

文章编号: 2095-4980(2021)06-1075-06

基于光谱线性分解的高光谱图像高效压缩

苏令华¹, 王平², 马志强¹, 张茜¹

(1.空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077; 2.重庆工程学院 软件学院, 重庆 400056)

摘要: 高光谱图像有效压缩对于实现实时传输具有重要意义。本文将光谱线性分解应用于高光谱图像的高效压缩中, 根据高光谱图像的线性混合模型, 将高光谱数据分解为端元与丰度的乘积, 编码端对端元与丰度进行必要的数据处理, 然后分别进行 JPEG-LS 无损压缩, 形成输出码流数据。解码端利用最终解码后的端元与丰度相乘来重建原始图像, 探讨了量化步长对率失真性能的影响。仿真实验结果表明, 该方法能够取得一定的压缩性能。

关键词: 高光谱图像; 线性混合模型; 端元提取

中图分类号: TN911.73; TP751.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020106

Efficient compression of hyperspectral images based on spectral linear decomposition

SU Linghua¹, WANG Ping², MA Zhiqiang¹, ZHANG Qian¹

(1.Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China;

2.School of Software, Chongqing Engineering Institute, Chongqing 400056, China)

Abstract: Effective compression of hyperspectral images is of great significance for real-time transmission. In this paper, spectral linear decomposition is introduced into efficient compression of hyperspectral image. According to the Linear Mixed Model(LMM), the hyperspectral data is decomposed into the product of endmember and abundance. At the encoder, the necessary data processing is performed on the endmembers and abundance, followed by JPEG-LS lossless compression. At the decoder, the original hyperspectral image is reconstructed by multiplying the final decoded endmembers and abundance, moreover, the effect of the quantization step on the rate-distortion performance is discussed. Experimental results show that the proposed method can achieve certain compression performance.

Keywords: hyperspectral images; linear mixed model; endmember extraction

高光谱遥感在国民经济的各个领域获得了广泛应用,其获取的高光谱图像能够在可见光到近红外区间生成数百个波段的图像,实现了“图谱合一”^[1]。目前,制约高光谱遥感实际应用的瓶颈是高光谱图像的数据量巨大,随着分辨率的不断提高,数据量仍在持续膨胀,给存储与传输带来了巨大挑战。因此,需采用有效的方法对其进行压缩,在保证重建质量的前提下,尽可能减少数据量。高光谱图像压缩可分为无损压缩与有损压缩,其中无损压缩的压缩程度太低,难以满足数据传输码率的实际需求;有损压缩能够以一定程度的信息损失来换取较大程度的压缩,成为当今高光谱图像压缩的发展方向。

针对高光谱图像的压缩,主要分为预测方法与变换方法。高放等对高光谱图像进行光谱维 K -均值聚类,再对每一类分别使用递归最小二乘法进行预测,从而有效消除空间冗余和谱间冗余^[2]。张海涛等提出基于多波段与查找表预测值校正的高光谱图像压缩方法,利用当前波段的前 3 个波段计算局部平均谱间比例,再对获取的查找表预测值进行 2 次校正^[3]。文献[4]提出基于预测的高光谱图像压缩算法,可实现无损与有损压缩,在码率控制与质量控制方面表现良好。近年来,压缩感知技术已被成功应用于高光谱图像的压缩,取得了优于传统的单波段压缩方法的压缩性能^[5-6],但与先进的压缩方法相比,差距依然较大。目前,高光谱图像压缩常用的变换主要有离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)、离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)与卡胡南-洛维

收稿日期: 2020-03-18; 修回日期: 2020-05-11

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2016JM4008)

