

文章编号 1004-924X(2004)02-0179-06

# CCD 遥感图像的小波分解特性及编码压缩

赵洁红<sup>1</sup>, 孙文军<sup>2</sup>, 孟 忠<sup>2</sup>, 郝志航<sup>2</sup>

(1. 长春工程学院 信息工程系, 吉林 长春 130021;  
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**研究了遥感图像的小波变换系数统计特性及小波系数的相关性。通过试验得出小波变换系数分布的一般规律和遥感图像基本特征,即数据的局部相关性弱、纹理丰富复杂和低冗余度,不利于高保真压缩,而遥感图像的小波变换系数却具有很强的局部相关性。提出了插分预测编码(DPCM)与集合树多级分裂(SPIHT)算法相结合的遥感图像小波编码算法,用该算法对 CCD 采集的遥感图像进行了 3 级小波分解和重构,并与 EZW 算法、SPIHT 算法进行了比较。结果表明,算法所得的遥感图像没有方块效应,图像恢复质量较高,在相同压缩比和比特率低的情况下,明显优于其他两种算法。

**关键词:**遥感图像;小波变换;子带相关;插分预测编码;集合树多级分裂法

中图分类号:TP751 文献标识码:A

## Wavelet transform characteristics and compression coding of remote sensing images

ZHAO Jie-hong<sup>1</sup>, SUN Wen-jun<sup>2</sup>, MENG Zhong, HAO Zhi-hang

(1. Department of Information Engineering,  
Changchun Institute of Technology, Changchun 130021, China;  
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The statistical characteristics of remote sensing image are studied by using wavelet transform and presented definition of similarity for wavelet coefficient. The general distribution rule of wavelet transform coefficient and basic characteristics of remote sensing images, such as lesser similarity, complicated and abundant texture, lesser redundancy degree, are indicated by experiments, which are not beneficial to compression in high fidelity. The wavelet transform coefficient of remote sensing image has stronger local similarity, hereby a version of combining of DPCM with SPIHT is presented. The experimental results show that the new compression scheme performs better than SPIHT arithmetic in terms of image reconstruction quality and encoding/decoding speed.

**Key words:** remote sensing image; wavelet transform; sub-band similarity; DPCM; SPIHT

## 1 引言

遥感图像分为航空遥感图像和航天遥感图

像,其所含信息量大,图像数据十分珍贵,而且具有长期或永久保存价值。大容量、细节丰富、纹理多的遥感图像对存取和传输速率提出了极高的要求,因而有效的遥感图像数据压缩方法显得特别

和重要。目前已研究出迫切一些压缩方法,但是都存在不同程度的局限性,如 DPCM (Differential Pulse Code Modulation) 压缩率不高;矢量量化 (VQ) 的计算复杂度随着维数的上升而急剧增加;而 JPEG (Joint Photographic Experts Group) 是迄今广为使用的国际压缩标准,仍然被作为人们研究各种压缩算法相比较的参照物,但在量化误差较大时会产生方块效应,已经远远不能满足大容量遥感图像的需求。而以小波变换为基础的 JPEG2000 是最新发展起来的静态图像压缩标准,该方法力求提高图像的压缩比及图像的恢复质量,但结构和算法较复杂,而且系统的压缩时间也相对较长,应用还有待于进一步研究。

所以要研究一种适合于遥感图像压缩的算法,就必须从遥感图像本身的特点和统计特性出发。本文在分析遥感图像的统计特征及其小波分解系数分布特点和相关关系基础上,提出了基于 DPCM 和 SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees) 相结合的压缩方法。实验结果表明,该方法具有压缩率较高,图像恢复质量好,速度快等优点,十分适合遥感数据的高保真压缩。下面先研究遥感图像的小波分解的统计特性和小波域系数的分布特性,然后介绍本文的遥感图像量化压缩方法。

## 2 遥感图像

### 2.1 遥感图像的熵

信息论中熵定义为每个信源的信息数统计的平均值,熵就是平均信息量。设一个数字图像的像素有  $M$  个灰度等级  $X_i$ , 设  $X_i$  的出现概率为  $P(X_i)$ , 则这个像素可提供的平均信息量(熵)  $H(X)$  为:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^M P(X_i) \log_2 P(X_i)$$

