

基于小波变换和分段 DPCM 混合编码的多光谱遥感图像压缩算法¹

吴 铮 何明一

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

摘 要 多光谱遥感图像的压缩要利用图像谱内及谱间的相关特性。该文在分析多光谱图像谱内和谱间相关特性的基础上,提出了对多光谱遥感图像进行压缩的分段 DPCM 和 SPIHT 相结合的混合压缩算法,即首先利用分段 DPCM 算法去除谱间冗余,再利用高效的 SPIHT 小波压缩算法对预测误差图像进行编码。实验取得了令人满意的效果,证明了该算法的有效性。

关键词 多光谱遥感图像压缩, SPIHT, 分段 DPCM

中图分类号 TN911.73, O177.6

1 引 言

多光谱遥感图像的压缩技术是星载和机载遥感数据传输和存储中一个急待解决的问题。多光谱遥感图像的压缩是通过同时去除谱内空间冗余和谱间冗余获得的。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,因此只靠去除谱内空间冗余很难获得较高的压缩比。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,各波段图像间具有一定的相关性,如果利用这种谱间冗余对多光谱图像进行压缩,就能够得到较高的压缩比。目前,在多光谱图像压缩中,仍然广泛采用熵编码、变换、矢量量化、预测或各种混合编码技术去除以上两种形式的冗余^[1-5]。根据图像信息恢复的准确程度,多光谱遥感图像压缩技术可分为无损压缩、有损压缩以及介于两者之间的近无损压缩。由于遥感数据信息非常宝贵,所以压缩时更注重无损压缩或近无损压缩,即使是有损压缩,也通常要求达到高保真的效果。

本文将介绍一种利用小波变换和分段 DPCM 混合编码对多光谱遥感图像进行压缩的新算法。这种算法首先利用 DPCM 方法去除多光谱图像的谱间冗余。考虑到不同波段遥感图像间相似性的差异,本文提出了分段 DPCM 算法以使预测器的性能达到最佳;然后利用基于小波变换的 SPIHT 算法^[6]对去除谱间冗余后的残差图像进行编码。该算法不仅能够实现多光谱图像的近无损压缩,还可以方便地实现不同精度下的有损压缩。

2 多光谱图像的谱内 SPIHT 压缩算法

由于小波变换的多分辨性质,图像经小波变换后得到的系数在空域和频域都有良好的分布特性^[7,8],因此各种基于小波变换的图像压缩技术取得了很大成功, SPIHT 算法是其中性能最好的算法之一^[6],其基本思路如图 1 所示。从算法框图中可以看出,通过调整 n_0 可以对重构图像的质量进行控制,实现图像的有损或近无损压缩。

3 多光谱图像的谱间 DPCM 压缩算法

3.1 DPCM 算法

本文首先采用 DPCM 方法去除多光谱图像的谱间冗余,考虑一阶线性预测器

$$\hat{x}_{n|n-1,i,j} = a_1 x_{n-1,i,j} + a_0 \quad (1)$$

¹ 2001-10-26 收到, 2002-05-21 改回

国家 863 计划 (编号: 863-308-14-04(3)) 和国家 973 计划资助

设 $x_{n-1,i,j}$ 是第 $n-1$ 个谱带图像在 (i,j) 处的像素灰度值, $\tilde{x}_{n|n-1,i,j}$ 是由它预测得到的第 n 个谱带图像上同一位置的像素灰度值. 将这个预测器应用到图像上的每一像素, 就可以由图像 x_{n-1} 预测出多光谱图像序列中的下一幅图像 x_n , 然后对误差图像 $\varepsilon_n = x_n - \tilde{x}_{n|n-1}$ 利用 SPIHT 算法进行编码即可. 图 2 和图 3 分别是 DPCM+SPIHT 的多光谱图像编码和解码算法框图.

