

文章编号: 1007-4619 (2000) 04-0290-05

基于 KLT/WT 和谱特征矢量量化三维谱像数据压缩

闫敬文, 沈贵明, 胡晓毅, 许 芳

(厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要: 提出了基于 KLT/WT 和谱特征矢量量化(SFCVQ)三维谱像数据压缩的新方法。在对多光谱图像数据进行 Karhunen-Leove 变换(KLT)消除谱相关性,再应用小波变换(WT)对 KLT 后的多光谱图像数据进行消除空间相关性。采用 SFCVQ 编码对每个谱像数据进行压缩,获得较高的压缩性能。实验结果表明:KLT/WT/SFCVQ 方法和 KLT/WT/VQ 压缩方法比在同样压缩比(CR)条件下,峰值信噪比(PSNR)没明显变化,而速度提高了 30 倍,比 KLT/WT/FSVQ 也提高了 5 倍,整体压缩性能有较大的提高。

关键词: KLT;小波变换;矢量量化;数据压缩

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

高分辨成像光谱技术是新一代遥感技术,它能够获得地面目标的空间特征,同时也能获得其对应丰富的光谱信息,可定性定量地对被测对象进行物理分析和识别^[1]。如 288 个通道的高分辨率成像光谱仪,波长范围在 0.4—2.5 μm ,原始数据率达 512 MByte/s。而目前卫星最大的下行通道带宽为 300 MByte/s,无法实时地将这些数据传输到地面接收站^[2]。在带宽有限卫星下行通道实时传输这样大量数据,必须进行遥感数据压缩。多光谱遥感图像一般有 3 种冗余性^[3]:(1) 谱段与谱段间的谱相关;(2) 空间相关性;(3) 统计相关性。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^[4]。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特性,是通常采用的压缩方法。也可以用三维 VQ、DPCM 和 WT 同时消除这两种相关性^[5]。三维变换、量化和编码的算法比较复杂,使得性能明显下降。改进的 KLT 方法应用于消除多光谱图像谱相关性获得成功的应用^[6]。虽然基于 KLT/JPEG 压缩方法^[6]采用较小分块的 KLT 进行计算,较上述方法在一定程度上有所改进。

利用小波变换技术多尺度分析的结构和调节不同频率带宽,允许对子图像实施不同的编码策略,成为图像压缩编码的强有力工具。本研究采用 KLT 来消除谱相关性,应用二维 WT 来消除空间相关性,并对变换后的数据应用改进的 SFCVQ 压缩编码方法进行压缩。在对小波变换大量的研究工作基础上,将小波变换技术应用于二维的视频图像和遥感图像的压缩^[8-10]。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^[11]。寻找一种快速压缩编码算法^[9],在变换域内对小波系数进行 SFCVQ 压缩编码,以适于实时性的要求。SFCVQ 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 VQ 方法快 30 倍,当码书取 4096 个码字时比常规 VQ 方法快 43 倍),而且压缩后恢复精度有所提高^[7]。但文献[7]中是直接采用 SFCVQ 压缩编码,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。低频亮度子图像是相对平滑了的原图像版本,所以在谱维上变化和未变换前相比,统计分布更趋于平均,SFCVQ 码书在同样本大小的情况下,压缩的恢复精度将进一步提高;而水平、垂直和对角各子图像是低频亮度子图像的误差图像,在谱维上变化和未变换前相比,均值在零附近,而且零系数都在 10%—30%,采用 SFCVQ 码书在同样本大小

收稿日期: 1999-08-20; 修订日期: 2000-01-05

基金项目: 福建省自然科学基金资助 (9910002)。

作者简介: 闫敬文(1964—),男,汉族,副教授。1987年7月毕业于吉林工业大学电子工程系。1997年在中国科学院长春光学机械研究所应用光学国家重点实验室获得理学博士学位。现在厦门大学电子工程系任教。主要研究领域:数字信号处理、小波变换理论和应用、光学遥感图像数据压缩和分类、阵列天线信号处理,已发表论文十多篇。

的情况下, 压缩的恢复精度也将进一步提高。

缩比 CR 可由下式表示:

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

2 多光谱数据压缩系统基本方法

2.1 改进的 KLT 方法应用简介

随着高速大规模集成电路(VSLI)器件的出现, 准 KLT 已被应用到光谱图像数据压缩系统中, 并取得压缩比为 5:1—40:1 无明显失真的实时效果^[2]。改进的 KLT 减少码流的方法能有效地对失真进行人为的调整, 取得其它变换无法获得的效果^[6]。压