$I[X_i] = - \log_2 P(X_i)$  为  $X_i$  的自信息量。

实验所采用的图像是 CCD 相机所拍摄下来的太原机场遥感图像,其图像的熵值为 3.921 2;而标准的人物图像的熵值为 4.5 左右。通常情况下,图像所含的信息量不同,图像的熵值就不同。

可见,遥感图像的熵值要小于一般的自然图像和人物图像的熵值,所以有利于压缩。

### 2.2 遥感图像的小波分解特性

#### 2.2.1 遥感图像的组成及分布

大多数自然图像由大部分的同性均匀区域、纹理区域以及相当小的一部分边缘和视觉上可以感知的边界组成。同性均匀区域过渡变化平滑,由低频分量构成;纹理区域过渡变化比较适度,由一定的低频含量和高频含量分量组成;边缘是过渡变化比较剧烈的地方,由高频含量构成。

与静止图像相比,遥感图像数据的局部相关性较弱、纹理复杂丰富且具有高熵值和低冗余度的特点。与人物图像比较,遥感图像熵值较小有利于压缩,但相关性较弱不利于压缩,而人物图像则相反;遥感图像能量分布较集中,人物图像能量分布较广;遥感图像纹理多、细节丰富,高频能量较大;而遥感图像的小波变换系数却具有很强的局部相关性。

#### 2.2.2 遥感图像小波变换的统计特性

- (1) 空间-频率局部化;
- (2) 能量集中,大多集中在低分辨率子图像上;
- (3) 分解频带之间的相似性;
- (4) 小波系数幅度从粗尺度到细尺度逐渐衰减;
- (5) 小波变换将大多数能量集中在低频通带内,高频通带主要由边缘信息组成。另外,高频分量中的边缘信息具有聚簇性。

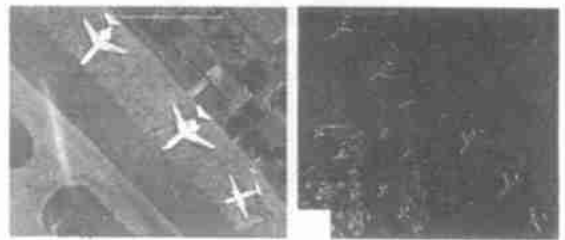


图 1 太原机场 (256 × 256 × 8 bits)  
Fig. 1 Taiyuan aerodrome (256 × 256 × 8 bits)

如图 1 所示的遥感图像,采用 Antonini9-7 双正交小波分解,其 3 层小波分解系数统计如表 1。经实验分析,其所有细节子图近似遵循零均值 Gamma 分布:

$$Gamma_{\mu, \sigma}(x) = \frac{1}{\sigma \Gamma(3)} \exp(-\sqrt{3} / |x - \mu| / 2) / \sqrt{8} \quad \mu = 0, \quad (1)$$

对这些块进行统计分析还表明:除极少数纹理较强的局部区域之外,绝大部分纹理不太强的区域近似服从广义 Gaussian 分布,特别是平坦区域,均值大多约等于 0。其中近 97% 的非纹理区呈近似的 Gaussian 分布,全部平坦区的均值在 ±0.2 之间。

表 1 图 1 高频子带的小系数统计

Tab. 1 Statistic data of wavelet high frequency of Fig. 1

	LH <sub>3</sub>	HL <sub>3</sub>	HH <sub>3</sub>	LH <sub>2</sub>	HL <sub>2</sub>	HH <sub>2</sub>	LH <sub>1</sub>	HL <sub>1</sub>	HH <sub>1</sub>
最大值	61.35	53.99	36.56	62.13	47.11	18.38	40.67	103.14	9.66
最小值	-38.42	-40.76	-23.06	-52.44	-35.84	-20.89	-56.22	-31.28	-27.24
平均值	0.04	0.06	0.05	-0.03	0.2	0.01	-0.06	0.35	-0.14
Var	4.32	3.94	2.6	2.84	3.63	6.08	2.01	6.08	0.88

