. This paper presents a new lossy compression method for hyperspectral imagery based on fast independent component analysis (FastICA). Virtual dimensionality is introduced to determine the number of target endmembers. The mixing matrix of FastICA is initialized by target endmembers. Minimum noise fraction is employed for dimensionality reduction of original data volumes, and FastICA is performed on the selected principal components to generate independent components. Then, constant false alarm rate detection is performed on each IC, which is followed by morphologic filtering. Karhunen-Loeve transform is used to decorrelate the spectral redundancy, general scaling-based method is selected to upshift the wavelet coefficients of interested targets. Finally, each principle component is allocated optimal rate and compressed by SPIHT algorithm. Experimental results on AVIRIS data show that the proposed method not only provides high compression performance, but also preserves targets interested effectively.

Key words hyperspectral imagery; independent component analysis; lossy compression; target detection

20世纪80年代开始建立的成像光谱学,在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域,获取了许多非常窄且光谱连续的图像数据。一般认为,光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ (λ 为波长)的遥感称为高光谱遥感。由于其光谱分辨率达到纳米量级,获取的数据能够提供丰富的地物细节,在国民经济和军事侦察等领域获得了广泛应用^[1]。随着光谱分辨率的不断提高,成像光谱仪获取的数据量急剧增加,对数据的存储和传输带来困难,因而对高光谱图像压缩技术的研究非常必要。

高光谱数据的压缩并非其最终应用目的,目标

识别与理解已经成为重要的应用方向之一,尤其在军事上具有极高的应用价值。因此,如何有效保护高光谱图像中的重要目标信息成为压缩算法必须着重考虑的问题。在此应用背景下,首先需要探测出图像中的潜在目标,并对其进行分割;然后将目标看作感兴趣区域(region of interest, ROI),利用ROI的编码方法对高光谱图像实施压缩。针对未知任何先验信息条件的目标探测,首先需要通过端元提取算法获取感兴趣或疑似感兴趣目标的光谱表达形式,再对目标进行探测或者提取。在高光谱图像目标探测领域,约束最小能量算子(constrained energy

收稿日期: 2009-04-08; 修回日期: 2009-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(60572135); 部级预研基金

作者简介: 辛 勤(1973-),男,博士,副教授,主要从事现代信号处理方面的研究。

minimization, CEM)是应用最为广泛的目标探测算法^[2]。文献[3]利用迭代误差分析获取图像中的端元光谱, 然后将其代入CEM滤波器得到相应的探测结果。文献[4]提出基于加权样本自相关矩阵的目标探测算法, 解决了CEM无法有效探测大目标的不足。文献[5]提出一种基于感兴趣信息的高光谱数据压缩方法, 通过确定图像中的感兴趣区域与波段, 较好地保护了图像中的重要信息。独立分量分析(independent component analysis, ICA)是20世纪90年代后期发展起来的信号处理新方法^[6], 它能够将信号分解成若干个与高光谱图像特征密切相关的独立分量(independent component, IC)。文献[7]利用ICA对高光谱图像实施压缩, 能够有效保留图像中的目标信息, 但该方法无法重建原始数据。本文引入FastICA对高光谱图像进行目标探测, 提出了一种基于FastICA的高光谱图像压缩算法。该算法首先采用虚拟维数(virtual dimensionality, VD)对目标端元数量进行估计, 通过提取目标端元光谱初始化FastICA的混合矩阵, 采用最小噪声分量变换(minimum noise fraction, MNF)对原始数据进行降维, 利用FastICA从降维后的主分量中依次提取IC, 对IC进行恒虚警率检测(constant false alarm rate, CFAR)和形态学滤

波, 实现目标分割; 然后选取特定应用背景下的感兴趣目标, 采用ROI编码技术对高光谱图像实施压缩, 实验结果验证了所提方法的有效性。

1 基于FastICA的压缩算法设计

高光谱图像中通常存在感兴趣区域, 如军事侦察图像中的军事目标、重要地物等, 这些ROI恢复质量的好坏直接影响高光谱图像的后续应用。高光谱图像ROI编码能够使得码流中的ROI先于背景(background, BG)出现, 当发生码流截断时能够保证ROI具有优于BG的重建质量, 在中低码率情况下能够较好地保护重要目标。