其中: $n \times n$ 表示所分的子块大小, k 为保留的本征值的个数, Q 为光谱波段数。当 Q 为 200, 子块是 4×4 , k 取 2 时, 获得的压缩比 CR 为 7。 k 取 1 时, 获得的压缩比 CR 为 13.8。均值图像仍为 512×512 。经上述步骤处理后, 传输数据量大为减少, 可获得 (1) 式的压缩比。数据压缩量如图 1(a) 所示。

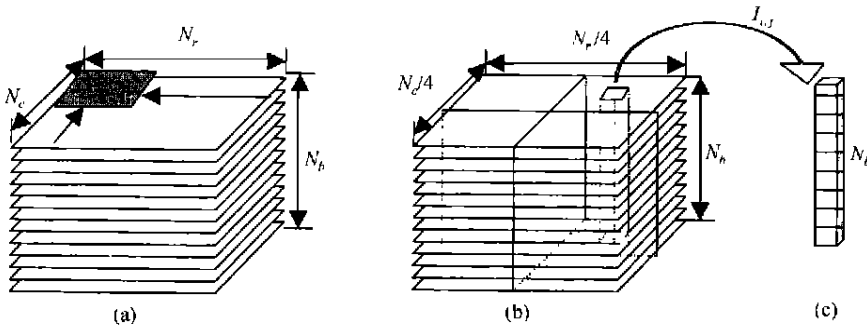


图 1 成像光谱数据经 KLT/WT 后对压缩和矢量构成示意图

(a) KLT 对数据的压缩 (b) WT 后变换成各子图像 (c) 空间任何一点的谱矢量

Fig. 1 The vector-constructed and compressed diagram for imaging spectral data by KLT/WT

2.2 短时小波基本理论

每个小波 ψ 满足正交条件, 任何函数 $f(x): f \in L^2(\mathbb{R})$ 可用一个小波级数表示, 即:

$$f(x) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(x) \quad (2)$$

令 ψ 是任一小波并且考虑它生成的 Riesz 基 $\{\psi_{j,k}\}$ 。对于每个 $j \in \mathbb{Z}$ 令 W_j 表示 $\{\psi_{j,k}: k \in \mathbb{Z}\}$ 的线性扩张的闭包, 即 $W_j := \text{clos } L^2(\mathbb{R}) \langle \psi_{j,k}: k \in \mathbb{Z} \rangle$ 。那么 $L^2(\mathbb{R})$ 能够分解为空间 W_j 的直接和:

$$L^2(\mathbb{R}) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} W_j := \dots + W_{-1} + W_0 + W_1 + \dots \quad (3)$$

每个 $f \in L^2(\mathbb{R})$ 都有一个唯一的分解: $f(x) = \dots + g_{-1}(x) + g_0(x) + g_1(x) + \dots$ 。如果 ψ 是正交小波, 那么 $L^2(\mathbb{R})$ 的子空间 W_j 相互正交, 即 $\langle g_j, g_l \rangle = 0, j \neq l$ 。其中 $g_j \in W_j$ 与 $g_l \in W_l$ 。于是 (3) 式就可以用空间的正交和的形式写成如下表示式:

$$L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus W_j := \dots \bigoplus W_{-1} \bigoplus W_0 \bigoplus W_1 \bigoplus \dots, j \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

任何小波, 半正交的或非正交的, 都产生 $L^2(\mathbb{R})$ 的一种直接和的分解形式。对于 $j \in \mathbb{Z}$, 空间 $L^2(\mathbb{R})$ 的闭子空间: $V_j = \dots + W_{j-2} + W_{j-1}, j \in \mathbb{Z}$ 。显然这些空间具有如下性质:

- (a) $\dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots$
- (b) $\text{clos } L^2 \left\{ \bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j \right\} = L^2(\mathbb{R})$
- (c) $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$
- (d) $V_{j+1} = V_j + W_j, j \in \mathbb{Z}$
- (e) $f \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1}, j \in \mathbb{Z}$ 。

小波是由一个母函数 ψ 扩张和平移得到的函数:

$$\psi^{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (5)$$

这里 t 可认为是一个一维变量, 母小波 ψ 满足:

- (1) $\int \psi(x) dx = 0$, 即满足振荡的波动性。
- (2) $\int |\psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty$, $\psi(\omega)$ 是 ψ 的傅里叶变换。

$a < 1$ 对应窄带高频小波, $a > 1$ 对应宽带低频小波。对于离散小波变换, $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m, m, n \in \mathbb{Z}, a_0 > 0, b_0 > 0$ 。小波分解如下:

$$f = \sum C_{m,n}(f) \psi_{m,n} \quad (6)$$

一般情况下选择 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$, $\psi_{m,n}$ 是一个正交基, 满足

$$\begin{aligned} C_{m,n}(f) &= \langle \psi_{m,n}, f \rangle \\ &= \int \psi_{m,n}(x) f(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

算法的实现都转换为(7)式的实现^[11]:

$$\begin{aligned} C_{m,n}(f) &= \sum_k g_{2n-k} a_{m-1,k}(f) \\ a_{m,n}(f) &= \sum_k g_{2n-k} a_{m-1,k}(f) \end{aligned} \quad (8)$$

这里

$$g_l = (-1)^l h_{-l+1}, h_n = 2^{1/2} \int \phi(x-n) \phi(2x) dx.$$

事实上 $C_{m,n}(f)$ 是映射到 V_m 子空间的系数. 由滤波器可得出精确的重建公式为:

$$\begin{aligned} a_{m-1,l}(f) &= \sum_n [h_{2n-l} a_{m,n}(f) \\ &+ g_{2n-l} C_{m,n}(f)] \end{aligned} \quad (9)$$

采用双正交小波变换, 它由两个相互正交的尺度函数定义的滤波器确定:

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \sum_n h_n \phi(2x-n) \\ \tilde{\phi}(x) &= \sum_n \tilde{h}_n \phi(2x-n) \end{aligned} \quad (10)$$

如果这两个滤波器的响应是有限冲激响应, 它的紧支小波定义为:

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \sum_n g_n \phi(2x-n) \\ \tilde{\psi}(x) &= \sum_n \tilde{g}_n \phi(2x-n) \end{aligned} \quad (11)$$

这时重公式为 $f = \sum_{m,n} \langle \psi_{m,n}, f \rangle \psi_{m,n}$, 而且满足 $\sum_n h_n = 2^{1/2}$, $\sum_n (-1)^n h_n = 0$ 和 $\sum_n \tilde{h}_n = 2^{1/2}$, $\sum_n (-1)^n \tilde{h}_n = 0$. 根据镜像滤波器的对应关系可确定镜像滤波器 g 和 \tilde{g} .

2.3 改进的 SFCVQ (ISFCVQ) 压缩编码

经 KLT/WT 后光谱信息构成如图 1 所示. 图 1 中的(a)是 KLT 后应用本征主分量对数据的压缩示意图, (b)是 KLT 后的数据进行 WT, 将光谱变换成 WT 各子图像对应变换后的光谱, (c)是任意子图像上任意点对应的的光谱数据. 将在光谱维上对应同一空间像元 $I_{i,j}(k)$ 构成一列光谱矢量:

$$I_{i,j} = [I_{i,j}(1), I_{i,j}(2), \dots, I_{i,j}(N_b)]^T \quad (12)$$

将一个 N_b 维光谱矢量 $Y_{i,j}^{ab}$ 表示成反应幅度变化的 N_b 比特二进制码 $Y_{i,j}^a$:

$$\begin{aligned} Y_{i,j}^a &= [Y_{i,j}^a(1), Y_{i,j}^a(2), \dots, Y_{i,j}^a(N_b)]^T \\ &(i = 1, 2, \dots, N_r, j = 1, 2, \dots, N_c) \end{aligned} \quad (13)$$

$$Y_{i,j}^{ab}(\lambda) = \begin{cases} 1 & [Y_{i,j}^a(\lambda) - \mu_{i,j} \geq 0] \\ 0 & [Y_{i,j}^a(\lambda) - \mu_{i,j} < 0] \end{cases}, \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} \mu_{i,j} &= \frac{1}{N_b} \sum_{\lambda=1}^{N_b} Y_{i,j}^a(\lambda), \\ i &= 1, 2, \dots, N_r, j = 1, 2, \dots, N_c \end{aligned} \quad (15)$$

