

汉明文章编号: 0253-2239(2003)10-1163-5

# 基于 Karhunen-Loève 变换和小波谱特征矢量量化的 三维谱像数据压缩\*

闫敬文 沈贵明 胡晓毅 许 芳

(厦门大学电子工程系, 厦门 361005)

**摘要:** 提出了基于 Karhunen-Loève 变换的小波谱特征矢量量化三维谱像数据压缩方法。三维 Karhunen-Loève 变换/小波变换/小波谱特征矢量量化方法应用了 Karhunen-Loève 变换的消除谱相关性优良性能,应用二维小波变换消除空间相关性,在小波变换域内应用二维集分割嵌入块编码和一维谱特征矢量量化对三维谱像数据压缩,获得较高的压缩性能。实验结果表明:Karhunen-Loève 变换/小波变换/小波谱特征矢量量化编码比 Karhunen-Loève 变换/小波变换/改进对块零树编码和 Karhunen-Loève 变换/小波变换/快速矢量量化编码方法在同样压缩比条件下,峰值信噪比提高 2 dB 和 1 dB 以上,而速度提高了 1.5 和 8 倍,整体压缩性能有较大的提高。

**关键词:** 信息光学; Karhunen-Loève 变换; 小波变换; 矢量量化; 数据压缩

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## 1 引 言

高分辨成像光谱仪产生的海量数据,如 288 个通道高分辨成像光谱仪(0.4~2.5  $\mu\text{m}$ ),数据量化为 16 bit,不经过压缩的数据码流可达 Gbit/s。在带宽有限的卫星下行通道实时传输这样大量的数据,必须进行数据压缩。多光谱遥感图像一般有谱相关、空间相关性和统计相关性<sup>[1]</sup>。遥感专家设计了多种压缩系统来消除遥感图像数据压缩谱相关和空间相关性<sup>[2]</sup>。应用一维线性变换消除谱相关性,再利用二维变换消除空间相关性,是通常采用的压缩方法。也可以用三维矢量量化,三维差分脉冲调制编码(3-D DPCM)和三维小波变换同时消除这两种相关性<sup>[3]</sup>。三维变换、量化和编码的算法比较复杂,需要花大量计算时间,使得性能明显下降。尽管 Karhunen-Loève 变换是经典的传统方法,因多光谱谱像的特殊性,在多光谱数据压缩系统中仍被广泛地采用。而改进的 Karhunen-Loève 变换方法应用于消除多光谱图像谱相关性已获得成功的应用<sup>[4]</sup>。虽然基于 Karhunen-Loève 变换/静止图像压缩标准压缩方法<sup>[4]</sup>采用较小分块的 Karhunen-

Loève 变换进行计算,较上述方法在一定程度上有所改进。但静止图像压缩标准压缩编码的块效应和标量量化的低效率,也无法在压缩性能上有较大的提高。本研究采用 Karhunen-Loève 变换来消除谱相关性,应用二维小波变换来消除空间相关性,并应用改进的小波谱特征矢量量化压缩编码方法对变换后的数据进行压缩。小波变换技术已被应用于二维的视频图像和遥感图像的压缩<sup>[6,7]</sup>。本研究选择适合遥感图像压缩的双正交小波基进行小波变换<sup>[9]</sup>。而谱特征矢量量化方法不仅使压缩处理速度大大加快(当码书取 256 个码字时比常规矢量量化方法快 30 倍,当码书取 4096 个码字时比常规矢量量化方法快 43 倍),而且压缩后恢复精度有所提高<sup>[5]</sup>。但文献[5]中是直接采用谱特征矢量量化压缩编码的,没有对数据进行去相关的变换处理,不利于压缩比的进一步提高。采用 Karhunen-Loève 变换/小波变换后的三维谱像数据,各子图像虽然对应变换了的光谱信息,但和原来的光谱信息相比,各子图像数据分布呈现出更适合压缩的各自特点。低频亮度子图像是相对平滑了的原图像版本,统计分布规律更趋于平均。小波谱特征矢量量化码书在样本大小相同的情况下,压缩的恢复精度比谱特征矢量量化方法得到进一步提高。水平、垂直和对角各子图像是相对平滑了原图像版本的低频亮度子图像的误差图像,均值在零附近,而且零系数都在 10%~30%。这部分信息是高频的误差,在编码引入一些误差时,

