

文章编号: 0253-2239(2007)10-1740-5

分组 Karhunen-Loeve 变换/整数小波变换高光谱影像 准无损压缩新方法*

闫敬文¹ 屈小波² 陈嘉臻²

(¹ 汕头大学电子工程系, 汕头 515063)
(² 厦门大学电子工程系, 厦门 361005)

摘要: 提出了分组 Karhunen-Loeve 变换(KLT)和整数小波变换(IWT)的高光谱图像数据压缩方法,并采用整数小波变换技术和 Set Partitioning in Hierarchical Trees(SPIHT)压缩编码,实现了对分组 Karhunen-Loeve 变换后的数据压缩。该压缩编码方法与现有压缩方法相比,既保留了 Karhunen-Loeve 变换压缩性能和整数小波变换高压缩比的特点,也宜于实时传输。实验结果表明,分组 Karhunen-Loeve 变换/整数小波变换/SPIHT在相同压缩比下,峰值信噪比比 Karhunen-Loeve 变换/小波变换/WSFCVQ、Karhunen-Loeve 变换/小波变换/改进的对块零树编码压缩和 Karhunen-Loeve 变换/WT/FSVQ 分别提高了 6 dB, 9 dB 和 8 dB,运算时间减少一半,整体压缩性能有了较大的提高。

关键词: 图像处理; 分组 Karhunen-Loeve 变换; 整数小波; 高光谱
中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

A New Quasi-Lossless Compression of Partitioned KLT and IWT Multispectral Images

Yan Jingwen¹ Qu Xiaobo² Chen Jiazhen²

(¹ Department of Electronic Engineering, Shantou University, Shantou 515063)
(² Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: A method of hyperspectral image data compression using partitioned Karhunen-Loeve transform (PKLT) and integer wavelet transform (IWT) is proposed. IWT technique and set partitioning in hierarchical trees (SPIHT) compression coding are used to compress the PKLT data. In comparison with other methods, PKLT/IWT/SPIHT not only reserves the compression performance of KLT and the performance of IWT's high compression rate, but also is easy to implement real-time transmission. Experimental results show that the peak signal-to-noise ratio(PSNR) of PKLT/IWT/SPIHT improves 6 dB, 9 dB and 8 dB comparing with KLT/WT/WSFCVQ, KLT/WT/IBZTC and KLT/WT/FSVQ in the condition of same compression rate respectively, computation hours decrease half, and the whole compression performance is enhanced much more.

Key words: image processing; partitioned Karhunen-Loeve transform (PKLT); integer wavelet; hyperspectrum

1 引 言

卫星高光谱遥感以其能够分辨地物特征使其在遥感技术中占有十分重要的地位。未来光谱仪以其高分辨力和多波段数导致数据量倍增,传输和存贮需要对其进行压缩处理^[1,2]。由于陆地遥感卫星图

像主要有谱间冗余性和空间冗余性^[3],在压缩时需要消除这两种相关性。但由于高光谱数据含有地物特征信息,压缩时要求无损或准无损压缩,这对压缩系统提出更为严格的要求。

由于三维变换、量化和编码的算法比较复杂,且

* 国家自然科学基金(60472081)和厦门大学信息技术 985 二期信息创新平台项目(2004-2007)资助课题。

作者简介: 闫敬文(1964—),男,吉林磐石人,教授,博士生导师,中国图像图形学会理事,主要从事遥感图像压缩、SAR 图像增强处理、图像融合和小波与超小波分析技术研究。E-mail: yjwen@xmu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-01; 收到修改稿日期: 2007-04-26

