

# 基于三维小波变换和上下文量化的高光谱图像压缩\*

伞兴, 吴秀清, 田新梅

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027)

**摘要:**提出了一种基于三维小波变换和上下文量化的高光谱图像压缩算法. 该算法先利用三维小波变换去除高光谱图像在谱内和谱间的冗余信息, 然后建立了一个高维时、频域的上下文预测模型以分析小波系数之间的相关性, 并通过对增加条件熵的理论分析, 合理地对该模型中的上下文进行量化, 得到合适的编码上下文用于自适应的算术编码. 试验结果表明, 该算法不仅明显优于基于二维小波变换的 JPEG2000 标准, 而且相对于同样基于三维小波变换的三维分层树集合分裂算法也有较大的提高.

**关键词:**压缩; 高光谱图像; 三维小波变换; 上下文量化

**中图分类号:** TN919.81      **文献标识码:** A

## Compression of hyperspectral images based on three-dimensional wavelet transform and context quantization

SAN Xing, WU Xiu-qing, TIAN Xin-mei

(Dept. of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** A novel hyperspectral image coding method based on three-dimensional wavelet transform (3DWT) and context quantization was proposed. With this method, 3DWT was firstly adopted to remove the intra- and inter-spectral redundancy of hyperspectral images. Then the correlation of wavelet coefficients was analyzed by a high dimension context predicting model. After the theoretical analysis on conditional entropy, this context model was quantized to provide the coding contexts for the adaptive arithmetic coder to yield an embedded bit-stream. The experiments show that the proposed method is not only much better than the 2DWT-based JPEG2000 but also provides improvement relative to 3DWT-based three-dimensional set partitioning in hierarchical trees (3DSPIHT).

**Key words:** compression; hyperspectral images; three-dimensional wavelet transform; context quantization

高光谱图像一般由几十到几百个带宽为 10 nm 左右的波段组成, 这使得一幅高光谱图像对应的数据量非常大, 如标准的高光谱 AVIRIS (airborne visible infrared imaging spectrometer) 图像有 224 个连续谱带, 每个谱带图像的大小为  $512 \times 614 \times 12$  bits, 一幅

图像的数据量就高达 100 MB 以上. 在传输和处理这些高光谱图像时, 需要占用大量的带宽和存储空间, 这使得越来越多的研究人员致力于高光谱图像的压缩, 并提出了很多种编码方法. 目前的高光谱图像压缩方法大致可以分为四种: 预处理, 预测编码,

\* 收稿日期: 2006-09-25; 修回日期: 2007-01-26

基金项目: 中国高技术研究发展(863)计划(2004AA783052)资助.

作者简介: 伞兴, 男, 1982年生, 博士生. 研究方向: 图像与视频压缩. E-mail: sanxing@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 吴秀清, 教授. E-mail: wuxq@ustc.edu.cn

矢量化和变换编码<sup>[1]</sup>. 其中,变换编码以其优异的编码效率、较低的计算复杂度和良好的扩展性得到了最广泛的应用.

高光谱图像可以看成由二维的空间域和一维的频谱域组成的一个三维体数据. 根据高光谱数据的这种三维特性,一些学者采用视频压缩中的三维小波变换的方法来去除高光谱图像中的谱间相关性和谱内相关性,与此同时一些成熟的二维小波编码方法也被扩展到三维空间用于高光谱图像的压缩,如 3DSPIHT<sup>[2]</sup>, 3DSPECT<sup>[3]</sup>, 1 + 2D-WT/EBCOT<sup>[4]</sup> 等. 这些基于三维小波变换的编码方法尽管都取得了非常好的效果,但是它们与其相应的二维编码方法一样,都只利用了小波系数的时频域相关性中的一种,而没有充分利用小波系数的所有统计特性<sup>[5]</sup>. 为了解决这一不足,本文提出了一种基于三维小波变换和上下文量化的高光谱图像压缩算法. 该算法是在对高光谱图像进行三维小波分解的基础上,利用三维小波系数的时频域相关性建立一个高维上下文预测模型用于算术编码,并根据改进的上下文量化标准降低了上下文量化的复杂度.

