

基于 DWT 和减影混合变换的超光谱图像无损压缩算法研究^{*}

解成俊 田永清

(北华大学数字图像处理研究所 吉林 132011)

摘要 提出了一种新的去冗余方案,利用 DWT 去除空间冗余、无边界延拓 DWT 和帧间减影混合变换去除谱间冗余、改进的 EBCOT 算法进行编码。实验结果表明,无损压缩远好于 JPEG-LS、WinZip、ARJ、DPCM、中国科学院一小组、NMST、MST 的结果,以 JPL 的 Canal 测试图像为例,平均而言无损压缩比分别比上述算法提高了 43%、38%、36%、31%、17%、13%、10% 左右。本文算法运算速度快,便于硬件实现。

关键词 空间和谱间相关冗余去除,无损压缩,改进的 EBCOT 算法

Research of Lossless Hyper-spectral Image Compression Algorithm Based on the Combination of DWT Transform and Subtraction Transform

XIE Cheng-Jun TIAN Yong-Qing

(Digital Images Processing Institute of Beihua University, Jilin 132011)

Abstract This paper presents a new redundancy elimination approach, it uses CDF(2,2) DWT to eliminate spatial redundancy, subtraction between frames and boundless extension CDF(2,2)DWT transform to remove spectral redundancy, and improved EBCOT algorithm to finish compression coding. The results show that in lossless image compression applications the method is much better than JPEG-LS, WinZip, AR, DPCM and the research result of a Chinese Academy of Sciences research team, NMST, MST. Using test set of Canal images of JPL laboratory as a example data set, on the average the compression ratio using this algorithm increases about 43%, 38%, 36%, 31%, 17%, 13%, 10% respectively comparing to the above algorithms. The algorithm presents in this paper has priority in aspects such as computing efficiency and hardware realization convenience.

Keywords Spatial and spectral redundancy elimination, Lossless image compression, Improved EBCOT algorithm

1 引言

超光谱图像是相对于多光谱图像($\lambda/\Delta\lambda \sim 10$, 记录几个至十几个分立的光谱图像)而言的,是以较高的光谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda \sim 100$)记录景物连续的光谱图像(几十个乃至多达几百个)。超光谱图像是一种三维立体图像,即在普通二维图像的基础上又多了一维光谱信息,因此超光谱遥感图像的数据量庞大。对超光谱图像进行压缩编码,可以节省传输时占用的信道容量及存储时占用的存储容量,从而提高处理、传输与存储的效率。因此,对超光谱遥感图像压缩编码的研究具有重要的应用价值。由于遥感图像信息十分宝贵,一般采用无损压缩^[1]。目前,一直没有形成一套成熟或标准的超光谱图像压缩技术^[2]。

对超光谱图像压缩的研究,主要集中在去冗余和编码算法两个核心展开。去冗余主要是去除空间冗余和谱间冗余。空间冗余来自自然图像固有的平滑性,谱间冗余是由于成像设备的频谱交叠,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,冗余的去除还有许多理论和技术难点仍待解决,是超光谱图像压缩的核心步骤^[3],对提高压缩效率具有重要作用,主要方法有预测、变换等。

去除谱间冗余通常有 DPCM 预测、最优线性预测、自适应非线性性和线性预测、双向预测、组合预测、对残差图像的二次

预测等^[4], KTL(Karhunen-Loeve Transform)变换、自适应 KLT 变换、整数 KLT 变换^[5]、经验正交函数 EOF(Empirical Orthogonal Functions)^[6]、一维 DCT 变换、一维 DWT、一维 DWPT(discrete wavelet packet transform)^[7]。DCT 变换、经验正交函数 EOF 的主要缺点是谱间去相关的效率比较低。KLT 是一种最优线性变换,与其它正交变换相比,它的能量最集中,误差最小,去除图像中的谱间相关性效果相对而言较好,但复杂度较高,变换的基矢量需要计算原始数据相关的协方差矩阵和特征矢量,变换后需要把 KLT 基矢量写进码流中,所以虽然去冗余效果好,但是总的压缩效果却未必是最好的,也无法应用在去空间冗余的二维变换中。小波变换采用的通常是二进小波变换,需要对变换数据进行重整规则化,容易造成数据的膨胀和重整规则化后边界扩充的冗余,但对压缩的效率影响不大。谱间相关冗余和空间相关冗余的特点不同^[6],在考虑去冗余策略时需要将这些特点考虑进去。

