

# 基于 IPCT/3-D Tarp 的高光谱图像无损压缩

罗欣<sup>1</sup>, 郭雷<sup>1</sup>, 刘震<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 研究了一种将变换矩阵分解为三角元素可逆矩阵 (TERM) 实现的主成分变换整数近似算法 (IPCT)。为限制误差和提高计算效率, 改进了 TERM 分解中选择主元的方法。结合可逆整数 PCT 和三维 Tarp 编码技术, 提出了一种新的高光谱图像无损压缩算法。该算法在进行空间维小波变换以后, 利用改进的 IPCT 去除谱间相关; 在编码阶段, 新颖的三维 Tarp 编码器能利用五个简单的递归滤波器进行概率估计, 以驱动一个非自适应算术编码器, 对变换系数的显著性映射和细化信息进行熵编码。该算法复杂度较低, 能够产生嵌入式码流, 并且较已有的算法能获得更高的压缩比。

**关键词:** 高光谱图像; 无损压缩; 整数主成分变换; 三维 Tarp 编码

**中图分类号:** TP751.1      **文献标识码:** A

## LOSSLESS COMPRESSION OF HYPERSPECTRAL IMAGERY BY IPCT AND 3-D TARP CODER

LUO Xin<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Automation and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Based on the factorization of transform matrix in triangular elementary reversible matrices (TERM), an integer approximation algorithm of the principal component transform (IPCT) was proposed. The pivoting method of TERM factorization was improved in order to obtain limited error and enhance computational efficiency. And a new lossless compression algorithm for hyperspectral imagery was developed by combining the perfectly reversible integer PCT with the 3-D Tarp coder. After an integer wavelet transform was applied in spatial domain, the improved IPCT was used as the inter-band decorrelating transform. In coding stage the novel 3-D Tarp coder allows probability estimation with five simple recursive filters. And this probability estimate can be used to drive a non-adaptive arithmetic coder to entropy code significance-map and refinement information of transformed coefficients. The main advantage of our compression algorithm is of low complexity and it can yield embedded bitstreams with higher compression ratios compared with the existing algorithms.

**Key words:** hyperspectral imagery; lossless compression; integer PCT; 3-D Tarp coding

### 引言

高光谱技术是 20 世纪 80 年代初在遥感界发展起来的新兴研究领域, 是当前遥感的前沿技术。高光谱遥感光谱分辨率在可见光区高达纳米数量级, 往往具有多波段特点, 在可见到近红外光谱区光谱通道多达数十至数百<sup>[1]</sup>。由于具有足够的光谱分辨率, 因此, 高光谱数据已经被广泛的应用于亚像元目标检测、混合像元分类、物质成份量化等方面<sup>[2,3]</sup>。

高维数据的优越性是以增加数据量和数据复杂性为代价的。由于传输速度和存储容量的限制, 开发有效的高光谱图像压缩算法的研究也日益增加。

尽管有损压缩能提高压缩比, 但由于获取高光谱图像的成本相当高, 而光谱信息的损失可能影响高光谱图像的遥感应用价值, 因此无损压缩更适用于高光谱图像, 而本文也将主要研究高光谱图像无损压缩算法。高光谱图像一般具有空间和谱间两种相关<sup>[4]</sup>, 所以基于变换的无损压缩方法一般包括

去相关和编码两个阶段. 在去相关阶段, 利用现有的标准灰度或静止图像压缩方法就能去除空间相关; 然而, 如何有效的利用高光谱图像相邻波段间的冗余, 还值得研究. 另外, 尽管许多算法在高光谱图像编码方面表现出了良好的性能, 然而它们不能产生嵌入式码流以实现图像的渐进传输和多分辨率重构.

考虑到以上因素, 本文开发了一种新的低复杂度的高光谱图像无损压缩算法, 称为 IPCT/3-DTarp 算法. 该压缩策略采用整数小波变换去除空间相关, 同时采用提出的整数 PCT 去除谱间相关, 最后三维 Tarp 编码器进一步去除各变换系数间存在的冗余, 并产生嵌入式码流.