高光谱图像的三维小波变换是在二维空间域图像变换的基础上,增加一维频谱域变换,如图 1 所示. 经过三维小波变换后,虽然整个高光谱图像的能量都集中在几个低频子带中,但系数之间的相关性却变得更为复杂了. 与当前系数有很强相关性的不仅仅是八邻域内的系数和谱间对应位置的系数,而且和上个分辨率下相应子带的像素也有很强的关系. 为此本文建立了一个基于时、频域的高维上下文模型. 这种模型首先根据零树假设,选择当前编码的小波系数对应的上一分辨率系数的状态作为一种上下文因子;然后考虑到图像数据遵从马尔可夫随机场,当前编码系数的八个邻域内的系数的状态也被作为一种上下文因子;最后由于谱间相关性的存在,本文把前后两幅图像相应位置的系数状态作为第三种上下文因子. 根据上面的分析,该模型共选取了 11 个上下文因子,相应的上下文模板如图 2 所示.

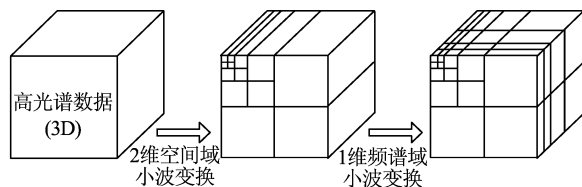


图 1 三维小波变换

Fig. 1 Three-dimension wavelet transform

其中,  $X$  表示的是当前编码系数的状态;  $C_1$  为上一个子带中对应系数的状态;  $C_2 \sim C_9$  是在当前谱图像中,编码系数的 8 个邻近系数的状态;  $C_{10}$  和  $C_{11}$  分别表示的是前后两个谱图像中对应位置的系数状态.

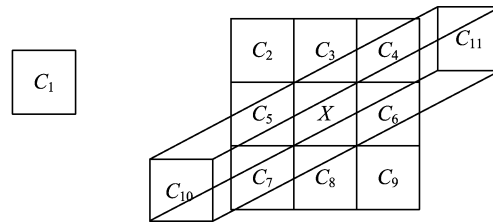


图 2 三维小波系数的上下文模板

Fig. 2 Context template of 3DWT coefficients

由于在编码过程中,所有的系数都将被二进制化,则由这 11 个上下文因子产生的所有上下文数目是  $2^{11}$ . 如果直接利用这么多的上下文进行编码,一幅图像并不能为每个上下文提供足够的采样值来预测其准确的发生概率,从而带来“上下文模型稀释”问题<sup>[6]</sup>. 所以在实际的算术编码之前,必须对高维上下文模型进行量化. 为了获得较好的量化结果,一个合适的上下文量化标准是必不可少的. 文献[7,8]中已经从理论上对最优上下文量化标准做了一些分析,并采用条件熵的增加值作为最优量化标准. 然而在实际编码中,由于计算信息熵涉及大量的对数运算,计算复杂度过高,严重限制了上下文量化方法在实际中的应用. 为此,本文提出一种改进的上下文量化标准.

对于一个给定的数据源  $D = \{d\}$  和它的原始上下文模型  $C = \{c_i\}$ ,则该数据源的条件熵为  $H(D|C)$ . 当  $C$  被量化成上下文  $Q = \{q_i\}$ ,那么数据源  $D$  的条件熵就变成  $H(D|Q)$ ;增加的条件熵为

$$\Delta H = H(D|Q) - H(D|C). \quad (1)$$

当只考虑两个原始上下文  $c_k, c_l$  量化成一个上下文  $q_i$  的情况时,该量化过程使条件熵增加:

$$\begin{aligned} \Delta H &= H(D|q_i) - H(D|c_k) - H(D|c_l) = \\ &= \sum_{d \in D} \left\{ [P(d, c_k) + P(d, c_l)] \log_2 \frac{P(c_k) + P(c_l)}{P(d, c_k) + P(d, c_l)} - \right. \\ &\quad \left. P(d, c_k) \log_2 \frac{P(c_k)}{P(d, c_k)} - P(d, c_l) \log_2 \frac{P(c_l)}{P(d, c_l)} \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

令

$$\left. \begin{aligned} P(d, c_l) &= x, P(c_l) = y, \\ P(d, c_k) &= P(d, c_l) - a = x - a, \\ P(c_k) &= P(c_l) - b = y - b. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则式(4)可以写成:

$$\Delta H = \sum_{d \in D} \left\{ (2x+a) \log_2 \frac{2y+b}{2x+a} - (x+a) \log_2 \frac{y+b}{x+a} - x \log_2 \frac{y}{x} \right\}. \quad (4)$$

