



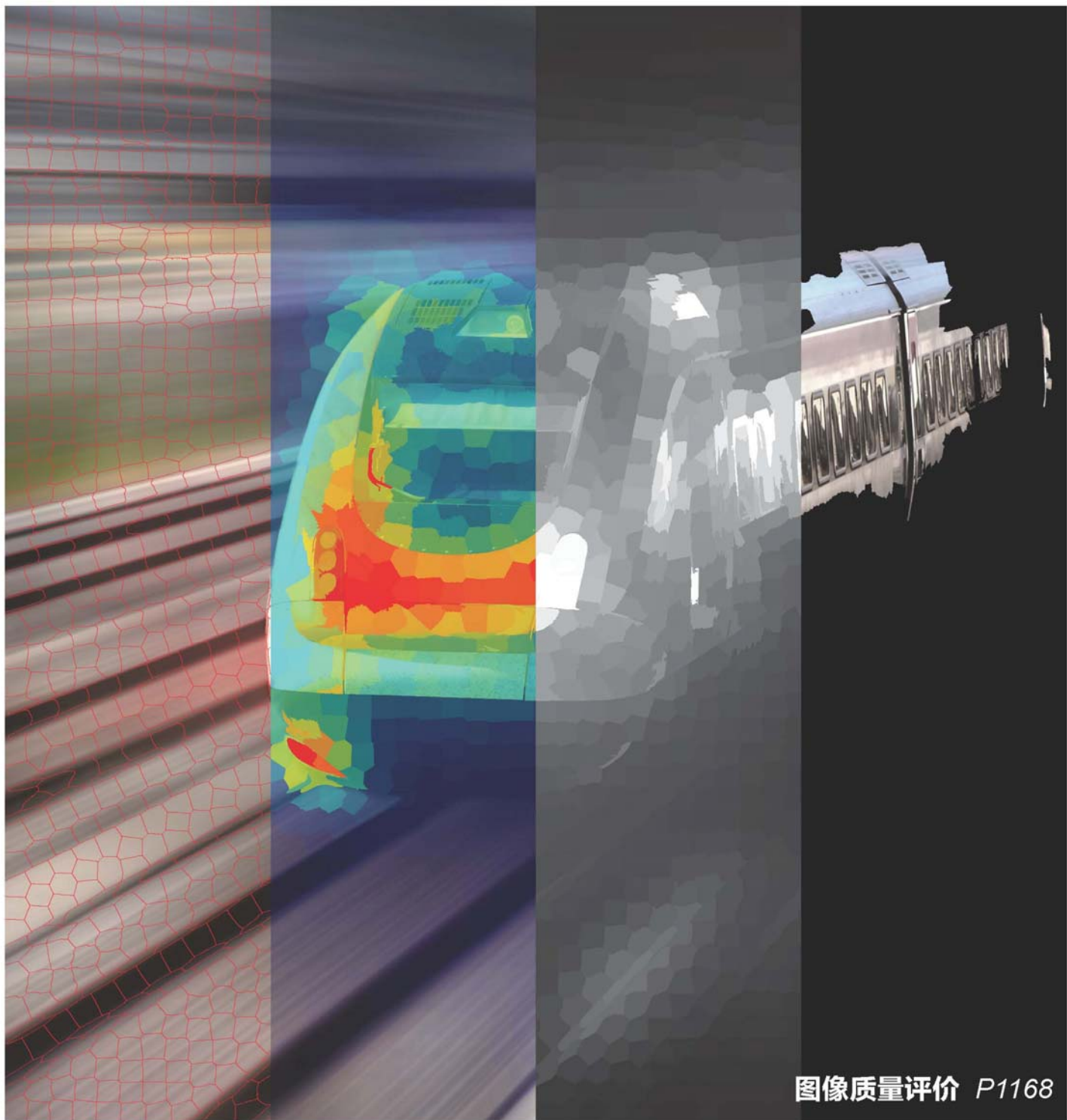
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
08
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

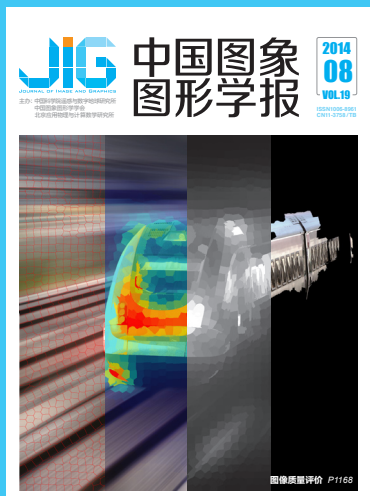


图像质量评价 P1168

中国图象图形学报

刊名题字: 宋健

月刊 (1996年创刊)



第19卷第8期 (总第220期)

2014年8月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

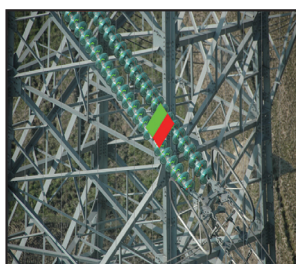
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



基于色调优化的图像视频细节增强(第1149页)



形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断(第1194页)



基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建
(第1210页)