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

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

$$i = 1, 2, \dots, N_r, j = 1, 2, \dots, N_c \quad (16)$$

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

$$\lambda = 2, \dots, N_b - 1 \quad (17)$$

然后将二个二进制以矢量(或矩阵)形式合并成一个二进制码 $Y_{i,j}$ 矢量:

$$\begin{aligned} [Y_{i,j}] &= [Y_{i,j}^{ab}] [Y_{i,j}^s], \\ i &= 1, 2, \dots, N_r, j = 1, 2, \dots, N_c \end{aligned} \quad (18)$$

用 $N_b - 2$ 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用它们间的 Hamming 距离来测量. 本研究对此方法进行了改进, 不再用增加标准差特征位的方法^[7] 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 BTC 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 $Y_{i,j}^{ab}$ 进行分块求平均, 即 1 和 0 的各自均值 E_1 和 E_0 :

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{N_1} \sum_m Y_1, \\ E_0 &= \frac{1}{N_0} \sum_m Y_0 \end{aligned} \quad (19)$$

其中 N_1 和 N_0 分别为 $Y_{i,j}^{ab}$ 为 1 和 0 的个数, Y_1 和 Y_0 分别对应 $Y_{i,j}^{ab}$ 为 1 和 0 的实际光谱幅值, 分别有 m 和 $N_b - m$ 个. 这样只需要增加一个 N_b 比特同样负担, 能够获得接近或优于增加标准差特征位编码方法. 另外无需进行增加标准差特征位运算, 只求 E_1 和 E_0 , 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 KLT 变换, 空间的二维 WT, 使数据分布比没有进行三维变换的更适合 SFCVQ 处理, 使压缩比进一步提高.

4 实验结果与讨论

改进的较小分块自适应 KLT 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%,取得其他变换方法无法获得的效果^[6]。实验研究表明使用双正交小波 9-3 滤波器的小波变换非常适合多光谱遥感图像数据压缩^[8]。故本文选用双正交小波 9-3 滤波器作为小波变换的滤波器进行数据压缩。KLT 变换和一次二维小波变换后,对变换后的各光谱维的小波系数进行 SFCVQ 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 BTC 标量量化细化,每一谱维上的数值为二进制码 4 bit,水平和垂直方向子图像在光谱维上的数值为二进制码 3 bit,对角方向子图像在光谱维上的数值为二进制码 2 bit,即不对其进行 BTC 标量量化细化。可以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忍限确定。本研究综合 KLT 和 WT 及 FSCVQ 编码优点的基础上,对 SFCVQ 编码进行了改进,提出了 ISFCVQ 编码。该编码方法可在满足任意均方误差条件或压缩比条件下结束码字匹配搜索,提高

了压缩编码的效率,使该方法具有一定的灵活性。这是本研究方法的最大特点。

本实验选用我国自行研制的 16 谱段的成像光谱仪在澳大利亚达尔文地区飞行获得的谱像数据,作为 KLT/WT/ISFCVQ 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 151.13 时,PSNR 仍达 30.87dB。而采用小波树快速矢量量化压缩编码方法时,当压缩比为 140.98 时,PSNR 为 30.21dB。因视觉效果与文献^[6]中的 KLT/JPEG 压缩方法的结果没有明显差别,而编码速度快了 30 倍。不考虑光谱谱维的相关性,编码和解码速度比 KLT/WT/FSVQ 方法快 5 倍,在同样的压缩比情况下,PSNR 也有所提高。本研究方法从整体性能上优于文献^[7]中的压缩编码方法的性能,这是 KLT 和 WT 及 ISFCVQ 编码的特点决定的,具体压缩结果如图 2。未来的研究工作将包括基于谱特征的三维矢量量化编码和成像光谱仪重复扫描同一区域遥感数据相关性的研究工作,可望获得进一步改善压缩系统性能的压缩方法,并侧重其实时实现。