## 1 整数变换

在利用变换的方式对数字信号进行无损压缩时, 通常要求使用的变换必须是从整数到整数的映射且完全可逆. 即应对将采用的变换进行修改, 得到与原变换效果最为近似的整数版本.

### 1.1 整数主成分变换

主成分变换 (Principal Component Transform, PCT) 是理论上最优的去相关变换, 已经广泛地用于高光谱图像谱间的信息提取和冗余去除<sup>[5]</sup>. 然而, 由于实数的变换信号很难进行熵编码, PCT 目前仍主要用于有损压缩.

令  $x$  为  $N$  维高光谱像素向量, 主成分变换定义为

$$y = A'x \quad (1)$$

这里  $A$  为由图像协方差矩阵  $\Sigma_x$  的单位特征向量组成的矩阵 ( $t$  表示转置操作). 根据 Hao P. 和 Shi Q. 的理论<sup>[6]</sup>, 本文提出了一种整数 PCT 的构造和实现方法, 简要介绍如下:

首先, 可以找到一些具有元素可逆结构的矩阵, 称为元素可逆矩阵 (Elementary Reversible Matrix, ERM). 对角线元素都是整数的上三角矩阵或下三角矩阵就是一种 ERM, 称为三角元素可逆矩阵 (Triangular ERM, TERM), 如果 TERM 对角线上的整数都是 1, 就是单位三角矩阵. 另一种可行的 ERM 结构是单行 ERM (Single-row ERM, SERM), 其非对角线上的元素只有一行不全为零, 对角线上的元素也都是整数. 同时也存在单位 SERM, 定义为  $S_m = I + e_m s_m^T$ , 标准基础向量,  $e_m$  为取自单位矩阵的第  $m$  列的标准基向量,  $s_m$  为第  $m$  个元素为 0 的列向量,  $m = 1, 2, \dots, N$ .

根据文献<sup>[6]</sup>, 对于 PCT 由于  $A$  为非奇异矩阵

且  $|\det A| = 1$ , 存在  $A'$  的 TERM 分解  $A' = PLUS$  (其中,  $L$  和  $U$  分别为单位下三角和上三角阵,  $P$  为置换矩阵,  $S$  为单位 SERM). 于是, 谱间整数 PCT 可以由 3 个 TERM 实现, 变换矩阵分解算法与  $LU$  分解相当近似. 不同之处仅在于在使用高斯消元法消去矩阵的第  $k$  列以前, 需要通过列变换将对角线上的第  $k$  个元素转化为 1. 然而, 经实验发现对于低维线性变换矩阵, 文献<sup>[6]</sup>的方法能将误差控制在较小的范围内; 但当维数增加时, 误差将会迅速繁殖和扩大. 因此, 必须选择适当的主元进行列变换, 从而使误差最小化. 本文提出的方法直接选择子块

$$A_k^{(k-1)} = \begin{bmatrix} a_{k,k+1}^{(k-1)} & \cdots & a_{k,N}^{(k-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N,k+1}^{(k-1)} & \cdots & a_{N,N}^{(k-1)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

中的最大值元素  $a_{i,j}^{(k-1)}$  作为主元, 这里  $A_k^{(k-1)}$  表示原始矩阵经过  $k-1$  次高斯消元后右下角的子块, 该方法可称为全局最大值法.

于是, 改进的 IPCT 可以通过 3 个 TERM 实现, 计算流图如图 1 所示. 单位上三角矩阵串行实现的计算次序为自上而下, 单位下三角矩阵串行实现的计算次序为自下而上. IPCT 的逆变换可以用同样的计算网络, 只是数据反向传输、结点的加变为减同时乘以整数因子的倒数、以及串行实现的计算次序颠倒. 这样的计算结构能够实现整数到整数的映射, 并确保完美重构和原位运算.

### 1.2 空间去相关变换

通常高光谱数据在光谱方向相对平滑, 在空间方向可能表现出明显的局部特性. 因此采用小波作为空间去相关变换, 能够适应像素局部统计特性的变化. 本文在压缩实验中将利用样条 5/3 小波去除高光谱图像的谱内冗余, 主要原因是样条 5/3 小波滤波器相对较短, 对图像局部内容的变化能较好的适应; 同时文献<sup>[7]</sup>中指出对于灰度图像, 最好的压缩结果是利用样条 5/3 小波得到的.