图像处理和编码

利用纹理和空间相关性的HEVC帧内预测模式选择

齐美彬, 朱广辉, 杨艳芳, 蒋建国 1119

方向滤波抗混叠的低冗余图像多尺度变换

张湃, 王丽侠, 张银蒲 1126

L_{∞} 准则的最大误差图像压缩算法

李晓云, 庞超逸, 黎彤亮, 黄世中 1135

利用无参考图像内容量度优化非局部均值去噪方法的参数

侯鑫, 陆耀, 李建武 1142

基于色调优化的图像视频细节增强

王津航, 刘春晓, 朱臻阳, 金剑秋, 唐佳娣 1149

结合图像融合与分割的快速去雾

王伟鹏, 戴声奎 1155

彩色图约束的二阶广义总变分深度图超分辨率重建

邸维巍, 张旭东, 胡良梅, 段琳琳 1162

重要区域保持的图像缩放质量评价方法

梁云, 傅贤超, 刘财兴 1168

图像分析和识别

图嵌入正则化投影非负矩阵分解人脸图像特征提取

杜海顺, 张旭东 1176

基于稀疏编码的动态纹理识别

刘洋, 李一波, 姬晓飞, 王杨扬 1185

形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断

张晶晶, 韩军, 赵亚博, 刘浪, 王万国, 朱铭武 1194

迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪

黄斌, 孙永荣, 杨博文, 王潇潇, 刘晓俊 1202

图像理解和计算机视觉

基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建

杨宇翔, 曾毓, 何志伟, 高明煜 1210

医学图像处理

应用球形算子层次聚类的3维冠脉跟踪提取

郑永昌, 耿辰, 宋爽, 杨健 1219

遥感图像处理

波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法

王相海, 解天, 宋传鸣, 张智迪 1228

多线程遥感影像实时渐进传输

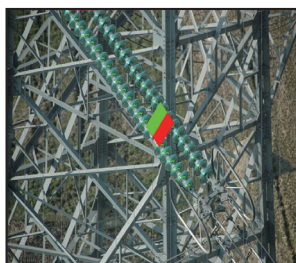
刘万军, 孟煜, 曲海成, 石翠萍 1237

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Image and video detail-enhancement via tone optimizationimage morphing(P1149)



Insulator Recognition and Defects Detection Based On Shape Perceptual (P1194)



Depth map super-resolution via adaptive weighting filter (P1210)

Image Processing and Coding

- HEVC intra-prediction mode selection by using texture and spatial correlation
Qi Meibin, Zhu Guanghui, Yang Yanfang, Jiang Jianguo 1119
- Low redundant image multiscale transform with anti-aliasing direction filtering
Zhang Pai, Wang Lixia, Zhang Yinpu 1126
- Algorithm for maximum error image compression based on L_{∞} norm
Li Xiaoyun, Pang Chaoyi, Li Tongliang, Huang Shizhong 1135
- Optimizing the parameters of non-local means via no-reference image content metric for image denoising
Hou Xin, Lu Yao, Li Jianwu 1142
- Image and video detail-enhancement via tone optimization
Wang Jinhang, Liu Chunxiao, Zhu Zhenyang, Jin Jianqiu, Tang Jiadi 1149
- Fast haze removal method based on image fusion and segmentation
Wang Weipeng, Dai Shengkui 1155
- Depth image super-resolution based on second-order total generalized variation constrained by color image
Di Weiwei, Zhang Xudong, Hu Liangmei, Duan Linlin 1162
- Image retargeting quality assessment by preserving important regions
Liang Yun, Fu Xianchao, Liu Caixing 1168

Image Analysis and Recognition

- Graph embedding regularized projective non-negative matrix factorization for face image feature extraction
Du Haishun, Zhang Xudong 1176
- Dynamic texture recognition based on sparse coding
Liu Yang, Li Yibo, Ji Xiaofei, Wang Yangyang 1185
- Insulator recognition and defects detection based on shape perceptual
Zhang Jingjing, Han Jun, Zhao Yabo, Liu Liang, Wang Wanguo, Zhu Mingwu 1194
- Droque image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting
Huang Bin, Sun Yongrong, Yang Bowen, Wang Xiaoxiao, Liu Xiaojun 1202

Image Understanding and Computer Vision

- Depth map super-resolution via adaptive weighting filter
Yang Yuxiang, Zeng Yu, He Zhiwei, Gao Mingyu 1210

Medicine Image Processing

- Novel 3D coronary artery extraction method using hierarchical clustering of spherical operator
Zheng Yongchang, Geng Chen, Song Shuang, Yang Jian 1219

Remote Sensing Image Processing

- Hyperspectral image coding with band ordering and 3D hybrid tree
Wang Xianghai, Xie Tian, Song Chuanming, Zhang Zhidi 1228
- Remote sensing image real-time progressive transmission based on multi-threads
Liu Wanjun, Meng Yu, Qu Haicheng, Shi Cuiping 1237

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)08-1228-09

论文引用格式: Wang X H, Xie T, Song C M, Zhang Z D. Hyperspectral image coding with band ordering and 3D hybrid tree[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1228-1236. [王相海, 解天, 宋传鸣, 张智迪. 波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(8): 1228-1236.] [DOI:10.11834/jig.20140815]

波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法

王相海^{1,2}, 解天¹, 宋传鸣¹, 张智迪¹

1. 辽宁师范大学计算机与信息技术学院, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室, 大连 116029

摘要: 目的 高光谱影像压缩的关键技术是对空间维和光谱维的去相关性。根据高光谱影像数据结构的特点, 如何有效去除其空间相关性与谱间相关性是高光谱影像压缩中至关重要的问题。对高光谱影像进行编码时, 3维小波变换是极为有效的去除冗余的方法。因此提出了一种通过波段排序并结合3维混合树型结构对高光谱影像3维小波变换系数进行编码的算法。**方法** 首先, 将高光谱影像按照自然波段顺序进行波段分组, 并对每组影像进行相邻影像的谱间相关性统计; 其次, 对相关性较弱的波段组, 建立以影像波段序号为顶点、影像相关性系数为边的完全图, 对这个完全图求其最大汉密尔顿回路。按照求得的最大汉密尔顿回路顺序对该波段组进行重新排序, 从而提高波段组的谱间相关性; 在此基础上, 对重新排序后的波段组进行3维小波变换, 并通过3维混合树结构对3维小波变换系数进行零树编码。**结果** 通过对大量AVIRIS型高光谱影像数据的仿真实验, 验证了本文方法的有效性。对相关性较低的波段组, 加入排序算法后, 其解码影像与未排序时比, 峰值信噪比有了一定的提高。通过实验统计, 算法平均用时2.7579 s。**结论** 由于采用了对弱相关性波段组的重新排序机制, 使得基于混合树结构的3维零树编码出现了更多有效的零树, 在一定程度上提高了编码效率。通过实验统计算法用时, 表明该方法以较小的时间代价获得了解码效果的提升。