变换(Karhunen-Loève Transform, KLT)。由于 KLT 能够达到与原始图像良好的匹配,在去相关方面远远优于 DWT。Rucker 研究 KLT+JPEG2000 的码率分配问题,实验结果表明联合分配码率可以获得整体最优的率失真性能^[7]。文献[8]提出基于区域 KLT 的高光谱压缩算法,在区域分割的基础上,对每个区域分别在光谱方向上进行 KLT。文献[9]提出基于分块 KLT 的高光谱图像压缩算法,利用分块 KLT 来进一步提高 KLT 的去相关效果。尽管 KLT 具有良好的去相关性能,但反复迭代的过程使得其复杂度过高。为了解决这一问题,Blanes 通过降低 KLT 协方差矩阵的维数来降低复杂度,但损失了部分率失真性能^[10]。陈善学等提出一种基于自适应波段聚类主成分分析与反向传播神经网络相结合的高光谱图像压缩算法^[11],利用近邻传播聚类算法对波段进行自适应聚类,对聚类后的各个分组分别进行主成分分析,最后利用反向传播神经网络对所有主成分进行编码压缩,取得了良好的压缩性能。Gundogar 提出一种基于多维数组分解的高光谱有损压缩算法^[12],但未展示与传统压缩方法的性能比较。Valsesia 将卷积神经网络用于高光谱图像的压缩重建^[13],获得了次优的重建结果。除了算法研究外,其硬件实现也是目前高光谱压缩研究的热点,其中 Barrios 研究星载高光谱压缩方法的硬件实现问题,提出一种通用的硬件解决方案^[14],获得良好的压缩性能。

光谱解混的思想已在高光谱图像压缩中得以应用。Du 提出基于无监督全约束最小二乘线性光谱混合分析的高光谱压缩算法^[15],所提出的压缩方法主要编码高光谱图像中感兴趣目标的丰度图像,以此实现数据压缩。张立燕等提出了基于端元提取的高光谱图像压缩方法^[16],首先用顶点成分分析(Vertex Content Analysis, VCA)提取端元光谱,然后根据各端元与观测像元之间的光谱间余弦角相似性度量估计各端元的丰度,再对端元与丰度分别进行无损压缩。谌德荣等提出基于线性光谱混合理论的星上高光谱数据压缩算法^[17],利用 VCA 获得高光谱图像的端元,根据信道容量选择端元数,基于线性光谱混合模型获得丰度值,利用 JPEG2000 对端元和丰度分别进行无损压缩。在借鉴上述研究成果的基础上,本文深入研究基于光谱线性分解的高光谱图像高效压缩技术,在线性混合模型(LMM)的假设条件下,将高光谱图像分解为端元与丰度,然后对两者分别进行数据管理和 JPEG-LS 无损压缩,实验结果验证了该方法的有效性。

1 线性混合模型

LMM 物理含义明确,模型计算简单,已经在高光谱图像的光谱解混中获得了成功应用。假设 $\mathbf{X}=[\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_L]^T$ 表示原始高光谱图像,其中 L 为波段数量,LMM 可表示为:

$$\mathbf{X}=\mathbf{E}\mathbf{S} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为端元矩阵; \mathbf{S} 为丰度矩阵。由式(1)可以看出,LMM 可以将原始高光谱图像线性分解为端元与丰度的乘积。需要指出的是,高光谱图像中的端元数目通常来讲远远少于高光谱图像的原始维数,因此,利用 LMM 可以实现高光谱图像的降维,高光谱图像的压缩传输转换为端元与丰度的压缩传输,而低维的端元与丰度有利于获得良好的压缩性能。

2 基于光谱线性分解的高光谱图像压缩

在利用 LMM 对高光谱图像进行线性分解之前,首先要确定高光谱图像中的端元数量 p 。目前,已经提出诸多端元数量估计的方法,例如 HySime^[18]等。在确定了端元数量 p 的基础上,可以利用端元提取算法 VCA 提取高光谱图像中相应数量的端元 \mathbf{E} ,根据式(2)求得丰度矩阵 \mathbf{S} :

$$\mathbf{S}=(\mathbf{E}^T\mathbf{E})^{-1}\mathbf{E}^T\mathbf{X} \quad (2)$$

本文提出的基于光谱线性分解的高光谱图像压缩流程,如图 1 所示。首先,对成像光谱仪所获取的高光谱图像进行光谱线性分解,利用 VCA 从原始高光谱图像中提取出端元 \mathbf{E} ,在此基础上,利用式(2)得到丰度信息 \mathbf{S} 。在对 \mathbf{E} 和 \mathbf{S} 进行数据处理后,采用 JPEG-LS 对两者进行无损压缩,得到压缩码流。