随着光谱维数的增加压缩所花费的时间也大大增加,使压缩系统的压缩性能明显下降。在光谱数据压缩系统中,Karhunen-Loeve 变换^[1~3]和小波变换经常被采用。而基于第二代小波的三维整数小波变换(IWT)编码方法^[4]、三维自适应 Karhunen-Loeve 变换的方法^[5]、基于双映射方式的零数编码方法^[6]和基于向量提升模式的编码方法^[7]等,以其压缩效率高和实时性好的特点,常被各种光谱压缩系统采用。虽然上述几种方法编码速度较快,但在压缩比为 0.05 bit/pixel 时,峰值信噪比(PSNR)在 16.8~27 dB 之间,无法达到实际应用要求。针对以上峰值信噪比较低的缺点,后来提出的改进方法是先用 Karhunen-Loeve 变换消除谱间冗余性,然后用二维数学变换消除空间冗余性,最后进行压缩编码^[8~11]。Karhunen-Loeve 变换是以图像的统计特性为基础的一种正交变换,应用了本征矢量空间技术,将变换的数据映射到本征矢量空间上^[8]。在最小均方误差的意义上,Karhunen-Loeve 变换是最优的变换^[3]。而改进的 Karhunen-Loeve 变换减少码流的方法能有效选择保留本征矢量数,从而对失真进行调整,取得其他变换所无法获得的效果^[8]。采用 Karhunen-Loeve 变换/小波谱特征矢量化方法^[8,9]进行三维高光谱图像压缩,把分解的信号转换成能够利用带内和带外相关性和高维矢量空间分维灵活性的位率^[12],是一种有效的压缩编码方法。这种方法不仅可以使压缩处理速度加快^[8],而且改善了数据的恢复精度。然而矢量量化需要进行码本训练和码字匹配^[8,9],因运算量大而导致编码效率下降。另外其码本训练因压缩的数据源不同而改变,这些都限制了该方法的实际应用。针对矢量量化的不足,Karhunen-Loeve 变换/小波变换/改进的对块零树编码压缩方法进行了改进^[10],将硬件并行思想和压缩率或失真率可控的特点结合起来,并应用视频图像数据压缩^[13]。但由于第一代小波变换,其结果是通过伸展和平移^[14]得到的,在其计算过程中耗费了相当大的运算量和存储单元。Sweledens 提出了第二代小波的概念^[14~16],这是一种基于提升模式的整数小波。该整数小波克服了第一代小波的缺陷,将运算速度提高了一倍,可实现同址计算^[14~16]。

本文针对 Karhunen-Loeve 变换对高光谱处理时运算量大的问题,提出了分组 Karhunen-Loeve 变换

方法,使 Karhunen-Loeve 变换运算量大为降低。实验中采用的 224 段光谱数据进行了 32 分组的分组 Karhunen-Loeve 变换。并采用整数小波变换替代原来的小波变换来加快运算速度和节省资源,然后对数据进行 SPIHT 压缩编码。对剩余误差进行算术无损压缩,实现整个系统的准无损压缩,提高了高光谱数据压缩比的峰值信噪比。

2 基于分组 Karhunen-Loeve 变换和整数小波变换的高光谱图像压缩系统

本文所采用的系统框图如图 1 所示,第一步为对高光谱图像的正交变换处理,消除其光谱之间的相关性。第二步对分组 Karhunen-Loeve 变换后的结果进行整数小波变换后,再进行 SPIHT 和算术编码,获得更高的压缩率。

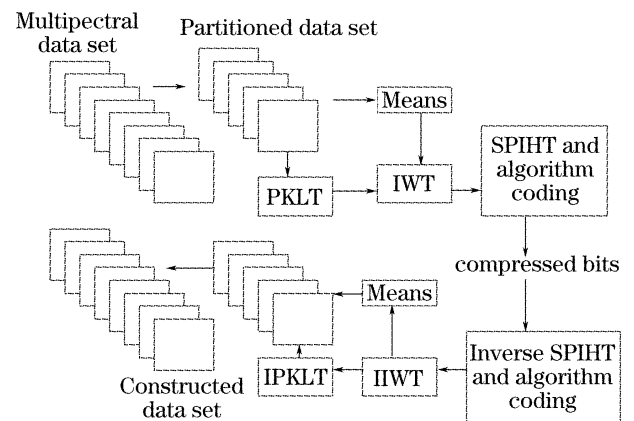


图 1 高光谱图像压缩系统框图

Fig. 1 Diagram of the hyperspectral images compression system

由文献[3]可知,本征值分布规律呈明显下降趋势。当取 $k=2$ 时,即取 λ_1 和 λ_2 对应的本征矢量对图像进行分解,可以保留 95% 以上的能量,舍去的均方差总和小于 1%。此时压缩比 R_c 可由下式求得:

$$R_c = \frac{Q \times n \times n}{n \times n + k \times n \times n + Q \times k}, \quad (1)$$

