

基于分类 KLT 的高光谱图像压缩

方凌江¹, 粘永健^{1,2}, 王迎春³

- (1. 济南军区联勤部 指挥自动化工作站, 山东 济南 250022;
2. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
3. 济南军区装备部 指挥自动化工作站, 山东 济南 250002)

摘要:高光谱图像的有效压缩已经成为高光谱遥感领域研究的热点。提出了一种基于分类 KLT(Karhunen-Loève Transform)的高光谱图像压缩算法。该算法利用光谱信息对高光谱图像进行地物分类,根据相邻波段的相关性对高光谱图像进行波段分组。在地物分类与波段分组的基础上,对每组的每一类地物数据分别进行 KL 变换,利用 EBCOT(Embedded Block Coding with Optimal Truncation)算法对所有主成分进行联合编码。实验结果表明,该算法能够取得优于 JPEG2000 以及 DWT-JPEG2000 的压缩性能,适合实现高光谱图像的有效压缩。

关键词:高光谱图像;数据压缩;地物分类

中图分类号:TP751.1

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)11-0082-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.11.021

Hyperspectral Images Compression Based on Classified KLT

FANG Ling-jiang¹, NIAN Yong-jian^{1,2}, WANG Ying-chun³

- (1. Automatic Command Headquarter, Department of Joint Logistics of Jinan Military Area, Jinan 250022, China;
2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Automatic Command Headquarter, Equipment Department of Jinan Military Area, Jinan 250002, China)

Abstract:Efficient compression of hyperspectral images has been the focus in the field of hyperspectral remote sensing. A new compression algorithm of hyperspectral images based on classified-Karhunen-Loève Transform (KLT) is proposed. Ground classification of hyperspectral images is performed by using spectral information. Band grouping is carried out according to the correlation between adjacent two bands. Based on the ground classification and band grouping, KLT is performed on each ground class of hyperspectral images respectively in each group. EBCOT(Embedded Block Coding with Optimal Truncation) algorithm is used for the joint coding of all the principle components. Experimental results show that the proposed algorithm can achieve better compression performance compared with those state-of-the-art compression algorithms such as JPEG2000 and DWT-JPEG2000, which is suitable for the efficient compression of hyperspectral images.

Key words:hyperspectral images; data compression; ground classification

0 引言

高光谱遥感技术是 20 世纪 80 年代兴起的新型对地观测技术。高光谱图像具有较高的光谱分辨率,这使得其数据量呈几何量级增长。在现有信道带宽条件下,尤其对于星载数据链路,数据存储与传输的矛盾日益尖锐。例如,对地观测系统(Earth Observation System, EOS)中的高分辨成像光谱仪获取的图像具有 192 个波段(0.4~2.5 μm),可以产生 512 MB/s 的数据流量,而 EOS 系统下行链路的通信能力仅仅达到

300 MB/s,而且这些带宽还不能全部用于高光谱数据的传输,另外还要考虑信道的编码。因此,研究有效的高光谱图像压缩算法已经得到了国内外的广泛关注。

高光谱图像是一种准三维图像序列,由于其光谱分辨率达到纳米量级,这使得它具有较强的谱间相关性;而受制于元器件水平,其空间分辨率较低,这使得高光谱图像具有较低的空间相关性。针对高光谱图像的压缩,关键是如何有效去除谱间与空间相关性。现有的高光谱图像压缩算法可分为联合编解码结构^[1-4]

收稿日期:2013-02-13

修回日期:2013-05-25

网络出版时间:2013-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41201363);湖南省自然科学基金资助项目(11JJ3066)

作者简介:方凌江(1956-),男,高级工程师,研究方向为计算机应用。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130827.1432.019.html>