如表 2 所示,随着分解尺度的增加,小波系数子带所含的能量也逐渐在增加,而且最低频子带所含的能量接近于图像总能量的 90%,即最低频子带几乎包含了整个图像的能量。

表 2 图 1 小波系数的能量统计

Tab. 2 Statistic data of wavelet energy in Fig. 1

子带类型	能量分布 (%)	总和 (%)
LH <sub>1</sub>	0.660	
HL <sub>1</sub>	0.197	0.945
HH <sub>1</sub>	0.088	
LH <sub>3</sub>	4.183	
HL <sub>3</sub>	1.811	96.568
HH <sub>3</sub>	0.700	
LL <sub>3</sub>	89.874	
LH <sub>2</sub>	1.538	
HL <sub>2</sub>	0.547	2.487
HH <sub>2</sub>	0.402	

### 2.3 小波子带图像的相关性定义

#### 2.3.1 相同方向不同尺度上的子带相关性定义

(1) 抽点相关:将高频子带的 4 个系数取最大值后,再与低频子带的对应系数来计算子带之间的相关性;

(2) 均值相关:将高频子带的 4 个系数取均值后再与原图像的像素对应来计算图像各子带之间的相关性;

(3) 补偿相关:将低频子带的一个像素周围再添加 3 个与其像素值相等的像素,构成的 4 个像素(正方形的 4 个顶点)再与高频子带的 4 个像素对应来计算子带之间的相关性。

$$\text{coeff}_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(Y_{i,j})^2 - (Y_{i,j})^2]}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Y_{i,j})^2}, \quad (2)$$

其中,  $Y_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}$  分别为图像小波分解后相同方向上的各子带图像的像素值,  $m$ 、 $n$  分别为各子带图

像的长和宽。对于以上 3 种方法,  $Y_{i,j}$  所代表的像素值不同。

表 3 水平、垂直和对角方向的子带相关性

Tab. 3 Correlation of subband

子带图像	H 子带图像	V 子带图像	D 子带图像
相关性 (%)	81.60	86.75	90.36

由表 3 可以看出,对角方向子带的相关性最强,而水平方向子带相关性最小。对角方向的小波系数非常小,大部分都接近于零,所以很容易量化小波系数,提高图像的压缩比。相同方向不同尺寸的子带相关性随着尺度的增大而逐渐增大。

#### 2.3.2 不同方向相同尺度上的子带相关性定义

相同尺度上各子带中对应系数的绝对值之差与某一子带系数的绝对值之和的比值

$$\text{coeff}_2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (|Y_{i,j}| - |Y_{i,j}|)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |Y_{i,j}|}, \quad (3)$$

其中,  $Y_{i,j}$ ,  $Y_{i,j}$  分别为图像小波分解后的各子带图像的像素值;  $m$ 、 $n$  分别为各子带图像的长和宽。

### 2.4 遥感图像小波变换域系数的基本特征

(1) 频带内重要小波系数聚簇特性。大多数自然图像由大部分的同性均匀区域、纹理区域以及相当小的一部分边缘和视觉上可以感知的边界组成。同性均匀区域过渡变化平滑,由低频分量构成;纹理区域过渡变化比较适度,由一定的低频含量和高频含量分量组成;边缘是过渡变化比较剧烈的地方,由高频含量构成。小波变换将大多数能量集中在低频通带内,高频分量主要由边缘信息组成。另外,高频分量中的边缘信息具有聚簇性;

(2) 频带间重要小波系数相似性依赖特性。频带之间的相似性:试验证明,父小波系数的平方与子小波系数的平方的相关性在 0.2~0.6 之间,基本集中在 0.35 左右;

(3) 带间系数的衰减特性。要想有效地刻画和充分地利用频带间幅度相似性比较困难,但对于真实的自然图像可根据试验结果得到合理的推测,就是子小波系数的幅值几乎总是小于父小波系数。因此,对于自然图像来说,小波系数的大部分能量都集中在低频分量上。