高光谱图像压缩并非数据应用的最终目的, 有损压缩技术必须与其后续应用结合才有意义。目前, 高光谱数据的应用基本上可以归结为高维特征空间的目标检测与分类技术。在该大背景下, 军事侦察又具有自身显著的特点, 小目标及异常检测成为战场环境最为重要的应用方向之一。因此, 如何有效保留“少数”信号特征, 成为有损压缩考虑的一个重点方面。本文提出了一种基于FastICA的高光谱图像压缩方法, 该方法包括目标分割与ROI编码两部分, 如图1所示。

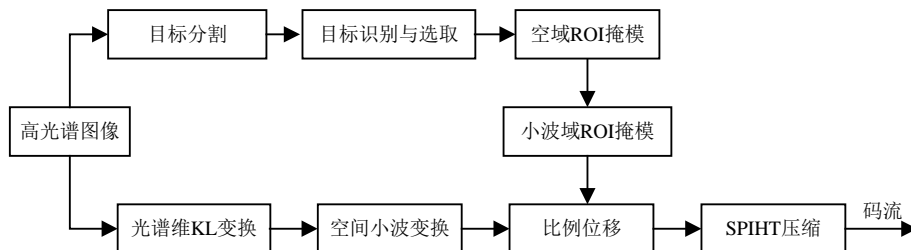


图1 基于FastICA的高光谱图像压缩算法

2 高光谱图像目标分割

线性混合模型在高光谱图像处理中获得了广泛应用, 它主要通过确定一组具有相对固定光谱的特征地物和相应的混合比例系数描述图像中光谱的混合情况。高光谱图像中的每个像元矢量都可近似认为是各个端元的线性混合像元, 如:

$$\mathbf{r} = \mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中 \mathbf{r} 为任一像元矢量; $\mathbf{M} = [m_1, m_2, \dots, m_p]$ 为端元矢量集; $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_p]^T$ 为系数向量; a_i 为 \mathbf{r} 中端元 m_i 所占的比例(丰度); \mathbf{n} 为噪声项。

ICA的最初目的是从一组观测信号中分离出相互统计独立的、原始的、被未知矩阵混合的信号估计值, 其基本模型为: 假设观测信号 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$

是由 n 个相互统计独立的源信号 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 线性组合而成, 该线性关系表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (2)$$

式中 混合矩阵 \mathbf{A} 为 $m \times n$ 的实系数矩阵。ICA所要解决的问题是以统计独立为优化目标, 通过寻找分离矩阵 \mathbf{W} , 从观测信号 \mathbf{X} 中估计出源信号 \mathbf{S} 。由于ICA具有较高的运算复杂度, 文献[8]提出了基于固定点的ICA快速算法(FastICA)。

高光谱图像的目标探测过程可以看作是一个线性光谱解混过程。光谱解混通常包括端元提取和丰度反演两个步骤, 即利用几何端元提取方法自动获取端元矢量 \mathbf{M} , 再根据式(1)进行丰度反演。若将混合信号 \mathbf{X} 看作像元矢量 \mathbf{r} , 端元矩阵 \mathbf{M} 看作混合矩阵 \mathbf{A} , 系数向量 \mathbf{a} 看作独立信号源 \mathbf{S} , ICA在盲分离中的基本模

型转化为高光谱图像处理中的线性混合模型。FastICA利用高阶累积量可以更好地提取出图像中的目标特征,获得理想的目标探测效果。目前, FastICA算法主要针对无噪声的独立分量分析模型,在无噪或者噪声较少时有较好的效果,因此,可以考虑通过对原始数据进行降维达到降噪的目的。根据上述分析,给出了一种基于FastICA的高光谱图像目标分割算法,如图2所示。首先利用HFC (harsanyi、farrand and chang)算法对原始数据进行VD估计^[9],获取图像中的

目标端元数量,然后利用基于最大距离(maximum distance, MD)的快速端元自动提取算法获取目标端元矢量^[10],并对FastICA的混合矩阵进行初始化,解决IC在排序上的随机性;由于MNF能够根据SNR对主分量(principle component, PC)进行排序,与PCA相比,更适合高光谱图像的后续处理。本文采用MNF对原始数据进行降维,利用FastICA从降维后的PC中依次提取出含有目标信息的IC,然后对每个IC进行CFAR检测与形态学滤波,实现目标的有效分割。