如果两个原始上下文  $c_l, c_k$  的出现概率和联合概率都相差不大的时候,也就是  $a$  和  $b$  相对于  $P(c_l)$  和  $P(d, c_l)$  来说很小的情况下,式(4)利用泰勒级数展开并化简可以得到

$$\Delta H \approx \frac{1}{2 \ln 2} \sum_{d \in D} \left\{ \frac{a^2}{P(d, c_l)} - \frac{ab}{P(c_l)} \right\}. \quad (5)$$

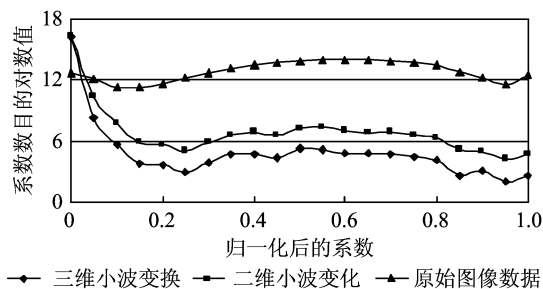
式(5)即为改进后的上下文量化标准.该标准用乘法代替了计算信息熵时所需要进行的对数运算,大大减少了算法复杂度.与此同时,我们也可以从式(5)中得知,当原始上下文的出现概率和联合概率已知的情况下,量化后条件熵的增加值不但与两个上下文的联合概率之差有关,还和它们的出现概率之差有关.

基于式(5)所描述的上下文量化标准,本文在三维小波变换的基础上,把时、频上下文模型应用到高光谱图像的编码中.在具体的编码方法中,首先利用 Mallat 变换方法对原始高光谱图像在空间域和频谱域上进行三维小波分解,并建立相应的时、频域上下文模型;然后采用基于层的上下文量化方法对该模型进行量化<sup>[8]</sup>;最后使用自适应二进制算术编码器编码以输出一个嵌入式码流.

为了测试本文所提出方法的效率,我们选取了一幅航拍的高光谱图像 Village (位于中国陕西省境内)作为我们的研究对象.图像 Village 一共包含 128 个波段,每幅波段图像都具有 8 bpp 的灰度和 512 px × 512 px 的图像尺寸.试验中,首先测试了三维小波变换的能量集中能力.在对 Village 的 128 个波段图像的边缘进行对称延拓处理后,利用双正交 9/7 小波对这 128 幅图像进行空间域 5 层、频谱域 4 层的三维小波分解,得到的三维小波系数的归一化对数直方图如图 3 所示.作为对比,原始图像和只进行空间域二维小波变换的归一化对数直方图也同时给出.

从图 3 的试验结果可以看出,原始图像的能量分布非常平稳,在整个灰度范围内的分布都基本一致.在经过二维小波变换后,整个图像的能量已经被集中在少部分的系数上,其他绝大部分系数几乎接近于零.而通过三维小波变换后,明显获得了比二维小波变换更好的能量集中能力:能量集中在更少的系数上,更多的系数接近于零.因此,基于三维小波

变换的编码方法将会取得比基于二维小波变换更好的效果.



X-axis presents the unitary DWT coefficients or pixel values and the corresponding logarithmic number is signaled on Y-axis

图 3 小波变换前后的图像能量比较

Fig. 3 Energy evaluation of DWT coefficients compared with original image

表 1 统计了在不同上下文数目的情况下,所有被量化上下文的概率差值与其自身概率的比值.在试验结果中,这一比值随着上下文数目的减少而逐渐上升.这说明通过上下文量化,使获得的上下文之间有着更大的条件概率差异,符合上下文量化的目的.另一方面,在上下文的数目减少到 64 个的时候,虽然概率比值分别上升到了 0.26 和 0.10,但仍然满足“ $a$  和  $b$  相对于  $P(c_l)$  和  $P(d, c_l)$  来说很小”这一假设.这就使得本文提出的通过泰勒级数展开获得的上下文量化标准在整个量化过程中一直保持着正确性.

表 1 概率差值与自身概率值的比值(编码位平面=3)

Tab. 1 Ratio of the difference of probability to the probability (bitplane=3)

上下文数目	$\Delta P(c_l)/P(c_l)$	$\Delta P(d, c_l)/P(d, c_l)$
1 024	0.15	0.01
512	0.16	0.02
256	0.23	0.03
128	0.28	0.06
64	0.26	0.10

我们在 CPU 为 Core Duo T2300E(1.66 GHz) 的 PC 机上,利用本文提出的压缩算法对高光谱图像 Village 和另一幅高光谱遥感图像 Harbor (与 Village 具有相同图像类型和波段数目)的三维小波系数进行编码.图 4 显示了本文提出的算法和 3DSPIHT 以及 JPEG2000<sup>[9]</sup> 在相同码率下对 Village 进行压缩编码后,重建图像相对于原始图像的率失真曲线.而两幅高光谱图像的具体编码结果数据,则如表 2 所示.