### 3 遥感图像的小波压缩算法

SPIHT 算法采用集合不断分裂方法来组织小波系数,改善了 EZW (Embedded Zero Tree Wavelets) 算法的多次扫描重要系数的逐次逼近量化方法。由遥感图像的小波系数的分布特性可知,其最低频 LL 子带小波系数几乎保留了原图像的 90% 以上的能量。因此,该部分系数较少的损失就会带来图像恢复质量较大的损失,应该特别重视。SPIHT 压缩算法只有增加集合划分的次数和编码时间来提高最低频子带的小波系数的利用率,这无疑增加了算法的复杂度和算法的整个时间消耗。本文对 SPIHT 压缩算法作了进一步的改善。

#### 3.1 最低频子带 LL 的 DPCM 编码

最低频 LL 子带集中了图像的大部分能量,重要系数大部分集中于此,而且具有很强的相关性,本文采用二维 DPCM,其构造如图 2 所示。

当前像素的预测值计算公式为:

$$X = 0.5 A + 0.25 B + 0.25 C$$

遇到边界情况,当 A, B, C 有 1 个或 2 个不存在时,上式变为

$$X = A \text{ (B 与 C 不存在)}$$

$$X = 0.75 B + 0.25 C \text{ (A 不存在)}$$

$$X = 0.5 A + 0.5 B \text{ (C 不存在)}$$

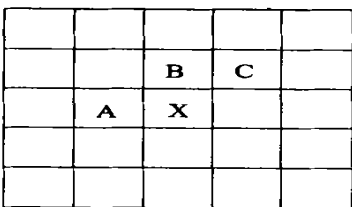


图 2 二维 DPCM 预测方法示意图

Fig. 2 Map of two-dimensional DPCM

对于左上角的第 1 个像素来说,三者均不存在。该像素将不做预测,其值可作为单独的信息保存

在输出码流的头信息中。

#### 3.2 SPIHT 算法简介

基于分层树集合分割排序(多级数集合分裂算法, Set Partitioning in Hierarchical Trees, SPIHT)的编码算法采用了空间方向树 (Spatial Orientation Tree, SOT)、集合  $D(i, j)$  和  $L(i, j)$  更有效地表示这样的 EZW 算法中的零树结构,从而提高了编码效率。

算法简介:

$Z(i, j)$ : 点  $(i, j)$  及其所有的后代的坐标集合,即指空间方向树;

$D(i, j)$ : 点  $(i, j)$  的所有后代(子孙)的坐标集合,不包括  $(i, j)$  点本身;

$O(i, j)$ : 点  $(i, j)$  的直接后代(儿子)的坐标集合,在分层塔形结构的最高层  $H$  有  $O(i, j) = \{(i + LL, j), (i, j + LL), (i + LL, j + LL)\}$ , 除此之外的结点有  $O(i, j) = \{(2i, 2j), (2i, 2j + 1), (2i + 1, 2j), (2i + 1, 2j + 1)\}$ , 这里  $LL$  为最高层  $H$  的尺度。

$L(i, j)$ : 点  $(i, j)$  除直接后代外所有后代坐标的集合。

去掉根节点集合  $H$ 。

集合的分割策略如下式所示:

$$\begin{cases} Z(i, j) = C(i, j) + D(i, j) \\ D(i, j) = O(i, j) + L(i, j) \\ L(i, j) = D(k, l) \quad (k, l) \in O(i, j), \end{cases} \quad (4)$$

扫描排序:

在编码中使用了 3 个表:不重要系数表 LIP (the List of Insignificant Pixels)、重要系数表 LSP (the List of Significant Pixels) 和不重要集合表 LIS (the List of Insignificant Sets)。LSP 初始化为空表, LIP 用最低频子带系数(如 3 级分解中的  $LH_3$ 、 $HL_3$ 、 $HH_3$  中的系数)初始化, LIS 用每一个空间方向树的根结点(如 3 级分解中的  $LH_3$ 、 $HL_3$ 、 $HH_3$  中的系数位置)来初始化。