\* 福建省自然科学基金(A0210002)、模式识别国家重点实验室开放基金和国家留学基金资助课题。

E-mail: yjwen@jingxian.xmu.edu.cn

收稿日期:2002-10-14; 收到修改稿日期:2003-05-14

对恢复数据的失真影响较小。Karhunen-Loève 变换时传输的均值图像直接进行二维小波变换,然后对其进行小波树矢量量化快速压缩编码。

## 2 多光谱数据压缩中的变换和编码方法

Karhunen-Loève 变换是应用本征矢量空间技术,将变换的数据映射到本征矢量空间上。改进的 Karhunen-Loève 变换减少码流的方法能有效选择保留本征矢量数对失真进行调整,取得其它变换无法获得的效果<sup>[6]</sup>。假设多光谱图像  $N_c$  谱段每一幅图像 ( $i=1,2,\dots,N_c, m=1,2,\dots,M, n=1,2,\dots,N$ ) 组成可表示成一个行(或列)顺序的列向量  $\overline{f_i(j)}$ , 其中  $j=mN+n+1, 0 \leq n \leq N_c-1$ 。对  $N_c$  个谱段图像样本集,可估计出随机过程的协方差矩阵如下:

$$C_f = E\{(f_i - \mu_f)(f_i - \mu_f)\}, \quad (1)$$

$\mu_f$  表示信号均值矢量,它可由下式求出:

$$\overline{\mu_f} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \overline{f_i(j)}, \quad (2)$$

求出本征值按大小进行排序  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{MN}$ , 再求出本征值  $\lambda_i$  对应的归一化矢量  $e_i$  构成正交线性变

换矩阵  $A$ 。于是 Karhunen-Loève 变换为  $g=A(f-\mu_f)$ 。这里  $f$  对应  $\xi, g$  对应  $\psi$ 。 $g$  的第  $i$  个元素的方差  $\sigma_i^2$  等于本征值  $\lambda_i$ 。将的维数减小到  $P$ , 使  $M \times N$  维向量等于前  $P$  个元素所构成的向量,可获得最小均方差意义上的最佳近似,可使能量获得最佳压缩。逆 Karhunen-Loève 变换,就是由本征子图像重建原图像,其公式为

$$f = A^T g + \mu_f.$$

压缩比  $R_c$  可由下式表示:

$$R_c = \frac{N_c \times l \times l}{l \times l + k \times l \times l + N_c \times k}, \quad (3)$$

$l \times l$  表示所分的子块大小,  $k$  是保留的本征值的个数。Karhunen-Loève 变换后的图像数据量为减少,节省存贮量。

多光谱是由可见光、红外线经过层析细化获得对应地面物质的光谱信息。经 Karhunen-Loève 变换/小波变换后光谱信息构成如图 1 所示。图 1(a) 是 Karhunen-Loève 变换后应用本征主分量对数据的压缩示意图,图 1(b) 是 Karhunen-Loève 变换后的数据进行小波变换,任意点对应的的光谱数据。