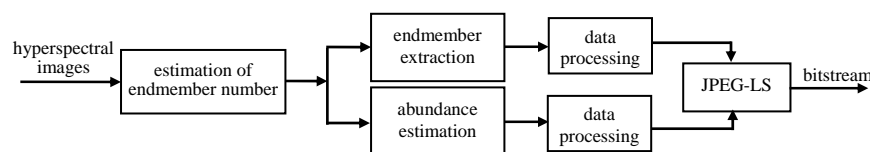


Fig.1 Hyperspectral image compression based on spectral linear decomposition

图 1 基于光谱线性分解的高光谱图像压缩流程

需要指出的是,光谱线性分解得到的 \mathbf{E} 和 \mathbf{S} 无法直接进行 JPEG-LS 无损压缩,需要进行必要的数据处理。

由于丰度 S 是浮点型，并且其值较小，在压缩之前需要对其进行浮点转定点的运算，如式(3)所示：

$$S = \text{round}(2^n * S) \quad (3)$$

式中 round 是四舍五入操作， n 的大小能够控制 S 的精确度，需根据实际情况进行选取。在此基础上，对丰度 S 进行标量量化，如式(4)所示：

$$S = \text{round}(S / 2^q) \quad (4)$$

其中改变 q 的大小可以控制量化步长的大小。此外，虽然 VCA 提取出的端元 E 也是浮点型，但其值较大，直接进行取整操作即可，即 $E = \text{round}(E)$ 。

由于 E 和 S 中仍存在部分负值，需要将它们转换为正值才能进行后续压缩，转换方法为：

$$E = \begin{cases} 2E & E \geq 0 \\ 2|E|+1 & E < 0 \end{cases}, \quad S = \begin{cases} 2S & S \geq 0 \\ 2|S|+1 & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

为保证解码端的高光谱图像重建质量，编码端直接对两者进行 JPEG-LS 无损压缩，从而得到最终的压缩码流。目前，基于变换的方法在高光谱图像有损压缩中获得了广泛应用，并取得了较好的压缩性能。此类方法均是对原始高光谱图像进行空谱变换，从而去除高光谱图像的相关性。本文方法将原始高光谱图像进行光谱线性分解，获得端元与丰度 2 个分量，通过对两者信息的压缩来实现原始数据的压缩。与基于变换的典型压缩方法相比，本文方法具有较低的编码复杂度，并且对内存的需求较小，适合星载平台的高光谱数据压缩。

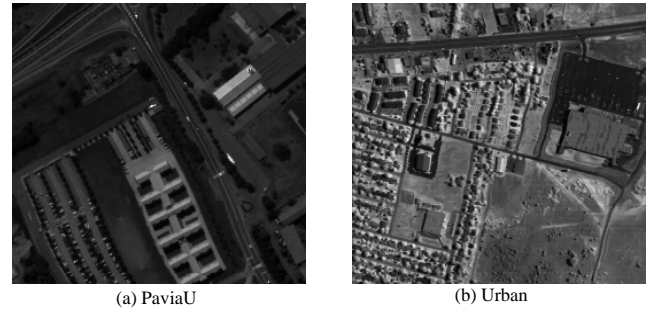
3 实验结果与分析

为了验证所提方法的有效性，选取 PaviaU 与 Urban 两个高光谱数据进行性能测试，如图 2 所示。这 2 幅图像都是高光谱遥感领域著名的测试图像，其中 PaviaU 的波段数为 103，空间大小截取为 256×256 ；Urban 的波段数为 162，空间大小为 256×256 。2 幅图像每个像素均为 2 个字节。

采用码率 (Bit Per Pixel, BPP) 和信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 来评价压缩性能，其中 R_{SN} 的计算公式为：

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\|X_i\|_2^2}{\|X_i - \hat{X}_i\|_2^2} \quad (6)$$

式中： X_i 为原始图像的像素值； \hat{X}_i 为恢复图像的像素值。利用式(6)可以计算出每个波段的 R_{SN} ，本文利用高光谱图像所有波段 R_{SN} 的平均值来评价算法的压缩性能。



