

文章编号: 1001-9014(2004)05-0349-04

基于均匀网格编码量化的超光谱图像自适应压缩

吴颖谦, 方涛, 施鹏飞

(上海交通大学模式识别与图像处理研究所, 上海 200030)

摘要: 提出一种基于小波系数分类的超光谱图像压缩方法. 算法首先将各波段小波分解并将所得子带划分成子块, 而后根据子块活动性将其分类. 在分类基础上, 使用预测差分技术去除谱间冗余, 此过程中分别求取各子类的预测系数以反映子带的局部相关性. 而后利用均匀网格编码量化方法来量化残差系数序列, 最后使用自适应算术编码对量化码字进行熵编码. 为使编码器能在所有系数序列中最优地分配比特, 本文提出一个基于序列统计特性和网格编码量化器率-失真特性的比特分配算法. 实验证明该方法能高效地压缩超光谱图像, 表现出优异的压缩性能.

关键词: 超光谱图像; 自适应预测; 网格编码量化; 分类; 比特分配

中图分类号: TN919 文献标识码: A

ADAPTIVE COMPRESION OF HYPER-SPECTRAL IMAGES BASED ON UNIFORM TRELLIS-CODED QUANTIZATION

WU Ying-Qian, FANG-Tao, SHI Peng-Fei

(Shanghai Jiaotong University Institute of Image Processing & Pattern Recognition, Shanghai 200030, China)

Abstract: An approach for compression of hyper-spectral image based on classification of sub-bands was proposed firstly. The wavelet decomposition was carried out and the sub-bands were partitioned into sub-blocks. Then sub-blocks were classified based on their activity. Based on classification, the algorithm uses prediction to remove the spectral redundancy, in which the algorithm computes the predictor for each class to reflect local correlation in sub-band images. Then the uniform trellis-coded quantization is used to quantize the error images. At last, entropy encoding of the quantized codeword is performed by adaptive arithmetic encoding. To optimally allocate bits through all series of coefficients, an algorithm for bit allocation based on statistic characteristic of the series of coefficients and R-D characteristic of trellis-coded quantizer was proposed. The experiments show that the approach can efficiently compress hyper-spectral remote sensing images, and the excellent performance of the proposed algorithm is demonstrated.

Key words: hyper-spectral images; adaptive prediction; trellis coded quantization; classification; bit allocation

引言

超光谱图像压缩对于超光谱图像应用具有重要意义, 压缩研究的基础是图像中存在的冗余: 谱间冗余和空间冗余. 空间冗余来自自然图像固有的平滑性; 谱间冗余的存在是由于成像设备的频谱交叠, 而地物反射频谱覆盖了较大范围. 这些冗余都表现出明显的非平稳性. 冗余的处理是超光谱图像压缩的核心步骤, 主要方法有差分预测^[1]、变换编码^[2-3]等. 变换编码是最重要的有损压缩方法. 小波编码方法在近年压缩研究中得到充分重

视, 其基本内容是小波变换、量化、比特分配、熵编码等, 根据冗余的非平稳性优化上述内容是提高性能的有效手段.

1 压缩算法的流程

本文提出一个基于分类网格编码量化的自适应压缩算法, 其流程如图 1 所示, 其变换步骤采用 9-7 双正交小波滤波器组^[4]. 自然图像的小波子带具有明显的非平稳性, 子带中强活动性的区域涵盖了图像的细节信息, 显然其量化应更精细, 而低活动性区域的量化则可以较为粗糙, 空域自适应处理能较

收稿日期: 2003-06-10, 修回日期: 2004-06-11

基金项目: 国家 863 高技术研究资助项目(2002AA134020-05)

作者简介: 吴颖谦(1974-), 男, 湖北武汉人, 上海交通大学博士研究生, 主要从事图像压缩、小波变换、图像处理等方面的研究.

