

## 基于分类和 3D-SPIHT 算法相结合的多光谱图像压缩

罗建书 卓红艳 孙蕾

(国防科技大学理学院数学与系统科学系 长沙 410073)

**摘要** 文中提出了一种基于分类预测的三维 SPIHT 算法,并对多光谱 1~7 波段图像进行了压缩实验。首先对图像数据作三维变换,空域采用浮点 97 小波去除相关性,谱域分类预测去除冗余;再根据分类预测算法获得系数的残差图像,并对残差图像进行三维 SPIHT 编码;而对分类预测时得到的码书和索引表进行哈夫曼无损压缩;将这 3 个编码文件传送到解码端用于图像重构。实验证明该算法具有很好的重构效果。

**关键词** 遥感图像,变换编码, SPIHT, 分类预测

中图分类号: TP751.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1607-04

## Multispectral Image Compression Based on Classification and 3D-SPIHT Algorithm

Luo Jian-shu Zhuo Hong-yan Sun Lei

(Academy of Sciences, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** The paper presents an algorithm based on classification and 3D-SPIHT for 1-7 bands multispectral images compression. First, the 3D transform for the image data is used with CDF97 wavelet to move spacial correlation and classification prediction to move spectral correlation. Second, according to remain image coefficients from classification prediction, the method realizes compression coding by 3D-SPIHT and adopts Huffman coding files to do the lossless coding of codebook and index table. Meanwhile it transmits all coding files to the decoding so as to reconstruct image. The results of numerous experiments indicate the quality of reconstructive image.

**Key words** Remote sensing image, Transform coding, SPIHT, Classification prediction

### 1 引言

多光谱遥感图像的压缩技术是遥感数据传输和存储中一个迫切需要解决的问题。由于遥感数据信息非常宝贵,所以压缩时更注重无损压缩和近无损压缩,即使是有损压缩,也要求达到高保真的效果。与其他图像压缩技术一样,多光谱遥感图像的压缩也是通过去除数据间冗余获得的。多光谱遥感图像中各像素之间存在两种冗余:谱内的空间冗余和谱间冗余。与自然图像相比,遥感图像含有丰富的纹理信息,空间相关性较差,因此只靠谱内压缩很难获得很高的压缩比。但对多光谱图像来说,由于各波段图像的成像对象是同一地物,虽然各图像在灰度值上会有很大差异,但其结构是非常相似的,如果利用这种谱间冗余对多光谱图像进行压缩,就可能获得较大的压缩比。在多光谱图像压缩中,通常采用预测、变换或矢量量化的方法去除以上两种冗余。

在多光谱图像的有损压缩中,常用的是矢量量化和变换编码方法。由于遥感图像中,同一类地物的光谱反射特性大致相同。目前用于多光谱图像的变换编码方法主要有:(1)三维 DCT 变换;(2)一维 K-L 变换加二维 DCT 变换;(3)一维 DPCM 加二维 DCT 变换;(4)一维小波变换加二维小波变换;(5)三维小波变换。这些方法中矢量量化的压缩效率非常的高,但是随着码书的增长,运算时间呈几何指数增长。由

于 DCT 变换具有快速算法,它的时效性较好,但是在有损压缩中,容易出现瓦块效应,影响了视觉效果。小波变换的出现成功地应用在渐进式传输中,但是速度较 DCT 而言要慢一些。

本文提出基于聚类方法的三维 SPIHT 算法对多光谱遥感图像进行压缩。算法的主要思想是对多光谱图像变换后的系数采用 K-平均值法进行分类预测,对预测后获得的残差系数进行 3D-SPIHT 编码,对预测时得到的码书和索引表进行无损压缩用于图像重构时进行反预测,使得重构的灰度值更加接近于原图像。实验证明,该方法随着输入的分类个数的提高,所得到的图像压缩效果也随着提高。