与分布式编码结构^[5-8]。基于联合编解码结构的压缩算法能够较大程度地挖掘高光谱图像的相关性,从而获得较高的压缩性能,但无法提供有效的抗误码能力。高光谱图像分布式压缩算法能够提供一定的抗误码能力,但其压缩性能较低。到目前为止,基于联合编解码结构的高光谱图像压缩算法仍是首选方案。文中提出了一种基于分类 KLT (Classified - Karhunen - Loève Transform, C-KLT) 的高光谱图像压缩算法 (C-KLT-EBCOT)。该算法首先对高光谱图像进行无监督分类与波段分组,针对每一类地物,分别进行 KL 变换,然后利用基于 EBCOT (Embedded Block Coding with Optimal Truncation, 优化截断嵌入式块编码) 算法对所有主成分进行联合编码。对 OMIS (Operational Modular Imaging Spectrometer) 型高光谱图像的实验结果验证了算法的有效性。

1 高光谱图像的无监督分类

遥感图像分类是根据各像元的性质分为若干类别的过程,高光谱图像的分类是基于像元的光谱与空间特性,对每个像元的类别属性进行确定和标注^[9]。高光谱图像中不同地物的差异通过像元的光谱信息及几何空间信息进行表达,不同的地物类型具有不同的光谱信息或几何空间特性,这是分类的理论依据。对于实际应用中获取的高光谱图像,由于事先无法获知地物类别的先验知识,因此,只能对高光谱图像进行无监督分类。无监督分类是指在无任何先验知识的前提下,仅仅利用遥感影像中各类地物光谱特征的分布规律,随其自然地进行分类,最终结果只是对地物类别进行了划分,无法确定类别的属性。高光谱图像分类作为一个预处理阶段,对后续压缩性能的提高具有一定的促进作用。高光谱图像的分类预处理已经成功应用于高光谱图像的无损压缩^[10-12],但在高光谱图像有损压缩中鲜见应用。文中采用 K-means 算法对高光谱图像的光谱矢量进行分类,从而获得各种地物类别的分类图。若 $I_k(i, j)$ ($1 \leq k \leq L, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) 表示第 k 波段空间位置为 (i, j) 的像素,其中 L 为波段数, M 与 N 分别为波段的高度与宽度。分类图中给出了各个像素的所属类别,如式(1)所示。

$$\text{Index}(i, j) = l, l \in \{1, 2, \dots, c\} \quad (1)$$

其中 c 为分类数,同类像素的集合可表示为

$$\{I_l(x, y) \mid \text{Index}(x, y) = l, x = 1, \dots, M, y = 1, \dots, N, l = 1, \dots, L\} \quad (2)$$

2 波段分组

虽然高光谱图像的谱间相关性较强,但并非所有波段之间均具有较强的相关性。为了获得较好的谱间

去相关效果,需要对高光谱图像预先进行波段分组,其目的是将相关性较强的波段分在相同的组,这样能够显著提高谱间去相关效果。高光谱图像的波段分组可分为等长分组与非等长分组两种方式。等长分组主要是针对基于变换的无损压缩算法,难以充分利用高光谱图像相邻波段之间的相关性。文中采取非等长分组的方式,选取互相关系数作为波段分组的准则将相关性较强的波段分到同一组。若 $R_{k,l}$ 表示波段 k 与 l 之间的互相关系数,其表达式为

$$R_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_k(i, j) - \mu_k) (I_l(i, j) - \mu_l)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_k(i, j) - \mu_k)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_l(i, j) - \mu_l)^2}} \quad (3)$$

其中, μ_k 与 μ_l 分别为波段 k 和 l 的均值,其表达式为

$$\mu_k = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_k(i, j) \quad (4)$$

图 1 给出了 OMIS 型高光谱图像相邻波段的相关性曲线示意图。从该图可知,高光谱图像部分波段之间的相关性较差,这部分波段基本上属于强噪声或者水吸收波段。在具体分组过程中,选取相关性较小的几个极值点对应的波段作为分组的界限。例如,图 1 中的几个较小的极值点对应的横坐标分别为 64、81、96 与 112,因此,分组结果为 1~64、65~81、82~96、97~112 以及 113~128。需要指出的是,高光谱图像波段分组的结果与成像光谱仪有关,与图像内容是无关系的。利用预先计算好的波段分组结果,可以应用于绝大多数该成像光谱仪获取的数据。因此,针对同一成像光谱仪获取的高光谱图像,可以利用一定量的具有代表性的数据计算最优的分组结果。