$n \times n$ 表示所分的子块大小, k 为保留的本征值的个数, Q 为谱段数。取前两个本征子图像进行重建,获得的压缩后重建几乎无失真,并且没有方块效应^[3]。当 $n=4$ 时, $R_c=4.57$; 当 $n=8$ 时, $R_c=8$ 。理论上 Karhunen-Loeve 变换时分块 $m \times n$ 中的 m 和 n 可取任意正整数,只要按照图像尺寸能够划分。

首先对 224 谱段的高光谱图像进行分组 Karhunen-Loeve 变换。将图像分成 32 谱段一组,224 谱段共分成 7 组。对每组分别进行 Karhunen-Loeve

变换,或者统称为分组 Karhun-Loeve 变换。每次分组 Karhun-Loeve 变换分块为 8×8 的子块图像,组成大小为 $8 \times 8 \times 32$ 的三维光谱图像数据集。并对其进行 Karhun-Loeve 变换,最后得到 Karhun-Loeve 变换变化结果为 7 个 $64 \times 64 \times 32$ 三维数组。其变换框图如图 2 所示,其中图 2(a)是原始的高光

谱数据,图 2(b)是经过分组 Karhun-Loeve 变换后的光谱数据子集,图 2(c)是任意点进行整数小波变换后的光谱数据,图 2(d)则是对应一个压缩后的光谱数据矢量。而对于使用整数小波变换后又可分成不同高频和低频子分量矢量集。

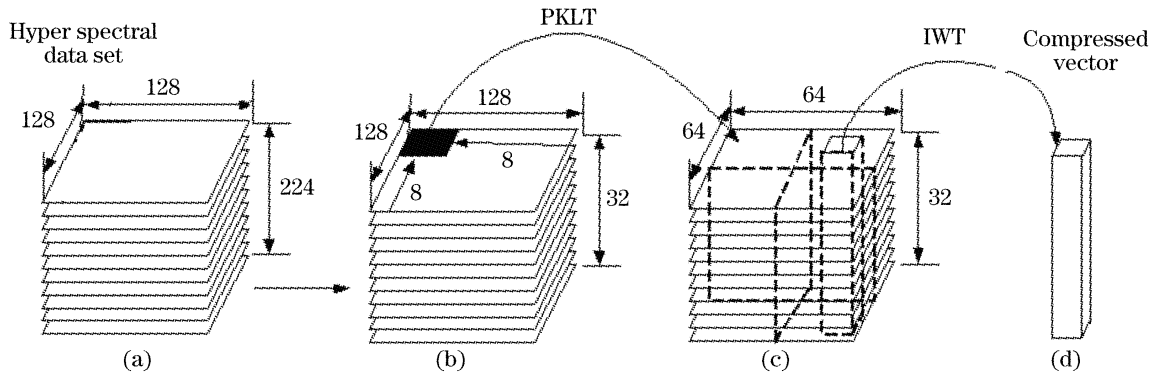


图 2 224 谱段高光谱图像的分组 Karhun-Loeve 变换+整数小波变换过程
Fig. 2 PKLT+IWT processing of the 224-spectral-bands hyperspectral images

3 结果与结论

3.1 224 谱段的光谱数据压缩

分别利用了第一代离散小波变换(DWT)、S+P 整数小波变换、CDF97 整数小波变换、LS97 整数小波变换和(5,3)整数小波变换进行小波变换,同时用零数编码扫描五次的光谱数据压缩^[12]。图 3 是 61 谱段图,其中的 PSNR 是峰值信噪比,单位是 dB。压缩比是单位比特率。