### 2 基于分类预测的三维 SPIHT 压缩方法

#### 2.1 分类预测

分类预测指的就是聚类法。根据物体的某些属性把物体按类分组。在图像分割中,希望用那些从看来相似的区域中提取出的特征矢量来形成特征空间中的组,称为聚类。如我们考虑把图像分成  $K$  组,那么分割标记段  $z(x_1, x_2)$ , 可以是每个像素上  $K$  个值中的一个。对于标量特征来说,如像素密度,聚类可以被认为是确定  $K-1$  个阈值的方法,这  $K-1$  个阈值定义了一维特征空间的判决边界。对于  $M$  维特征矢量来说,分割对应于把  $M$  维特征空间分解  $K$  个区域。聚类的标准过程是把每次采样赋给最接近聚类平均值的那组。在非控制模式下,由于聚类的平均值最初也未知,所以这个过程可

以用一个迭代过程来完成,即所谓的  $K$ -平均值法。

假设以像素灰度值为基础,把一幅图像分割成  $K$  个区域。设  $x = (x_1, x_2)$  表示一像素的坐标,  $S(x)$  表示它的灰度级。 $K$ -平均值法的目的是使性能指标达到最小。性能指标为

$$J = \sum_{l=1}^K \sum_{x \in A_l^{(i)}} \|S(x) - \mu_l^{(i+1)}\|^2$$

其中  $A_l^{(i)}$  表示第  $i$  次迭代后赋给聚类  $l$  的一组采样,表示第  $\mu_l$  个聚类的平均值。该指标是度量每次采样与它们各自的聚类平均值间的距离之和。 $K$ -平均值法,通常收敛于性能指标  $J$  的局部最小值。

$K$ -平均值法的计算过程:

(1)任意选出  $K$  个聚类的初始平均值,  $\mu_1^{(1)}, \mu_2^{(1)}, \mu_3^{(1)}, \dots, \mu_K^{(1)}$ ;

(2)在第  $i$  次迭代中,根据下列关系,把每个像素  $x$  赋给  $K$  个聚类中的一个

$$x \in A_j^{(i)}, \quad \|S(x) - \mu_j^{(i)}\| < \|S(x) - \mu_l^{(i)}\|$$

对所有的  $l, l=1, 2, \dots, K, l \neq K$ 。其中  $A_l^{(i)}$  表示一组采样,这些采样的聚类中心是  $\mu_l^{(i)}$ 。亦即,把每次采样赋给最接近聚类平均值的那组。

(3)修改聚类平均值  $\mu_l^{(i+1)}, l=1, 2, \dots, K$ ,把它改成所有采样的采样平均值

$$\mu_l^{(i+1)} = \frac{1}{N_l} \sum_{x \in A_l^{(i)}} S(x), \quad l=1, 2, \dots, K$$

其中  $N_l$  是  $A_l^{(i)}$  中的采样数。

(4)如果对于所有的  $l, l=1, 2, \dots, K, \mu_l^{(i+1)} = \mu_l^{(i)}$ 。则算法收敛,并终止过程,否则转到(2)继续。

多光谱遥感图像谱间相关性要强于空间相关性,谱间相关部分是由于传感器的频谱交叠,部分是由于地物的反射频谱覆盖了较大的频谱范围,因此从地物反射特性考虑去除谱间相关性,在此基础上构造预测器,以进一步去除谱间相关性。本文首先得到变换后的三维小波系数,虽然小波变换去除了图像空间的相关性,但在图像各波段之间仍然存在谱间的结构相关性,考虑这种结构相关性,我们把上述介绍的聚类思想引入到编码中。

### 2.2 三维 SPIHT

2000 年, Dragotti, Poggi 和 Ragozini 为多光谱遥感图像的压缩提出了三维 SPIHT 算法,它基于图像的空间上二维小波变换和频域上的 KLT,再对变换系数进行编码。该算法与二维 SPIHT 的唯一不同点在于空间定位树的定义。定义三维空间定位树如图 1。

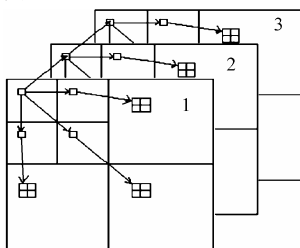


图 1 三维 SPIHT 算法中的树型结构  
Fig.1 Tree structure in 3D-SPIHT algorithm

下面引入几个表征多级树结构的符号。

$C(i, j)$  表示节点  $(i, j)$  的小波变换系数;  $D(i, j)$  表示节点  $(i, j)$  的所有后代节点;  $O(i, j)$  表示节点  $(i, j)$  的所有儿子节点;  $L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$  表示节点  $(i, j)$  的所有儿子节点的后代节点,即  $L(i, j) = \bigcup_{(k,l) \in O(i,j)} D(k,l)$ ;  $R$  表示小波分解后的