Received date: 2003-08-03, revised date: 2004-04-18

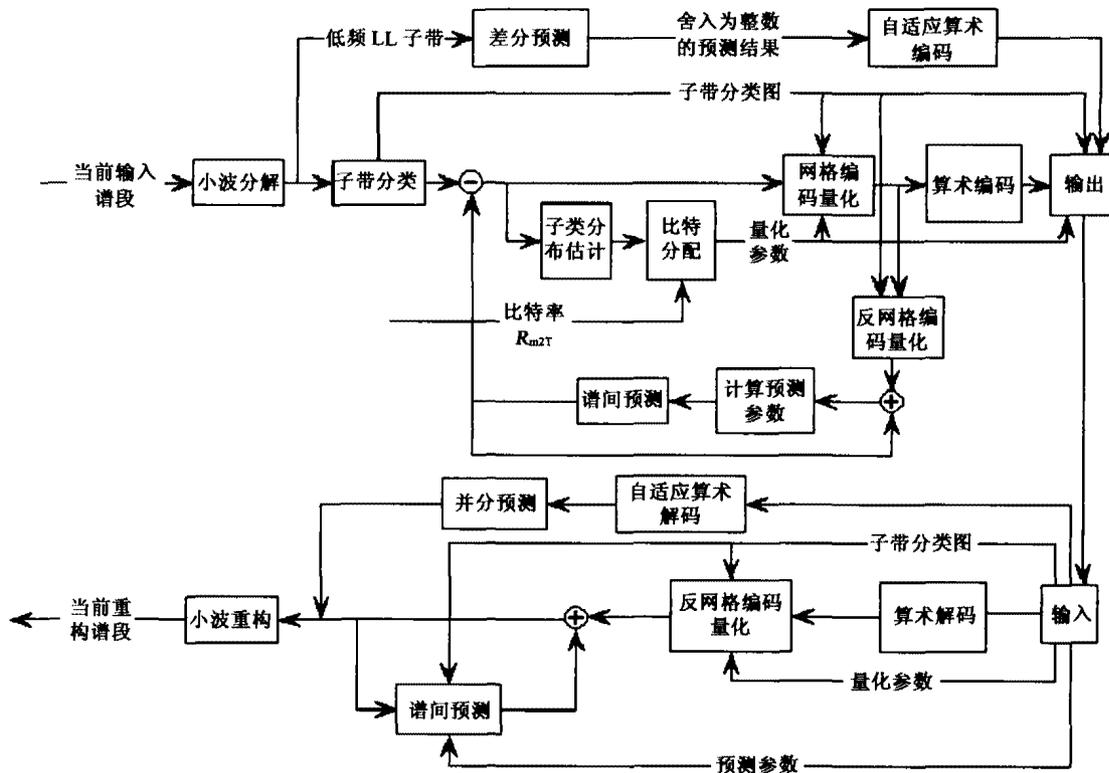


图 1 本文提出算法的流程
Fig. 1 The flowchart of the proposed algorithm

好地体现此思想. 本算法采用空间自适应量化, 它将子带划分成大小相同、非重叠的子块, 子块大小随小波分解级数加大而减小. 算法按照子块方差大小采用 K 均值聚类方法将子块分为 N 类, 每类系数使用不同的量化器. 算法将前一波段中子带分类结果作为相邻波段对应子带的 K 均值聚类过程的初始状态.

在分类基础上, 算法逐子类进行谱间冗余处理, 实现了自适应的谱间预测; 比特分配步骤则为所有子类设计各自的率失真最优均匀网格编码量化器, 实现了自适应量化. 分类过程产生的分类图在算术编码后作为附属信息保留, 以供解码过程使用. 各波段的 LL 子带并不进行分类, 而单独进行谱间和空间的差分预测并对舍入为整数的预测残差进行算术编码.

2 压缩算法的原理

2.1 自适应谱间预测

预测技术能以很小的计算代价描述图像的统计相关模型, 是一种有效的去相关方法. 本文采用的谱间预测器如式(1)所示:

$$\hat{I}(i, j, k) = a \cdot I(i, j, k - 1) + \beta \quad (1)$$

其中 i, j 表示空间位置, k 表示波段序号, α, β 为预测系数, M, N 分别表示相应地邻域范围.