由图 3 可以看出在同样进行 3 次小波分解,零数扫描 5 次的情况下,第一代小波的压缩效果很明显没有第二代小波的性能优越:从图 3(b)~图 3(f)可以看出第一代小波压缩的峰值信噪比和压缩比都不如第二代小波。由于第二代小波可以从整数变换到整数,因此在对图像进行相同次数的小波分解和编码扫描的情况下,第二代小波基比第一代小波基更具有优越性。

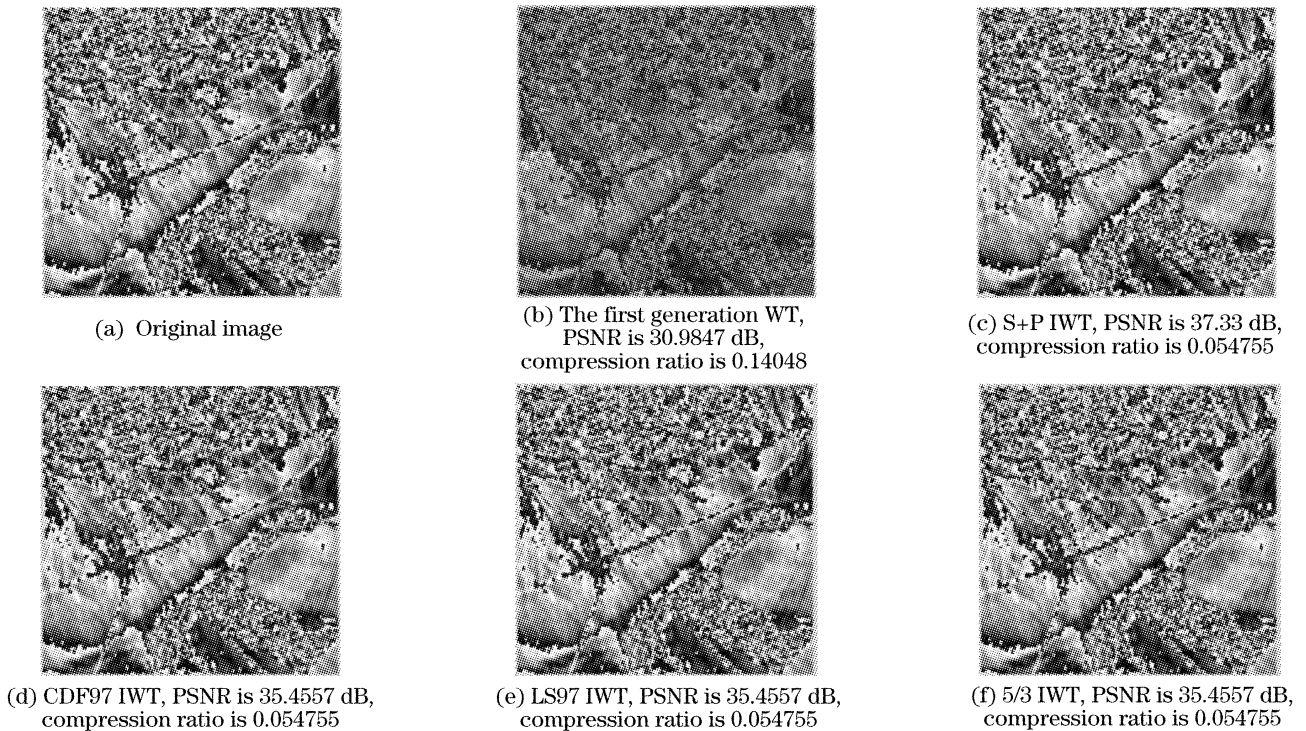


图 3 第 61 谱段压缩效果图
Fig. 3 61th band compression effect

3.2 光谱数据同一空间位置的不同效果

图 4 是对 1~224 谱段上同一个位置图像点 (64,64) 的不同谱段曲线的比较。其中横轴表示谱段数,纵轴表示图像的灰度值。图 5 是第一代小波和第二代小波(S+P)在 1~224 谱段上同一个位置图像点(64,64)的不同谱段曲线与原图曲线误差的比较,其中横轴表示谱段数,纵轴 Err 表示灰度值误差。可以看出,整数小波变换后能够更好地重建原光谱曲线。

