

# 基于小波变换和矢量量化的遥感图象压缩方法

阎敬文 孙辉 张圣华

(长春邮电学院通信工程系, 长春 130012) (长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 提出基于小波变换(WT)的矢量量化(VQ)的遥感图象压缩编码方法。采用二维 WT 消除像素间的空间相关性, 然后对变换后的小波系数进行 VQ 压缩编码。实验结果表明: 该方法可获得 10 倍压缩比, 峰值信噪比(PSNR)为 30.52。本方法明显优于 JPEG 方法, 而且没有方块效应。该方法可用于各种遥感图象压缩, 压缩比和 PSNR 这两项指标与 JPEG 压缩方法相比, 也有明显的提高。

**关键词** 小波变换, 数据压缩, 矢量量化

## 1 引言

近年来各种形式的数据压缩方法研究一直是研究的热点。而有数学“显微镜”美称的小波变换, 以其多尺度时间—频率分辨的能力, 受到广泛关注。小波变换特别适合于细节丰富、空间相关性差、冗余度低的遥感图象数据压缩处理。因小波变换的特点, 现在各种数据压缩系统中都采用了这一先进技术。各国对小波变换都投入力量进行了大量的研究和应用工作。1982年 Battle 在构造量子场论中使用了类似 Calderon 再生公式的展开。1984年法国地球物理学家 Morlet 在分析地震波的局部性质时, 发现传统的 Fourier 变换难以达到要求, 因此将小波概念引入信号分析中对信号进行分解。随后, 理论物理学家 Grossman 对 Morlet 的这种信号按一个确定数的伸缩平移系  $\left\{ |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) : a, b \in R, a \neq 0 \right\}$  展开的可行性进行了研究, 为小波的发展奠定了基础。1986年 Meyer 创造性地构造出了具有一定衰减性的光滑函数, 其二进制伸缩平移  $\{\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) : j, k \in Z\}$  构成  $L^2(R)$  的规范正交基。1987年 Mallat 巧妙地将计算机视觉领域的多尺度分析的思想引入到小波分析中, 小波函数的构造及信号按小波变换的分解和重构, 并将这种算法

应用于图象的分解与重构。Daubechies 构造了具有有限支集的正交小波基, 已应用到各种信号和图象处理中<sup>[1]</sup>。而在数据压缩应用中效果最好的是 Antonini 构造的双正交小波<sup>[2]</sup>。小波理论的逐步完善, 已成为信号和图象处理的有力的数学工具<sup>[3]</sup>, 有可能取代传统的 Fourier 变换。现在小波变换已被应用到数据压缩<sup>[4]</sup>、信号处理、模式识别、信号检测、计算机视觉、混沌力学、分形理论和偏微分方程数值解等多学科的诸多领域。矢量量化压缩编码方法也是数据压缩的一个有力工具。本文根据遥感图象的特点, 应用 Antonini 的双正交小波基对遥感图象进行小波分解, 对分解的系数进行矢量量化压缩编码。

## 2 小波和双正交小波变换

小波是由一个母函数  $\psi$  扩张和平移得到的函数:

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

这里  $t$  可认为是一个一维变量, 母函数  $\psi$  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  $\psi$  的傅立叶变换。 $a < 1$  对应窄带高频小波,  $a > 1$  对应宽带低频小波。

• 国家自然科学基金资助项目(NO 49581001), 邮电部立项和邮电部青年基金资助项目  
收稿日期: 1996-11-01; 收到修改稿日期: 1997-05-19

波。对于离散小波变换,  $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m, m, n \in Z, a_0 > 0, b_0 > 0$ 。小波分解如下:

$$f = \sum C_{m,n}(f) \psi_{m,n} \quad (2)$$

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

$$C_{m,n}(f) = (\psi_{m,n}, f) = \int \psi_{m,n}(x) f(x) dx \quad (3)$$

算法的实现都转换为式(3)的实现<sup>[2]</sup>:

$$C_{m,n}(f) = \sum_k g_{2n-k} a_{m-1,k}(f),$$

$$a_{m-1,k}(f) = \sum_k g_{2n-k} a_{m-1,k}(f) \quad (4)$$

这里  $g_l = (-1)^l h_{-l+1}, h_n = 2^{\frac{1}{2}} \int \phi(x-n) \phi(2x) dx$ 。事实上  $C_{m,n}(f)$  是映射到  $V_m$  子空间的系数。如果  $f$  是离散的, 该算法可视为由低通滤波器  $h$  和高通滤波器  $g$  组成的子带编码算法。因为低通滤波器  $h$  和高通滤波器  $g$  与正交小波基对应, 所以由滤波器可得出精确的重建公式为:

$$a_{m-1,l}(f) = \sum_n [h_{2n-1} a_{m,n}(f) + g_{2n-1} C_{m,n}(f)] \quad (5)$$

双正交小波变换是目前最适合数据压缩的小波变换之一, 它由两个相互正交的尺度函数定义的滤波器

确定:

$$\phi(x) = \sum_n h_n \phi(2x-n),$$

$$\tilde{\phi}(x) = \sum_n \tilde{h}_n \tilde{\phi}(2x-n) \quad (6)$$

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:

$$\psi(x) = \sum_n g_n \psi(2x-n),$$

$$\tilde{\psi}(x) = \sum_n \tilde{g}_n \tilde{\psi}(2x-n) \quad (7)$$

这时重公式为  $f = \sum_{m,n} (\psi_{m,n}, f) \tilde{\psi}_{m,n}$ , 而且满足

$\sum_n h_n = 2^{\frac{1}{2}}, \sum_n (-1)^n h_n = 0$  和  $\sum_n \tilde{h}_n = 2^{\frac{1}{2}}, \sum_n (-1)^n \tilde{h}_n = 0$ 。Antonini 根据上述双尺度方程和双正交的特性, 构造小波双正交小波滤波器  $h$  和  $\tilde{h}$ 。再由镜像滤波器的对应关系可确定镜像滤波器  $g$  和  $\tilde{g}$ 。具有长度为 3, 消失矩是 4 的 9-3 样条小波标尺函数和小波如图 1 所示。我们将在下一部分用 Antonini 构造的各种双正交小波基进行变换<sup>[2]</sup>, 对遥感图象进行统计分析, 确定适合遥感图象数据压缩的小波变换。

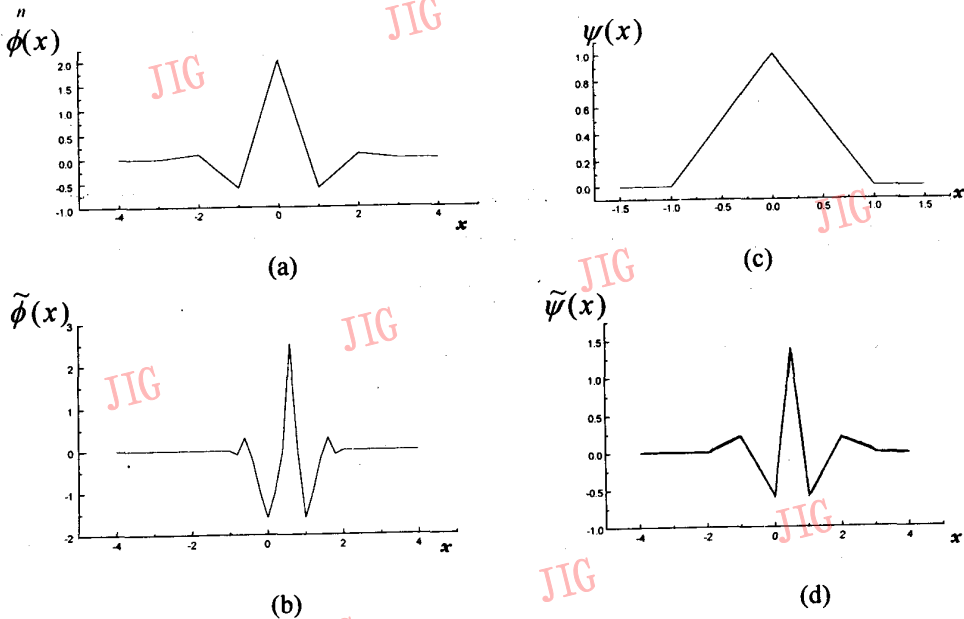


图 1 尺度函数  $\phi, \tilde{\phi}$  和小波  $\psi, \tilde{\psi}$  ( $l=3, k=4$  的样条滤波器)