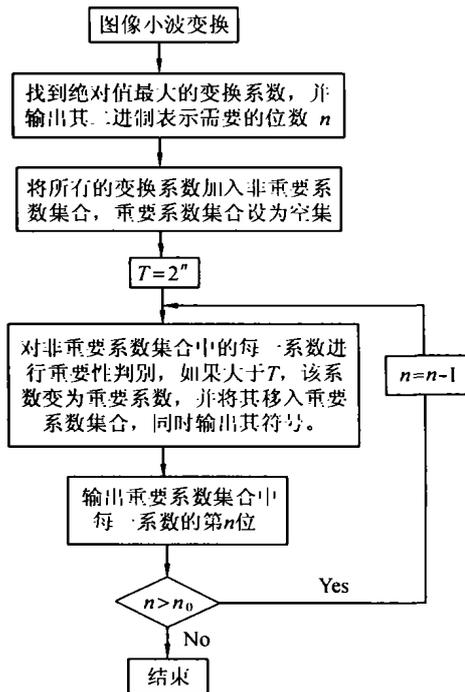


图 1 SPIHT 压缩算法框图

设图像大小为 $M \times N$, 则多光谱图像序列中第 n 幅图像的预测均方误差为

$$e_n^2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{n,i,j} - a_1 x_{n-1,i,j} - a_0)^2 \quad (2)$$

最优线性预测器应使预测均方差的期望值达到最小, 即寻找最优的 a_1 及 a_0 , 使其满足

$$E \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{n,i,j} - a_1 x_{n-1,i,j} - a_0)^2 \right\} = \min \quad (3)$$

因此推导出预测器系数 a_1 及 a_0 的最优值为

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \left[1 - \frac{r_x(1) - \mu^2}{r_x(0) - \mu^2} \right] \mu \\ a_1 &= \frac{r_x(1) - \mu^2}{r_x(0) - \mu^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

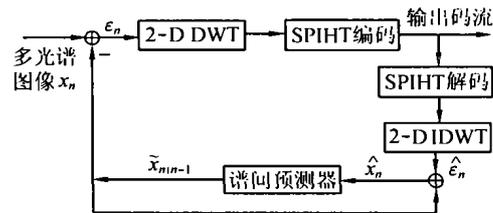


图 2 多光谱图像的 DPCM+SPIHT 编码算法框图

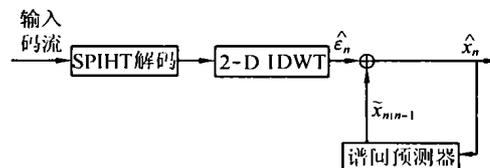


图 3 多光谱图像的 DPCM+SPIHT 解码算法框图

其中

$$r_x(k) = E \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{n,i,j} x_{n-k,i,j} \right\}, \quad k = 0, 1 \quad (5)$$

$$\mu = E \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{n,i,j} \right\} \quad (6)$$

假设多光谱图像序列的长度为 L , 那么实际运算中 $r_x(k)$ 和 μ 的估计值将由下式给出:

$$\hat{r}_x(k) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1-|k|} \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{n,i,j} x_{n+k,i,j} \right\} \quad (7)$$

$$\hat{\mu} = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{n,i,j} \right\} \quad (8)$$

3.2 分段 DPCM 算法

由于一组多光谱图像中各谱带图像间的相似性强弱是随着谱带变化的, 因此对整个多光谱图像序列采用单一的预测器是不合适的。下面给出了一个简单有效的去除谱间冗余的分段 DPCM 方法, 即首先根据相似性对多光谱图像序列分段, 然后对每个序列段采用与 (1) 式类似的预测器。这一算法中首先要对图像的像素灰度值进行能量归一化处理, 即

$$x'_{n,i,j} = (x_{n,i,j} - \mu_n) / \sigma_n \quad (9)$$

其中 μ_n 和 σ_n 分别是图像 x_n 中各像素灰度值的均值和方差。归一化后可得

$$r_{x'}(0) = E \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x'_{n,i,j} \right\} = 1$$

$$\mu' = E \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x'_{n,i,j} \right\} = 0$$

这时利用 $x'_{n-1,i,j}$ 预测 $x'_{n,i,j}$

$$\tilde{x}'_{n|n-1,i,j} = a'_1 x'_{n-1,i,j} + a'_0 \quad (10)$$

同样可得到 a'_1 及 a'_0 的最优值为

$$\left. \begin{aligned} a'_0 &= 0 \\ a'_1 &= r_{x'}(1) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 $r_{x'}(1)$ 定义为

$$r_{x'}(1) = E \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x'_{n,i,j} x'_{n-1,i,j} \right\} \quad (12)$$