编码器的设计通常要结合变换来展开,根据变换的性质设计相应的编码器。在超光谱图像压缩中,常采用的算法有 JPEG2000^[8](EBCOT)、SPIHT^[7]、利用上下文模型实现的改进,这些编码算法都是根据小波变换的性质来设计的。笔者利用 CDF(2,2)小波提升变换去除空间相关冗余;帧间 CDF(2,2)小波提升变换和减影混合变换去除谱间相关冗余,这样的混合变换可以避免谱间 DWT 的边界延拓问题,有效提高

^{*} 获国家自然科学基金资助,谱间(≥ 3 波段)去冗余最优矩阵整数可逆变换求解、空间变换最优结合、优化编码算法超光谱图像压缩方案研究(60672156)、吉林省科技厅资助项目(20060519)。解成俊 教授,博士,研究方向为遥感图像处理;田永清 研究员。

压缩效率;改进的 EBCOT 算法进行压缩编码,关于这一主题研究未见报道。

2 改进的 EBCOT 算法

EBCOT 算法是将小波变换后的子带分成系数矩阵块,并独立地在这些“码块”上执行位平面编码。通常,这些数据块的大小是 64×64 或 32×32 。EBCOT 将编码分成四部分,即重要性编码、符号编码、‘0’的 RLC 编码、基于上下文的自适应二进制算术编码(Context-based adaptive binary arithmetic coding——CABAC)。本文在此算法的基础上做一些改进。

2.1 基于 Rice 码的 RLC 编码

本文 RLC 编码采用 Rice 码实现, Rice 码由基本序列(FS, Fundamental Sequence)和劈分(Sample Splitting)两个部分组成。FS 是一种逗号码,码字唯一,不需要码本。给定编码参数 k , 对于一个 n 位数据,编码时,首先对 $n-k$ 个最高有效位使用 FS 进行编码,接着直接用二进制编码随机的 k 位,然后使用 FS 编码后的结果与 k 位 LSB (Least Significant Bit) 相连形成 Rice 码。Rice 编码需要对参数 k 进行有效的估计, Rice 码通常采用后缀定长的码。笔者采用后缀不定长的码,其码字的形成见本文 2.3 节的 Step3。

2.2 DWT、减影变换及编码块处理

在 EBCOT 算法中,变换对压缩效果的影响非常明显。在普通的图像压缩中,仅涉及二维 DWT,但在超光谱图像压缩中涉及的是三维图像变换,即一维谱间变换和二维空间 DWT。下面叙述本文的实现过程。

2.2.1 空间 DWT

二维空间 DWT 利用 CDF(2,2) 双正交小波,采用对称延拓实现基于整型数运算的可逆双正交小波变换,变换如下。

$$\text{正变换: } d(n) = x(2n+1) - \left[\frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right],$$

$$s(n) = x(2n) + \left[\frac{d(n-1) + d(n)}{4} \right]$$

$$\text{可逆反变换: } x(2n) = s(n) - \left[\frac{d(n-1) + d(n)}{4} \right],$$

$$x(2n+1) = d(n) + \left[\frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right]$$

设进行 J 级小波变换,则变换后各子带分别为 LL_J 、 HL_J 、 LH_J 、 HH_J 、……、 HL_1 、 LH_1 、 HH_1 。将图像进行“穷尽”离散小波变换,则 LL_J 可能仅包含一个像素。为实现有效的编码,从第 J 级到第 s 级作为一个编码块(LL_J 、 HL_J 、 LH_J 、 HH_J 、……、 HL_s 、 LH_s 、 HH_s),然后依次将每级的三个高频子带各作为一个编码块进行编码,即 HL_{s-1} 、 LH_{s-1} 、 HH_{s-1} 作为独立的编码块,……、 HL_1 、 LH_1 、 HH_1 作为最后一个编码块。这样作可以提高基于 Rice 码的 RLC 编码效率。

2.2.2 谱间 DWT 和减影混合变换

在此没有采用三维 DWT 的重要原因是,在谱间方向 DWT 可能涉及边界延拓的问题。通常在三种边界延拓方法中(零延拓、对称延拓、周期延拓),对称延拓的压缩效果比较好。但是在谱间方向延拓,一点就是一帧,这个数据量是相当大的,严重影响了压缩效率。为了在谱间实施无边界延拓的 DWT,笔者采取谱间 DWT 和减影混合变换来解决这个问题。假设参与压缩编码的超光谱图像共 P 帧,而且 P 可以表示为

$$P = 2^a + 2^b + \dots + 2^c + Q$$

共 M 个 2 的幂次

也就是说,将 P 帧超光谱图像分成两组,第一组: 2^a 、 2^b 、……、 2^c , 共 M 个 2 的幂次部分;第二组: Q 个单帧部分。谱间变换包含两步:

Step1: Q 个单帧进行相邻帧的减影变换,其中有一个参考帧在第一组中选出。

Step2: 针对这 M 个部分分别做 CDF(2,2) 小波变换,变换后出现 M 个低频帧。这 M 个低频帧是 M 个部分的近似,以其中的某一帧为参考帧做减影变换,这样做可以有效地提高压缩效率。

2.3 重要性、符号、Rice 码的 RLC 编码算法

设系数块: $\{U_i | 0 \leq i \leq L-1\}$, $U_i = \pm b_M b_{M-1} \dots b_0$, v_i 代表位平面, F_i : 已出现像素 U_i 最高有效位的标志, $F_i = 1$, 意味着已找到了 U_i 最高有效位。 n : 代表比特位为零的求和。 k : 零计数自适应调节因子。

Step 1: 初始化, 对所有 i 置 $F_i = 0$, $v = 0$, $k = 0$, 计算系数块 $\{U_i | 0 \leq i \leq L-1\}$ 的最高有效位 $v_{\max}$ 。

Step 2: 计算 b_v = 第 v 个位平面 $|U_i|$ 的比特值, 将集合 $\{b_v\}$ 分成两组, 即 $B_s = \{b_v | F_i = 0\}$, $B_R = \{b_v | F_i = 1\}$, $v = v + 1$ 。

Step 3: 如果 $B_s \neq \Phi$, 对于 B_s 中每一元素, 按元素排列的增序做:

- if ($b_v = 0$) $n = n + 1$;
- if ($b_v = 1$) { $\blacktriangle$ while ($n > (1 \ll k)$) { 输出 0; $n = n - (1 \ll k)$; $k++$;}
 $\blacktriangle$ 输出 1; 输出 k 位 n 值; 输出 n 的符号;
 $\blacktriangle n = 0$; $k--$;}
 $\bullet$ while ($n > (1 \ll k)$) { 输出 0; $n = n - (1 \ll k)$; $k++$;}
 $\bullet$ if ($n > 0$) { 输出 0; $n = n - (1 \ll k)$; $k++$;}。

Step 4: 如果 $B_R \neq \Phi$, 对于 B_R 中每一元素, 按元素排列的增序做, 输出 b_v 。

Step 5: 如果 $v < v_{\max}$, 返回 Step 2, 否则结束。

2.4 CABAC 编码

Step 1: 根据相邻已编码符号的信息, 为当前符号选择合适的上下文模型。

Step 2: 对输入符号作 CABAC 编码。

2.5 压缩算法实现流程

3 实验结果与分析

测试的超光谱图像 Canal 为美国 JPL 实验室研制的 AVIRIS, 在加拿大运河平原地区所拍摄, 图像参数为: 200 行、200 列、223 波段(Bands)、每个像素 2 个字节; 拍摄地点: Canal Flat, 北纬 50.0667°, 西经 115.5917°; 拍摄高度: 19,860m; 光谱分辨率: 10nm; 光谱范围: 400~2400nm。

为了和其他研究小组的研究结果进行比较, 在此选择 Canal 图像的 Band24~Band37 共 14 个波段的数据以及 Band21~Band30 共 10 个波段的数据进行实验, 因为在这些波段上有可以对比的研究结果。

3.1 算例一: Canal 的第 21 至 30Band 压缩实验

对超光谱图像 Canal 的第 21 至 30Band (共 10 个 Bands) 数据进行了测试, 按照 2.5, 对这 10 个波段分成两组去除谱间冗余。第一组共 2 个波段, 实施相邻波段减影去除谱间冗余。由于要用到第二组的一个波段, 所以在编码前一定要先

实施减影变换,后实施谱间小波变换,译码时反之。第二组共8个波段,实施CDF(2,2)小波提升变换去除谱间冗余。实施谱间变换后再对变换后的各个波段图像进行空间二维CDF(2,2)小波提升变换,去除空间冗余,然后对其进行EBCOT压缩编码。关于算例一典型的研究成果是文[9](中国科学院

长春光学精密机械与物理研究所研究小组)的最小生成树(MST: Minimum Spanning Tree)算法、近最小生成树(NMST: Near Minimum Spanning Tree)算法。对比压缩实验结果见表1。