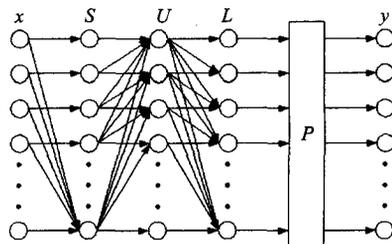


图 1 整数 PCT 的实现流图

Fig. 1 Flowchart structure of integer PCT implemented by three TERMS

## 2 Tarp 编码的原理与实现

### 2.1 Tarp 滤波器技术

去相关变换后本文选择了最近提出的 Tarp 编码器<sup>[8]</sup>作为无损编码器. Tarp 算法包括一个层进式小波系数编码过程,该过程利用著名的非参数概率估计技术——Parzen 窗技术估计显著性概率. 对于一个贝努利随机变量序列,其为 1 的概率是缓慢变化的,那么,可以通过下面的一个一阶递归滤波器对下一个变量为 1 的概率进行简单的估计

$$p(t+1) = \alpha p(t) + (1-\alpha)v(t), \quad (4)$$

$p(t)$  为位置  $t$  为 1 的概率估计,  $v(t)$  为当前  $t$  位置的观测值,  $\alpha$  为递归参数. 很明显  $p$  是  $v(t)$  与脉冲响应为

$$f(t) = \begin{cases} a^t(1-a), & t \geq 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

的滤波器的卷积,同时  $f$  是一个概率密度函数(0 到 1 区间的有界函数,积分为单位 1),对于数据流中的每一个 1,  $p(t)$  是形状由  $f$  确定的 Parzen 窗的和. 参数  $\alpha$  自适应速度也可以看作一个平滑因子,数据的噪声程度越大,  $\alpha$  的值就应该设置的越高.

### 2.2 3-D Tarp 编码器

Tarp 滤波器的概念可以推广到三维(3-D)<sup>[9]</sup>,从而得到 3-D Tarp 编码器. 3-D Tarp 编码器本质就是利用 5 个一维(1-D)滤波器在图像编码中实现对小波系数显著性的概率估计. 特别是三维小波系数显著性的概率估计是基于 3 个邻近值的随机信息,它们分别来自左边、上面和前一波段同一位置. 概率估计过程严格遵循先列后行再光谱片段的扫描顺序. 3-D Tarp 滤波器的计算可总结为三组等式. 第一组实现右向滤波器  $p_1$  和下向滤波器  $p_2$ , 同时更新概率  $p$

$$\begin{cases} p(x_1, x_2, x_3) = \alpha p_1(x_1, x_2 - 1) + \alpha p_2(x_2) + \alpha p_3(x_1, x_2) \\ p_1(x_1, x_2) = \alpha p_1(x_1, x_2 - 1) + \beta v(x_1, x_2, x_3) \\ p_2(x_2) = p_1(x_1, x_2) + \alpha p_2(x_2) \end{cases}, \quad (6)$$

其中  $p_3$  为光谱方向的滤波器. 当整行被编码以后,第二组利用左向滤波器  $p_4$  更新  $p_2$  和  $p_3$

$$\begin{cases} p_2(x_2) = p_2(x_2) + \alpha p_4(x_1, x_2 + 1) \\ p_3(x_1, x_2) = p_2(x_2) + \alpha p_3(x_1, x_2) \\ p_4(x_1, x_2) = \alpha p_4(x_1, x_2 + 1) + \beta v(x_1, x_2, x_3) \end{cases}, \quad (7)$$

当完成一个完整的片段编码以后,第三组滤波器将更新  $p_3$ , 扫描顺序是自下而上和自左向右

$$\begin{cases} p_3(x_1, x_2) = p_3(x_1, x_2) + \alpha p_5(x_2) \\ p_5(x_2) = p_1(x_1, x_2) + \alpha p_5(x_2) + \alpha p_4(x_1, x_2 + 1) \end{cases}, \quad (8)$$

根据 Parzen 窗的理论,  $\beta = (1-\alpha)^3 / (3\alpha + \alpha^3)$  是保证所有概率的和为 1 的归一化系数.