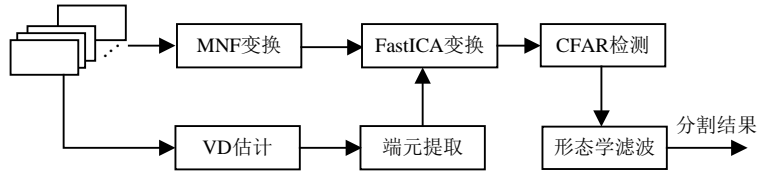


图2 基于FastICA的高光谱图像目标分割流程

ROI的提取是面向目标识别与理解,因此,不宜将目标形状直接作为ROI,这是由于一旦产生分割错误就会严重影响目标识别的效果。在实际应用中, ROI通常定义为包含目标的最小外接矩形,即对于给定的目标点集 Ω ,最小外接矩形为:

$$[z(x_{\min}, y_{\min}), z(x_{\max}, y_{\max})] \quad (3)$$

在此基础上合并最小外接矩形,即对于给定的搜索距离 d ,定义目标点集之间的距离为:

$$D = \min\{z_1 - z_2\} \quad z_1 \in \Omega_1, z_2 \in \Omega_2 \quad (4)$$

若 $D \leq d$,合并这两个目标点集,形成新的目标点集^[11]。最后,将目标点集的边界向外扩充 r 个像素,即可得到最终的感兴趣区域。

3 高光谱图像ROI编码方法

3.1 变换方法的选取

针对高光谱图像有损压缩而言,基于变换的方法已被证明能够获得较好的压缩性能而被广泛使用。考虑到高光谱图像的相关性存在三维非对称特性,即光谱维具有比空间维(水平与垂直方向)更强的相关性,因而应采用不同的变换方法去除谱间与空间相关性。目前,常用的变换方法包括KLT、DCT(discrete cosine transform)以及DWT(discrete wavelet transform)。KLT是统计意义上的最优线性正交变换,与DCT及DWT不同,KLT的基函数是不固定的,其变换矩阵依赖于原始数据的统计特性,因而对变换数据具有最佳的匹配效果,利用KLT能够有效去除高光谱图像的谱间相关性。而信号在空间维上依赖于场景的几何结构较难预测,在各个区域

边界处存在较多的不连续,在该情形下,利用DWT或者DCT可以获得较好的去相关效果^[12]。根据上述分析,本文分别采用KLT与DWT去除谱间与空间相关性。

针对军事侦察应用背景的高光谱图像压缩而言,在低码率条件下,要求ROI获得比BG更高的图像质量,而在高码率条件下,ROI与BG均要获得较高的图像质量,这是由于BG对ROI的理解也是不可或缺的。本文给出的目标分割算法最终利用矩形对ROI进行标识,并且高光谱图像中通常存在多个目标,考虑到JPEG2000中的比例位移法(scaled-based shift)在控制ROI与BG质量上的灵活性,选取该方法对高光谱图像进行ROI编码。

3.2 主分量选取与最优码率压缩

利用KL变换进行光谱维去相关后,PC数量的选取一直是其应用过程中的难点问题。传统方法通过计算能量百分比保留少数特征值较大的PC,可能丢失掉原始图像中的一些异常信息,这是由于该类信息通常出现在特征值相对较小的PC上。为了解决这一不足,本文在文献[13]的基础上提出了一种新的PC选取方法,利用该方法确定需要保留的PC数量。考虑到PC之间是按照能量大小进行排序,根据各PC的能量大小进行码率分配可显著提高压缩效果。若目标码率为 R_i ,需保留的PC数量为 q ,则最优码率分配方案为^[14]:

$$B_i = R_i \left(\log_2 \sigma_i / \sum_{j=1}^N \log_2 \sigma_j \right) q \quad (5)$$

式中 B_i 表示第 $i(i=1,2,\dots,q)$ 个PC分配的码率; σ_i

表示第 i 个PC的标准差。该分配方案可以使能量较大的PC获得较高的码率,而能量较低的PC获得较少的码率,从而达到最优的压缩结果。

4 实验结果与讨论

为验证算法的有效性,对航空可见光/红外光成像光谱仪 (airborne visible/Infrared imaging spectrometer, AVIRIS)型高光谱图像进行仿真试验,使用美国圣地亚哥某机场数据,其覆盖波长范围为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,空间分辨率为 $3.5\ \text{m}$ 。去掉水吸收与强噪声波段,从原始224波段中选取190个波段作为实验对象。图像大小为 128×128 像素,每个像素保存为 2 bit,图3给出了第30波段图像。