所有顶层节点:

$$S_n(T) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j) \in T} |C(i,j)| \geq 2^n \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$S_n(i, j) = \begin{cases} 1, & |C(i, j)| \geq 2^n \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

在划分集合时, SPIHT 算法选取的是  $A$  型集合  $D(i, j)$  和  $B$  型集合  $L(i, j)$ 。为了充分利用已编码过的信息, SPIHT 算法使用了 3 个链表: LSP(重要像素链表)、LIP(非重要像素链表)、LIS(非重要集合链表)来存储编码过的节点和集合。

SPIHT 算法如下:

(1) 输出  $n = \lceil \log_2(\max\{|C(i, j)|\}) \rceil$ , 将 LSP 置空, 把  $R$  中的所有节点  $(i, j)$  放入 LIP, 并且将其后代集合放入 LIS, 并标记为  $A$  型集合。

(2) 对所有 LSP 中的节点  $(i, j)$ , 输出  $|C(i, j)|$  的第  $n$  位比特值。

(3) 对所有 LIP 中的节点  $(i, j)$ : 输出  $S_n(i, j)$ , 若  $S_n(i, j) = 1$ , 则输出  $C(i, j)$  的符号, 并将其移到 LSP 中。对所有 LIS 中的集合  $(i, j)$ ;

如果是  $A$  型集合, 即  $D(i, j)$ , 则输出  $S_n(D(i, j))$ ; 若  $S_n(D(i, j)) = 1$ ;

对所有  $O(i, j)$  中的节点  $(k, l)$ , 输出  $S_n(k, l)$ 。如果  $S_n(k, l) = 1$ , 则输出  $C(k, l)$  的符号, 并将其移到 LSP 中; 否则, 将其置入 LIP;

删除这个集合。如果其对应的  $L(i, j)$ , 输出  $S_n(L(i, j))$ ; 若  $S_n(L(i, j)) = 1$ , 则删除这个集合, 将所有的  $D(k, l), (k, l) \in O(i, j)$  置入 LIS, 并标记为  $A$  型集合。

(4) 如果  $n = 0$ , 则终止; 否则  $n = n - 1$ , 并转到(2)继续执行。

变换后,为了运用 SPIHT 算法,我们定义三维树型分层结构。在第一波段 DCT 频带的顶层中的每一个系数都是树的根节点,且有 4 个子节点;其中 3 个分别位于水平、竖直、对角线方向的较低分辨率的子带中,第 4 个则位于第二波段 DCT 频带中。同一个频带中的子节点产生一般的空间定位树,而谱域的子节点则是另一棵三维树的根节点。注意,只有顶层节点才有谱域的子节点,否则将会出现大量具有多父亲的节点,这会破坏算法的正常工作。

### 3 编解码算法

我们算法的主要思想是对多光谱图像变换后的系数采

用  $K$ -平均值法进行分类预测,对预测后获得的残差系数进行3D-SPIHT 编码,对预测时得到的码书和索引表进行无损压缩用于图像重构时进行反预测,使得重构的灰度值更加接近于原图像。

### 3.1 编码算法

在进行分类预测前输入两个参数: 矢量维数和分类个数。根据这两个参数对小波系数进行分类预测。预测后得到的残差系数根据输入的目标比特率进行三维 SPIHT 编码,在解码端根据 3 个接收到的编码文件重新计算图像的压缩比(CR)和比特率。

具体算法如下:

(1) 采用浮点CDF97小波分别对各波段图像进行二维小波变换,分解5层。

(2) 对相同空间位置的小波系数构成小波矢量,采用  $K$ -MEAN 算法对小波系数进行分类预测,进一步去除相关性。

(3) 计算每一类的中心矢量  $\mathbf{P}_{\text{center}}(k)$

$$\mathbf{P}_{\text{center}}(k) = \frac{\sum_{\mathbf{P} \in S(k)} \mathbf{P}}{N(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, \text{Numcluster}$$

其中  $S(k)$  为第  $k$  类的所有矢量集合,  $\mathbf{P}$  为  $S(k)$  内的矢量,  $N(k)$  为  $S(k)$  内矢量的个数,  $\text{Numcluster}$  为分类的个数。

