

# 基于 SHIRCT 和减影及 CDF(2,2)DWT 混合变换的超光谱图像无损压缩算法

解成俊, 刘太辉

(北华大学 数字图像处理研究所, 吉林省 吉林市, 132011)

**摘要:**提出了 SHIRCT 和减影混合变换去除谱间冗余、2D-CDF(2,2)DWT 去除空间冗余, 该变换完全由加法和移位完成, 便于硬件实现。去冗余效果好于(1D+2D)CDF(2,2)DWT+改进的 EBCOT 算法进行编码。实验结果表明, 无损压缩性能略好于(1D+2D)CDF(2,2)DWT+改进 EBCOT, 远好于 JPEG-LS、WinZip、ARJ、DPCM、文献[1]及 NMST 和 MST。

**关键词:**信息处理技术; SHIRCT 和减影混合变换; 冗余; 无损压缩; 改进的 EBCOT 算法  
**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)04-0919-05

## Lossless hyper-spectral image compression algorithm based on mixing transform of SHIRCT, subtraction and CDF(2, 2) DWT

XIE Cheng-jun, LIU Tai-hui

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

**Abstract:** Integer reversible color transform (SHIRCT) and subtraction mixing transform to eliminate spectral redundancy was presented, meanwhile 2D-CDF(2, 2)DWT was used to eliminate spatial redundancy. This transform can be fully implemented by add and shift operations, therefore it is convenient for hardware realization. Its redundancy elimination effect is better than that of (1D+2D)CDF(2, 2)DWT. An improved EBCOT algorithm was applied for compression coding. Experiments show that in lossless image compression application the effect of the proposed method is slightly better than the effect acquired using (1D+2D)CDF(2, 2)DWT and improved EBCOT algorithm. It is much better than JPEG-LS, WinZip, ARJ, DPCM, NMST and MST, and the method in the literature[1].

**Key words:** information processing; SHIRCT and subtraction mixing transform; redundancy; lossless image compression; improved EBCOT algorithm

去冗余主要是去除空间冗余和谱间冗余, 去除谱间冗余通常有 DPCM 预测、最优线性预测、自适应非线性和线性预测、双向预测、组合预测、对残差图像的二次预测等, KLT, 自适应 KLT, 整数 KLT, 经验正交函数 EOF (Empirical Orthogonal Functions), 一般整数可逆变换, 一维

DCT, 一维 DWT、一维 DWPT (Discrete Wavelet Packet Transform)。DWT 是目前公认的去除空间冗余最好的变换, 而且对于 DWT 在去除空间冗余方面所获得的认知是相当成熟的, 但是利用 DWT 去除超光谱图像的谱间冗余却未必是最好的, 甚至是效果不好的, 例如利用 Harr 小波

**收稿日期:**2007-03-10.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(60672156);吉林省科技厅项目(20060519).

**作者简介:**解成俊(1962-),男,教授,博士.研究方向:遥感图像处理. E-mail:xcjciom@yahoo.com.cn

(Harr 小波是去冗余能力最差的小波,见文献[2])的提升方案来去除 7 个波段图像的谱间冗余,只进行一次分解<sup>[3]</sup>,这样做远没有达到去冗余的效果,而选择 Harr 小波是考虑到边界延拓及参与 DWT 变换的波段数是否为 2 的幂次的问题。在文献[2]中,作者进行了提高基于提升方案的整数小波变换无失真压缩编码性能的研究,对 9 种基于整数运算的小波基的去冗余能力进行了评价,并给出了评价的判据和依据,对所有小波滤波器、低通滤波器消失矩阶数一定的情况下,高通滤波器消失矩阶数越大,压缩效果越好,但随着高通滤波器消失矩阶数的增大,压缩效果改善的程度并不明显。对于同种类型的小波基低通滤波器消失矩阶数比高通滤波器消失矩阶数对于改善图像压缩性能更重要,所以利用 DWT 去除相关冗余而选择小波基应有一个基本的原则。但是作者认为,由于波段数的限制,如果给定的波段数不是 2 的幂次,则不适合采用 DWT 去除谱间冗余,因为每延拓一点就要多出一帧图像数据,这个数据量是巨大的,会对压缩效果产生严重影响。如果一定要用 DWT 去除谱间冗余,可以采用 DWT 和其他变换的混合变换,对 2 的幂次部分采用 DWT,对其余部分采用其他变换,这是提出 SHIRCT 变换的基本出发点。