这样 (10) 式简化为

$$\tilde{x}'_{n|n-1,i,j} = r_{x'}(1) \cdot x'_{n-1,i,j} \quad (13)$$

下面给出对多光谱图像序列进行分段的依据, 定义相邻两幅多光谱图像的一个相似性系数如下:

$$\text{Cor}(n) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x'_{n,i,j} x'_{n-1,i,j}, \quad n = 1, \dots, L-1 \quad (14)$$

在算法中预先设定阈值 T_{Cor} , 如果 $\text{Cor}(n) > T_{\text{Cor}}$, 则认为图像 x_n 和 x_{n-1} 的相似性较强, 可以用 x_{n-1} 预测 x_n , 即 x_n 和 x_{n-1} 划分在同一个序列段中; 否则, 就不用 x_{n-1} 预测 x_n , 即 x_n 和 x_{n-1} 在不同的序列段中. 假定已按上述方法把图像序列 $\{x_n, n = 0, 1, \dots, L-1\}$ 划分为 P 段 $\{\{x_n\}_p, p = 0, 1, \dots, P-1\}$, 这时需要对每个子序列 $\{x_n, n = I_p, I_p+1, \dots, I_p+L_p-1\}_p$ 计算 (13) 式中的预测器系数 $r_{x'_p}(1)$. 为了区分各子序列的预测器系数, 将其记为 $r_{x'_p}(1)$, $p = 0, 1, \dots, P-1$. 根据 (7) 式, $r_{x'_p}(1)$ 的估计值为

$$\hat{r}_{x'_p}(1) = \frac{1}{L_p} \sum_{n=I_p}^{I_p+L_p-2} \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x'_{n,i,j} x'_{n+1,i,j} \right\} \quad (15)$$

将 (13) 式代入 (15) 式得

$$\hat{r}_{x'_p}(1) = \frac{1}{L_p} \sum_{n=I_p}^{I_p+L_p-2} \text{Cor}(n+1) \quad (16)$$

根据 (9) 式和 (13) 式, 多光谱图像序列中第 p 个子序列采用的预测器为

$$\tilde{x}'_{n|n-1,i,j} = r_{x'_p}(1) \cdot (x_{n-1,i,j} - \mu_{n-1}) / \sigma_{n-1} \quad (17)$$

实际编码过程中为控制压缩后重构图像的精度, 需要对 $\tilde{x}'_{n|n-1,i,j}$ 进行逆归一化, 即

$$\tilde{x}_{n|n-1,i,j} = \tilde{x}'_{n|n-1,i,j} \cdot \sigma_n + \mu_n \quad (18)$$

所以该算法在解码时, 各图像的均值和方差要作为副信息首先发送到解码端.

由 (16) 式可以看出, 事先对各图像数据进行归一化统计的优点是对图像序列分段后可直接对各子序列进行预测器系数的计算, 而不必再分别对每个子序列进行统计以计算出它们各自的预测器系数, 从而大大节省了编码时间. 以下是分段 DPCM 和 SPIHT 混合编码算法.

- (1) 对 $n = 1, \dots, L-1$, 按照 (14) 式计算 $\text{Cor}(n)$. 计算并输出各图像的均值和方差.
- (2) 根据阈值 T_{Cor} , 将原始多光谱序列划分成 P 个子序列 $\{x_n, n = I_p, I_p+1, \dots, I_p+L_p-1\}_p$, 其中 $\text{Cor}(n) \geq T_{\text{Cor}}$, $n = I_p+1, \dots, I_p+L_p-1$, 并输出分段结果.
- (3) 对 $p = 0, 1, \dots, P-1$, 按照 (16) 式估算 $r_{x'_p}(1)$, 并输出.
- (4) $p = 0$.
- (5) 如果 $p \geq P$, 转到 (7); 否则执行以下各步:
 - (a) 直接用 SPIHT 算法对第 p 个子序列的第一幅图像 x_{I_p} 进行编码输出并得到重构图像 \hat{x}_{I_p} , 令 $n = 1$;
 - (b) 如果 $n > L_p - 1$, 转到 (6);
 - (c) 根据 (17) 式和 (18) 式由 \hat{x}_{I_p+n-1} 得到 x_{I_p+n} 的预测值 \tilde{x}_{I_p+n} ;
 - (d) 计算预测误差图像 ε_{I_p+n} , 并用 SPIHT 算法对其编码输出;

- (e) 解码得到重构误差图像 $\hat{\varepsilon}_{I_p+n}$;
- (f) 计算重构图像 $\hat{x}_{I_p+n} = \bar{x}_{I_p+n} + \hat{\varepsilon}_{I_p+n}$;
- (g) $n = n + 1$, 转到 (b) .
- (6) $p = p + 1$, 转到 (5) .
- (7) 编码结束.