(a) 样条函数  $\phi$  (b) 样条函数  $\tilde{\phi}$  (c) 小波  $\psi$  (d) 小波  $\tilde{\psi}$

Fig. 1 Scaling functions  $\phi, \tilde{\phi}$  and wavelets (spline filters with  $l=3, k=4$ )

(a) Scaling functions  $\phi$  (b) Scaling functions  $\tilde{\phi}$  (c) Wavelets  $\psi$  (d) Wavelets  $\tilde{\psi}$

### 3 遥感图象统计特性和适合遥感图象数据压缩小波基的确定

小波变换被称作数学显微镜,很适合表现图象的特征<sup>[5]</sup>。但存在的不足是不能用一组滤波器去处理任何问题。不同  $g$  和  $h$  的系数对应不同的滤波特性,确定  $g$  和  $h$  的系数是小波变换的一个很有实际意义的问题。寻求适合多光谱遥感图象数据压缩的  $g$  和  $h$  的系数是我们所研究问题的一个重要方面。以大小为  $512 \times 512$  的 Lena 图象作为统计分析的源图象。选用 Daubechies 4-4, 6-6, 8-8 小波基和 Antonini 的双正交小波基 9-7, 9-3, 5-7 进行多谱图象压缩特性研究。小波变换后系数概率分布情况分析结果如图 2 所示, Pdf 为概率密度。由图 2 可知,小波滤波器和 Antonini 的双正交小波 9-3, 9-7 滤波器的压缩结果。Daubechies 的 4-4, 6-6, 8-8 滤波器在

0,  $\pm 1$  小波系数为 31%, 而 Antonini 的双正交小波 9-7, 9-3, 5-7 滤波器在 0,  $\pm 1$  小波系数高达 42%。可见使用 Antonini 双正交小波滤波器的小波变换非常适合多光谱遥感图象数据压缩, 采用 Antonini 双正交小波滤波器小波变换的多光谱遥感图象数据压缩系统性能优于使用 Daubechies 的 4-4, 6-6, 8-8 滤波器小波变换的多光谱遥感图象数据压缩系统性能。由表 1 对小波系数分布的统计分析可知, Antonini 的双正交小波 9-3 滤波器分解的小波系数变化范围为 55 至 -63 之间, 其变化范围最小。通过上述对各种小波变换系数分布的统计研究表明, 使用 Antonini 的双正交小波 9-3 滤波器的小波变换最适合表征图象数据, 使变换后的数据分布最为集中, 它就是上述 6 种小波基中最适合数据压缩的小波变换。我们选用 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。

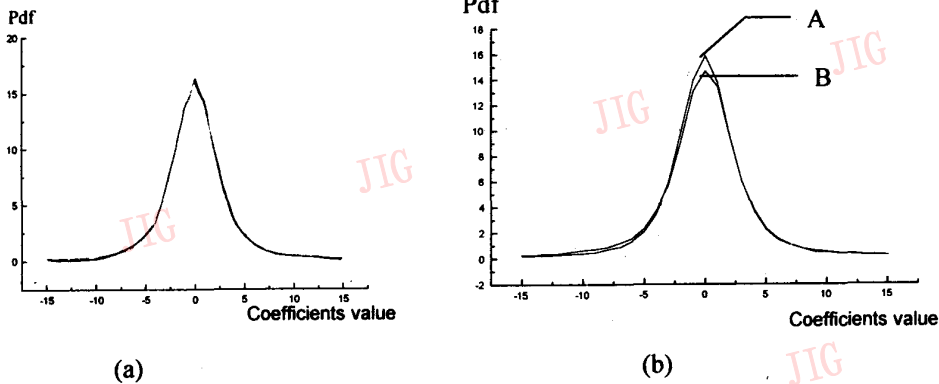


图 2 用 Daubechies 和 Antonini 小波基进行小波分解后的小波系数概率分布

(a)用 Antonini 9-7 滤波器的小波系数概率分布 (b)A 为用 Antonini 9-3 滤波器的小波系数概率分布曲线,B 为用 Daubechies 4-4 滤波的小波系数的概率分布曲线