表 2 高光谱图像 Village 和 Harbor 的压缩结果

Tab. 2 Compression results of hyperspectral image Village and Harbor

编码图像	编码长度 /kB	3DSPIHT /dB	原始上下文量化标准		改进后的量化标准	
			PSNR/dB	编码时间/s	PSNR/dB	编码时间/s
Village	251.8	27.54	28.66	143	28.59	21
	516.7	30.16	31.13	247	31.04	35
	1 281.6	32.47	33.27	375	33.20	52
	4 293.3	36.19	36.60	561	36.59	75
	9 300.0	41.52	41.78	750	41.75	98
Harbor	48.3	28.66	29.70	69	29.65	9
	118.7	31.92	32.75	101	32.71	14
	262.3	35.43	36.15	133	36.11	18
	520.6	39.08	39.58	197	39.56	26
	951.7	42.18	42.53	260	42.52	36

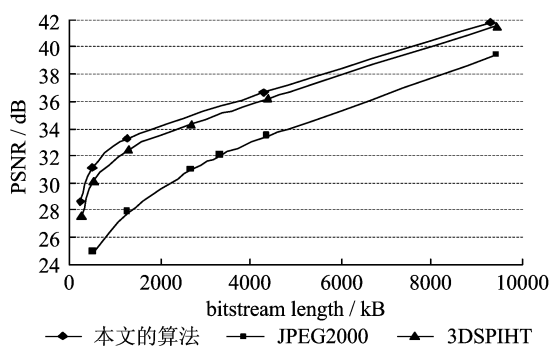


图 4 不同编码方法的压缩结果 (Village)

Fig. 4 Compression results of several coding methods (Village)

以上的实际编码结果表明:两种基于三维小波变换的方法都比基于二维小波变换的 JPEG2000 有 3~5 dB 的提高,这说明了在高光谱图像压缩中,三维小波变换拥有比二维小波变换明显的优势.而同样也是基于三维小波变换的压缩方法,由于本文提出的算法利用了小波系数在时、频域上的相关性,因此获得了比 3DSPIHT 高出 0.5~1 dB 的压缩效果.与此同时,采用本文提出的上下文量化方法,在重构的图像质量基本没有发生太大变化的条件下,和原始的上下文量化方法相比,大大缩短了编码时间,并且该方法得到的嵌入式比特流还具有质量可伸缩的特性,能够满足渐进传输的需要.

## 参考文献 (References)

[1] ZHANG Xiao-ling, SHEN Lan-sun. Research advances on lossless compression of hyperspectral image [J]. Measurement and Control Technology, 2004, 23(5): 23-26.

张晓玲,沈兰荪. 高光谱图像的无损压缩研究进展[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 23-26.

- [2] Dragotti P L, Poggi G, Ragozini A R P. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 416-428.
- [3] Tang X, Pearlman W A, Modestino J W. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet coding [C] // Proceedings of SPIE. SPIE, 2003, (5022): 1037-1047.
- [4] WANG Qi, GUO Lei. Multispectral images compression based on 1+2D wavelet coding [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9): 1126-1129.
- 王琪, 郭雷. 基于 1+2 维小波变换的多光谱图像压缩 [J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1126-1129.
- [5] ZHANG Zong-ping, LIU Gui-zhong. Advances in wavelet-based video compression [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 883-889.
- 张宗平, 刘贵中. 基于小波的视频图像压缩研究进展 [J]. 电子学报, 2002, 30(6): 883-889.
- [6] Rissanen J. Universal coding, information, prediction and estimation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30: 629-636.
- [7] SAN Xing, CAI Hua, WU Xiu-qing. Image coding based on spatial and frequency context model [J]. Mini-Micro Systems, 2006, 27(8): 1556-1559.
- 伞兴, 蔡华, 吴秀清. 基于时、频域上下文模型的图像压缩算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(8): 1556-1559.
- [8] Cai Hua, San Xing, Li Jiang. Embedded image coding with context partitioning and quantization [C] // 2005 IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2005, 2: 241-244.
- [9] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1. JPEG2000 Verification Model 7.2 [S].