和其它基于小波的嵌入式编码器一样, 3-D Tarp 编码器采用通常的位平面编码形式,即显著性过程和细化过程连续进行,显著性阈值在每个通道后递减. 在显著性过程中,通过一个由 Tarp 滤波器驱动的统一分布的非自适应二值算术编码器对每一系数的显著性状态进行编码;当系数从非显著转变为显著性系数时,系数的符号也将被编码. 在细化过程中,除了前一显著性过程刚发生状态转变的系数外,所有已知的显著性系数都将通过编码当前位平面比特值进行细化. 对于显著性过程中的符号位编码和细化过程的细化比特编码,在非自适应算术编码器中则使用固定概率 0.5. 显而易见, 3-D Tarp 编码器没有复杂的上下文模型,也不需要跨子带及跨尺度的符号集(如常见的零树结构),因此 3-D Tarp 编码器的实现是相当容易的.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 TERM 分解方法比较

首先,以用随机矩阵的 QR 分解构造了一个 30 维的正交实数矩阵  $A$ , 并随机产生一个在  $[-2^{15}, 2^{15}]$  上服从均匀分布的 30 维的整数向量  $x$ , 测试了本文提出的 TERM 分解算法的精度. 图 2 为重复 1000 次计算的误差分布直方图,其中横坐标表示误差取值,纵坐标表示各取值的出现频数. 这里误差定义为实数变换与其整数实现间结果差值的绝对值再取整,即

$$\text{round}(\|Ax - \tilde{A}x\|) = \text{round}(\|Ax - P\tilde{L}\tilde{U}\tilde{S}x\|), \quad (9)$$

$\tilde{L}$ 、 $\tilde{U}$ 、 $\tilde{S}$  分别表示相应实数三角矩阵的整数实现. 实验结果表明:全局最大值法与 Galli 提出的类全局法(quasi-complete)<sup>[10]</sup>的精度相当,均能将误差保持在较小的范围内;在考虑效率的前提下,全局最大值法更具有优势,因为全局最大值的方法仅需要进行比较运算.

### 3.2 高光谱压缩

这里采用被研究界广泛使用的 AVIRIS 图像数据进行了编码实验. 这些数据来自 5 个地区,包含不同的场景,尺寸为  $614 \times 512$ , 每像素为 16 位,共 224 个波段. 为便于实验,将每一场景均裁减为  $512 \times 512 \times 224$  大小.

考虑到计算的简单性,在三维高光谱数据中每 32 波段就进行一次 IPCT 变换;在空间维则进行 5 级整数  $5/3$  小波变换,在由以上两种操作生成的子

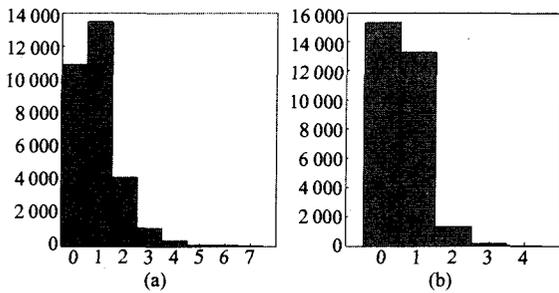


图2 整数变换与实数变换的误差分布直方图 (a) 全局最大值法 (b) 类全局法

Fig.2 Histogram of the difference between the real transform and its integer approximation by different pivotings (a) complete-maximum pivoting (b) quasi-complete pivoting

表1 高光谱图像无损压缩结果

Table 1 Compression ratio results for the different algorithms and images

Image	JPEG-LS	JPEG2000	3-D CALIC	IPCT/3-D Tarp
Cuprite	1.95	1.89	2.75	2.93
Jasper	1.96	1.90	2.86	3.01
Low altitude	2.07	2.02	2.94	3.07
Lunar lake	2.08	2.02	2.81	3.15
moffet	1.95	1.88	2.72	2.94
Average	2.00	1.94	2.82	3.02