对重要图的确定主要是通过空间方向树的多次分裂来实现的。1 个 3 级空间方向树  $T(i, j)$  在初始化时分裂成树头结点  $C(i, j)$  和剩余集合  $D(i, j)$ , 见公式(4)。对  $C(i, j)$  判断其重要性,若重要则转到 LSP 中。对集合  $D(i, j)$  进行重要性测试,若  $D(i, j)$  是不重要的,则  $D(i, j)$  用一个符号就可以表示出来。若  $D(i, j)$  是重要的,则  $D(i, j)$  继续分裂为 2 个集合  $O(i, j)$  和  $L(i, j)$ , 如公式

(5)。对  $O(i, j)$  中的每个元素分别进行重要性测试,把重要元素转到 LSP 中。对  $L(i, j)$  集合进行重要性测试,若  $L(i, j)$  不重要,则用一个符号就可以表示该集合,若  $L(i, j)$  重要,则  $L(i, j)$  分裂为 4 部分,每部分由相应空间方向树上的位置上的元素构成,每一部分与  $O(i, j)$  中的 4 个元素分别构成 4 棵新树,由于每棵新树的头结点已经判断,只对新树的剩余部分也就是  $L(i, j)$  分裂出的 4 个集合即进行判断,见公式(4)。如此重复对每棵树进行分裂和判断直到找出每棵树中的所有重要元素,把它们转到 LSP 中。可以看到 SPIHT 算法对重要图的排序是通过一系列的集合分裂完成的,即一棵树  $T(i, j)$  分裂成头结点元素  $C(i, j)$  和剩余部分  $D(i, j)$ ,对重要的  $D(i, j)$  继续分裂成头结点的直接 4 个孩子  $O(i, j)$  和剩余部分  $L(i, j)$ ,对重要的集合  $L(i, j)$  再继续分裂为 4 棵新树的剩余部分。

对每棵树的分裂不是一次进行到底的,而是要按照一定的扫描顺序进行。对各个子带的扫描顺序与 EZW 算法的扫描顺序相同。对于头结点构成的 LIP 中的元素是按从上到下、从左到右的顺序进行扫描的。而对其他子带则是按  $2 \times 2$  的块为单位从上到下、从左到右依次扫描。对每个  $2 \times 2$  块中元素还是按从上到下、从左到右顺序扫描。扫描的同时不断地输出重要系数的第  $n$  位的值,不断地减小阈值,使之达到目标码率。

### 3.3 压缩系统构成

压缩系统的构成如图 3 所示。

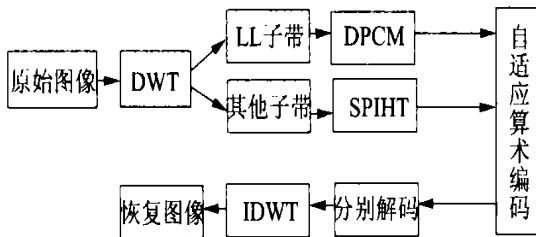


图 3 编/解码示意图

Fig. 3 The map of the structure of encoding and decoding

## 4 实验结果

本文对 CCD 所采集的太原机场遥感图像进行了 3 级小波分解和重构,并与 EZW 算法、SPIHT

算法进行了比较。试验结果如图 4,图 5 和表 4。

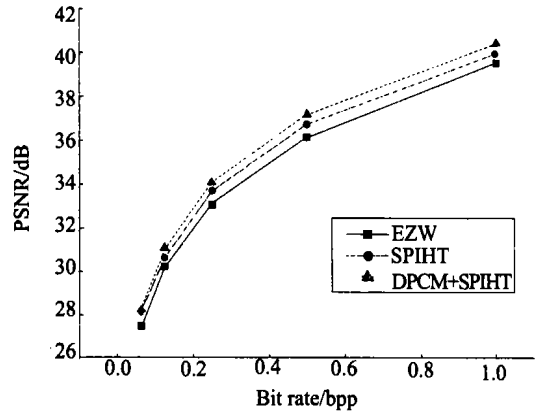


图 4 3 种压缩算法的峰值信噪比曲线

Fig. 4 Curves of the three compression algorithms

表 4 3 种压缩算法的 PSNR 比较

Tab. 4 Comparison of three compression algorithms

比特率 (bpp)	太原机场		
	EZW	SPIHT	本文算法
0.0625	27.50	28.17	28.26
0.125	30.22	30.64	31.08
0.250	33.06	33.70	34.10
0.500	36.18	36.78	37.22
1.000	39.57	40.01	40.47