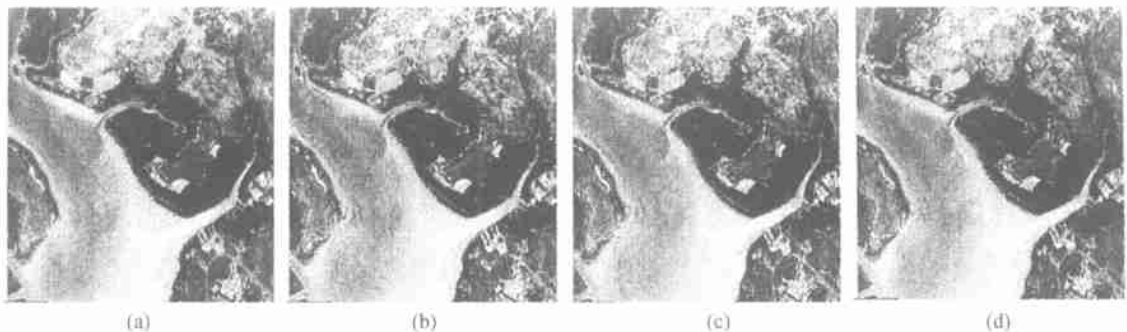


图 2 KLT/WT/ISFCVQ 压缩的性能

(a) 16 个谱段第一谱段原图像 (b) KLT/JPEG 重建图像, $Q=50$, 压缩比为 102.34 峰值信噪比为 34.33
(c) KLT/WT/FSVQ 重建图像, 压缩比为 140.98, 峰值信噪比为 30.21 (d) KLT/WT/ISFCVQ 重建图像, 重建图像压缩比为 151.13, 峰值信噪比为 30.87

Fig.2 The compression performance of KLT/WT/ISFCVQ

参考文献 (References)

- [1] A. F. H. et al. Sciences [J], 1985, 228(4704):1147-1153.
- [2] VAL. P. VAUGHN, Timothy S. Wilkinson. System Consideration for Multispectral Image Compression Designs [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1995, 1(1): 19-31.
- [3] Michael L. Hilton Bjorn D. J. Sergupta A. Compression Still and Moving Images with Wavelets [J]. Multimedia System, 1994, 2(3): 32-38.
- [4] John A., SagHri, Andrew T, John Reagon T. Practical Transform Coding of Multispectral Imagery [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1995, 1(1):32-43.
- [5] Brower B., Gandni B. D, Couwenhouven, Smith C. ADPCM for Advanced Landsat Downlink Plications [R]. Proc. of Twenty Seventh Asilouar Conf. on Signals System & Computers, 1993.
- [6] YAN Jing-wen et al. A New Compression of Multispectral Image Data [J]. ACTA OPTICA SINICA, 1997, 17 (3): 298-303.
- [7] QIAN Shen-en, YAN Jing-wen, SUN Hui. 3D Hyperspectral Imagery Data Compression Using VQ with Spectral-Feature-Coding-Based Fast Matching [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 1997, 25(5): 11-16.
- [8] YAN Jing-wen, SUN Hui, ZHANG Sheng-hua. A Fast Compression

- Coding Method Based on Wavelet Tree Vector Quantization [J]. *THE CHINESE JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICAL* **2**(10): 730—734.
- [9] YAN Jing-wen, SUN Hui, ZHANG Sheng-hua. A Image Compression Method Based on Wavelet and Vector Quantization [J]. *THE CHINESE JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICAL*, **2** (12): 909—913.
- [10] QI Lei, YAN Jing-wen. A M-bands Wavelet Base Construction with K Regularity [J]. *THE JOURNAL OF CHANGCHUN INSTITUTE OF POSTS AND TELECOMMUNICATION* **15**(1): 33—36.
- [11] Marc Antonini, Michel Barlaud, Pierre Mathieu, Ingrid Daubechies. Image Coding Using Wavelet Transform [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1992, **1**(2): 205—220.

3D Multispectral Imagery Data Compression Based on KLT/WT and VQ with Spectral-feature-coding

YAN Jing-wen, SHEN Gui-ming, Hu Xiao-yi, XU Fang

(The Dept. of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In this paper we propose a new method for multispectral image data compression based on Karhunen-Leove Transformation (KLT)/Wavelet Transformation (WT) and VQ with Spectral Feature Coding(SFCVQ). After KLT is applied to multispectral image data for exploiting the spectral correlation, the Wavelet Transformation (WT) is used for the transformed multispectral image data to remove spatial redundancy. Then the SFCVQ is designed to compress every spectral image data. A higher compression performance is obtained. Experimental results shows that in comparison of the methods of KLT/WT/SFCVQ with KLT/KLT/VQ, under the condition of the same Compression Ratio (CR), the Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) is not varied apparently, while the compression speed increases 30folds, or 5folds compared with the KLT/WT/FSVQ, and the total compression performance has a great enhancement.

Key words: KLT; wavelet transformation; vector quantization with spectral feature coding; data compression