

文章编号: 1007-4619 (2001) 01-0029-05

基于整数小波变换的多光谱图像无损压缩

张 荣¹, 俞能海¹, 刘政凯¹, 吴文忠²

(1. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027; 2. 芜湖市消防支队, 安徽 芜湖 241000)

摘 要: 多光谱图像一般都采用预测方法去除空间冗余和谱内冗余实现无损压缩。通过用提升方法构造整数小波变换, 将变换方法用于去除空间冗余; 通过分类方法构造谱间预测器, 用预测方法去除谱间冗余, 两者相结合, 实现无损压缩。由于变换方法的去相关性能良好, 使该方法压缩效果大大改善。

关键词: 无损压缩; 整数小波变换; 分类

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

随着遥感技术的不断发展, 由各种传感器获取的图像数据急剧增长, 为了有效地传输海量遥感数据, 必须研究符合遥感应用的压缩技术。由于数据对地物的解译非常宝贵, 所以在很多应用中, 需要采用无损压缩技术^[1]。从信息论的角度来看, 所有的压缩技术都是通过去除冗余来达到压缩目的。多光谱图像是当前最主要的遥感数据之一, 它存在两类冗余; 空间冗余和谱间冗余。其空间冗余表现为, 在属于同一类地物的相邻像素之间存在空间相关性; 其谱间冗余表现为, 由于谱间分辨率的提高, 相邻波段同一位置的像素之间存在相关性。另一方面, 由于不同波段的成像对象是同一地域, 具有相同的物理结构, 因此, 其谱间冗余还表现在: 虽然同空间不同波段的像素相关较大, 但与其邻域的关系却是相似的。各波段空间相邻像素之间的关系是相似的, 我们称这种相似性为结构冗余。近年来, 出现了一些去除这两类冗余的无损压缩方法^[2-6]; J. F. Wang 等人提出的残差最小方差方案^[2]、Z. Arnavut 等人提出的排序方案^[3]、N. D. Memon 等人提出的预测树方案^[4], 我们也提出了多种基于预测的无损压缩方法^[5-8]。这些方法都是通过不同的预测器采用预测技术来实现去相关的。在数据压缩技术中, 与预测技术相比, 消除冗余的一种更有效方法是进行信号

线性变换, 使数据在变换域上最大限度地不相关。但是, 由于各种变换都是在实数域上的变换, 变换的系数为小数, 编码前变换系数通常都要进行取整和量化。因此, 压缩过程不可逆。这就是变换编码广泛用于有损压缩而不适用于无损压缩的原因。随着小波研究的深入, 人们找到了一种从整数到整数的小波变换方法, 使之可以用于无损压缩。

本文提出一种基于整数小波变换和分类预测的方法。首先, 对各波段图像进行整数小波变换, 去除空间冗余。由于小波变换可以保持原始数据在各波段空间结构, 因此, 各波段的小波系数保持了结构特征。我们对小波系统进行分类。对每一类分别构造谱间预测器, 进行预测消除谱间冗余, 最后对残存图像进行算术编码。实验表明该方法与其它无损压缩相比, 压缩比有明显提高。

2 用提升方法构造整数小波变换

1994年, W. Sweldens 等人^[9]提出一种不依赖于 Fourier 变换的新的双正交小波构造方法——提升方法(Lifting Scheme)。提升方法的内涵是: 开始用非常简单而一般的多分辨率分析, 然后逐渐向带有某一特定性质的多分辨率分析靠拢(提升)^[10]。有人称提升方法为第二代小波构造方法, 其原理见参考文献^[9-11]。

收稿日期: 1999-09-07; 修订日期: 2000-03-08

作者简介: 张荣(1968-), 女, 安徽泾县人, 1995年毕业于合肥工业大学计算机与信息科学系, 获信号与信息处理专业硕士学位。

1998年7月毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 获信号与信息处理专业博士学位。现留校任教, 从事遥感图像处理领域的研究。

I. Daubechies 和 W. Sweldens 等人提出用因式分解的方法将现有小波变换转化成提升方法中的几个步骤,并且证明由有限长度滤波器构成的小波变换都能用有限步长的提升实现^[11]。A. R. Calderbank, I. Daubechies 和 W. Sweldens 等人证明能在提升步骤通式上直接完成整数集到整数集的小波变换^[12],即一个整数集经小波变换后仍然是整数集。这对数据压缩带来很大的好处,无须量化过程,使变换方法可以用于无损压缩。对一数据集 S_j (原始信号) 经小波变换分解为低分辨率的 S_{j-1} 与高分辨率的 d_{j-1} , S 变换(Sequential, 贯序变换)是最简单的可逆整数小波变换。