图3 圣地亚哥机场第30波段图像

将原始三维数据表示为二维数据的形式,共 L 行,每一行表示一个波段的数据,使用HFC算法对机场数据进行VD估计。表1所示为不同虚警概率 P_f 条件下对应的VD估计结果。

表1 不同 P_f 对应的端元数量

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
VD	34	15	10	7	6	6

为尽可能提取出图像中潜在的目标,选取 $P_f=10^{-2}$ 对应的VD估计结果进行后续处理,即端元数 $p=15$ 。采用基于MD的端元提取算法从原始数据中提取出15个端元矢量,将其作为FastICA的初始混合矩阵。对于MNF降维,选取 $\text{SNR}>1$ 的PC,即 $q=61$ 。需要指出的是,所提取的IC代表了图像中潜在的目标,但并非所有的目标都是感兴趣或有实际意义的,图4给出了其中4个感兴趣目标的端元光谱曲线。

利用图2所示的目标分割算法对圣地亚哥机场数据进行目标探测,其结果如图5a所示。在此基础上进行CFAR检测,可得到目标检测的二值图像,此时个别目标存在较多的虚警,但基本上都是孤立噪声点与极少量像素的连通区域,它们对目标识别并没有太大的意义,利用形态学滤波的方法很容易进行消除,仅留下极个别相对较大的虚警目标,如图5b所示。

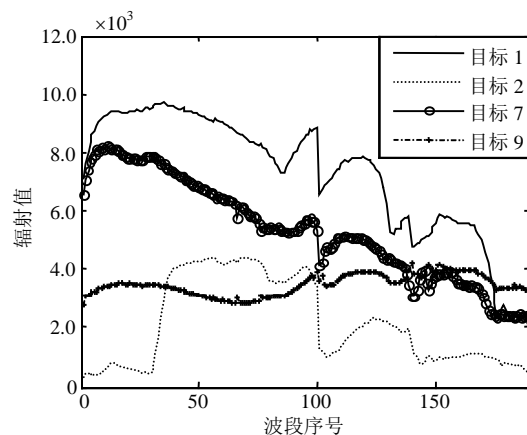


图4 目标端元的光谱曲线

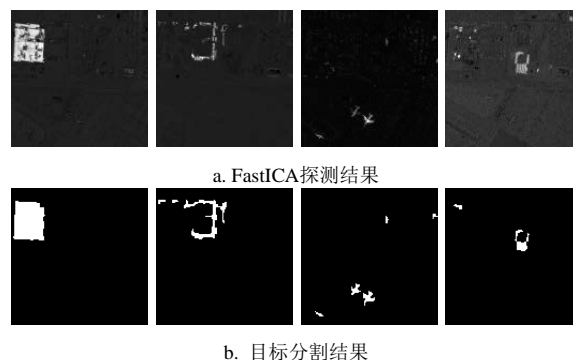


图5 本文算法的目标检测与分割结果

在军事侦察的应用背景下,本文将图5中的飞机作为感兴趣目标,其空域ROI掩膜如图6所示($r=3$)。

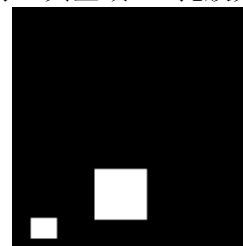


图6 ROI掩膜

利用KL变换去除高光谱数据的谱间相关性,然后利用9-7提升小波去除空间相关性,根据式(5)对各个PC分配最优的压缩码率,采用比例位移法对ROI小波系数进行提升,最后利用SPIHT算法对各PC进行压缩。在未知任何先验信息条件下,无法对各个目标的重要性做出合理判断,因此,各个ROI应具有相同的优先级。利用信噪比(SNR)作为评价压缩性能的标准。由于谱间变换后的各个PC的码率不同,因此,各个PC应具有不同的位移因子 s_i ,选取方法为 $s_i = \max(M_{b,i})/3$,其中 s_i 为谱间变换后第 i 个PC的位移因子, $\max(M_{b,i})$ 表示第 i 个PC的最高位平面数。表2为无ROI的压缩算法与本文算法的压缩性能比较,显然,本文算法提高了ROI的SNR,但BG的SNR有所降低。