超光谱图像的谱间相关性随着地物不同而变化, 本文提出以子带分类为基础计算各子类的预测系数, 由于基于分类的预测模型能反映局部区域的谱间相关性, 可有效提高效率. 各子类的预测器都作为附属信息保留以供解码端使用.

最小二乘准则要求各类的预测器应使该类中所有系数的预测误差平方和最小, 即 $e_k^2 = \|\hat{I}_{jk} - I_{jk}\|^2$ 最小, 向量 $\hat{I}_{jk} = [\hat{I}(1, j, k) \cdots \hat{I}(n_j, j, k)]^T$ 表示波段 k 中当前子带第 j 类所有系数的预测值, $I_{jk} = [I(1, j, k) \cdots I(n_j, j, k)]^T$ 为实际值, n_j 为子类 j 中系数个数, 相邻波段 $k-1$ 中对应位置的实际系数值表示为 $I_{k-1} = [I(1, k-1) \cdots I(n_j, k-1)]^T$, 容易得到:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{jk} &= \frac{n_j \cdot \sum_{i=1}^{n_j} I(i,j,k) \cdot I(i,k-1) - \sum_{i=1}^{n_j} I(i,j,k) \cdot \sum_{i=1}^{n_j} I(i,k-1)}{n_j \cdot \sum_{i=1}^{n_j} I(i,k-1)^2 - (\sum_{i=1}^{n_j} I(i,j,k))^2} \\ \beta_{jk} &= \frac{n_j \cdot \sum_{i=1}^{n_j} I(i,j,k) - a_{jk} \cdot \sum_{i=1}^{n_j} I(i,k-1)}{n_j} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

2.2 网格编码量化与 R-D 特性

网格编码量化 (Trellis-coded Quantization) 具有优异的量化性能^[5]. 非均匀的最优码书可使 TCQ 具有最优性能, 不同的最优性定义使 TCQ 适用于不同场合, 如[4]提出结合小波变换和考虑信道性能的非均匀网格编码量化的超光谱图像压缩方法, 但最优 TCQ 为获取非均匀的最优码书必须在不同比特率上分别训练最优码书, 不能得到连续的压缩率, 且需在编、解码端分别维护庞大的码书系统. 本文提出使用均匀码书的网格编码量化器, 其中唯一自变量是连续变化的量化步长.

给定输入信号分布, 容易对量化性能建模, 且执行效率高于非均匀量化. 广义高斯 (Generalized Gaussian) 分布能很好地拟合预测残差系数序列的概率密度分布^[6]. 均值为 0 的广义高斯分布形式如式(4)所示:

$$p(x) = \frac{v}{2\Gamma(1/v)} \eta(v, \sigma) \cdot \exp[-(\eta(v, \sigma) \cdot |x|)^v], \quad (3)$$

其中 $\eta(v, \sigma) = \frac{1}{\sigma} [\frac{\Gamma(3/v)}{\Gamma(1/v)}]^{1/2}$, 上式中为 σ 分布的

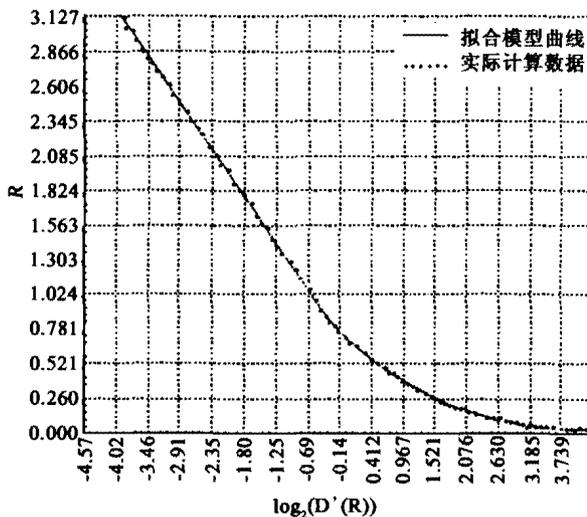


图 2 $R \sim \log_2(-D'(R))$ 的拟合曲线
Fig. 2 The fitted curve of $R \sim \log_2(-D'(R))$