正变换:

$$\begin{aligned} d_{j-1,l} &= S_{j,2l+1} - S_{j,2l} \\ S_{j-1,l} &= S_{j,2l} +? d_{j-1,l}/2_j \end{aligned} \quad (1)$$

逆变换:

$$\begin{aligned} S_{j,2l} &= S_{j-1,l} -? d_{j-1,l}/2_j \\ S_{j,2l+1} &= d_{j-1,l} + S_{j,2l} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, l 为子数据集中元素的序号, $? \cdot j$ 为取整函数。

用提升方法也能将其它小波算法转换成可逆整数小波变换^[12]。以下是几种常用的可逆整数小波变换:

$$\begin{aligned} d_{j-1,l} &= S_{j,2l+1} -? (S_{j,2l} + S_{j,2l+2})/2 + 1/2_j \\ S_{j-1,l} &= S_{j,2l} +? (d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/4 + 1/2_j \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d_{j-1} &= S_{j,2l+1} -? 9(S_{j,2l} + S_{j,2l+2})/16 \\ &\quad - (S_{j,2l-2} + S_{j,2l+4})/16 + 1/2_j \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_{j-1,l} &= S_{j,2l} +? (d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/4 + 1/2_j \\ d_{j-1} &= S_{j,2l+1} -? 9(S_{j,2l} + S_{j,2l+2})/16 \\ &\quad - (S_{j,2l-2} + S_{j,2l+4})/16 + 1/2_j \\ S_{j-1,l} &= S_{j,2l} +? 9(d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/32 \\ &\quad - (d_{j-1,l-1} + d_{j-1,l})/32 + 1/2_j \end{aligned} \quad (5)$$

3 基于可逆整数小波变换和分类的压缩方案

图像的无损压缩过程通常分为两步。第一步为去相关(De-correlation), 即去除图像冗余, 获取残差图像; 第二步为编码(Coding), 即对残差图像进行熵编码, 常用的熵编码算法有 Huffman 编码和算述编码。去相关在无损压缩中具有至关重要的作用。去相关越彻底, 残差图像越接近无记忆信源。去相关后的残差图像概率分布很好地吻合 Laplasian 分

布^[2]。根据 Shannon 编码定理, 无记忆信源的零阶熵是熵编码平均码长的下限, 因此, 只有研究有效的去相关算法, 降低残差图像的零阶熵, 才能减少平均码长, 提高压缩比。

多光谱图像存在两类冗余: 空间冗余和谱间冗余。本文首先采用可逆整数小波变换去去除各波段图像空间冗余, 得到一组小波系数图像, 可以表示为一个三维数组 ($M \times N \times B$)。其中 $M \times N$ 为图像的空间尺寸, B 表示图像的波段数。由于小波变换的多分辨率特性, 变换后的图像数据能够保持原始在各种分辨率下的精细结构。对于多光谱图像, 变换后的系数图像中存在谱间结构相关性, 即各波段平坦区域的系数都较小, 细节丰富区域系数较大。我们将相同空间位置不同波段上的小波系数构成波段矢量 $P = [P(i, j, 1), P(i, j, 2), \dots, P(i, j, B)]$, 则波段矢量反映了给定点频率特性, 大致可以分为 4 类: (1) P 中元素具有较大的正数, 是对应于变换图像中低频区域的平滑模板; (2) P 中的元素为较小的正数, 对应于变换图像中的高频分量中正系数; (3) P 中元素为较小的负数, 对应于变换图像中高频分量的负系数; (4) P 中元素几乎为零, 对应于变换图像中高频量的平坦区域。

因此, 我们将小波系数图像构成波段矢量进行分类。用每一类的中心波段矢量构造谱间预测器。将预测误差进行熵编码, 具体算法如下:

(1) 分别对每一波段图像进行可逆整数小波变换;

(2) 对变换后的小波系数, 空间上每一点沿谱维方向造成一个波段矢量;

(3) 用 K-Means 算法, 将所有的波段矢量分成 4 类;

(4) 计算每一类的中心波段向量 $P_{\text{center}}(k)$

$$P_{\text{center}}(k) = \frac{\sum_{P \in S(k)} P}{N(k)}; \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