关键词: 高光谱影像编码; 谱间相关性; 波段排序; 汉密尔顿回路; 3维小波变换

Hyperspectral image coding with band ordering and 3D hybrid tree

Wang Xianghai^{1,2}, Xie Tian¹, Song Chuanming¹, Zhang Zhidi¹

1. College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: **Objective** The key technology in hyperspectral remote sensing image compression is to get rid of the spatial correlation and spectral correlation. According to the characteristics of the structure of data of hyperspectral remote sensing image, how to effectively remove the spatial correlation and spectral correlation in hyperspectral image compression is a crucial problem. For hyperspectral remote sensing image, in the image coding, wavelet transform is a very effective method to remove redundancy. 3D wavelet transform can effectively remove the spatial correlation and spectral correlation of hyperspectral image. Therefore, this paper proposes a coding algorithm based on band ordering and 3D hybrid tree. **Method** First, the hyperspectral remote sensing image is divided into groups based on natural spectral order, each group contains 16 con-

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271422); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20132136110002); 辽宁省博士科研启动基金项目(20121076); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2011192, L2013405, L2013406); 智能计算与信息处理教育部重点实验室(湘潭大学)开放课题(2011ICIPO6)

第一作者简介: 王相海(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 中国计算机学会高级会员, 1999年于吉林大学获计算数学博士学位, 主要研究方向为计算机图形学、多媒体和遥感影像信息处理。E-mail: xhwang@lnu.edu.cn

tinuous spectral bands. Second, in each band group, the sum of the spectral correlation of all the adjacent bands is calculated. If the correlation value is less than a given threshold, a complete graph is structured on the basis of the group of bands. In the complete graph, each apex represents a band, so there are 16 apexes in the graph, and each side of the complete graph represents the spectral correlation value of two bands in the group. Then, the max Hamilton loop of the complete graph is searched for, and the group of bands is reordered based on the max Hamilton order to improve the correlation value of the band group. On the basis of the above, the reordered group of bands is given a 3D wavelet transform, and 3D hybrid tree coding algorithm is used to encoded the 3D wavelet transform coefficients. As to those band groups whose sum correlation values are greater than the given threshold, their band order does not have to be reordered. 3D wavelet transform will be given to these band groups directly, and then wavelet transform coefficients will be encoded by the 3D hybrid tree coding algorithm. **Result** First, reordering the band groups with a relatively small correlation value can improve the efficiency of 3D wavelet transform in removing the spectral correlation and spatial correlation of hyperspectral image. By reordering, 3D wavelet can more effectively remove the redundancy. Second, the use of 3D hybrid tree coding algorithm can produce more effective zero trees because the group of band with a weak correlation value is reordered to improve the correlation value. Based on the algorithm above, the coding efficiency improves to a certain extent. **Conclusion** AVIRIS hyperspectral images are used in the simulation experiment to verify the validity of the algorithm. Given the adoption of a reordering mechanism on the band groups that have weak spectral correlation values, the hybrid tree structure of the 3D zero tree coding algorithm appears more effective and to a certain extent, improve the coding efficiency. From the experimental data we can see that, compared with the use of wavelet transform only, joined band ordering and the hybrid tree structure coding algorithm improves the peak signal-to-noise ratio of the decoded image to some extent.

Key words: hyperspectral image coding; spectral correlation; band ordering; Hamilton loop; 3D wavelet transform

0 引言

与传统的遥感影像数据相比,高光谱影像具有更高的光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率及辐射分辨率^[1],这些因素使得高光谱影像的数据量急剧增加,特别是随着高光谱遥感技术的进一步发展,这一数据量的规模还在持续增大。高光谱影像庞大的数据量给其传输和存储带来巨大压力,严重制约了高光谱遥感技术的发展。因此,高效高光谱影像压缩技术的研究成为高光谱遥感领域的一个重要的研究热点^[2]。与一般的图像压缩方法相似,高光谱影像的压缩编码总体上也可分为有损和无损两大类。对于无损压缩人们针对高光谱影像空间相关性和谱间相关性的特点,提出了许多有效的编码方法^[3-4],这些方法很好地防止了高光谱遥感影像细节信息的丢失,然而无损压缩通常要采用诸多的预处理,计算复杂度高,难以完成高光谱数据的实时编码要求,此外无损压缩的压缩比普遍都较低,无法满足网络传输的需求。高光谱遥感影像的有损压缩能够实现较无损压缩高得多的压缩比,尽管有损压缩会造成影像不可逆转的信息损失,但已有的研究表明^[5-6],适度的信息损失并不会影响高光谱影像的应用,并且在更高比特率下传输更多的影像信息能够通过牺牲较低

应用价值的信息来获取更多高应用价值的信息^[7]。

高光谱影像 3 维数据结构的特点决定了其拥有较大的谱间冗余。因此,基于 3 维小波的高光谱影像有损压缩方法受到关注^[8-9]。在传统 2 维图像 SPIHT 算法^[10]的基础上,文献[8]将高光谱影像数据视为 3 维矩阵提出了用于高光谱影像编码的 3 维-SPIHT 算法,文献[6]对其进行了改进,实现了高光谱影像从有损到无损的渐进分辨率压缩;文献[9]提出了一种基于 3 维小波包的高光谱影像压缩方法,该方法通过对高光谱影像进行 3 维整数小波包变换去除其空间和谱间冗余,然后对每个子带的小波系数构建子带重要性树并进行 3 维零树块编码,同时对码流进行算术编码,算法取得了略高于 3 维-SPIHT 的编码效果,但复杂度也有一定程度的提高。