方差, v 为形状因子, $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ 为伽马函数. 使用服从此分布的训练数据可方便地获取 TCQ 的 R-D 特性, 以供比特分配方法使用. 本文用 10 组大小为 10000 的单位方差随机数序列进行训练, 因子 v 分别为 [0.3, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 2.0], 获取了量化器的相关特性, 其中包括 $R \sim \lg(-D'(R))$ 和 $\lg(\Delta) \sim R$. 如图 2 所示的是 $v = 0.7$ 的随机序列得到的实验结果. 本文使用分段多项式曲线来获取相关函数, 拟合得到的分段多项式表达如下:

$$R = \begin{cases} g_1(\lg(-D'(R)), m_1), & R > r_b \\ g_2(\lg(-D'(R)), m_2), & R \leq r_b \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{和 } \log(\Delta) = \begin{cases} f_1(R, n_1), & R > r_b \\ f_2(R, n_2), & R \leq r_b \end{cases} \quad (5)$$

其中 r_b 为高、低比特率的分界, 本文中 $r_b = 1$, m_1, m_2, n_1, n_2 分别为拟合多项式阶数, 本文中 $m_1 = n_1 = 1, m_2 = n_2 = 6$. 上例中拟合的多项式如图 2 中实线所示.

2.3 子带概率分布模型和比特分配算法

算法首先必须估计系数的分布参数, 并将其与已有的训练结果对应. 本文中参数 σ 直接从系数中计算, 形状因子 v 则通过峰度来估计, 其形如(6)所示: $K = E(x^4)/(\sigma^2)^2 = F(v)$ (6)

其中 $F(v) = \frac{\Gamma(5/v) \cdot \Gamma(1/v)}{\Gamma(3/v)^2}$, 故在 $v = F^{-1}(E(x^4)/\sigma^4)$. 本文在实现中为 $v = F^{-1}(E(x^4)/\sigma^4)$ 建立查找表, 以便在编码过程中快速计算函数值.

为各子类设计率失真最优量化器将归结到比特分配问题, 即用网格编码量化器量化各子类系数时, 如何在子类概率分布估计的基础上, 确定量化各类系数的量化步长, 使产生的比特率之和等于目标比特率时, 产生的量化误差平方和能最小. 此约束优化问题可借助拉格朗日乘法等效为非约束优化问题:

$$\Delta_{mlk}' = \underset{\Delta_{mlk}}{\operatorname{argmin}} \{ J(\Delta_{mlk}, \lambda) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \beta_{lk} \gamma_l \sigma_{mlk}^2 D(\frac{\Delta_{mlk}}{\sigma_{mlk}}) + \lambda [\sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \beta_{lk} R(\frac{\Delta_{mlk}}{\sigma_{mlk}}) - R_{m,T}] \} \quad (7)$$

上式中, m, l, k 分别标示波段、子带、子类序号, β_{mlk} 考虑所有波段子带中各类系数长度影响, 而 γ_l 则补偿双正交小波滤波器能量的影响^[7]. 代价函数 J

(Δ_{mlk}, λ) 最小使得 $\frac{\partial J(\Delta_{mlk}, \lambda)}{\partial \Delta_{mlk}} = 0$, 进而得到式(8):



图3 原始图像第12个波段
Fig. 3 The 12th band of the original OMIS image



图4 0.5bpp 比特率时恢复的12波段
Fig. 4 The recovered 12th band at 0.5bpp



图5 0.25bpp 比特率时恢复的12波段
Fig. 5 The recovered 12th band at 0.25bpp

$$-\frac{\partial D(\Delta_{mk}/\sigma_{mk})}{\partial R(\Delta_{mk}/\sigma_{mk})} = \frac{\lambda}{\sigma_{mk}^2 \gamma_t} \quad (8)$$

此时最优 Δ_{mk} 保证式(9)成立,即:

$$\sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \beta_{lk} R\left(\frac{\Delta_{mk}}{\sigma_{mk}}\right) = R_{m,T} \quad (9)$$

迭代 λ_t , 可求得约束最优解:1) 选取 λ_k 与 λ_l ; 2) 当前 $\lambda_t = (\lambda_k + \lambda_l)/2$, 带入式(8)和式(5)计算

相应的 R_{mk} ; 3) 若当前 R_{mk} 满足式(9), 则跳至4), 否则按二分法处理 λ_k 与 λ_l , 跳至2); 4) 利用式(6)计算对应于 R'_{mk} 的步长 Δ'_{mk} , 迭代结束.