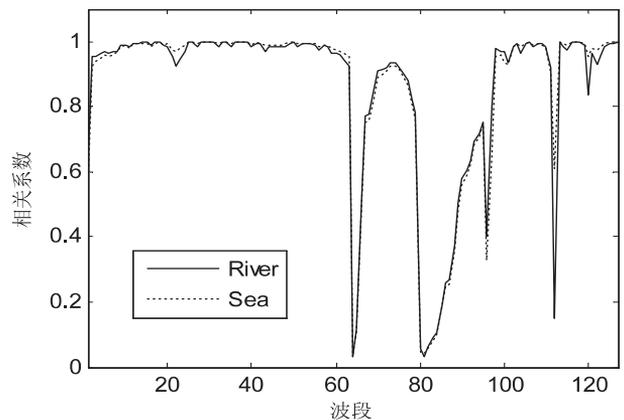


图 1 OMIS 型高光谱图像相邻波段的相关性曲线

3 基于分类 KLT 的高光谱图像压缩

3.1 高光谱图像的 KLT

对于高光谱图像的谱间变换,常用的方法有 KLT、

DCT (Discrete Cosine Transform, 离散余弦变换) 与 DWT (Discrete Wavelet Transform, 离散小波变换) 等。KLT 是统计特征基础上的最优线性正交变换, 经过 KLT 后的系数之间互不相关, 与 DCT 和 DWT 相比, 数据能量更为集中, 更有利于后续的压缩处理。KLT 与 DCT 以及 DWT 的不同之处在于其变换的基函数是不固定的, 它依赖于待变换数据的统计特性。KLT 需要对每一组数据计算相应的基函数, 这也使得它对待变换数据具有最好的匹配效果, 因此, KLT 能够获得优于其他变换的去相关性能。在高光谱图像编码算法中, KLT 主要用于去除高光谱图像的谱间相关性, 而空间相关性通常用 DCT 或者 DWT 来去除。首先介绍高光谱图像的 KLT, 若高光谱图像原始数据可表示为

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1(1,1) & I_1(1,2) & \cdots & I_1(M,N) \\ I_2(1,1) & I_2(1,2) & \cdots & I_2(M,N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_L(1,1) & I_L(1,2) & \cdots & I_L(M,N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

\mathbf{I} 中的每一行表示一个波段的数据, 将 \mathbf{I} 中的每一列数据看作一个 L 维的矢量, 即

$$\mathbf{X}_i = [x_{1,i}, x_{2,i}, \cdots, x_{L,i}]^T \quad i = 1, \cdots, MN \quad (6)$$

显然, $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \cdots, \mathbf{X}_{MN}]$ 。假设均值向量为

$$\mathbf{m}_x = [m_1, m_2, \cdots, m_L] \quad (7)$$

其中

$$m_i = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^{MN} x_{i,j} \quad i = 1, 2, \cdots, L \quad (8)$$

对任意光谱的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_{l,i} = E[(\mathbf{X}_i - \mathbf{m}_x)(\mathbf{X}_i - \mathbf{m}_x)^T] \quad i = 1, 2, \cdots, MN \quad (9)$$

所有光谱矢量的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_l = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{MN} \mathbf{C}_{l,i} \quad (10)$$

其中 \mathbf{C}_l 为 $L \times L$ 的实对称矩阵。存在正交矩阵

$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \cdots, \mathbf{u}_L]$, 使得 \mathbf{C}_l 对角化, 即

$$\mathbf{U}^T \mathbf{C}_l \mathbf{U} = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $\{\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_L\}$ 为 \mathbf{C}_l 的特征值且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_L \geq 0$, \mathbf{u}_i 为 \mathbf{C}_l 第 i 个特征值对应的特征向量 ($i = 1, 2, \cdots, L$)。式(11)相当于对 \mathbf{C}_l 进行特征值分解, 得到相应的特征值与特征向量。KL 变换后的高光谱图像第 i 个波段为