(a) PaviaU (b) Urban

Fig.2 Hyperspectral images for testing

图 2 测试所采用的高光谱图像

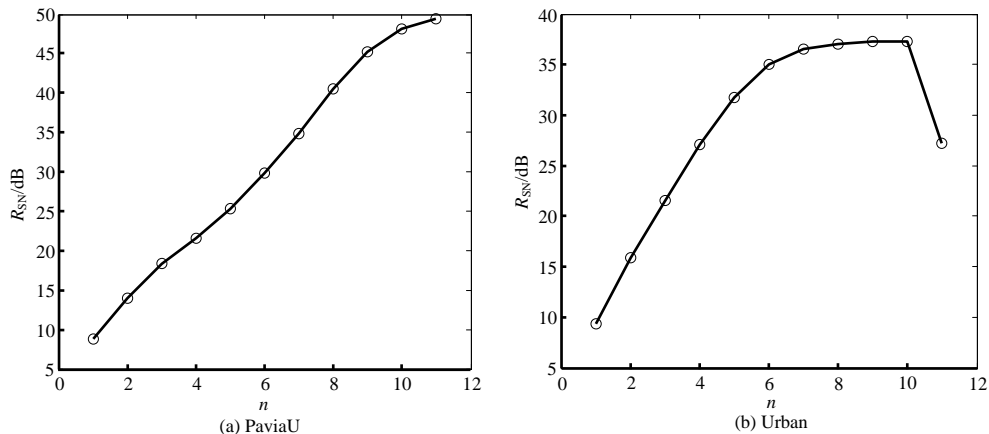


Fig.3 Influence of n value on reconstruction quality

图 3 n 的取值对于重建质量的影响

首先利用 HySime 算法估计 PaviaU 与 Urban 的端元数量 p ，估计结果分别为 58 和 28。由于丰度数据是浮点型，并且其值较小，为了后续编码的需要，需将其转换为定点整数。根据式(3)给出的转换方式，需探讨合理的 n

的取值。此外，采用 VCA 提取出的端元 E 也是浮点型，需要对其进行取整操作。在丰度 S 完成量化的基础上，根据式(5)将 E 和 S 映射为正值。理论上讲， n 的值越大，保留 S 精确度就越高；而 n 越小，保留 S 的精确度就越低。图 3 给出了 Urban 和 PaviaU 在取不同 n 值时所取得的重建图像 SNR，其中端元数量为 HySime 估计的结果。可以看出， $n=10$ 时，2 幅重建图像的 SNR 已经可以取得理想的值，此时随着 n 的增大，对于 PaviaU 而言，SNR 增长趋势比较微弱，对于 Urban，其 SNR 已经下降，这是由于 S 的数值过大，已经超出 2 个字节的表示能力。因此，对于 S 的浮点转定点操作，本文选取 $n=10$ 。

图 4 分别给出了利用 VCA 算法从 PaviaU 和 Urban 中提取的 6 个端元，图 5 和图 6 分别给出了 PaviaU 和 Urban 前 3 个端元对应的丰度图像。需要指出的是，本文目的在于实现高光谱图像的高效压缩与恢复，光谱线性分解结果并非本文所要关注的主要方面，它仅仅是实现上述目的的一个手段。因此，对于所提取的端元具体代表哪种地物，并非是本文所研究的内容。