Fig. 2 The wavelet decomposition pdf using Daubechies and Antonini wavelet base

(a) The coefficient contribution using Antonini 9-7 filter wavelet base (b) A is the coefficient contribution curve using Antonini 9-3 filter wavelet base and B is the coefficient contribution curve using Daubechies 4-4 wavelet base

表 1 用 Daubechies 和 Antonini 小波分解其小波系数的方差

Table 1 The wavelet coefficient variance using Daubechies and antonini wavelet decomposition

	Daubechies Filters			Antonini biorthogonal filters			
	Style	4-4	6-6	8-8	9-7	9-3	5-7
Variance		-86~79	-77~74	-79~63	-70~60	-63~55	-76~66
Absolute		165	151	162	130	118	142

### 4 WT+VQ 遥感图象数据压缩方法和应用

在上节分析中,确定采用 Antonini 的双正交小波 9-3 滤波器的小波变换对本文的遥感图象进行分解。而矢量量化压缩编码方法是图象压缩编码的一种有效的编码方法,已被广泛应用于各种图象压缩中。本文采用的 VQ 方法的码本用 LBG 方法产生。各子图象分配不同的位率,各子图象位率分配如图 3 所示。

Texture 8bpp Scalar Quantion	2bpp $N=256$ size $2 \times 2(k=4)$ VQ	Horizontal orientation 0.5bpp $N=256$ size $4 \times 4(k=16)$ VQ
2bpp $N=256$ size $2 \times 2(k=4)$ VQ	0.5bpp $N=256$ size $4 \times 4(k=16)$ VQ	
Vertical orientation 0.5bpp $N=256$ size $4 \times 4(k=16)$ VQ		Diagonal 0 bpp

图 3 各子图象最佳位率分配

Fig. 3 Subimages optimal bit rate allocation diagram

实践表明矢量量化是数字图象压缩的一个强有力工具,可应用于各种数字信号压缩。根据二次小波

分解的特点,对每一谱段各子图象每象素位率分布如图所示。用 LBG 算法产生各尺度不同方向(水平,垂直,对角)子码本,再进行矢量量化编码。多尺度利用人眼的视觉属性,能够根据分辨级和方向选择分类编码,从而获得最佳位率分配。人眼的视觉属性对高频反应不敏感,对低频反应敏感。根据这一特点,由 VQ 获得最佳位率分配如图 3 所示:对角高频区位率分配为 0bpp,不对这一区域进行 VQ 编码;水平和垂直及第二尺度分辨的对角区域位率分配 0.5bpp,进行 256 码字长  $4 \times 4(k=16)$  大小的 VQ 编码;第二尺度分辨的水平和垂直区域位率分配是 2bpp,进行 256 码字长  $2 \times 2(k=4)$  大小的 VQ 编码;第二尺度分辨包含大量纹理信息的低频区域位率分配为 8 bpp,不进行 VQ 编码,而对其进行标量量化(SQ)编码。VQ 编译码每一码字进行全部搜索,获得方差意义上最小的最佳匹配的编译码,需要大量时间,这是 VQ 缺点。但小波 VQ 是对不同方向较小的子图象进行编码,码本很短,匹配的编译码所需时间少,完全克服 VQ 缺点,获得高效率的高压缩比。

### 5 结 论

基于小波变换(WT)的矢量量化(VQ)的遥感图象压缩编码方法能有效地消除遥感图象空间相关性,而且在地面能够快速重建原来遥感图象数据。采用二维 WT 消除象素间的空间相关性,然后对变