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{U}^T (\mathbf{X}_i - \mathbf{m}_x) \quad i = 1, \cdots, MN \quad (12)$$

3.2 总体压缩方案

文中提出的 C-KLT-EBCOT 算法流程如图 2 所

示。该算法首先对高光谱图像进行无监督分类, 获得代表各种地物类别的分类图; 然后对高光谱图像进行波段分组, 对于每组的所有波段, 根据分类图对每类地物分别进行 KL 变换, 然后采用 JPEG2000 标准中的 EBCOT 算法对变换后的各个主成分进行联合编码, 从而获得最终的压缩码流。

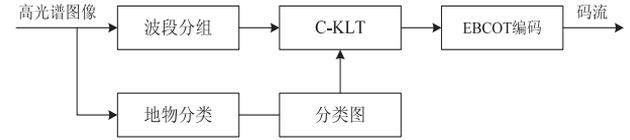


图 2 C-KLT-EBCOT 算法的处理过程

4 实验结果与分析

为验证所提算法的有效性, 利用 VC++ 软件对我国上海技术物理研究所研制的成像光谱仪 (OMIS) 获取的高光谱图像进行测试。

OMIS 获取的高光谱图像共有 128 个波段, 每个像素量化为 1 个字节。选取 River 与 Sea 两个场景, 波段大小截取为 512×512 , 图 3 给出了这两个场景图像及其分类后的结果。由于无法确定图像中准确的地物数目, 综合考虑压缩性能与分类复杂度两方面因素, 将分类数统一设定为 8。

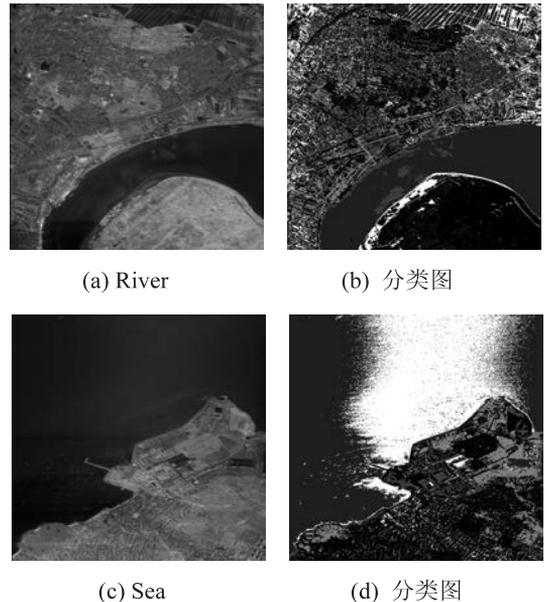


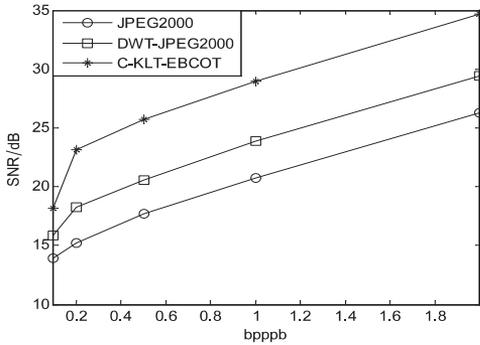
图 3 实验采用的高光谱图像及其分类图

采用 bpppb (bit per pixel per band, 每波段每像素的比特数) 与 SNR (Signal-to-Noise Ratio, 信噪比) 衡量算法的压缩性能。图 4 给出了 C-KLT-EBCOT 与 JPEG2000 以及 DWT-JPEG2000 的率失真性能比较, 其中 JPEG2000 单独对各个波段分别进行压缩, 未考虑去除谱间相关性; DWT-JPEG2000 首先采用 9-7 提升小波去除谱间相关性, 然后再利用 JPEG2000 压缩各个分量。