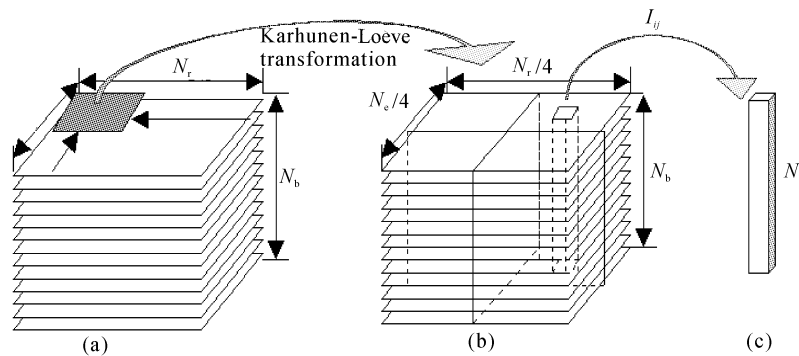


Fig. 1 The vector-constructed and compressed diagram for imaging spectral data by K-LT/WT. (a) The data compression by K-LT; (b) The subimage spectrum by WT; (c) A spectral vector of random dot in space

一幅光谱图像由  $N_c \times N_r$  个像元构成,将空间景象中的每一个像元  $I_{i,j}(k')$ , 其中  $(i,j)$  对应图像空间位置,  $k$  对应光谱维数 ( $k'=1,2,\dots,N_b$ )。将在光谱维上对应同一空间像元强度  $I_{i,j}(k')$  构成一列光谱矢量

$$I_{ij}(k) = [I_{i,j}(1), I_{i,j}(2), \dots, I_{i,j}(N_b)]^T, \quad (4)$$

地面目标对应的物质是有限的,光谱也是有限的,那么光谱所对应的矢量也有限。将一个  $N_b$  维光谱矢量  $I_{i,j}(k)$ (亮度) 转换成幅度  $Y_{i,j}^a$  矢量,并把  $Y_{i,j}^a$  量化成反应幅度变化的  $N_b$  比特二进制码  $Y_{i,j}^b$ :

$$Y_{i,j}^a = [Y_{i,j}^a(1), Y_{i,j}^a(2), \dots, Y_{i,j}^a(N_b)]^T, \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N_r; j = 1, 2, \dots, N_c)$$

$$Y_{i,j}^b(\lambda) = \begin{cases} 1 & [Y_{i,j}^a(\lambda) - \mu_{i,j} \geq 0], \\ 0 & [Y_{i,j}^a(\lambda) - \mu_{i,j} < 0], \end{cases} \quad (6)$$

$\lambda = 1, 2, \dots, N_b$

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{N_b} \sum_{\lambda=1}^{N_b} Y_{i,j}^a(\lambda), \quad (7)$$

和反应斜率变化的  $N_b-2$  比特二进制码  $Y_{i,j}^s$ :

$$Y_{i,j}^s = [Y_{i,j}^s(1), Y_{i,j}^s(2), \dots, Y_{i,j}^s(N_b)]^T, \quad (8)$$

$$Y_{i,j}^s(\lambda) = \begin{cases} 1 & [I_{i,j}(\lambda+1) - I_{i,j}(\lambda-1) \geq 0], \\ 0 & [I_{i,j}(\lambda+1) - I_{i,j}(\lambda-1) < 0]. \end{cases} \quad (9)$$

然后将两个二进制合并成一个二进制码  $Y_{i,j}$ :

$$Y_{i,j} = Y_{i,j}^{ab} Y_{i,j}^s, \quad (10)$$

用  $2N_b - 2$  比特长二进制码来表示原来的  $N_b$  光谱比原来的  $N_b$  光谱要简单得多。进行码字匹配搜索时, 采用相同或相近汉明距离的码字进行比较, 提高搜索速度。两个码的相似性用它们间的汉明距离来测量。由这个编码过程可知, 本编码方法在解码时将会引入较大的误差。为了提高精度可采用标量量化细化方法, 对每一谱像数据进行压缩以增加比特的量化, 但这将会影响压缩比的提高。对此方法进行了改进, 不用增加标准差特征位的方法<sup>[7]</sup> 提高精度, 而改用类似于块截短编码(BTC)方法。将空间任意一点像元对光谱维上的  $N_b$  个值视作一个块截短编码块, 采用同样的方法将其变换成二进制码的光谱表示。接着对  $Y_{i,j}^s$  进行分块求平均, 即 1 和 0 的各均值  $E_1$  和  $E_0$ 。这样只需要增加一个  $N$  比特的负担, 就能够获得接近或优于增加标准差特征位编码的方法。另外无需进行增加标准差特征位的运算, 只需求  $E_1$  和  $E_0$  即可, 运算量也有所减少。同时由于进行了三维变换, 即谱间的一维 Karhunen-Loève 变换, 空间的二维小波变换, 使数据分布比没有进行三维变换的更适合谱特征矢量量化处理, 在不影响压缩速度的前提下, 使压缩比进一步提高。