分段 DPCM 和 SPIHT 的解码算法是编码算法的逆过程, 算法框图依然如图 3 示. 但在解码时, 各图像的均值和方差, 图像分段结果和各序列段的预测器系数首先作为副信息发送到解码端, 解码端可以利用这些信息直接建立谱间预测器, 因此解码速度要远快于编码速度.

4 实验结果

本文使用的实验数据是由国家 863 计划 308 办公室和中国科学院上海技术物理所提供的于 1999 年 5 月在常州附近飞行采集的 64 波段多光谱数据, 空间分辨率为 10m , 谱间分辨率为 10nm , 图像大小为 256×256 像素. 图 4 绘出了多光谱图像序列中每两个相邻波段图像的相似性系数 $Cor(n)$, 当选取不同的阈值 T_{Cor} 时图像序列有不同的分段结果.

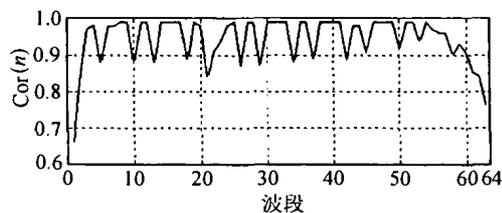


图 4 相邻图像的相似性系数

图 5 是分别利用 SPIHT(不删除谱间冗余) , DPCM+SPIHT , 分段 DPCM+SPIHT 算法对这组多光谱图像进行近无损压缩后得到的结果. 图 5 中绘出了当 SPIHT 算法中的参数 n_0 分别取为 1 和 2 时, 这 3 种方法对每一谱带图像可得到的压缩比, 以及 n_0 取为 4 时分段 DPCM+SPIHT 算法的性能. 为了提高压缩算法的速度, 在对图像进行小波变换时选用了双正交 5/3 小波, 对各谱带图像进行 6 级分解. 表 1 列出了一些具体的压缩性能统计参数, 包括总压缩比、重构图像的 PSNR 值、像素灰度值的最大误差以及编码解码时间等. 表中结果是在 CPU 为赛扬 333MHz , 内存为 64M 的微机计算得到的.

从图 5 和表 1 中可以看出, 当只利用 SPIHT 算法对多光谱图像进行谱内压缩, 而不考虑去除谱间冗余时, 得到的压缩比是非常有限的, 因此去除多光谱图像的谱间冗余对提高压缩比是非常必要的. 比较图 5 (b) 和 5(c) 中各谱带图像的压缩比, 可以发现某些图像经 DPCM 方法去除谱间相关后用 SPIHT 方法编码得到的压缩比甚至比直接对该图像进行 SPIHT 编码得到的压缩比还要低, 这说明对多光谱图像序列采用统一的预测器并不合适, 因此分段 DPCM 方法更适用于去除多光谱图像序列, 取得了更好的压缩效果. 在分段 DPCM+SPIHT 算法中, 阈值 T_{Cor} 的选取影响了算法最后可以得到的压缩比, 对于本文的实验数据该阈值取为 0.90 时能取得最佳的压缩比.