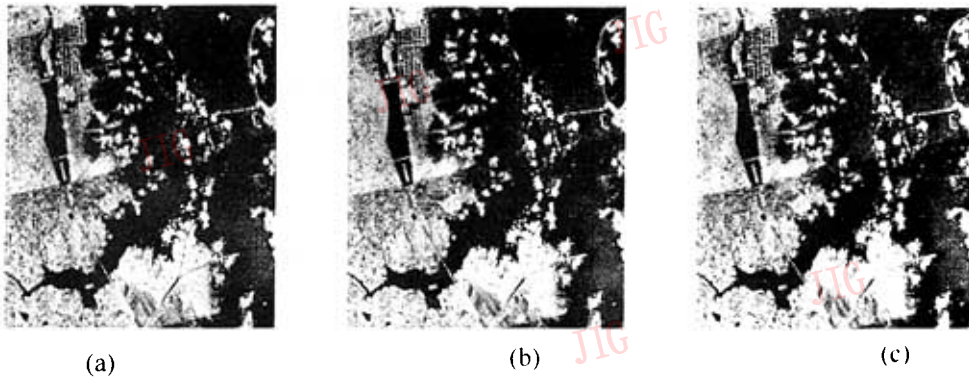


图 4 WT+VQ 与 JPEG 方法的比较

(a)原图象 (b)JPEG 重建图象,PSNR=26.20,Rt=0.87bpp  
(c)WT+VQ 重建图象 PSNR=30.52,Rt=0.80bpp

Fig. 4 The comparison of WT+VQ method and JPEG

(a) The original image (b) The reconstructed image of JPEG, PSNR=26.20, Rt=0.87 bpp  
(c) The reconstructed image of WT+VQ method, PSNR=30.52, Rt=0.80 bpp

换后的小波系数进行VQ压缩编码,降低要传输的码率。我们以一幅大小为 $512 \times 512$ 、每个象元为8比特的航空遥感图象为例进行仿真实验,实验结果如图4所示。该方法可获得10倍压缩比,峰值信噪比(PSNR)为30.52。而对同一图象进行JPEG压缩时,在同样10倍压缩比的情况下,PSNR为26.20,而且出现明显的方块效应。实验结果表明:本文提出的WT+VQ压缩方法的性能明显优于JPEG方法,而且没有方块效应。即在同样的PSNR时,WT+VQ压缩方法压缩比高于JPEG方法;或在同样的压缩比条件下,WT+VQ压缩方法的PSNR高于JPEG方法。该方法可用于各种遥感图象压缩,压缩比和PSNR这两项指标与使用JPEG压缩方法相比,也有不同程度的提高。



阎敬文,1964年生于吉林,1987年毕业于吉林工业大学电子工程系,获工学学士学位。1992年毕业于中国科学院长春地理所,获地图学与遥感理学硕士学位。现在长春邮电学院任教,于1994年在中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室攻读在职博士学位。主要研究领域:数字信号处理,小波变换理论和应用,数据压缩,已发表论文数篇。

## 参考文献

- 1 Ingrid Daubechies. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Commun. Pure Appl. Math.*, 1988, 41: 909~996.
- 2 Marc Antonini, Barlaud M, Mathieu P, et. al. Image coding Using Wavelet Transform, *IEEE Tran. On image processing*, 1992, 1(2).
- 3 Ingrid Daubechies, The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal analysis. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1990, 36(5): 968~1004.
- 4 DeVore R A, Jawerth B, Bradley J L. Image Compression Through Wavelet Transform Coding, *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1992, 38(2): 719~746.
- 5 Ranchin T, Wald L. Applications of wavelet transform in remote sensing processing. *Remote sensing for Monitoring the Changing Environment of Europe*, Winkler, 1993, 261~265.

# A Remote Sensing Image Compression Method Based on Wavelet Transformation and Vector Quantization

Yan Jingwen

(Dept. of Communication Engineerings, Changchun Institute of Posts & Telecommunications, Changchun 130012)

Sun Hui, Zhang Shenghua

(Changchun Institute of Fine Mechanics & Optics, Changchun 130022)

**Abstract** A remote sensing image compression method based on wavelet transformation (WT) and vector quantization (VQ) is proposed in this paper. Two dimensional WT is applied to remove the spatial correlations in pixels, then the transformed wavelet coefficients are encoded by VQ compression coding. The experimental results show that a compression ratio of 10 : 1 can be obtained using this method, and Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) is 30.52. The method is superior to JPEG method, and non-block effects are seen. This method can be applied in various remote sensing image compression, and the double performances of CR and PSNR are apparently improved in comparison with JPEG.

**Keywords** Wavelet transformation, Data compression, Vector quantization