上述方法的优势主要体现在:首先,由于获得高光谱影像的成像光谱仪具有较高的光谱分辨率,从而使得高光谱影像具有很强的谱间相关性。如何有效地去除高光谱影像的谱间相关性成为高光谱影像压缩技术的关键^[11]。而上述方法的核心都是基于小波变换,因此可有效去除高光谱影像的谱间冗余;其次,因为高光谱影像各波段的成像对象是同一地物,具有相同的物理结构,这样对各波段影像进行 3 维小波变换后,各波段的小波系数间存在着一定的

结构冗余,低频变换系数保留了影像的大部分能量,而高频系数则保留了影像在不同方向及频带的结构特性,这为有效去除高光谱影像的谱间相关性奠定了基础。此外,小波变换所具有的可使压缩码流具有嵌入式与可分级的特点,为高光谱影像的信道渐进传输与应用提供了可能^[12]。但总体而言,基于3维小波的高光谱影像编码技术编码效率还不是很,很多问题还有待进一步研究。

本文在对高光谱影像数据结构特征和谱间相关性等进行分析的基础上,提出一种基于波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法,该方法首先对高光谱影像按照自然波段顺序进行分组,形成一个个波段组 GOB(group of band),对每个 GOB 根据其谱间统计相关性决定是否进行影像重排序,提出了基于最大汉密尔顿路径的影像重排方案;在此基础上,对 GOB 进行3维小波变换,并采用3维混合树形结构编码策略^[13]对 GOB 小波系数进行编码,根据高光谱影像3维小波变换后尺度间与尺度内小波系数幅值相关性及时域低频与高频帧的系数分布特点,对光谱域低频、高频子带分别采用不同的系数结构对重要系数进行编码。由于对谱间统计相关性较弱的 GOB 进行了影像重排,使得影像的空间域和谱间域的小波系数间更具3维零树的统计特性;此外,由于谱间域高频中的空间高频部分主要包含了不同地物的边缘信息,而影像边缘部分的小波系数通常具有较大的幅值,这样,3维混合树结构所形成的谱间域高频中的空间低频系数与谱间域更高频中对应系数所形成的父子关系,可使地物边缘的大幅值系数优先得以编码,从而在保证整体编码效率的前提下,更加突出地物边缘的解码效果。大量的仿真实验验证了该方法的有效性。

1 高光谱影像的结构特性分析

高光谱影像除了具有空间维信息外还拥有较为丰富的光谱维信息,图1给出了由 AVIRIS 数据 Cuprite(JPL 提供)第172~221波段通过 ENVI 软件获得的高光谱图谱立方体,可以看出,高光谱影像的空间维(x 和 y 维)信息描绘了地表2维空间的特征,而光谱维(z 维)揭示了空间维的每一像素对应地球表面特定位置在某一波长下的强度特性,形成了每一像素的光谱曲线,从而形成了高光谱影像的“图谱合一”特性^[14]。

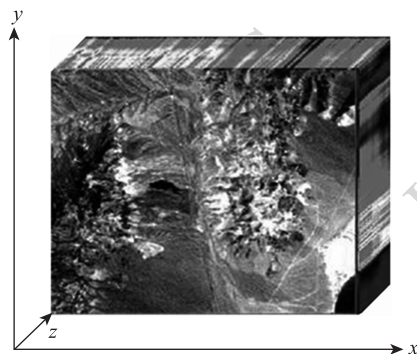


图1 高光谱影像图谱立方体示例

Fig. 1 Hyperspectral image cube

对高光谱影像的谱间相关性分析是高光谱影像特征分析的重要内容之一。高光谱影像沿着光谱维的谱间相关性通常用任意两个波段影像在同一空间位置像素之间的相关性来度量,对于空间大小为 $M \times N$ 的高光谱影像,波段 i 与波段 j 的谱间相关性系数可定义为

$$r(i, j) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(i, x, y) - I_i][I(j, x, y) - I_j]}{\sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(i, x, y) - I_i]^2 \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(j, x, y) - I_j]^2}} \quad (1)$$

式中, $I(i, x, y)$ 与 $I(j, x, y)$ 分别表示高光谱影像第 i 波段和第 j 波段分别在空间位置 (x, y) 的像素灰度值; I_i 与 I_j 分别表示高光谱影像第 i 波段和第 j 波段所有像素点灰度值的平均值。

对 AVIRIS 型高光谱影像 JasperRidge98(JPL 提供)相邻波段的相关性系数进行统计获得如图2所示的统计结果。由统计结果可以看出,高光谱影像大部分相邻波段之间具有很强的相关性,相关系数在0.99以上;但也有一些相邻波段的相关性较低,如图2中波段100附近与波段150附近相邻波段的相关系数则较低,其原因是这些波段受大气影响较大,且该部分波段为水吸收波段。此外,对于同一数据类型的高光谱影像,其相邻波段的相关系数曲线是相似的^[11]。高光谱影像的这些特性,为设计高效的编码算法提供了理论支撑。通过上述分析可以看出,高光谱影像编码首先要解决的问题就是如何有效去除谱间相关性。在图2中,大部分波段之间具有较强的谱间相关性,这对高光谱影像编码是非常有利的;而其他一些波段间的谱间相关性较差,对这些波段,寻找合适的处