从图 4 可以看出在相同的小波分解次数和编码扫描次数情况下,第二代整数小波(S+P)有比第一代小波更好的重建原图像点。从图 5 可以看出在相同的小波分解次数和编码扫描次数情况下,第一代小波的误差波动范围比第二代小波大 1.5 左右。

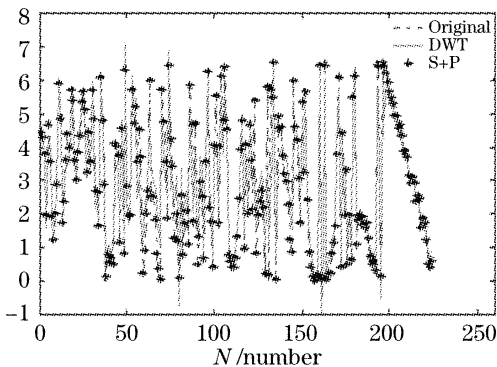


图 4 第一代小波变换和第二代小波(S+P)变换在 224 谱段上同一个位置图像点(64,64)的光谱特征曲线的比较

Fig. 4 Curve of different spectral bands in the same space (64, 64) between the first WT and the S+P WT

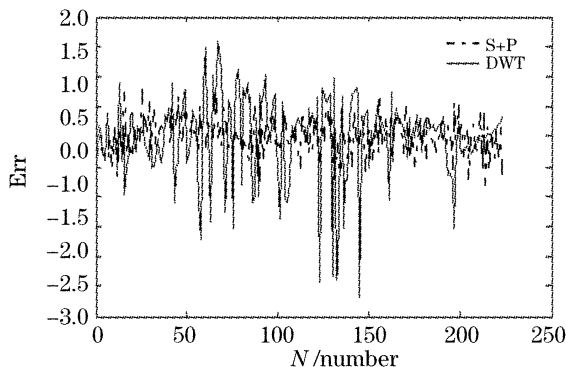


图 5 第一代小波变换和第二代小波(S+P)变换在 224 谱段上同一个位置图像点(64,64)光谱特征误差曲线的比较

Fig. 5 Error curve comparison of different spectral bands in the same space (64, 64) between the first WT and the S+P WT

通过实验可以看出在相同小波分解次数和编码扫描次数的情况下,采用分组 Karhunen-Loeve 变换、

整数小波变换、SPIHT 和算术编码方法进行高光谱数据压缩,其压缩效果(峰值信噪比和压缩率)比第一代小波基要好。这是因为:1)整数小波变换可以进行原址计算,占用比第一代小波基少的存储空间^[17];2)基于提升框架的整数小波不进行卷积运算,在算法结构上比第一代小波基简便^[14]。表 1 是文献[8]列举的压缩方法和本文采用的压缩方法的比较。可以看出,在相同压缩率为 200 的情况下,本文方法实现了更高的峰值信噪比。

实验结果表明分组 Karhunen-Loeve 变换/整数小波变换/SPIHT 压缩编码方法是一种实用而高效的谱间去冗余的方法。分组 Karhunen-Loeve 变换有效地解决了高维光谱压缩耗时长的缺点,整数小波变换也有效地提高了原来 DWT 时的运算效率,而 SPIHT 压缩编码方法可以充分利用 DSP 和 FPGA 等硬件实现时的流水线结构,有利于实时压缩,也是未来的发展方向。