2.4 自适应算术编码

本算法采用自适应算术编码来编码量化码字, 网格编码量化中每一个量化码字都属于某超集 (A_0 或 A_1), 这要求条件算术编码, 即在编码码字 s_i 时不使用概率 $p(s_i)$ 而是条件概率 $p(s_i|A_j), j \in \{0, 1\}$.

3 实验结果与分析

为验证算法性能, 本文采用了大量 OMIS 超光谱图像进行实验, 所有实验图像的各波段大小为 256×256 , 进行3级小波分解, 每个子带分为4个子类, 各分解尺度的子块大小分别为8、4和4. 本节以一幅拍摄自山西某煤矿的图像进行分析.

图4所示为“山西”图像的第12个波段, 图5与图6分别为比特率为0.5bps和0.25bps时的解码图, 其对应的峰值信噪比分别为40.4dB和38.8dB. 为评价性能, 本节将文献[1]与[2]的算法与本算法进行比较. 为证明分类的优点, 本节也比较了去掉分类步骤的简化算法. 这些算法在几个典型比特率上的性能如表1所示, 表1表明COTCQ性能优于本算法, 其主要原在于它采用的非均匀最优码书. 在有损压缩中, 量化器的性能差异对算法性能具有决定性的影响. 虽然COTCQ还考虑了传输的误码率, 但优化码书的原则依然是最小失真, 训练的最优网格编码量化器比均匀码书量化器性能要优越. COTCQ在采用一个比本方法简单的谱间预测器的条件下, 依然能得到优于本算法的压缩结果. 本算法的网格编码量化器采用均匀码书, 仅就量化性能而言不及非均匀最优码书, 但非均匀最优码书要求在不同比特率上分别进行训练, 这一训练过程包括反复求取训练数据质心的迭代过程, 计算量远大于本算法的训练过程. 非均匀码书量化过程中包括大量的比较计算, 所需计算量大, 本文实验用COTCQ和均匀量化器量化同样大小的图像, COTCQ量化时间是均匀量化器的2.3~2.6倍. 均匀码书的网格编码量化器能容易地建立率失真关系的模型, 能方便的达到任意连续比特率, 且比特分配过程比非均匀码书更精确, 这是本算法性能与COTCQ差别不大的主要原因之一, 而且本文方法量化过程计算简单, 具有更高的执行效率. 如表1所示, 分类方法的压缩性能明显优于简化算法, 充分说明了分类带来的编码增益, 分类是算法性能接近COTCQ的另一个主要原因. (下接第356页)

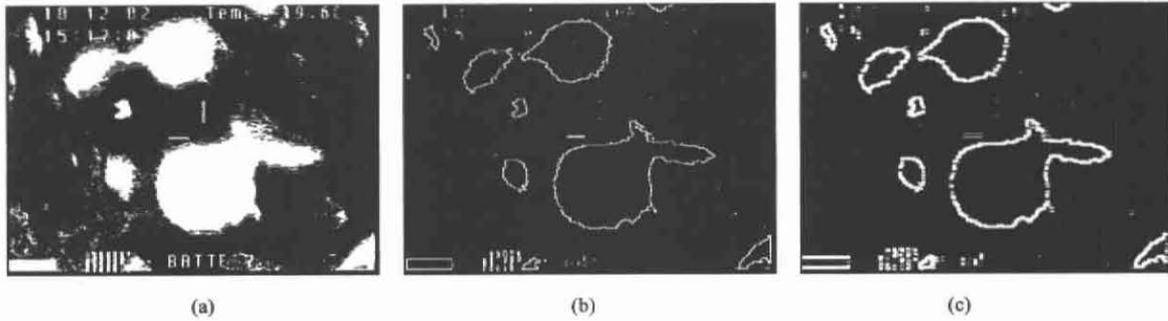


图5 Sobel 算子检测结果(a)二值图像(b)Sobel 算子检测结果(c)水平方向模板检测结果

Fig. 5 Extraction of citrus edges (a) binary image; (b) edge-extraction with Sobel; (c) edge-extraction with horizontal template