### 3 集分割嵌入块编码压缩编码

集分割嵌入块编码类似于集分割复合树编码, 但是集分割嵌入块编码是对数据块数据进行压缩处理, 提高了编码的速度。集分割嵌入块编码具有较高的编码效率, 在 JPEG2000 标准中成为核心压缩编码算法。集分割嵌入块编码方法对数据的分割和编码顺序如图 2 所示, 有关详细内容可参考文献[10]。

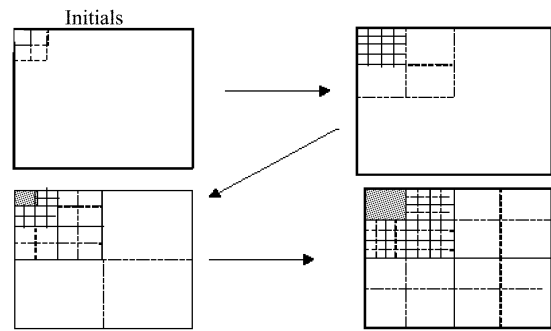


Fig. 2 SPECK coding partitioning proceeds from coarse to fine scale

### 4 基于 Karhunen-Loève 变换的小波谱特征矢量量化三维谱像数据压缩系统

基于 Karhunen-Loève 变换的小波谱特征矢量量化三维谱像数据压缩系统如图 3 所示。本系统采用三维编码方法。首先对三维谱像数据进行 Karhunen-Loève 变换, 然后进行二维小波变换。其次对变换后的第一个谱段数据进行消除空间相关性的集分割嵌入块编码压缩编码, 并在谱这一维上进行谱特征矢量量化编码或改进的谱特征矢量量化编码来消除谱相关性。小波谱特征矢量量化编码是在小波变换域内进行的, 故本文称为小波谱特征矢量量化编码。实际上小波谱特征矢量量化是对集分割嵌入块编码编码后的码流进行编码的, 消除了  $N_b$  维上的相关性。集分割嵌入块编码压缩是消除维  $N_c$  和  $N_r$  上的相关性。所以本系统中的压缩编码方法真正地实现了三维变换和三维压缩编码, 这是本研究方法和传统的三维压缩编码方法的最大区别。

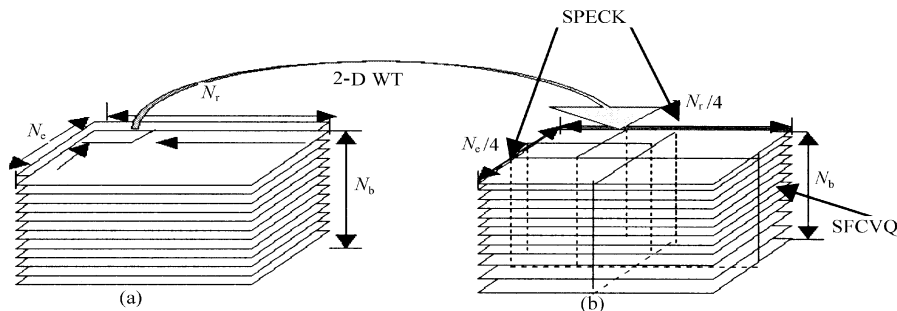


Fig. 3 Wavelet-spectral-feature-classification-vector-quantization (WSFCVQ) diagram. (a) The data compression by K-LT; (b) WSFCVQ coding description at different dimension