- parity-check codes[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1999.
- [7] SONG Shu-mei, ZHOU Bo, LIN Shu, et al. A unified approach to the construction of binary and nonbinary quasi-cyclic LDPC codes based on finite fields[J]. IEEE Trans Commun, 2009, 57(1): 84-93.
- [8] ZHOU Bo, KANG Jing-yu, LIN Shu, et al. High performance non-binary quasi-cyclic LDPC codes on euclidean geometries[J]. IEEE Trans Commun, 2009, 57(5): 1298-1311.
- [9] POUILLIAT C, FOSSORIER M, DECLERCQ D. Design of regular (2,dc)-LDPC codes over GF(q) using their binary images[J]. IEEE Trans Commun, 2008, 56(10): 1626-1635.
- [10] HU Xiao-yu, ELEFTHERIOU E. Binary representation of cycle Tanner-graph GF(2b) codes[C]//Proc IEEE Intern Conf on Commun. Paris: [s.n.], 2004: 528-532.
- [11] PENG Rong-hui, CHEN Rong-rong. Design of nonbinary quasi-cyclic LDPC cycle codes[C]//Proc Inform Theory Workshop. Salt Lake City: University of Utah, 2007: 13-18.
- [12] HU Xiao-yu, ELEFTHERIOU E, ARNOLD D M. Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51(1): 386-398.
- [13] MYUNG S, YOUNG K, KIM J. Quasi-cyclic LDPC codes for fast encoding[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2005, 51(8): 2894-2901.

编辑 张俊

(上接第715页)

- ZHANG Jun, HUANG Ying-jun, GAO Gui, et al. ROI detected automatically SAR image compressing[J]. Signal Processing, 2009, 25(1): 1-5.
- [12] CAGNAZZO M. Wavelet transform and three dimensional data compression[D]. Napoli: University of Napoli, 2005.
- [13] 粘永健, 王展, 万建伟, 等. 面向异常检测的高光谱图像压缩技术[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 48-52.
- NIAN Yong-jian, WANG Zhan, WAN Jian-wei, et al. Lossy compression for hyperspectral imagery oriented anomalous detection[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(3): 48-52.
- [14] RUCKER J T, FOWLER J E, YOUNAN N H. JPEG2000 coding strategies for hyperspectral data[C]//Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, South Korea: [s.n.], 2005.

编辑 税红

(上接第719页)

的高度串行后向迭代过程^[11]。此外,该方法使用正交旋转操作去除递归更新权值,其结果是可以维持QR分解方法的固有稳定性,在此基础上可进一步研究本文算法的硬件实现问题。

参 考 文 献

- [1] PEDRO J C, MAAS S A. A comparative overview of microwave and wireless power-amplifier behavioral modeling approaches[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2005, 53(4): 1150-1163.
- [2] KIM J, KONSTANTINOU K. Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory[J]. Electron Lett, 2001, 37(11): 1417-1418.
- [3] DING L, ZHOU G T, MORGAN D R, et al. A robust digital basedband predistorter constructed using memory polynomial[J]. IEEE Trans Commun, 2004, 52(1): 159-165.
- [4] ZHU A, PEDRO J C, BRAZIL T J. Dynamic deviation reduction based Volterra behavioral modeling of RF power amplifiers[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(12): 4323-4332.
- [5] MORGAN D R, MA Z, KIM J, et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10): 3852-3860.
- [6] WOOD J, LEFEVRE M, RUNTON D, et al. Envelope-domain time series(ET) behavioral model of a doherty RF power amplifier for system design[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2006, 54(8): 3163-3172.
- [7] DINIZ P S R. Adaptive filtering: algorithms and practical implementation[M]. 2nd ed. Norwell, MA: Kluwer Academic Press, 2002.
- [8] FERNET F. An ADS bench for generating multi-carrier 3GPP WCDMA ACLR test signals[J]. High Freq Electron, 2002, 11: 34-42.
- [9] KU H, KENNEY J S. Behavioral modeling of nonlinear RF power amplifiers considering memory effects[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51(12): 2495-2504.
- [10] CUNHA T R, PEDRO J C, CABRAL P M. Design of a power-amplifier feed-forward RF model with physical knowledge considerations[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2007, 55(12): 2747-2756.
- [11] ALEXANDER S T, GHIRNIKAR A L. A method for recursive least squares adaptive filtering based upon an inverse QR decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(1): 20-30.
- [12] WANG Hua-dong, HE Song-bai, BAO Jing-fu, et al. An envelope hammerstein model for power amplifiers[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(4): 362-365.

编辑 税红