柑桔与树枝、树叶及其周围环境存在 1°C 左右的温差,即存在不同的热辐射特性,体现在红外热图像中不同的灰度信息,柑桔灰度值较高,树叶、树枝灰度值相对较低,利用二值化处理能较方便地实现水果与背景分割,实现水果的检测。

REFERENCES

[1] Slaughter D C, Harrell R C. Discriminating fruit for robotic harvest using color in natural outdoor scenes [J]. *Trans of the ASAE*, 1989, 32(2): 757—763.

- [2] Moctó E, Pla F, Juste F. Vision system for the location of citrus fruit in a tree canopy [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1992, 52: 101—110.
- [3] Sun Ming, Takahashi T, Bekki Eiji. Discrimination based on image processing at apple harvest (Part 1) — Binarization of fruit pictures taken from apple orchards [J]. *Journal of the JSAM*, 1997, 59(4): 53—60.
- [4] ZHANG Ru - He, JI Chang - Ying, SHEN Ming - Xia et al. Application of computer vision to tomato harvesting [J]. *Trans. of the CSAM* (张瑞合, 姬长英, 沈明霞等. 计算机视觉技术在番茄收获中的应用. *农业机械学报*), 2001, 32(5): 50—52.

(上接第 352 页)文献[2]将 2 维 SPIHT 算法扩展到 3 维并用于超光谱图像压缩。SPIHT 方法具有优异的压缩性能,它属于增强的零树类方法。如表 1 所示,它并不能得到比本算法更好的压缩效果。

表 1 “山西”OMIS 数据的实验结果

Table 1 The result of experiments on “ShangXi” OMIS hyper-spectral image

比特率 (bps)	峰值信噪比(dB)			
	本文算法	简化算法	COTCA[4]	3D-SPIHT[6]
1	42.6	41.7	43.2	41.2
0.5	40.4	39.3	40.7	39.1
0.25	38.8	38.3	39.5	38.1
0.125	37.9	37.1	38.4	37.2

4 结语

本文提出一种基于分类的超光谱图像压缩有损方法,它在子带分类基础上进行谱间差分预测,采用均匀阈值网格编码量化器进行分类量化,而比特分配步骤则为所有子类设计率失真最优的量化参数,实验表明这些步骤有效地提高了压缩效率,使算法

表现出优良的性能。

REFERENCES

- [1] Aiazzi B, Alpa P. Loss-less compression of multi/hyper-spectral imagery based on a 3-D Fuzzy Prediction [J]. *IEEE Trans. Geo-science and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2287—2294.
- [2] Abolesman GP, Lam T T. Robust hyper-spectral image coding with channel-optimized trellis coded quantization [J]. *IEEE Trans. Geo - science and Remote Sensing*, 2002, 40(4): 820—830.
- [3] Lim S, Sohn K. Compression for hyper-spectral images using 3-dimensional wavelet transform. *Proceeding of IEEE International Geo-science and Remote Sensing Symposium*, 2001, 1: 109—111.
- [4] Christopoulos C, Skodras A. The JPEG2000 still image coding system: an overview [J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2000, 46(4): 1103—1127.
- [5] Marcellin M W. On entropy-constrained trellis coded quantization [J]. *IEEE Trans. Communication*, 1994, 42(1): 14—16.
- [6] Aiazzi B, Alparone L. Information-theoretic assessment of sampled hyper-spectral images [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1447—1458.
- [7] Woods J W, Naveen T. A filter based bit allocation scheme for sub-band compression of HDTV [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1992, 1(3): 436—440.