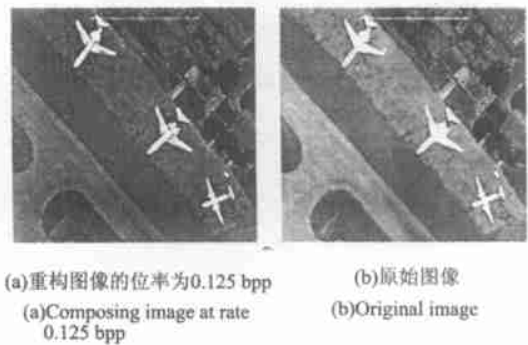


图 5 太原机场的压缩效果

Fig. 5 Coded results of Taiyuan Aerodrome

分析上述试验数据,不难得出:

- (1) 利用本文算法所得到的重构遥感图像没有方块效应,图像恢复质量较高;
- (2) 在相同压缩比的情况下,尤其在比特率较低的情况下,本文算法的图像恢复质量明显优于 EZW 编码算法和 SPIHT 算法。

## 5 结 论

本文以 SPIHT 算法为基础,通过单独编码最低频子带 LL、逐渐逼近量化最后形成嵌入式码流。试验结果表明,DPCM 编码算法和 SPIHT 编

码算法相结合对于遥感图像的压缩是非常有效的,图像的恢复质量明显优于 EZW 编码算法和 SPIHT 编码算法,且缩短了编解码时间,对于遥感图像的压缩具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] PEAELMAN W A. A new ,fast ,and efficient image code based on set partitioning in hierarchical trees[J]. *IEEE Trans Circuits Syst Video Technology*, 1996 ,6(6) :243-250.
- [2] SHAPIRO J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients[J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 1993 ,41(12) : 3445-3462.
- [3] 侯阳. 数据压缩及 C 语言实例[M]. 北京:北京邮电学院出版社,1994.  
HOU Y. *Data compression and C language* [M]. College Publishing House ,1994. (in Chinese)
- [4] 谢成俊. 小波分析方法在数据压缩中的应用[D]. 长春:中国科学院长春光机与物理研究所博士论文,2002. 2.  
XIE CH J. Application of wavelet anlysis in data compression[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences ,2002. 2. (in Chinese)
- [5] 张宗平, 刘贵忠. 基于小波的视频图像压缩研究进展[J]. 电子学报,2002 ,6(6) :883-889.  
ZHANG Z P, LIU G ZH. Research progress in wavelet-based video image compression[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2002 ,6(6) : 883-889. (in Chinese)
- [6] 黄贤武. 一种改进的基于人眼视觉特性的零树图像编码算法[J]. 计算机研究与发展, 2001 ,38(8) : 977-981.  
HUANG X W. An enhanced image coding algorithm based HVS and zerotrees [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2001 ,38(8) :977-981. (in Chinese)
- [7] 王沛. 基于小波变换的图像自适应盲水印算法[J]. 光学 精密工程,2002 ,10(3) :247-252.  
WANG P. Adaptive blind watermarking algorithm based on wavelet transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002 ,10(3) : 247-252. (in Chinese)
- [8] ZANDI A, ALLEN J, SCHWARTZ E, *et al.* CREW: Compression with reversible embedded wavelets [C]. *IEEE Data Compression Conference*, Snowbird ,UT ,pp. 1995 ,212-221.
- [9] 杨长生. 图像与声音压缩技术[M]. 浙江:浙江大学出版社,2000.  
YANG CH SH. Image and sound compression technology[M]. Zhejiang: Publishing House of Zhejiang University ,2000. (in Chinese)

作者简介:孙文军(1975 - ) ,男 ,江苏人 ,长春工程学院信息工程系博士研究生 ,主要研究方向为遥感图像信息处理 ,影像光学与图像处理 ,图像压缩及传输。