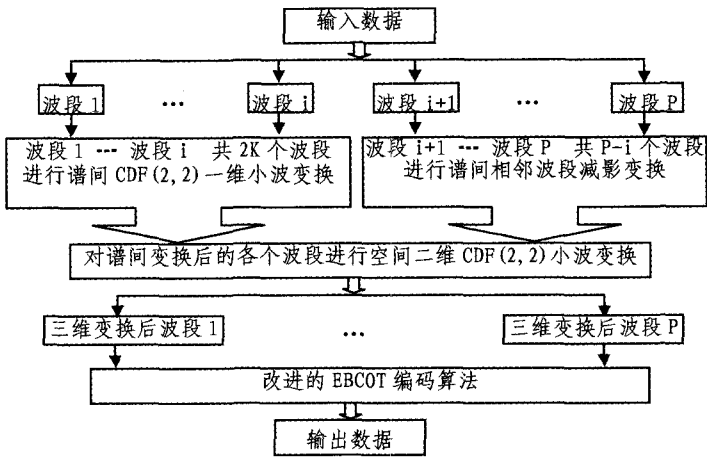


图1 压缩算法实现流程

表1 Canal的第21至30Band各种压缩算法无损压缩结果

算法名称	压缩比	本文比所列 算法提高(dB)	本文比所列 算法提高(%)
NMST,块4×4	2.04	0.27dB	13.24%
NMST,块2×2	2.06	0.25 dB	12.14%
MST	2.10	0.21 dB	10%
本文算法	2.31		

由表1可以看出,本文算法明显好于近最小生成树、最小生成树算法的无损压缩结果,平均提高10%左右。

3.2 算例二:Canal的第24至37波段压缩实验

算法实施过程同算例一,但是分组方案可以有两种,其具体方案如下。

方案1:

8Bands(谱间CDF(2,2)小波提升变换)+6 Bands(谱间减影变换),对变换后的14个Bands进行空间二维CDF(2,2)小波提升变换,然后进行EBCOT压缩编码。

方案2:

8Bands(谱间CDF(2,2)小波提升变换)+4 Bands(谱间CDF(2,2)小波提升变换)+2 Bands(谱间减影变换),对变换后的14个Bands进行空间二维CDF(2,2)小波提升变换,然后进行EBCOT压缩编码。

表2 Band24~Band37各种典型压缩算法无损压缩对比实验结果

典型 算法	压缩比	方案2比列出 算法提高(dB)	方案2比列出 算法提高(%)
JPEG-LS	1.571	0.68	43.29%
WinZip	1.627	0.624	38.35%
ARJ	1.652	0.599	36.26%
DPCM	1.715	0.536	31.25%
文献9	1.913	0.338	17.67%
本文方案1	2.226	0.025	1.12%
本文方案2	2.251		

行了实验对比。JPEG-LS是基于LOCO-I思想的无损压缩算法,通过上下文模型和误差反馈有效降低误差图像的熵,然后通过游程编码实现对误差图像的编码。WinZip是Microsoft提出的著名的无损图像压缩方法。ARJ方法采用的是单趟自适应Huffman无损压缩算法。DPCM是典型的基于预测的无损压缩算法。文[9]是基于位平面变换的超光谱无损压缩算法。对比压缩实验结果见表2。

从表2可以看出,针对测试图像平均而言,本文方法比JPEG-LS提高了43%左右,比WinZip提高了38%左右,比ARJ提高了36%左右,比DPCM提高了31%左右,比文[9]研究小组提高了17%左右。可见本文算法的压缩比要明显高于它们,其原因在于本算法可以有效地去除超光谱图像的空间、谱间相关冗余,使压缩编码的效率更高。

参考文献

1 王晋,张晓玲,沈兰荪,等.一种基于网格编码量化的高光谱图像无损压缩方法[J].中国图像图形学报,2006,11(1):123~127
2 张雷,黄廉卿.超光谱数据压缩技术[J].红外,2005,1:9~12
3 Ryan M J, Arnold J F. The lossless compression of AVIRIS images by vector quantization. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1997, GRS-35(3): 546~550
4 Rao A K, Bhargava S. Multispectral Data Compression Using Bi-directional Interband prediction. IEEE Trans on Geo-science and Remote Sensing, 1996, 34(2):385~397
5 Dragotti P L, Poggi G, Ragozini A P R. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2000, 38(1):416~428
6 Hoffman R N, Johnson D W. Application of EOF's to multispectral imagery; data compression and noise detection for AVIRIS. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1994, 32(1):25~34
7 Luigi P, Dragotti P L, Poggi G. Compression of Multispectral Images by Three-dimensional SPIHT Algorithm. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1):416~428
8 Lim S, Sohn K H, Lee C. Principal component analysis for compression of hyperspectral images. In: Proc. Of IGARSS - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2001,1:109~111
9 刘恒殊.超光谱遥感图像压缩算法的研究[D]:[学位论文].中国科学院研究生院,2002
10 李永峰.遥感卫星高光谱图像压缩编码方法研究[D]:[学位论文].西安电子科技大学,2004

为了说明本算法的有效性,和其它五种无损压缩算法进