理方法来提高影像的编码效率是必要的。因此, 对高光谱影像进行谱间相关性分析对影像的编码具有重要意义。

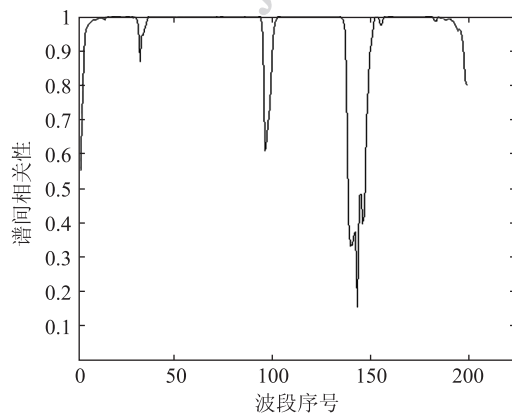


图 2 高光谱影像谱间相关性

Fig. 2 Hyperspectral image spectral correlation

2 基于波段排序的 3 维混合树编码算法

2.1 算法的基本过程

基于波段排序的 3 维混合树高光谱影像编码算法流程如图 3 所示, 其中, T 为判断阈值。

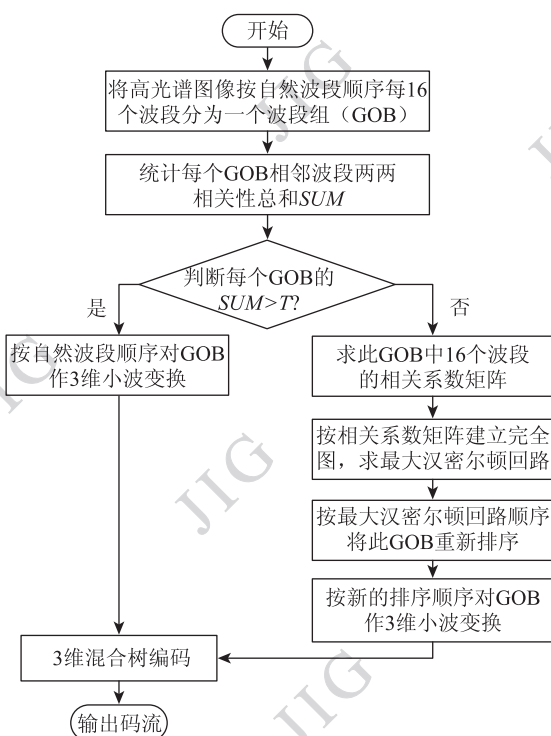


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

2.2 基于最大汉密尔顿回路的波段排序

由第 1 节的分析可知, 尽管高光谱影像大部分相邻波段之间具有较强的相关性, 但也有一些相邻波段的影像相关性较低, 同时谱间波段顺序相距较远的两个波段也可能存在较强的相关性^[15], 这就决定了高光谱影像某些波段组按自然波段顺序排序时, 谱间相关性总和往往不是最大值。因此, 在对这样的波段组作去除谱间相关性处理之前, 需要根据高光谱影像的特点对这类相关性较低的波段组进行重新排序。波段重排的目标是: 重新定义一个波段排列顺序, 按照这个新的排序, 可使整个波段组所有相邻波段影像的谱间相关性总和达到最大值。波段重排序的实质是一个优化问题, 目的是尽可能增大谱间相关性的值。据此, 在对高光谱影像进行小波变换前, 为了进一步提高 3 维小波变换系数所能形成“零树”的比例, 对高光谱影像进行了以下的分组与重新排序:

1) 波段组 GOB 的划分。GOB 的选择对高光谱影像压缩算法性能有很大影响。过大的 GOB 选择, 不仅对计算机内存有较高的要求, 而且会跨越不同的波段类型, 造成 GOB 整体相关性降低, 进而造成编码效率的降低; 而过小的 GOB 选择, 不能充分利用相同波段类型的谱间冗余, 同样也会降低编码效率。以 AVIRIS 型高光谱影像为例, 其在波长 400 ~ 2 500 nm 的区间内有 224 个光谱波段。光谱跨越可见光与近红外波段。在图 2 中, 谱间相关性曲线在 40 ~ 50 波段区间有明显下降, 而这部分是可见光谱与近红外光谱的交界部分。另外, 图 2 中第 100 波段附近与第 150 波段附近谱间相关性也有明显下降, 这部分波段主要是水吸收波段。因此, 可根据波段类型进行分组。通过上述分析, 根据不同波段类型中波段的数目, 考虑小波变换的需求以及后续排序算法的效率, 采用每 16 个波段分为 1 个 GOB 的划分原则。即将高光谱影像按照自然波段序号顺序, 每 16 个波段分为一组。对于每个 GOB 按照自然波段顺序统计前后相邻波段的相关性并进行累加, 并根据其大小决定是否进行波段重排。表 1 为以 JasperRidge98 (共 224 个波段) 为例进行 GOB 划分并进行相关性统计的结果。

由表 1 可以看出, GOB 组中 1、7、10 和 11 组的相关性总和明显小于其他组, 这与图 2 中高光谱影

表 1 波段分组相关性统计

Table 1 Band grouping correlation statistics

GOB	相邻波段相关系数累加和
1(1~16 波段)	13.641 9
2(17~32 波段)	15.877 7
3(33~48 波段)	14.665 2
4(49~64 波段)	15.975 0
5(65~80 波段)	15.986 8
6(81~96 波段)	15.929 3
7(97~112 波段)	14.056 5
8(113~128 波段)	15.857 9
9(129~144 波段)	15.990 9
10(145~160 波段)	11.824 6
11(161~176 波段)	12.319 6
12(177~192 波段)	15.953 2
13(193~208 波段)	15.916 5
14(209~224 波段)	14.836 6

1	0.999 4	0.999 2	0.998 7	0.997 9	0.996 4	0.993 7	0.981 3	0.953 3	0.885 4	0.573 6	0.292 7	0.242 2	0.325 4	0.258 5	0.419 1
1	0.999 4	0.999 1	0.998 5	0.997 2	0.994 6	0.982 5	0.954 7	0.886 8	0.574 0	0.292 4	0.241 9	0.325 4	0.258 5	0.420 0	
1	0.999 3	0.998 9	0.997 8	0.995 3	0.983 4	0.955 7	0.887 8	0.574 6	0.292 4	0.241 8	0.325 4	0.258 4	0.420 8		
1	0.999 3	0.998 4	0.996 2	0.984 9	0.957 7	0.889 9	0.575 4	0.292 3	0.241 4	0.325 5	0.258 3	0.422 0			
1	0.999 0	0.997 3	0.987 2	0.961 0	0.893 6	0.577 2	0.292 4	0.241 5	0.325 8	0.258 4	0.423 4				
1	0.998 4	0.990 3	0.966 1	0.899 7	0.580 3	0.293 0	0.241 9	0.326 8	0.258 4	0.425 5					
1	0.993 9	0.972 9	0.908 1	0.585 5	0.294 4	0.242 5	0.328 4	0.259 3	0.428 5						
1	0.987 1	0.929 2	0.600 3	0.301 1	0.246 5	0.334 5	0.263 3	0.438 1							
1	0.948 5	0.623 6	0.315 8	0.260 8	0.349 9	0.275 4	0.455 5								
1	0.646 0	0.351 8	0.290 9	0.384 1	0.306 0	0.479 7									
1	0.415 0	0.368 8	0.417 2	0.389 7	0.454 7										
1	0.334 9	0.369 2	0.339 3	0.362 1											
1	0.338 7	0.327 7	0.321 6												
1	0.371 7	0.399 3													
1	0.374 9														
1															