其中 P 为波段矢量, $S(k)$ 为属于 k 类的波段向量集合, $N(k)$ 为属于 k 类的波段向量个数。

(5) 用所得的 4 个中心波段向量构造谱间预测器, 用数组表示为

$\text{spectrpd}(k, b)$, $k = 1, 2, 3, 4$; $b = 1, 2, \dots, B$
其中 $[\text{spectrpd}(k, 1), \text{spectrpd}(k, 2), \dots, \text{spectrpd}(k, B)] = P_{\text{center}}(k)$

(6) 预测: 对于任一点 $P(i, j, b)$, 根据其所类别, 其预测值为

$$P(i, j, b) = \text{spectrpd}(x, b)$$

(7) 获取残差图像：

$$e(i, j, b) = P(i, j, b) - P(i, j, b)$$

对残差图像进行熵编码。

4 实验结果

实验数据 1 取自里斯本泰吉沙流域的 TM 图像, 尺寸为 256×256 , 共 6 个波段, 像素灰度等级为

256(8 bits)。图 1(a)为其中的第 5 波段图像, 实验数据 2 取自华盛顿特区的 TM 图像, 尺寸为 512×512 , 共 7 个波段, 灰度等级为 256(8bits)。图 1(b)为其中的第 5 波段图像。实验数据 3 是日本平塚市区的 TM 遥感图像, 共 6 个波段, 图 1(c)为其中第 1 波段的图像。

我们用上述第 3 节中算法进行无损压缩, 其中小波变换阶次为 3, 实验结果如表 1。

经过 K-Means 算法迭代, 最后 4 个中心波段矢



图 1 实验数据

Fig. 1 Experimental data

表 1 实验结果

Table 1 Results of experiments

图像	平均码长(bits/pixel)							平均
	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 6	波段 7	
里斯本	1.97	1.72	2.15	2.10	2.43	2.07		2.07
华盛顿	1.94	1.49	1.80	2.23	2.42	0.58	1.94	1.77
平塚市	3.45	3.61	3.63	3.56	3.45	3.33		3.51

量与我们在第 3 节中的分析一致。其中里斯本 TM 图像的 4 个中心波段矢量为：

$$P_{\text{central}}[0] = [85 \ 44 \ 65 \ 87 \ 118 \ 55];$$

$$P_{\text{central}}[1] = [14 \ 9 \ 17 \ 12 \ 27 \ 15];$$

$$P_{\text{central}}[2] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$P_{\text{central}}[3] = [-9 \ -6 \ -14 \ -10 \ -24 \ -3].$$

华盛顿 TM 图像的 4 个中心波段矢量为：

$$P_{\text{central}}[0] = [8 \ 11 \ 24 \ 31 \ 7 \ 15];$$

$$P_{\text{central}}[1] = [2 \ 3 \ 5 \ 8 \ 0 \ 4];$$

$$P_{\text{central}}[2] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$P_{\text{central}}[3] = [-1 \ -1 \ -4 \ -8 \ 0 \ -3].$$

平塚市 TM 图像的 4 个中心波段矢量为：

$$P_{\text{central}}[0] = [120 \ 133 \ 134 \ 156 \ 172 \ 144];$$

$$P_{\text{central}}[1] = [8 \ 10 \ 10 \ 7 \ 8 \ 7];$$

$$P_{\text{central}}[2] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$P_{\text{central}}[3] = [-7 \ -8 \ -8 \ -3 \ -6 \ -6].$$

此外, 由于在进行谱间预测时, 需根据分类结果选择预测器, 因此, 分类图需作为附加信息加以保存, 里斯本、华盛顿和平塚市 TM 图像的分类图附加信息分别为 $(0.98/6)\text{bits/pixel}$, $(1.53/6)\text{bits/pixel}$ 和 $(1.89/6)\text{bits/pixel}$ 。

由于在本文的算法中成功地用变换方法去除空

间冗余,使去相关性能大大改善,所以与其它方法相比,该方法在压缩效果有明显提高,其中表 2 是华盛

顿 TM 图与其它文献中结果的比较。

表 2 与其他方法比较

Table 2 Comparison of other techniques

	平均码长							
	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5	波段 6	波段 7	平均
本文方法	1.94	1.49	1.80	2.23	2.42	0.58	1.94	1.77
文献[2]方法	3.33	2.89	3.00	4.20	4.53	0.97	3.05	3.16
文献[3]方法	3.75	2.89	3.21	5.32	5.35	3.28	4.67	4.76