块划分中进行 3-D Tarp 编码。同时,通过实验也发现先进行整数小波变换再进行整数 PCT,能获得更高的压缩性能。在所有的测试中,Tarp 滤波器的递归系数  $\alpha$  均设为 0.5 (对于高光谱图像,当  $\alpha \in [0.3, 0.5]$  时,3-D Tarp 编码的性能都是相当稳定的)。实验中比较了基于预测的 JPEG-LS 算法(一种先进的无损压缩标准),基于小波的 JPEG-2000 算法(最近开发的图像压缩标准),以及 3-D CALIC<sup>[11]</sup> (另一种著名的三维无损压缩算法),实验结果见表 1 所列。

表 1 的实验结果表明:提出的无损压缩算法明显优于 JPEG-LS 和 JPEG-2000,因为后两者都是一般应用目的图像压缩算法,没有考虑高光谱图像特有的谱间相关性。本文提出的算法比 3-D CALIC 得到更高的压缩率,这是因为 IPCT 的使用较好的达到了能量集中的目的,同时 3-D Tarp 滤波器比基于上下文的自适应预测的方式更能从所有扫描过的像素中捕获信息。另外,对于不同场景的图像,同一算法的压缩率均略有不同,这是由于一些图像含有更丰富的细节和纹理所致。

#### 4 结语

提出了一种基于整数主成分变换(IPCT)和 3-D

Tarp 编码技术的新型低复杂高光谱图像无损压缩算法。整数 PCT 能将整数直接映射为整数而没有信息损失。简单的全局最大选主元保证了精度,降低了 TERM 分解的计算量。对于高光谱图像而言,Tarp 滤波技术是一种的很有前途的嵌入式编码方式,特别是其具有低复杂度的优点,更具有实际应用价值。当然,提出的压缩策略也适用于如多光谱图像等其它一些多成分图像。

#### REFERENCES

- [1] LI Qing-Li, XUE Yong-Qi, WANG Jian-Yu, et al. Atmospheric correction of PHI hyperspectral imagery [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李庆利, 薛永祺, 王建宇, 等. PHI 高光谱图像的大气校正算法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(4): 316—320.
- [2] ZHANG Bing, CHEN Zheng-Chao, ZHENG Lan-Fen, et al. Object detection based on feature extraction from hyperspectral imagery and convex cone projection transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张兵, 陈正超, 郑兰芬, 等. 基于高光谱图像特征提取与凸面几何体投影变换的目标探测. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(6): 441—445.
- [3] XU Wei-Dong, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Comparison of different spectral match models [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (许卫东, 尹球, 匡定波. 地物光谱匹配模型比较研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 296—300.
- [4] Adaptive compression of hyperspectral images based on uniform trellis-coder quantization [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴颖谦, 方涛, 施鹏飞. 基于均匀网格编码量化的超光谱图像自适应压缩. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(5): 349—352.
- [5] Cagnazzo M, Poggi G, Vedoliva L. A Comparison of flat and object-based transform coding techniques for the compression of multispectral images [C]. In: Merce B ed, Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing. Piscataway: IEEE Publications, 2005, 1: 657—660.
- [6] Hao P, Shi Q. Matrix factorization for reversible integer mapping [J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*. 2001, 49(10): 2314—2324.
- [7] Adams M D, Kossentini F. Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression performance evaluation and analysis [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*. 2000, 9(6): 1010—1024.
- [8] Simard P, Steinkraus D, Malvar H. On-line adaptation in image coding with 2-D tarp filter [C]. In: Storer J A, Cohn M eds, Proc. IEEE Conf. Data Compression. Los Alamitos: the IEEE Computer Society Press, 2002, 1: 23—32.
- [9] Wang Y, Rucker J T, Fowler J E. Three-dimensional tarp coding for the compression of hyperspectral images [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 1(2): 136—140.
- [10] Galli L, Salzo S. Lossless hyperspectral compression using KLT [C]. In: Stein T I ed, Proc. IEEE Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing. Piscataway: IEEE Publications, 2004, 1: 313—316.
- [11] Wu X, Memon N. Context-based lossless interband compression—Extending CALIC [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2000, 9(6): 994—1001.