(2)

式中,第 i 行 j 列 ($1 \leq i \leq 16, i \leq j \leq 16$) 表示该波段组中第 i 波段与第 j 波段的相关性系数,该矩阵为对称阵。

(2) 根据式(2)的相关性矩阵,建立以 161~176 波段序号为顶点的有权完全图,其中任意两个顶点之间的路径权值为这两个波段之间的谱间相关系数。

(3) 将 GOB11 波段重排问题转换为确定赋权完全图的最大汉密尔顿回路顺序问题。

对于 GOB11,按原始波段排序的相关性系数总和为 12.319 6,经上述最大汉密尔顿回路顺序重排

像在波段 1、100 和 150 附近相关性曲线有显著下降是对应的,说明这些组中影像的谱间冗余度相对较小,这种情况不利于基于 3 维小波变换的零树编码,为此需要对其波段顺序进行重新排列。结合前面的分析,重新排序后的 GOB 应使其所有相邻波段影像的谱间相关性总和达到最大值。这里对于 GOB 相关性大小的确定是通过一个判断阈值 T 来确定的,其值的大小是通过统计获得的,比如针对 JasperRidge98 影像的情况,可选择 T 的大小为 15。

2) 最大汉密尔顿回路波段重排。采用图论中汉密尔顿最大回路法对相关系数较小的 GOB 进行重排以获得新的排列顺序。以表 1 中 GOB11 (波段 161~176) 为例来说明排列过程:

(1) 根据式(1)计算 GOB11 中任意两波段间的谱间相关性系数,其相关性系数对应的上三角矩阵为

后,新的波段顺序为 173-171-176-172-170-175-169-168-166-162-161-164-163-165-167-174,此时,相关性系数总和为 12.597 9。由此可见,对相关性较弱的 GOB,经波段重排后可在一定程度上提高其相关性。

2.3 基于 3 维混合树形结构的 GOB 编码

目前,基于 3 维小波的高光谱(或视频)编码所采用的树型结构大多是以 EZW(embedded zerotree wavelet)图像编码的树形结构^[15]或 SPIHT 图像编码的树形结构^[10]发展而来。以 EZW 树形结构为例,如图 4 所示。图 4 中箭头表示各频带小波系数的父

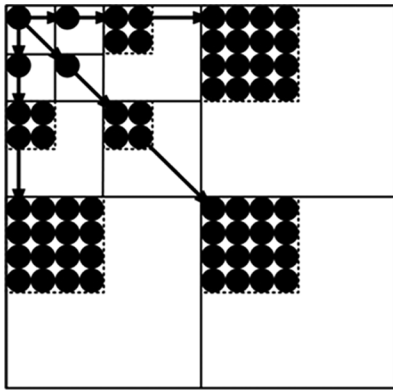


图 4 EZW 树形结构

Fig. 4 EZW Tree structure

子关系,且箭头从父子带指向子子带。图 4 中左上角为最低频子带,右下角为最高频子带。位于 (i,j) 位置的父节点对应 4 个子节点,分别位于 $(2i,2j)$, $(2i+1,2j)$, $(2i,2j+1)$, $(2i+1,2j+1)$ 。这种由父子带指向子子带的指向关系就构成了 EZW 树形结构。当给定一个阈值 M ,若小波系数 x 满足 $|x| \geq M$,则 x 是关于 M 的重要系数。若 $|x| < M$,则 x 是关于 M 的不重要系数。当 x 是不重要系数,且其所有子孙节点都是不重要系数时,则 x 称为关于 M 的零树根。若 x 是不重要系数,但它存在重要子孙系数,则称 x 是关于 M 的孤立零点。EZW 树形结构充分考虑了图像尺度间小波系数幅值的衰减性,很好地表达了图像小波系数中父子带系数与子子带系数之间的关系;而 SPIHT 树形结构在考虑父子带与子

子带系数的同时,还将相邻系数的相关性也考虑其中。然而,高光谱影像经过 3 维小波变换后,无论是光谱域还是空间域,其低频子带相邻系数之间仍存在着较高的相关性,而高频子带系数间的相关性则较弱,此时若采用基于 EZW 的 3 维树结构,则会忽略相邻系数的这种高相关性,会用更多的同步信息对系数进行编码;而若采用基于 SPIHT 的 3 维树结构来组织高频系数,父系数与子系数间很难形成有效的零树,从而使“孤立点”数量增加,影响编码效率。

对于经 2.2 节获得的每个 GOB 进行 3 维小波变换,对得到的 3 维小波系数采用基于 3 维混合树结构的编码方法^[13]。图 5 给出了 GOB 中 4 个连续波段影像小波系数的混合树型结构图,其中对光谱域和空间域分别进行了 2 级和 1 级滤波,父节点至子节点由有向线段连接,同尺度下的相同字母代表兄弟系数,而不同尺度下的相同字母代表父子系数。经过 3 维小波变换的高光谱影像其能量主要集中在光谱域低频部分,这种 3 维混合树结构对于光谱低频部分,采用 SPIHT 树结构,而对于光谱域高频部分则采用 EZW 树结构,从而可以使得光谱域低频系数与空间域高频系数优先编码。此外,由于谱间域高频中的空间高频部分主要包含的是不同地物的边缘信息,而影像边缘部分的小波系数幅值通常较大,这样,采用 3 维混合树结构将光谱域高频中的空间低频系数与光谱域更高频中对应系数构成父子关系,使得地物边缘的大幅值系数编码的优先级得到提高。