5 结 论

本文对多光谱图像的无损压缩进行了研究,提出一种基于可逆整数小波变换和分类的无损压缩方法。该方法用可逆整数小波变换去除图像空间冗余,取代传统的预测方法去除空间冗余,大大提高了去相关性能,在去除谱间冗余方面,该方法根据多光谱图像小波变换后特点,通过构造谱间预测器进行谱间预测,实现谱间去相关。这两者相结合,可以使无损压缩效率大大提高,实验结果及与其它方法的结果比较表明了该方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] K. Sayood. Data compression in remote sensing applications [J]. *IEEE Geosci. Remote Sensing Newsletter*, 1992, **84**: 7-15.
- [2] J. F. Wang, K. Zhang, S. Tang. Spectral and spatial decorrelation of Landsat-TM data for lossless compression [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(5): 1277-1285.
- [3] Z. Arnavut, S. Narumalani. Application of permutations to lossless compression of multispectral thematic mapper limages [J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(12): 3442-3448.
- [4] N. D. Memon, K. Sayood, S. S. Nagliras. Lossless Compression of Multispectral Image Data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, **32**(2): 282-289.
- [5] Zhang Rong, Liu Zhengkai, Li Houqiang. Classification-based lossless compression of multispectral image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1998, **3**(2): 106-110. [张荣, 刘政凯, 李厚强. 基于分类的多波段遥感图像无损压缩方法[J]. 中国图象图形学报, 1998, **3**(2): 106-110.]
- [6] Zhang Rong, Liu Zhengkai. A near-lossless compression technique of multispectral image data [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1998, **3**(10): 823-826. [张荣, 刘政凯. 一种多光谱遥感图像的无损压缩方法[J]. 中国图象图形学报, 1998, **3**(10): 823-826.]
- [7] Zhang Rong, Yan Qing, Liu Zhengkai. A prediction tree-based lossless compression technique of multispectral image data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1988, **2**(3): 171-175. [张荣, 阎青, 刘政凯. 一种基于预测树的多光谱遥感图像无损压缩方法[J]. 遥感学报, 1988, **2**(3): 171-175.]
- [8] Guo Quji, Zhang Rong, Yu Nenghai. Multischeme-based prediction for lossless compression of multispectral image [J]. *Journal of Image and Graphics*. 1999, **4**(3): 131-135. [郭去疾, 张荣, 俞能海. 基于多方式预测的多光谱遥感图像无损压缩方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, **4**(3): 131-135.]
- [9] Yang Feng. Method with Application to Computer Graphics and Image Processing [D]. Dissertation of South China University of Technology, 1998. [杨丰. 在图形图像处理中子波理论方法的研究[D]. 华南理工大学博士学位论文, 1998.]
- [10] W. Swelends. The Lifting Scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelets [J]. *Journal of Appl. And Comput. Harmonic Analysis*, 1996, **3**(2): 186-220.
- [11] I. Daubechies, W. Swilends. Factoring wavelet transforms into lifting steps. Preprints, 1996.
- [12] R. Calderbanl, I. Daubechies, W. Swilends, B. L. Yeo. Wavelet transforms that map integers to integers. Technical report, Department of Mathematics, Princeton University, 1996.

Integer Wavelet Transform-based Lossless Compression for Multispectral Images

ZHANG Rong¹, YU Neng-hai¹, LIU Zheng-kai¹, WU Wen-zhong²

(1. Dept. of Elec. Eng. & Info. Sci., Univ. of Sci. & Tech. of China, Hefei 230027, China

2. Contingents of fire brigade, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: With the rapid development of remote sensing techniques, the quantity of remotely sensed data generated by remote sensors increases fast. A large amount of remotely sensed data provide valuable information for researches on earth resources, but it is hard to be stored and transmitted. Therefore, there is a critical need of data compression for remote sensing applications. In the case of MSI data, there are two types of redundancy: spatial redundancy and spectral redundancy. Usually, the prediction technique is used in spatial and spectral decorrelation in lossless compression. In this paper we construct integer wavelet transform by using lift scheme, which is used for spatial decorrelation, and construct a spectral predictor by using classification that is used for spectral decorrelation. This combined technique could improve the compression ratio.

Key words: lossless compression; integer wavelet transform; classification