(4) 预测: 对于任一矢量  $\mathbf{P}$ , 根据其所属的类别, 预测值  $\hat{\mathbf{P}}$  为该类的中心矢量  $\mathbf{P}_{\text{center}}(k)$ 。

(5) 获取系数预测后的残差系数图像:  $\mathbf{e}(i, j) = \mathbf{P}(i, j) - \hat{\mathbf{P}}(i, j)$ 。

(6) 对残差系数图像  $\mathbf{e}(i, j)$  进行3D SPIHT 编码。

(7) 预测时得到的码书和索引表进行哈夫曼无损压缩传送到解码端。

上述方法简记为 WT+k-mean+SPIHT.

### 3.2 解码算法

解码的过程是与编码算法相对应的逆过程。具体算法描述如下:

(1) 先对预测时得到的码书和索引表进行哈夫曼无损压缩的解码;

(2) 对残差系数图像  $\mathbf{e}(i, j)$  进行3D SPIHT 解码;

(3) 根据解码得到的码书和索引恢复出预测值  $\hat{\mathbf{P}}$ 。

(4) 获取系数预测后的残差系数图像和预测值后可以恢复出原始图像的二维小波变换系数:  $\mathbf{P}(i, j) = \mathbf{e}(i, j) + \hat{\mathbf{P}}(i, j)$ ;

(5) 对图像的二维小波变换系数  $\mathbf{P}(i, j)$  进行逆变换, 得到重构图像。

从编码和解码的算法可以看出编码由于要对小波矢量进行聚类 and 预测, 因而编码算法的复杂度比解码大, 花的时间也相应多一些。

## 4 实验结果

采用上述方法对 Lena 图像和多光谱图像进行压缩, 小波基为浮点 97 小波, 分解 5 层。在编码前给定用于 SPIHT 编码的目标比特率, 在不同目标比特率下得到解码后的峰值信噪比(PSNR)、根据解码端接收到的 3 个压缩文件: SPIHT 文件和两个哈夫曼编码文件重新计算压缩比(CR)和精确码率(Rate)。对于类数的选择, 本文对不同类数的输入作了测试, 结果见表 1, 由表中可见, 类数越大, PSNR 越高, 图像的重构质量越好, 但是压缩比随着类数的增大而降低。由表 1 我们选取类数为 8, 对图像进行测试, 对各种性能参数进行对比。其中峰值信噪比的单位为(分贝), 压缩、解压缩时间和编码、解码时间的单位为(秒)。

表 1 Lena 图像在不同输入类数下, CR, PSNR, Rate 的比较  
Tab.1 CR, PSNR, Rate of image Lena using different classes

	class=4	class=8	class=16
CR	15.8817	15.2135	4.0777
Rate	0.5037	0.5258	1.9611
PSNR	36.4268	36.7956	41.1547

对 TM1-7 波段图像同时进行压缩, 分解 5 级。在输入类数=8 的条件下进行分类预测和 SPIHT 编码。与前面介绍的单波段图像分类预测方法一样, 输入的比特率是用于预测后对残差系数进行 SPIHT 编码的, 在解码端将收到 3 个压缩文件, 包括预测时对码书和索引表进行哈夫曼编码的压缩文件, 最后求出压缩比和新的码率。这里, 类数的选取不再测试了, 与单波段测试一样, 选取类数=8。对峰值信噪比、压缩比、压缩、解压缩时间, 编码、解码时间作比较。1-7 波段中的 1,6 波段重构图见图 2。

由表 2 和表 3 可以看到在不同压缩比下 WT+k-mean+SPIHT 方法得到的峰值信噪比都要高于 WT+SPIHT 方法, 从时间上来比较, 可以看到 WT+k-mean+SPIHT 方法得到的压缩、解压缩时间要长一些, 速度要慢一些, 但其编码、解码时间和 WT+SPIHT 方法得到的相差不大, 且在码率为 0.1058, 0.0658 时速度还要快一些。由实验数据可以看到采用分类的方法要好于表 3 中直接应用三维 SPIHT 方法。