在彩色视频编码中,通常不直接编码 RGB 数据,因为这样不能很好地利用源数据的统计特性<sup>[4-5]</sup>,通过变换可以有效地改变编码宏块的 PSNR,其理论上的编码增益超过 3 dB<sup>[4]</sup>。变换具有很好的去相关作用<sup>[6]</sup>,所以可以将变换应用到超光谱图像谱间冗余的去除,由于 SHIRCT 变换只涉及 3 个波段,所以谱间变换非常灵活,既可以单独实现谱间去冗余,也可以同 DWT 或减影变换结合起来实现谱间去冗余,SHIRCT 变换的另一个巨大优势是变换可以完全由加法及移位完成,运算速度快,便于硬件完成。

### 1 SHIRCT 变换和减影变换及

#### CDF(2,2)DWT

##### 1.1 SHIRCT 变换

正变换

$$t = X_1 - ((X_2 + X_3) \gg 1) \quad (1)$$

$$Z_1 = X_2 + X_3 + (t \gg 1) \quad (2)$$

$$Z_3 = -X_2 + ((Z_1 + (t \gg 3)) \gg 1) \quad (3)$$

$$Z_2 = t + \eta Z_3 \quad (4)$$

逆变换

$$t = Z_2 - \eta Z_3 \quad (5)$$

$$X_2 = -Z_3 + ((Z_1 + (t \gg 3)) \gg 1) \quad (6)$$

$$X_3 = Z_1 - X_2 + (t \gg 1) \quad (7)$$

$$X_1 = t + ((X_2 + X_3) \gg 1) \quad (8)$$

在上述变换中  $Z_2$  分量可以表示为

$$Z_2 = \left[ \frac{5}{16} X_1 - \frac{21}{32} X_2 + \frac{11}{32} X_3 \right] \eta + X_1 - \frac{X_2 + X_3}{2} = Z_3 \eta + X_1 - \frac{X_2 + X_3}{2} \quad (9)$$

考虑到图像压缩的实际效果,希望  $|Z_2|$  尽可能地小,由于  $Z_2$  是一个参数化的表达式,且  $Z_3$ 、 $X_1 - (X_2 + X_3)/2$  都是定值,因此  $\eta$  的选择对  $Z_2$  的影响非常大,不同的  $\eta$  代表了不同的可逆变换,理论上这样的可逆变换有无限多个,但是总是希望找到最优的一个。

为了便于硬件实现,将变换完全由加法和移位组成,可以将  $\eta$  写成  $\eta = k/2^l (k \neq 0, l \geq 0, \eta$  的符号在算法中直接给出),重写变换中的参数如下。

正变换

$$Z_2 = t \pm \left( \sum_{i=1}^q Z_3 \right) \gg l \quad (10)$$

逆变换

$$t = Z_2 \mp \left( \sum_{i=1}^q Z_3 \right) \gg l \quad (11)$$

##### 1.2 减影变换

图像 A、B,其空间区域内的点  $(x, y)$  的像素值为  $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ ,  $0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N$ ,则

$$C(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \quad (12)$$

上式为图像 A、B 的减影变换,通常将对减影变换后的图像 C 进行处理。在式(2)中,  $Z_1$  分量类似于 DWT 的低频分量,所以对变换后多个  $Z_1$  分量进行减影变换,如果  $Z_1$  分量的数目是 2 的幂次,也可以考虑用 DWT,以便进一步去除冗余。