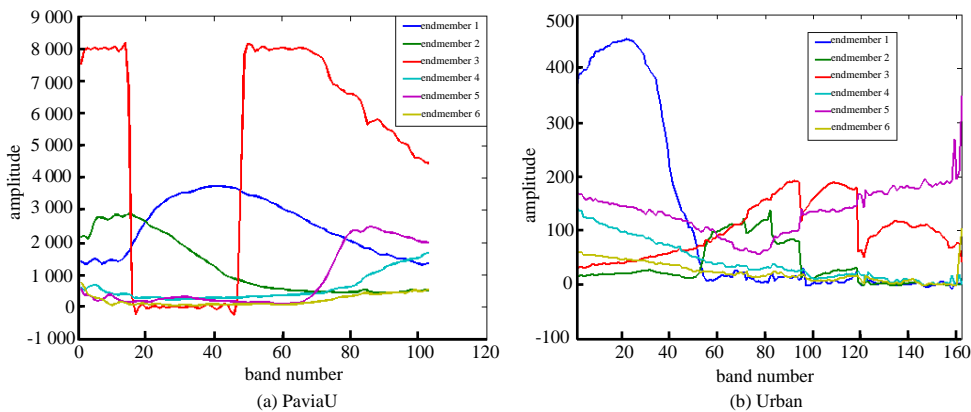


Fig.4 First six endmembers extracted by VCA

图 4 利用 VCA 提取出的前 6 个端元

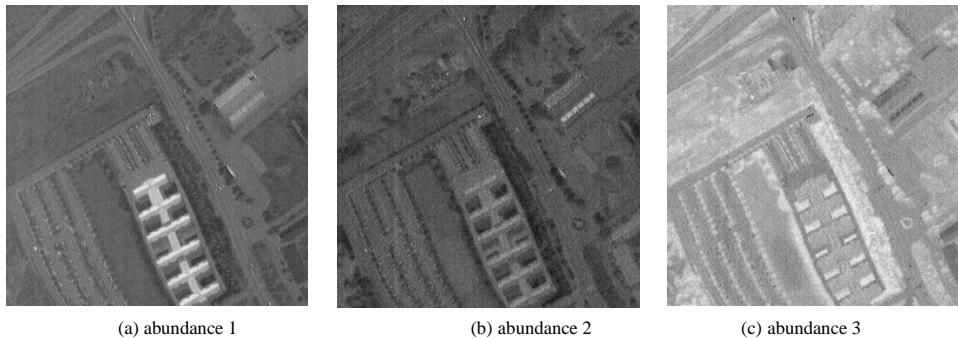


Fig.5 Abundance images of the first three endmembers(PaviaU)

图 5 前 3 个端元对应的丰度图像(PaviaU)

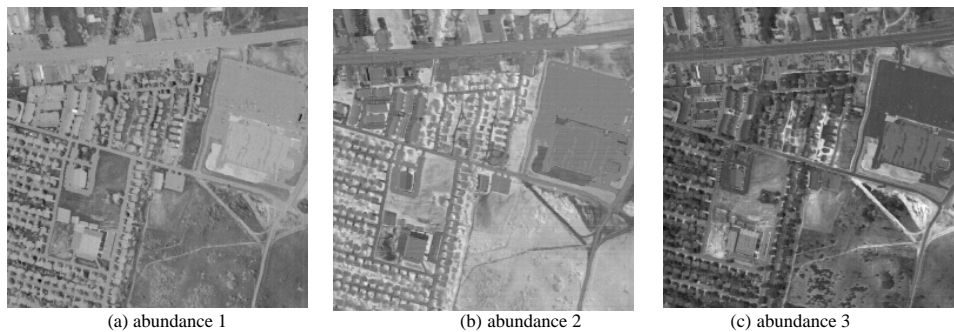


Fig.6 Abundance images of the first three endmembers(Urban)

图 6 前 3 个端元对应的丰度图像(Urban)

本文方法通过改变 q 的大小来改变量化步长，从而达到控制码率的效果。图 7 给出了 q 对于码率的影响。可以看出，随着 q 的增大，BPP 是逐渐降低的，这是因为量化步长的增大，量化后的数据量减少，从而降低了 BPP。由于 PaviaU 估计的端元数量较多，使得其整体 BPP 偏高。图 8 给出了 q 的取值对于重建图像 SNR 的影响，可以看出，随着 q 的逐步增加，SNR 也是单调递减的。