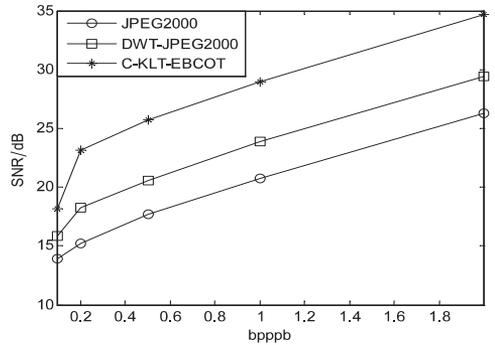
从图 4 可以看出,虽然 JPEG2000 在静止图像压缩中取得了理想的压缩性能,但它对高光谱图像的压缩效果并不理想,其原因是未考虑高光谱图像的谱间相关性。DWT - JPEG2000 去除了谱间相关性,与 JPEG2000 相比,在一定程度上提高了压缩性能。文中算法的压缩性能明显优于 JPEG2000 与 DWT - JPEG2000,验证了算法的有效性。实际上,DWT - JPEG2000 利用 DWT 去除谱间相关性,各个分量之间

仍存在着一定的相关性,其原因是由于 DWT 利用固定模式进行变换,无法与被处理数据的统计特性相匹配。C-KLT 能够较好地匹配各类地物的统计特性,这使得 C-KLT-EBCOT 取得了理想的去相关效果。

图 5 和图 6 分别给出了 River 和 Sea 在 $bpppb=0.2$ 时各种算法的解码图像对比。显然,C-KLT-EBCOT 在保持图像纹理细节方面明显优于 JPEG2000 和 DWT - JPEG2000。



(a) River

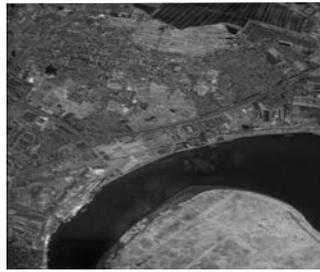


(b) Sea

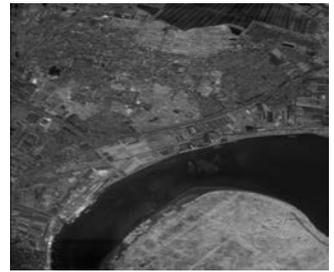
图 4 率失真性能比较



(a) JPEG2000



(b) DWT-JPEG2000



(c) C-KLT-EBCOT

图 5 各种算法的解码图像比较 (River)



(a) JPEG2000



(b) DWT-JPEG2000



(c) C-KLT-EBCOT

图 6 各种算法的解码图像比较 (Sea)

5 结束语

针对高光谱图像的压缩,提出了基于分类主成分分析的压缩算法。该算法首先利用无监督分类方法对高光谱图像进行地物分类,以获得标记每个像素所属类别的分类图;然后对高光谱图像进行波段分组,针对每组中的波段,分别对每一类数据进行 KLT,并利用 EBCOT 算法对变换后的主成分进行联合编码,实验结果验证了算法的有效性。今后需要继续研究的工作包

括改进 KLT 的变换结构,以降低压缩算法的计算量。

参考文献:

[1] 万建伟,粘永健,苏令华,等.实用高光谱遥感图像压缩[M].北京:国防工业出版社,2012.
 [2] Cagnazzo M, Poggi G, Verdoliva L. Region-based transform coding of multispectral images[J]. IEEE transactions on image processing, 2007, 16(12): 2916-2926.

和 T_{HIP} 要远远小于原 HIP 机制的切换时延总和 T_{HIP} 。

3.2 丢包率分析

在原 HIP 机制中,移动主机的切换时延较大,通常会造通信连接中断几秒甚至几十秒,造成严重的数据分组丢失。新机制在层次化结构设计基础上又引入了快速切换技术,大大减少了 MN 的切换延迟,进而降低了丢包率。除此之外,在 MN 切换过程中新机制还使用了分组缓存转发技术,进一步减少了数据包丢失,基本实现了 MN 的平滑切换。

3.3 信令开销分析

新机制采用层次化设计思想,将主机移动划分为域内移动和域间移动两种情况,大大减少了主机域内切换时发往域外的 BU 消息数量。但是,新机制中引入链路层触发机制和预先绑定更新机制加快移动主机切换过程,而这种快速切换的实现是以增加 MN 的切换相关信令开销为代价的。