由于 Karhunen-Loève 变换可以动态地调整压缩的码流, 可以控制压缩比。另外集分割嵌入块编码也可以控制扫描次数, 实际上也可以根据实际需

要控制码流和压缩比。但是对遥感图像失真有严格的要求, 要求 Karhunen-Loève 变换取更多的本征矢量进行传输。为了进一步提高图像质量, 也可以

用增加集分割嵌入块编码扫描次数的方法。

## 5 实验结果与讨论

改进的较小分块自适应 Karhunen-Loève 变换应用于多光谱数据压缩,用两个本征子图像重建原成图像,方差小于 1%,取得了其他变换无法获得的效果<sup>[4]</sup>。实验研究表明,使用 Antonini 双正交小波 9-3 滤波器的小波变换非常适合于多光谱遥感图像数据压缩<sup>[8]</sup>。故本文选用 Antonini 的双正交小波 9-3 滤波器作为小波变换的滤波器进行数据压缩。进行 Karhunen-Loève 变换后,用二维小波变换消除空间相关性。然后对变换后的各光谱维的每一小波系数进行小波谱特征矢量量化编码。根据小波变换对空间对应像元多尺度分析,对低频亮度子图像进行块截短编码标量量化细化,每一谱维上的数值为二进制码 4 比特,水平和垂直方向子图像在光谱维上的数值为二进制码 3 比特,对角方向子图像在光谱维上的数值为二进制码 2 比特,即不对其进行块截短编码标量量化。用矢量均值对量化码本进行排序,并根据矢量均值大小来确定搜索范围,以提高码字搜索速度。搜索范围由矢量均值及其给定的均值差容限确定。本研究充分利用 Karhunen-Loève 变换和小波变换及谱特征矢量量化编码优点。并对谱特征矢量量化编码搜索进行了改进,可在满足任意均方误差要求条件或压缩比条件下结束码字匹配搜索,极大地提高了压缩编码的效率,保证了该方法具有一定的灵活性。

本实验选用 224 谱段的成像光谱仪谱像数据,作为本研究方法的样本数据进行仿真。本研究中的压缩方法应用同样的实验数据进行压缩实验,当压缩比为 200 时,峰值信噪比仍达 30 dB 以上。而采用改进对块矢量量化压缩编码(Karhunen-Loève 变换/小波变换/改进对块零树编码)方法<sup>[11]</sup>时,当压缩比为 200 时,峰值信噪比为 27.73 dB,提高 2 dB 以上。比文献<sup>[4]</sup>中的 Karhunen-Loève 变换/静止图像压缩标准压缩方法的编码速度快了 35 倍。编码速度比 Karhunen-Loève 变换/小波变换/快速矢量量化编码方法<sup>[9]</sup>快 8 倍,在同样的压缩比情况下,峰值信噪比也有所提高。这主要是由集分割嵌入块编码压缩算法的优越性能决定的。本系统中的压缩编码方法真正地实现了三维变换和三维压缩编码,这是本研究方法的独到之处。

图 4 是本实验数据的平均压缩性能结果。对不

同的谱段数据压缩比可能不完全相同,有时间会有一些差别。有的谱压缩比提高了,但峰值信噪比有所下降,个别谱段只提高 1 dB。

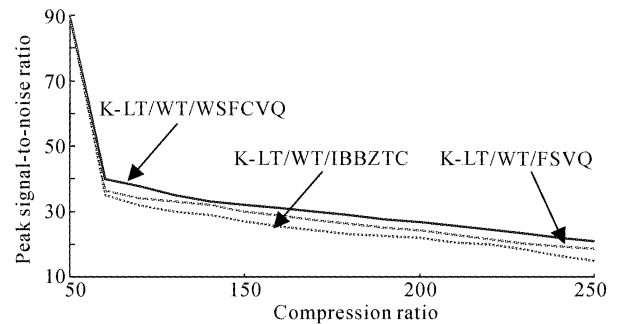


Fig. 4 The performance comparison of K-LT/WT/SFCVQ method with K-LT/WT/FSVQ and K-LT/JPEG