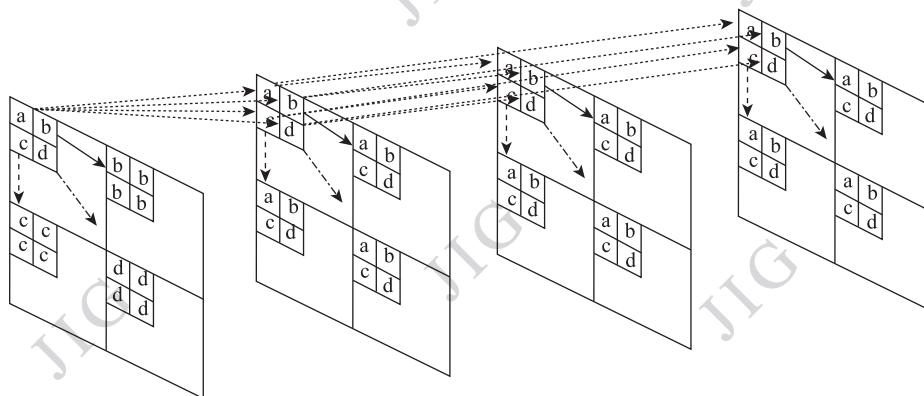


图 5 GOB 小波系数 3 维混合树型结构示意图

Fig. 5 GOB wavelet coefficient 3D hybrid tree structure

3 实验结果与分析

实验选取 AVIRIS 型高光谱影像 Jasper-Ridge98、

Cuprite 及圣地亚哥机场 Sandiego 作为实验数据,每个像素保存为 16 bit,影像大小为 352×288 像素,具体见图 6—图 8。可以看出,JasperRidge98 与 Cuprite 高光谱影像纹理复杂,Sandiego 高光谱影像细节丰

富,它们都具有高光谱遥感影像的典型特征。实验中,对经过分组和最大汉密尔顿排序后的 GOB,进行 3 维小波变换:谱间维进行了 4 级 5/3 小波变换,空间维进行了 3 级 9/7 提升小波变换。实验结果与未进行波段排序的算法^[13]进行了比较。实验采用平均峰值信噪比 PSNR 作为压缩效果的客观评价标准,其定义为

$$\overline{\text{PSNR}} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \text{PSNR}(i) \tag{3}$$

式中, B 为每个 GOB 包含的波段数, $\text{PSNR}(i)$ 为 GOB 组中第 i 个波段的峰值信噪比, 本文 B 选为 16。

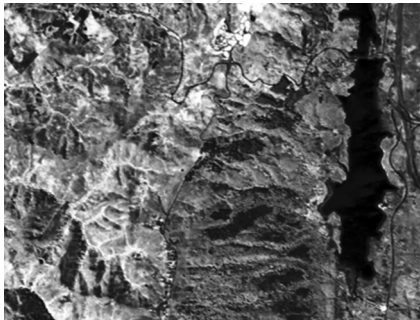


图 6 AVIRIS 数据 Jasper Ridge98 第 70 波段
Fig. 6 AVIRIS data JasperRidge98 band 17

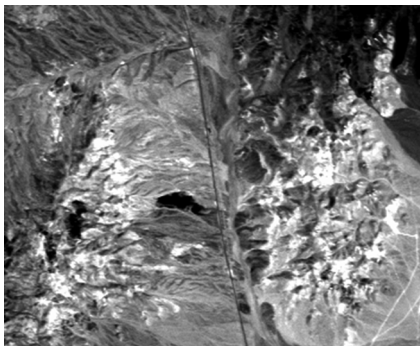


图 7 AVIRIS 数据 Cuprite 第 172 波段
Fig. 7 AVIRIS data Cuprit band 172



图 8 AVIRIS 数据 Sandiego 第 146 波段
Fig. 8 AVIRIS data Sandiego band 146

表 2 列出了 AVIRIS 型高光谱影像 Jasper-Ridge98 分别在码率 128 kbit/s、256 kbit/s 与 512 kbit/s 下的 3 组实验统计结果,其中 3 组波段重排顺序如表 3 所示。GOB(波段 1~16)组按照原始波段排序构成汉密尔顿回路相关性总和为 13.641 9;按照最大汉密尔顿路径顺序排序的相关性总和为 13.646 8;GOB(波段 97~112)组按照本文方法排序前后的相关性总和分别为 14.056 5 与 14.198 4;GOB(波段 161~176)组的两个值分别为 12.319 6 与 12.597 9。通过对比表 2 的实验数据可以看出,对总相关性较小的波段组进行重新排序,提高波段组总的相关性后,再通过 3 维混合树算法对影像进行编码,其压缩效果要优于未经波段排序的效果。

表 2 JasperRidge98 不同码率下的解码效果对比

Table 2 Comparision of different rate of decoding

波段组 (GOB)	码率 /(kbit/s)	PSNR/dB	
		未经波段排序	本文方法
1~16 波段	128	29.810	30.443
	256	37.640	38.669
	512	37.863	38.730
97~112 波段	128	30.366	30.438
	256	38.669	38.863
	512	38.677	38.913
161~176 波段	128	29.581	29.866
	256	37.283	37.818
	512	37.584	38.047

表 3 本文方法 JasperRidge98 波段组的重排顺序

Table 3 Rearrangement order of GOB

波段组 (GOB)	波段重排序号 (最大汉密尔顿路径顺序)
1~16 波段	4-6-8-9-7-10-13-16-15-14-12-11-5-3-1-2
97~112 波段	101-99-97-102-98-103-105-107-109-108-110-111-112-106-104-100
161~176 波段	173-171-176-172-170-175-169-168-166-162-161-164-163-165-167-174