4 结束语

文中设计了一种基于 HIP 的切换优化机制。该机制采用层次化设计思想和快速切换思想,在移动主机发生网络层切换之前预先更新各实体的绑定关系,为三层切换做好准备。同时新机制在 SRVS 服务器中增加了缓存机制,减少切换过程中的分组丢失,降低了丢包率。性能分析表明,新机制能够有效地减少移动主机的切换延迟和丢包率,具有更好的切换性能,能够满

足实时性业务发展需求。

参考文献:

- [1] Nikander P, Gurtov A, Henderson T R. Host identity protocol (HIP): connectivity, mobility, multi-homing, security, and privacy over IPv4 and IPv6 networks[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2010, 12(2): 186-204.
- [2] Soliman H, Catelluccia C, Malki K E. Hierarchical mobile IPv6 mobility management (HMIPv6)[S]. IETF RFC 4140, 2005.
- [3] Koodli R. Mobile IPv6 fast handovers[S]. IETF RFC 5268, 2008.
- [4] 杨 怡. 面向分层移动 IPv6 的高效快速切换方案[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(10): 225-228.
- [5] 管风彪, 徐明伟, 吴建平. 主机标识协议(HIP)研究综述[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(2): 224-228.
- [6] 杨水银, 周华春, 张宏科, 等. 基于动态层次位置管理的 HIP 移动性支持机制[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1615-1618.
- [7] 刘星宇. 一种改进的 HIP 移动管理方案[J]. 西安邮电学院学报, 2011, 16(1): 36-39.
- [8] 杨水银. 主机标识协议的移动性管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [9] Laganier J, Eggert L. Host identity protocol (HIP) rendezvous extension[S]. IETF RFC 5203, 2012.
- [10] Nikander P, Laganier J. Host identity protocol domain name system extension[S]. IETF RFC 5205, 2012.

(上接第 85 页)

- [3] Blanes I, Serra-Sagrista J. Cost and scalability improvements to the Karhunen-Loeve transform for remote-sensing image coding[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2010, 48(7): 2854-2863.
- [4] 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.
- [5] Abrardo A, Barni M, Magli E, et al. Error-resilient and low-complexity onboard lossless compression of hyperspectral images by means of distributed source coding[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2010, 48(4): 1892-1904.
- [6] 粘永健, 万建伟, 何 密, 等. 基于分布式信源编码的高光谱图像无损压缩研究进展[J]. 宇航学报, 2012, 33(7): 860-869.
- [7] 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.
- [8] Nian Y J, Wan J W, Tang Y, et al. Near lossless compression of hyperspectral images based on distributed source coding[J]. Science China: information sciences, 2012, 55(11): 2646-2655.
- [9] 张 兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标检测[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [10] 汤 毅, 辛 勤, 李 纲, 等. 基于内容的高光谱图像无损压缩研究[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 668-674.
- [11] 粘永健, 苏令华, 孙 蕾, 等. 基于聚类的高光谱图像无损压缩研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1271-1274.
- [12] Mielikainen J, Huang B. Lossless compression of hyperspectral images using clustered linear prediction with adaptive prediction length[J]. IEEE geoscience and remote sensing letters, 2012, 9(6): 1118-1121.

基于分类KLT的高光谱图像压缩

作者: [方凌江](#), [粘永健](#), [王迎春](#), [FANG Ling-jiang](#), [NIAN Yong-jian](#), [WANG Ying-chun](#)
作者单位: [方凌江, FANG Ling-jiang \(济南军区联勤部 指挥自动化工作站, 山东 济南, 250022\)](#), [粘永健, NIAN Yong-jian \(济南军区联勤部 指挥自动化工作站, 山东 济南 250022; 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073\)](#), [王迎春, WANG Ying-chun \(济南军区装备部 指挥自动化工作站, 山东 济南, 250002\)](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名: [Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期): 2013(11)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201311022.aspx