## 参 考 文 献

- Hilton M L, Bjoro D J, Sergupta A. Compression still and moving images with wavelets. *Multimedia System*, 1994, **2**(3):32~38
- John A, Sag Hri, Ardrew T *et al.*. Practical transform coding of multispectral imagery. *IEEE Signal Proc. Magazine*, 1995, **1**(1):32~43
- Brower B, Gandni B D, Couwenhouven *et al.*. ADPCM for advanced landsat downlink applications. *Proc. Twenty-Seventh Asilouar Conf. on Signals System & Computers*, Nov. 1993
- Yan Jingwen, Sun Hui, Zhang Shenghua. A new compression of multispectral image data. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(3):298~303 (in Chinese)
- Qian Shen'en, Yan Jingwen, Sun Hui. 3D hyperspectral imagery data compression using VQ with spectral-feature-coding-based fast matching. *Acta Electronica Sinica* (电子学报), 1997, **25**(5):11~16 (in Chinese)
- Yan Jingwen, Sun Hui, Zhang Shenghua. A image compression method based on wavelet and vector quantization. *The Chinese J. Image and Graphical* (中国图像图形学报), 1997, **2**(12):909~913 (in Chinese)
- Yan Jingwen, Sun Hui, Zhang Shenghua. A fast compression coding method based on wavelet tree vector quantization. *The Chinese J. Image and Graphical* (中国图像图形学报), 1997, **2**(10):730~734 (in Chinese)
- Antonini M, Barlaud M, Mathieu P *et al.*. Image coding using wavelet transform. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1992, **1**(2):205~220
- Yan Jingwen, Shen Guiming. 3D multispectral imagery data compression based on KLT/WT and VQ with spectral-feature-coding. *J. Remote Sensing*, 2000, **4**(4):290~294
- Slam, Pearlman. An embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder. *Visual Communications and Image Processing '99*, San Jose, CA, 1999, **3653**:294~305

11 Yan Jingwen, Shen Guiming, Hu Xiaoyi *et al.*. An improvement biblock zero tree coding for hyperspectral

data compression. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):834~838 (in Chinese)

## Three-Dimensional Multispectral Image Data Compression Based on Karhunen-Loève Transformation/Wavelet Transformation and Vector Quantification with Spectral Feature Coding

Yan Jingwen Shen Guiming Hu Xiaoyi Xu Fang

(*Department Of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen*)

(Received 14 October 2002; revised 14 May 2003)

**Abstract:** A new method for three-dimensional multispectral image data compression based on an improved Karhunen-Loève Transformation (K-LT)/wavelet transformation spectral feature coding vector quantification (WSFCVQ) is proposed. Three-dimensional Karhunen-Loève transformation/wavelet transformation/spectral feature coding vector quantification (SFCVQ) implement three-dimensional compression for three-dimensional multispectral image data with two-dimensional set partition embedded block (SPECK) and one-dimensional spectral feature vector quantification (SFVQ) coding, applying Karhunen-Loève transformation to exploit the spectral correlation in multispectral image data and using two-dimensional wavelet transformation (WT) to remove the spatial redundancy in the multispectral image data, and a high compression performance is got as well. Experimental results show: if Karhunen-Loève transformation/wavelet transformation/wavelet spectral feature coding vector quantification (WSFCVQ) method are compared with the method of Karhunen-Loève transformation/wavelet transformation/improvement BiBlock zero tree coding (IBBZTC) and the method of Karhunen-Loève transformation/wavelet transformation/fast speed vector quantification (FSVQ), the peak signal to noise ratio (PSNR) is enhanced by over 2 dB and 1 dB, the compression speed increased by 1.5 and 8 times respectively, and the total compression performance is greatly improved.

**Key words:** information optics; Karhunen-Loève transformation (K-LT); wavelet transformation (WT); vector quantification with spectral feature coding; data compression