##### 1.3 CDF(2,2)DWT

采用 CDF(2,2)DWT 来进行空间或必要的部分谱间变换,正变换如下:

$$d(n) = x(2n+1) - \left[ \frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right] \quad (13)$$

$$s(n) = x(2n) + \left[ \frac{d(n-1) + d(n)}{4} \right] \quad (14)$$

逆变换

$$x(2n) = s(n) - \left[ \frac{d(n-1) + d(n)}{4} \right] \quad (15)$$

$$x(2n+1) = d(n) + \left\lceil \frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right\rceil \quad (16)$$

## 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  $64 \times 64$  或  $32 \times 32$ 。EBCOT 将编码分成 4 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)。作者在此算法的基础上作一些改进。

### 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(Fundamental Sequence, FS)和劈分(Sample Splitting)两个部分组成。FS 是一种逗点码,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  $k$  进行有效地估计, Rice 码通常采用后缀定长的码,作者采用后缀非定长的码,其码字的形成见本文 2.3 的 Step3。

### 2.2 DWT、SHIRCT、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 2D-CDF(2,2)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,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。经上述操作后可以提高基于 Rice 码的 RLC 编码效率。

#### 2.2.2 谱间 SHIRCT 变换和减影混合变换

设参与压缩编码的超光谱图像共  $F$  帧,而且  $F$  可以表示为

$$F = 3N + Q \quad (17)$$

也就是说,将  $F$  帧超光谱图像分成两组:第一组共  $3N$  帧;第二组为  $Q$  个单帧部分 ( $Q < 3$ ), 谱间变换包含如下两步:

Step 1:  $Q$  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。

Step 2: 针对  $3N$  帧分别作  $N$  次 SHIRCT 变换,变换后出现  $N$  个低频帧  $Z_1$ , 对这  $N$  个低频帧还需进一步去冗余,具体办法是以其中的某一变换后的帧  $Z_1$  为参考帧作减影变换,从而可以进一步提高压缩效率。

### 2.3 重要性、符号、Rice 码的 RLC 编码算法

设系数块为  $\{U_i, 0 \leq i \leq L-1\}$ ,  $U_i = \pm b_M b_{M-1} \dots b_0$ ;  $v$  位为位平面;  $F_i$  为已出现像素  $U_i$  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;  $n$  为比特位为零的求和;  $k$  为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  $b_v$  等于第  $v$  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 ( $b_v = 1$ ) {
    while ( $n \geq (1 \ll k)$ ) {
        输出 0 ;  $n = n - (1 \ll k)$ ;  $k++$ ; }
    输出 1; 输出  $k$  位  $n$  值; 输出  $n$  的符号;
     $n = 0$ ;  $k--$ ; }
while ( $n \geq (1 \ll k)$ ) {
    输出 0 ;  $n = n - (1 \ll k)$ ;  $k++$ ; }
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

CABAC 的主要编码过程如下: 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, 称之为上下文建模; ② 将一个非二进制的

符号转化成相应的二进制符号串,即二进制化;  
 ③将由第二步所得的二进制符号串逐位送入自适应二进制编码器进行编码。每一位在编码时用到的概率估计都是第一步所选择的上下文模型提供的。任何一位在完成编码后,又更新它所用的上下文模型的概率估计,从而实现数据的编码。