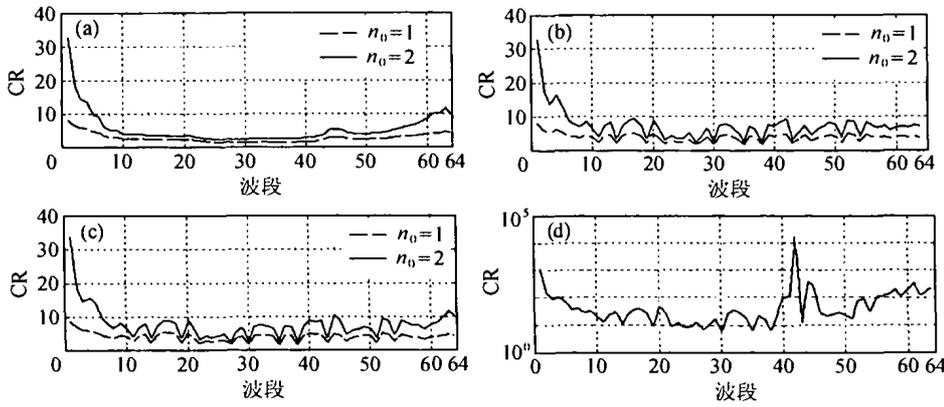


图 5 SPIHT(不除谱间冗余), DPCM+SPIHT, 分段 DPCM+SPIHT 算法

对多光谱图像进行压缩得到的压缩比

(a) SPIHT(不除谱间冗余) 算法 (b) DPCM+SPIHT 算法

(c) 分段 DPCM+SPIHT 算法 ($T_{Cor} = 0.90$) (d) 分段 DPCM+SPIHT 算法 ($T_{Cor} = 0.90, n_0 = 4$)

表 1 SPIHT(不除谱间冗余), DPCM+SPIHT, 分段 DPCM+SPIHT 算法的压缩性能统计参数

编码方法	精度 (n_0)	总压缩比	平均 PSNR(dB)	最大误差 \leq	编码时间 (s)	解码时间 (s)	
SPIHT (不除谱间冗余)	1	2.65	51.36	3	76.9	43.1	
	2	3.91	46.81	7	64.9	39.0	
	4	12.05	39.82	24	53.6	28.7	
DPCM+SPIHT	1	3.55	51.36	3	87.2	51.4	
	2	5.63	46.80	7	84.1	42.0	
	4	21.62	39.83	24	73.7	31.8	
分段 DPCM+ SPIHT	$T_{Cor} = 0.87$	1	3.74	51.37	3	82.7	40.8
		2	6.01	46.85	7	78.1	37.3
		4	23.13	39.83	24	67.4	31.1
	$T_{Cor} = 0.90$	1	3.81	51.37	3	82.2	41.5
		2	6.14	46.85	7	78.1	37.1
		4	23.31	39.84	24	68.1	31.8

该算法的另一特点是可以调节 n_0 实现多光谱图像的有损到近无损压缩。从表 1 中可以看出当 n_0 取 1 或 2 时重构图像质量极高, 已达到近无损压缩的要求; 当 n_0 取 4 时图像的失真虽然相对较大, 但仍保持较高的质量。图 6 是多光谱图像序列中第 10 幅图像及其在 n_0 取不同值时利用分段 DPCM+SPIHT 算法进行压缩后的重构图像。当 n_0 取 1 或 2 时, 人眼不能分辨重构图像的误差; 当 n_0 取 4 时, 可以看出重构图像的失真, 但图像的纹理和边缘等细节信息依然得到了较好的保留。

5 结 论

在分析多光谱图像谱内和谱间冗余特性的基础上, 本文提出了对多光谱遥感图像进行压缩的分段 DPCM 与 SPIHT 相结合的混合压缩算法, 即利用分段 DPCM 算法去除谱间冗余, 再利用高效的 SPIHT 小波压缩算法对预测误差图像进行编码。通过仿真多光谱图像和实际 64 波段多光谱图像的实验结果表明该算法速度较快且能取得较高的压缩比, 并能通过调节参数实现从有损到近无损情况下的压缩, 即使在有损情况下也能良好保持图像的纹理和边缘等细节信息。该算法简单有效, 同样也适用于超光谱图像的压缩, 因此具有良好的应用前景, 值得进一步的研究和完善。