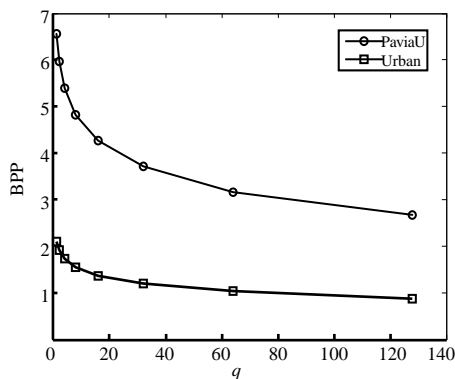


Fig.7 Effect of q value on BPP
图 7 q 的取值对于码率的影响

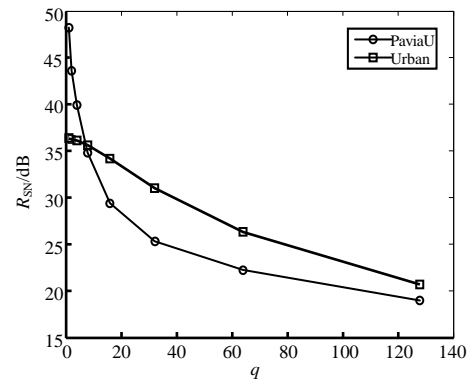


Fig. 8 Effect of the q value on R_{SN}
图 8 q 的取值对于 R_{SN} 的影响

图 9 给出了 JPEG2000 与本文方法的压缩性能比较。对于 PaviaU, 本文方法的压缩性能低于 JPEG2000, 其原因是: 由于利用 HySime 算法估计出来的该数据端元数过高($p=58$), 光谱线性分解后需要压缩的端元与丰度的数据量仍然过大, 加上量化操作所带来的损失, 致使其最终压缩性能严重下降。对于 Urban, 利用 HySime 对其估计的端元数量适中($p=28$), 光谱线性分解后需要压缩的数据量并不大, 并且在该端元数量条件下能够获得较好的重建性能, 这使得本文方法的压缩性能优于 JPEG2000。从实验结果可以看出, 在应用本文方法时, 需要特别注意端元数量的估计, 本文算法不太适合端元数量较多的高光谱图像。实际上, PaviaU 中并不存在如此多的端元, 后续可以在算法中对端元数量进行一定程度的限制, 减少端元对于重建性能的影响非常有限, 但会显著减少所需压缩的数据量, 从而提高整体压缩性能。

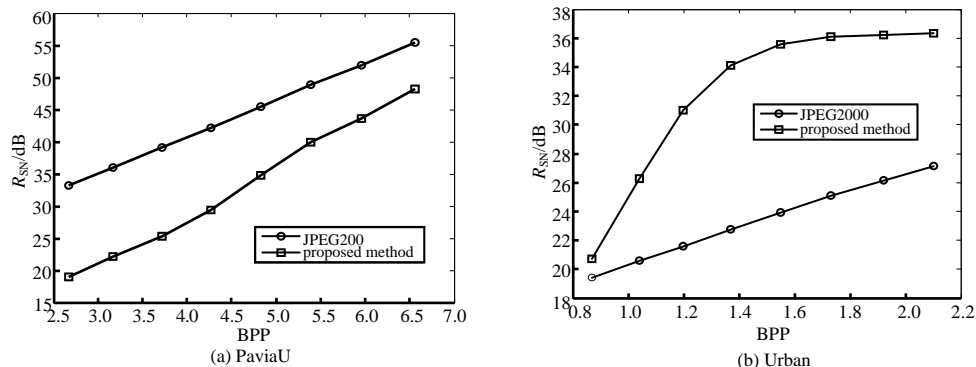


Fig.9 Comparison of compression performance between JPEG2000 and the proposed method
图 9 JPEG2000 与本文方法的压缩性能比较

4 结论

本文将光谱线性分解应用到高光谱图像的压缩中, 在 LMM 的假设下, 将高光谱图像分解为端元与丰度 2 个分量, 对两者进行适当的数据处理后分别进行 JPEG-LS 无损压缩, 通过改变量化步长来控制输出码率的大小以及重建质量。实验结果验证了算法的有效性。需要指出的是, 较高的端元数量会导致本文算法性能的下降, 因此, 需要将端元数量控制在合理的范围之内, 必要时对 HySime 估计的端元数量进行修正。未来可以针对端元与丰度 2 个分量, 开发更为高效的压缩方法, 以进一步提高压缩性能。

参考文献:

- [1] 童庆禧,张兵,郑兰芳. 高光谱遥感—原理、技术与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. (TONG Qingxi,ZHANG Bing,ZHENG Lanfang. Hyperspectral remote sensing—principle,technology and application[M]. Beijing:Higher Education Press, 2006.)
- [2] 高放,孙长建,邵庆龙,等. 基于 K-均值聚类 and 传统递归最小二乘法的高光谱图像无损压缩[J]. 电子与信息学报, 2016,38(11):2709–2714. (GAO Fang,SUN Changjian,SHAO Qinglong,et al. Lossless compression of hyperspectral images using K-means clustering and conventional recursive least-squares predictor[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016,38(11):2709–2714.)
- [3] 张海涛,曹博甫,刘万军. 多波段和查找表预测值校正的高光谱图像压缩[J]. 激光与红外, 2017,47(9):1181–1185.