表 1 压缩方法性能比较

Table 1 Performance comparison of different compression method

Methods	PSNR /dB
KLT/WT/WSFCVQ	31
KLT/WT/IBBZTC	28
KLT/WT/FSVQ	29
PKLT/IWT/SPIHT	37.33

参 考 文 献

- 1 Wang Shugen, Wang Junli, Guo Liyan. Shadow detection of color aerial images based on K-L transformation [J]. *J. Geomatics*, 2004, **29**(2): 21~23 (in Chinese)
王树根,王军利,郭丽艳. 基于 K-L 变换的彩色航空影像阴影检测[J]. *测绘信息与工程*, 2004, **29**(2): 21~23
- 2 Zhang Xiaoling, Shen Lansun. Research advance on lossless compression of hyperspectral image [J]. *Measurement and Control Technology*, 2004, **23**(5): 23~27 (in Chinese)
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
- 3 Yan Jingwen, Sun Hui, Zhang Shenghua et al.. The characteristic properties analysis for multispectral data compression based on Karhunen-Loeve transformation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, **5**(5): 30~35 (in Chinese)
闫敬文,孙辉,张圣华等. 基于 Karhunen-Loeve 变换的高光谱数据压缩统计特性分析[J]. *光学精密工程*, 1997, **5**(5): 30~35
- 4 James E. Fowler, Daniel N. Fox. Embedded wavelet-based coding of three-dimensional oceanographic images with land masses [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(2): 284~290
- 5 Lena Chang, Ching-Min Cheng, Ting-Chung Chen. An efficient adaptive KLT for multispectral image compression[C]. *Image Analysis and Interpretation Proceedings*, 4th IEEE Southwest Symposium 2~4 April 2000. 252~255
- 6 Jose L. Paredes, Gonzalo R. Arce, Leonard E. Russo. Multichannel image compression by bijection mapping s onto zero-

- trees [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(3): 223~233
- 7 Amel Benazza-Benyahia, Jean-Christophe Pesquet, Mohamed Hamdi. Vector-lifting schemes for lossless coding and progressive archival of multispectral images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(9): 2011~2024
- 8 Yan Jingwen, Shen Guiming, Hu Xiaoyi *et al.*. Three-dimensional multispectral image data compression based on Karhunen-Loeve transformation/ wavelet transformation and vector quantification with spectral feature coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1163~1167 (in Chinese)
 闫敬文,沈贵明,胡晓毅等. 基于 Karhunen-Loeve 变换和小波谱特征矢量量化的三维谱像数据压缩[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1163~1167
- 9 Yan Jingwen, Shen Guiming. A method for 3D multispectral data compression based on KLT/WT/WTVQ [J]. *J. Xiamen University (Natural Science)*, 2001, **40**(5): 1051~1055 (in Chinese)
 闫敬文,沈贵明. 基于 KLT/WT/WTVQ 的三维高光谱数据压缩方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, **40**(5): 1051~1055
- 10 Yan Jingwen, Shen Guiming, Hu Xiaoyi *et al.*. An improved biblock zero tree coding for hyperspectral data compression[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 834~838 (in Chinese)
 闫敬文,沈贵明,胡晓毅等. 改进的对块零树编码压缩方法对超光谱数据压缩[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 834~838
- 11 Pengwei Hao, Qingyun Shi. Reversible integer KLT for progressive to lossless compression of multiple component images [C]. *International Conference*, 2003, **1**(1): 633~636
- 12 Yan Jingwen, Shen Guiming, Liu Jingsong. An image data compression algorithm based on WT and quadtree vector quantization[J]. *J. Xiamen University (Natural Science)*, 2000, **39**(2): 180~184 (in Chinese)
 闫敬文,沈贵明,刘劲松. 基于小波变换及四元树矢量量化的图像数据压缩算法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2000, **39**(2): 180~184
- 13 Yan Jingwen, Zhou Aisheng. A compression method with wavelet transformation and biblock zero tree coding [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(8): 1160~1162 (in Chinese)
 闫敬文,周爱升. 基于小波变换和对块零数编码压缩方法[J]. 电子学报, 2002, **30**(8): 1160~1162
- 14 Wim Sweldens. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets[J]. *MSIAM J. on Mathematical Analysis*, 1997, **29**(2): 511~546
- 15 I. Daubechies, W. Sweldens. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. *J. Forier Anal. Appl.*, 1998, **4**(3): 247~269
- 16 W. Sweldens. The lifting scheme: a new philosophy in biorthogonal wavelet constructions [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2569**: 68~69
- 17 Li Ping, Xu Luping. Integer wavelet image transform and statistical analysis[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, (11): 90~92,107 (in Chinese)
 李萍,许录平. 整数小波图像变换及统计分析[J]. 计算机工程与应用, 2004, (11): 90~92, 107