### 2.5 压缩算法实现流程

压缩算法实现流程如图 1 所示。

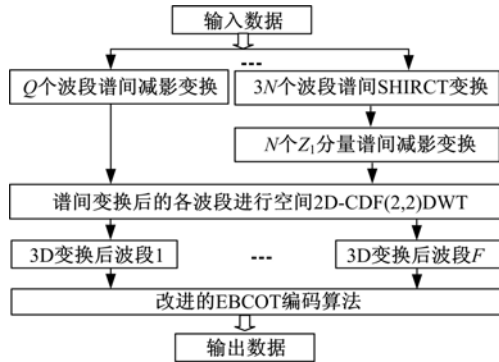


图 1 压缩算法实现流程

Fig. 1 Realization process of the compression algorithm

### 3 实验结果与分析

为了说明本算法的有效性,给出 3 个算例。

**算例 1** 160 个波段压缩效果比较(波段号:1—160)。

本文方案:159Bands(谱间 SHIRCT 变换)+1Bands(谱间减影变换),对 SHIRCT 变换后的 53 个  $Z_1$  帧进一步作谱间减影变换,对变换后的 160 个 Bands 进行空间 2D-CDF(2,2)DWT,然后进行 EBCOT 压缩编码,其压缩效果见图 2。

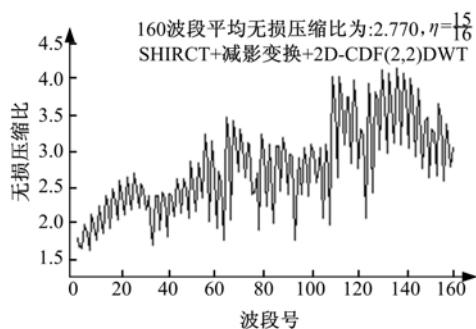


图 2 SHIRCT、减影谱间去冗余,CDF(2,2)DWT 空间去冗余 160 个波段无损压缩比随波段变化曲线

Fig. 2 Curve of lossless compression ratio versus the 160 bands in the process of SHIRCT and subtraction for spectral redundancy elimination, and CDF(2,2)DWT for spatial redundancy elimination

对比方案:三维小波变换。将 160 波段分成 10 组,谱间采用 1D-CDF(2,2)DWT,空间采用 2D-CDF(2,2)DWT,然后进行 EBCOT 压缩编码,其压缩效果见图 3。

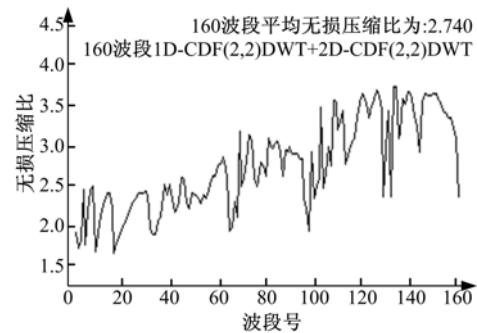


图 3 1D-CDF(2,2)DWT 谱间去冗余,CDF(2,2)DWT 空间去冗余 160 个波段无损压缩比随波段变化曲线

Fig. 3 Curve of lossless compression ratio versus the 160 bands in the process of 1D-CDF(2,2)DWT for spectral redundancy elimination and CDF(2,2)DWT for spatial redundancy elimination

由图 2 和图 3 可知,本文方案各个波段的无损压缩比随波段的变化比较快,压缩比变化范围为[1.5984,4.1686],而三维小波变换方案则相对变化的比较慢,压缩比变化范围为[1.6577,3.7301],从平均效果上看,本文方案好于三维小波变换的压缩结果。

**算例 2** 10 个波段压缩效果比较(波段号:21—30)。

取  $\eta = 15/16$ , 方案如下: 9Bands(谱间 SHIRCT 变换)+1Bands(谱间减影变换),对 SHIRCT 变换后的 3 个  $Z_1$  帧进一步作谱间减影变换,对变换后的 10 个 Bands 进行空间 2D-CDF(2,2)小波提升变换,然后进行 EBCOT 压缩编码。

为了说明这种情况下不适合作谱间 DWT,仍然给出压缩实验结果,实施 CDF(2,2)DWT 去除谱间冗余,由于 10 个波段不能直接进行 DWT,所以必须进行 6 点的边界延拓,但是在谱间边界延拓一点就多出一帧的数据量,因此只要参与变换的超光谱图像的帧数不是 2 的幂次,建议不要利用 DWT 去除谱间冗余,如果一定要用 DWT 去除谱间冗余,可以采用 DWT 与其他变换结合的形式进行。关于算例 2,典型的研究成果是文献[1]的最小生成树(Minimum Spanning Tree, MST)算法、近最小生成树(Near Minimum