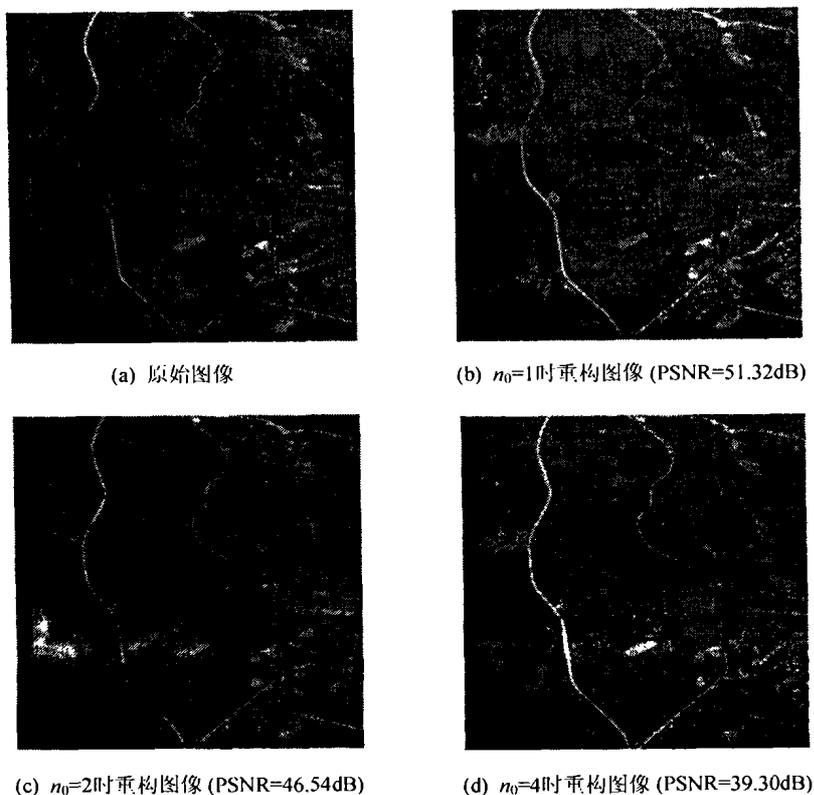


图 6 第 10 幅光谱图像及利用分段 DPCM+SPIHT 对其进行压缩后的重构图像

参 考 文 献

- [1] G. P. Abousleman, M. W. Marcellin, B. R. Hunt, Compression of hyperspectral imagery using 3-D DCT and hybrid DPCM/DCT, *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1995, 33(1), 26-34.
- [2] J. Wang, K. Zhang, S. Tang, Spectral and spatial decorrelation of Landsat-TM data for lossless compression, *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1995, 33(5), 1277-1285.
- [3] N. D. Memon, K. Sayood, S. S. Magliveras, Lossless compression of multispectral image data, *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1994, 32(2), 282-289.
- [4] 张荣, 刘政凯, 一种多光谱遥感图像的近无损压缩方法, *中国图像图形学报*, 1998, 3(10), 823-826.
- [5] 张荣, 刘政凯, 詹凯, 基于小波变换的多光谱图像压缩方法, *遥感学报*, 2000, 4(2), 100-105.
- [6] A. Said, W. A. Pearlman, A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees, *IEEE Trans. on Circuits and Syst. for Video Technol*, 1996, 6(3), 243-249.
- [7] [美] 崔锦泰著, 程正兴译, 小波分析导论, 西安, 西安交通大学出版社, 1995, 第五章.
- [8] 程正兴, 小波分析算法与应用, 西安, 西安交通大学出版社, 1999, 178-186.

MULTISPECTRAL IMAGERY COMPRESSION BY HYBRID DWT AND PARTITIONING DPCM

Wu Zheng He Mingyi

(Institute of Electronic Info., Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract Compression of multispectral imagery is based on reducing redundancies in both the spatial domain and the spectral domain. In this paper, a new hybrid compression algorithm using partitioning DPCM and SPIHT is proposed on the base of analyzing the spatial and spectral correlation features of multispectral imagery. A first-order predictor is designed for de-correlating the spectral redundancy and creating error images for later use. Because the image similarities among adjacent spectrum bands are different with the change of spectrum, the whole multispectral image sequence is partitioned into several subsets, and then DPCM predictors are designed separately for each image subset. After de-correlating spectral redundancy, a efficient wavelet coding method, SPIHT, is used to compress error images created by partitioning DPCM algorithm. The experimental results from simulated multispectral images and practical 64-band multispectral images have shown that the algorithm is fast, efficient and practical.

Key words Multispectral imagery compression, SPIHT, Partitioning DPCM

吴 铮: 女, 1977 年生, 博士生, 研究方向为小波变换与图像压缩.

何明一: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域: 神经网络与智能信息处理、图像处理与可视化, 以及三维信息获取与处理等.