## 5 结束语

本文研究了在小波变换领域里分类预测和 3D-SPIHT 相结合的方法, 把图像分割中的聚类思想引入到多光谱遥感图像的压缩中, 使多光谱遥感图像的压缩在不同的压缩比下获得了很好的效果。实验证明: 无论在压缩效果还是实时性上, 都达到了遥感图像应用的目的。在以后的研究工作中, 我们将对算法的性能进行理论的分析, 希望得到更好的结果。

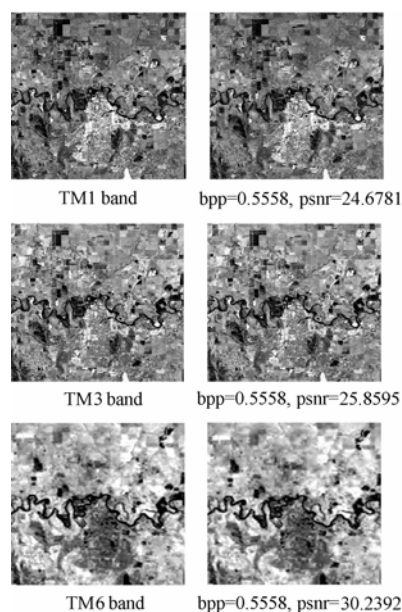


图 2 原始图像(左)和重构图像(右)

Fig.2 Initial images (left) and reconstructed images (right)

表 2 TM1-7 波段图像在 WT+Kmean+SPIHT 下压缩性能比较

Tab.2 TM1-7 bands images compression based on WT+Kmean+SPIHT

Rate	0.5	0.25	0.05	0.01
Band 1 PSNR	24.6781	23.4585	21.3349	19.8877
Band 2 PSNR	25.3669	24.1231	21.9359	20.2315
Band 3 PSNR	25.8595	24.5645	22.4445	20.6916
Band 4 PSNR	25.2848	23.4161	19.4548	16.9407
Band 5 PSNR	25.1720	23.5831	20.8973	19.5613
Band 6 PSNR	30.2392	27.7014	21.6546	18.6455
Band 7 PSNR	25.4305	23.9865	21.5375	20.2311
Average PSNR	25.7285	24.2181	21.2265	19.2758
CR	14.3936	26.1598	75.6077	121.5630
Rate	0.5558	0.3058	0.1058	0.0658
Comp.time(s)	23.5790	36.0470	21.7820	24.0310
Decomp.time(s)	5.1100	4.2660	3.4530	3.5000
Code time(s)	2.2970	1.3590	0.4540	0.2810
Decode time (s)	1.4380	0.6880	0.0930	0.0160

表 3 TM1-7 波段图像在 WT+SPIHT 下压缩性能比较

Tab.3 TM1-7 bands images compression based on WT+SPIHT

Rate	0.5558	0.3058	0.1058	0.0658
Band 1 PSNR	23.8405	21.7472	19.1425	18.1213
Band 2 PSNR	24.0089	21.8580	19.0553	17.8695
Band 3 PSNR	24.2489	22.1143	19.1838	17.9292
Band 4 PSNR	25.3691	23.3500	20.5330	19.3815
Band 5 PSNR	24.6665	22.6006	19.4844	18.2705
Band 6 PSNR	30.4284	28.2170	24.0844	22.2721
Band 7 PSNR	24.3990	22.5370	19.0398	18.3613
Average PSNR	24.8870	22.8216	19.8080	18.6835
Comp. time(s)	4.3430	3.5940	3.1090	2.9530
Decomp.time(s)	3.0310	2.5630	2.1560	1.9380
Code time(s)	1.6400	1.1250	0.6410	0.4840
Decode time(s)	1.0005	0.5790	0.1870	0.0780

## 参考文献

- [1] Dragotti P L, Poggi, G, Ragozini A R P. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 416-428.
- [2] Said A, Pearlman W. A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol.*, 1996, 6(3): 243-250.
- [3] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445-3462.
- [4] 张荣, 俞能海等. 基于整数小波变换的多光谱图像无损压缩. *遥感学报*, 2001, 5(3): 29-33.

罗建书: 男, 1956 年生, 教授, 研究方向为数据压缩、电磁拓扑理论及其应用.

卓红艳: 女, 1977 年生, 硕士生, 研究方向为数据压缩.

孙 蕾: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为数据压缩.