表 4 列出了 AVIRIS 型高光谱影像 Cuprite 与 Sandiego 分别在码率 128 kbit/s、256 kbit/s 与 512 kbit/s 下各组实验统计结果,波段重排顺序如表 5 所示。从实验结果可以看出,本文方法的解码质量与未经过波段排序的 3 维混合树算法相比同样有了一定程度的提高。

表4 Cuprite、San Diego 不同码率下的解码效果对比

Table 4 Comparison of different rate of decoding

波段组 (GOB)	码率 /(kbit/s)	PSNR/dB	
		未经波段排序	本文方法
Cuprite 172~187 波段	128	34.414	34.660
	256	35.588	35.835
	512	35.871	36.586
San Diego 1~16 波段	128	39.414	40.245
	256	39.563	40.714
	512	40.144	41.071

表5 本文方法 Cuprite、San Diego 波段组的重排顺序

Table 5 Rearrangement order of GOB

波段组 (GOB)	波段重排序号 (最大汉密尔顿路径顺序)
Cuprite 172~187 波段	101-99-97-102-98-103-105-107-109-108-110-111-112-106-104-100
San Diego 1~6 波段	4-6-8-9-7-10-13-16-15-14-12-11-5-3-1-2

表6列出了求取表2中3组实验相关系数矩阵与最大汉密尔顿路径所用的时间。可以看出,所提出的波段排序并结合3维混合树编码的压缩方法以较小的时间代价获得了解码效果的提升。

表6 算法用时

Table 6 Time-consuming of the algorithms

波段组 (GOB)	算法用时/s	
	求相关系数矩阵	求最大汉密尔顿路径
1~16 波段	0.894 1	2.095 1
97~112 波段	0.635 0	2.034 7
161~176 波段	0.617 4	1.997 4

4 结 论

高光谱影像数据的结构特点决定了其既存在空间相关性又存在谱间相关性。由于不同谱段同一位置对应相同地物,决定了高光谱影像谱间的相关性较高,这样对于高光谱影像,要获得较好的编码效果,必须充分考虑去除影像的谱间相关性。进一步,由于受到大气、地物结构及组成的影响,高光谱影像并非所有相邻谱段间的相关性都是最大的,非相邻波段间也可能存在着较高的相关性。基于此,提出

一种基于波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法,在对高光谱影像按照自然波段顺序进行分组的基础上,通过对每个波段组的谱间统计相关性的测量,确定谱间相关性相对较弱的波段组,通过对其进行基于最大汉密尔顿回路的波段重排来增加其相关性;在此基础上,通过对相关性较高的波段组进行基于3维混合树结构的编码,使有效的零树数量大大提高,从而在一定程度上提高了高光谱影像的编码效率。

参考文献 (References)

- [1] Tong Q X, Zhang B, Zheng L F. Hyperspectral Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 40-44. [童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 40-44.]
- [2] Luo J S, Zhou M, Sun L. Data Compression of Hyperspectral Remote Sensing Image [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 1-19. [罗建书, 周敏, 孙蕾. 高光谱图像数据压缩[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-19.]
- [3] Zhang X L, Shen L S. Research advances on lossless compression of hyperspectral image[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(5): 23-27. [张晓玲, 沈兰荪. 高光谱图像的无损压缩研究进展[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 23-27.] [DOI: 10.3969/j.issn.1000-8829.2004.05.009]
- [4] Wang L. Research on compression algorithm of hyperspectral remote sensing image based on spectral feature[D]. Changchun: Jilin University, 2009. [王朗. 基于光谱特征的超光谱遥感图像压缩算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.]
- [5] Shen E Q, Hollinger A B, Dutkiewicz M, et al. Effect of lossy vector quantization hyperspectral data compression on retrieval of red-edge indices[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(7): 1459-1470.
- [6] Tang X, Pearlman W A, Modestino J W. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet coding: a lossy-to-lossless solution [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5022: 1037-1047.
- [7] Chen L, Zhang X L, Yang W S, et al. A hyperspectral image compression method based on hybrid predictive coding and transform coding [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 754-761. [陈雷, 张晓林, 杨维松, 等. 一种基于预测和变换混合设计的超光谱图像压缩方法[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 754-761.]
- [8] Dragotti P L, Poggi G, Ragozini A R P. Compression of multi-spectral images by three-dimensional SPIHT algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 416-428.
- [9] Huang J, Zhu R H, Li J X. Hyperspectral image coding based on three-dimensional integer wavelet transform[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2007, 28(12): 2274-2279. [黄菁, 朱日

- 宏,李健欣. 基于三维整数小波变换的高光谱图像编码方法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2274-2279. [DOI: 10.3321/j.issn:0254-3087.2007.12.032]
- [10] Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol, 1996, 6(3): 243-250.
- [11] Wan J W, Nian Y J, Su L H, et al. Applied Compression of Hyperspectral Remote Sensing Image [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 7-8. [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: 7-8.]
- [12] Wang X H, Song C M. Scalable Coding of Images and Video [M]. Beijing: Science Press, 2009. [王相海, 宋传鸣. 图像及视频可分级编码[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [13] Fu M Z, Wang X H, Song C M. Scalable video coding algorithm based on 3D hybrid tree and visual characteristics [J]. Journal on Communications, 2012, 33(11): 100-107. [付明哲, 王相海, 宋传鸣. 基于3维混合树和视觉特性的视频可分级编码算法[J]. 通信学报, 2012, 33(11): 100-107.]
- [14] Wang L G, Zhao C H. Hyperspectral Image Processing Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. [王立国, 赵春晖. 高光谱图像处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.]
- [15] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1993, 41(12): 3445-3462.
- [16] Hoffman R N, Johnson D W. Application of EOFs to multispectral imagery data compression and noise detection for AVIRIS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(1): 25-34.