- (ZHANG Haitao, CAO Bofu, LIU Wanjun. Compression of hyperspectral images based on multi-band images and lookup table prediction correction[J]. *Laser and Infrared*, 2017,47(9):1181–1185.)
- [4] CONOSCENTI M, COPPOLA R, MAGLI E. Constant SNR, rate control, and entropy coding for predictive lossy hyperspectral image compression[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016,54(12):7431–7441.
- [5] WANG Z L, FENG W T, NIAN Y J. Compressive-sensing-based lossy compression for hyperspectral images using spectral unmixing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018,47(S1):S126003.
- [6] LI J, FU Y, LI G N, et al. Remote sensing image compression in visible/near-infrared range using heterogeneous compressive sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018,11(12):4932–4938.
- [7] 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.], 2005:128–131.
- [8] CAGNAZZO M, POGGI G, VERDOLIVA L. Region-based transform coding of multispectral images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007,16(12):2916–2926.
- [9] 王平, 陈欣, 粘永健, 等. 基于分块 KLT 的多光谱遥感图像低复杂度有损压缩[J]. *红外技术*, 2018,40(2):151–157. (WANG Ping, CHEN Xin, NIAN Yongjian, et al. Low-complexity lossy compression for multispectral remote sensing images based on block KLT[J]. *Infrared Technology*, 2018,40(2):151–157.)
- [10] BLANES I, SERRA-SAGRISTA J. Pairwise orthogonal transform for spectral image coding[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011,49(3):961–972.
- [11] 陈善学, 张燕其. 基于自适应波段聚类主成分分析和反向传播神经网络的高光谱图像压缩[J]. *电子与信息学报*, 2018,40(10):2478–2483. (CHEN Shanxue, ZHANG Yanqi. Hyperspectral image compression based on adaptive band clustering principal component analysis and back propagation neural network[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2018,40(10):2478–2483.)
- [12] GUNDOGAR Z, TOREYIN B U, DEMIRALP M. Tridiagonal format enhanced multivariate products representation based hyperspectral data compression[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018,11(9):3272–3278.
- [13] VALSESIA D, MAGLI E. High-throughput on board hyperspectral image compression with ground-based CNN reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019,57(12):9544–9553.
- [14] BARRIOS Y, SANCHEZ A J, SANTOS Lucana, et al. SHyLoC 2.0: a versatile hardware solution for on-board data and hyperspectral image compression on future space missions[J]. *IEEE Access*, 2020(8):54269–54287.
- [15] DU Q, CHANG C I. Linear mixture analysis-based compression for hyperspectral image analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004,42(4):875–891.
- [16] 张立燕, 谌德荣, 陶鹏. 端元提取技术在高光谱图像压缩中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008,28(7):1445–1448. (ZHANG Liyan, CHEN Derong, TAO Peng. Endmember extraction used for hyperspectral imagery loss compression[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008,28(7):1445–1448.)
- [17] 谌德荣, 宫久路, 曹旭平. 基于线性光谱混合理论的高光谱图像压缩[J]. *北京理工大学学报*, 2010,30(1):79–82. (CHEN Derong, GONG Jiulu, CAO Xuping. Hyperspectral image compression based on linear spectral mixture theory[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010,30(1):79–82.)
- [18] BIOUCAS-Dias J M, NASCIMENTO J M P. Hyperspectral subspace identification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008,46(8):2435–2445.

作者简介:

苏令华(1979–), 男, 山东省滕州市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为现代信号处理. email: sulinghua79@sina.com.

张茜(1983–), 女, 西安市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为网络空间安全.

王平(1981–), 女, 湖北省随州市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机应用.

马志强(1968–), 男, 山东省威海市人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为多媒体技术.