Spanning Tree, NMST)算法。对比压缩实验结果见表1。不对比CDF(2,2)DWT谱间对称延拓压缩比为1.47,由表1可以看出,本文算法明显好于近最小生成树及最小生成树算法的无损压缩结果,平均提高13%以上。

表1 Canal的Band21-Band30各种典型压缩算法无损压缩结果比较

Table 1 Comparison of lossless compression results of Canal from band21 to 30 by compression algorithms

算法名称	压缩比	性能提高/dB	性能提高百分比/%
NMST,块4×4	2.04	0.32	15.69
NMST,块2×2	2.06	0.30	14.56
MST	2.10	0.26	12.38
本文算法	2.36		

算例3 14个波段压缩效果比较(波段号:24—37)

取 $\eta = 15/16$ ,方案如下:12Bands(谱间SHIRCT变换)+2Bands(谱间减影变换),对SHIRCT变换后的4个 $Z_1$ 帧进一步作谱间减影变换,对变换后的14个Bands进行空间2D-CDF(2,2)小波提升变换,然后进行EBCOT压缩编码。

为了说明本算法的有效性,本文与其他5种无损压缩算法进行了实验对比。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。文献[1]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。

表2 Band24-Band37各种典型压缩算法无损压缩对比实验结果

Table 2 Comparison of lossless compression results from band 24 to 37 by compression algorithms

典型算法	压缩比	性能提高/dB	性能提高百分比/%
JPEG-LS	1.571	0.680	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[4]	1.913	0.338	17.67
本文算法	2.251		

从表2可以看出,本文算法的压缩比要明显高于其他算法,其原因在于本文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。

## 4 结束语

提出了基于SHIRCT和减影混合变换的谱间冗余去除算法,该算法是对波段数不是2的幂次情况的一个补充,这种情况下去除谱间冗余效果远好于DWT,即使波段数是2的幂次,本文算法去除谱间冗余也略好于CDF(2,2)小波提升变换。USA-JPL的Canal超光谱图像无损压缩实验结果表明,本文算法的无损压缩性能略好于3D-CDF(2,2)DWT,远好于JPEG-LS、WinZip、ARJ、DPCM、文献[4]及NMST和MST的结果。

### 参考文献:

- [1] 刘恒殊. 超光谱遥感图像压缩算法的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- [2] 肖江, 吴成柯, 李云松, 等. 多光谱图像的3D EBCOT压缩编码算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2005, 32(4): 549-554.  
Xiao Jiang, Wu Cheng-ke, Li Yun-song, et al. Compression of the multispectral image by the three-dimensional EBCOT coding algorithm[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2005, 32(4): 549-554.
- [3] Xie Cheng-jun, Yan Su, Xiang Yang. Property study of integer wavelet transform lossless compression coding based on lifting scheme[J]. SPIE, 2005, 6031: 1-7.
- [4] Henrique M, Gary S. YCoCg-R: a color space with RGB reversibility and low dynamic range[R]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q.6 Document: JVT-I014r3, Redmond, 2003.
- [5] 刘韶, 桑爱军, 陈贺新, 等. 基于YC子阵的彩色图像三维矩阵变换压缩编码[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(4): 569-573.  
Liu Shao, Sang Ai-jun, Chen He-xin, et al. 3D matrix transform compression coding of color image based on YC submatrix[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(4): 569-573.
- [6] 丁媛媛, 司玉娟, 郎六琪, 等. 基于提升小波变换的图像压缩编码的VLSI实现[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(3): 675-680.  
Ding Yuan-yuan, Si Yu-juan, Lang Liu-qi, et al. VLSI implementation of image compression coding based on lifting wavelet transform[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(3): 675-680.