

超光谱图像的三维小波嵌入零块压缩编码*

吴家骥¹⁺, 吴振森², 吴成柯³

¹(西安电子科技大学 智能信息处理研究所, 陕西 西安 710071)

²(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

³(ISN 国家重点实验室(西安电子科技大学), 陕西 西安 710071)

Hyperspectral Image Compression Using Three-Dimensional Wavelet Embedded Zeroblock Coding

WU Jia-Ji¹⁺, WU Zhen-Sen², WU Cheng-Ke³

¹(Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

²(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

³(National Key Laboratory on ISN (Xidian University), Xi'an 710071, China)

+ Corresponding author: E-mail: wujj@mail.xidian.edu.cn

Wu JJ, Wu ZS, Wu CK. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet embedded zeroblock coding. *Journal of Software*, 2007,18(2):461-468. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/461.htm>

Abstract: As 3D images, hyperspectral images result in large sized data sets. The storage and transmission of large volumes of hyperspectral data have become significant concerns. Therefore efficient compression is required for storage and transmission. In this paper, a new hyperspectral remote sensing image compression method based on asymmetric 3D wavelet transform and 3D set partitioning scheme is proposed. Because most hyperspectral images have asymmetric statistical properties in all directions, an efficient asymmetric 3D wavelet transform (3DWT) is used to reduce redundancies in both the spectral and spatial dimensions. Compared with traditional symmetric 3D wavelet transform, asymmetric 3D wavelet transform can more efficiently remove the correlation between the adjacent bands. A modified 3DSPECK (3D set partitioning embedded block) algorithm, AT-3DSPECK (asymmetric transform 3DSPECK), is proposed and used to encode the transformed coefficients. According to the distribution of energy of the transformed coefficients, the 3D zeroblock partitioning algorithm and the 3D octave band partitioning scheme are efficiently combined in the proposed AT-3DSPECK algorithm. To accelerate the speed and optimize the rate-distortion performance of the embedded bit stream, a fast algorithm of the optimal zeroblock sorting is given. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms AT-3DSPIHT (asymmetric transform 3D set partitioning in hierarchical trees) and 3DSPECK by 0.4 dB and 1.4dB on the average PSNR (peak signal to noise ratio) respectively. Compared with popular zerotree approaches, AT-3DSPECK is faster in coding speed.

Key words: hyperspectral image; three-dimensional image compression; embedded coding; zeroblock coding; wavelet transform; SPIHT (set partitioning in hierarchical trees); SPECK (set partitioning embedded block)

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60607010, 60672125, 60371020, 60532060 (国家自然科学基金)

Received 2004-07-03; Accepted 2006-01-09

摘要: 超光谱图像作为一种三维图像,其海量的数据导致在有限带宽信道上传输和存储非常困难,必须对它进行有效的压缩编码.提出了一种基于非对称三维小波变换(3D wavelet transform,简称 3DWT)和三维集合块分裂的超光谱遥感图像压缩方法.因为大多数超光谱图像在各个方向上具有非对称的统计特性,所以利用非对称三维小波变换去除图像的谱间和空间冗余.与传统的对称三维小波变换相比,非对称的三维小波变换能够更有效地去除相邻谱段间的冗余.提出了一种改进的 3DSPECK(3D set partitioning embedded block)算法——非对称三维集合分裂块算法(asymmetric transform 3DSPECK,简称 AT-3DSPECK),并被用于编码变换后的系数.根据变换系数的能量分布特点,三维零块分裂和三维 octave 子带分裂方法被有效地结合在所提出的 AT-3DSPECK 算法中.为了优化率失真和加速编码速度,也给出了一种零块优化排序的快速算法.实验测试表明:AT-3DSPECK 算法的平均 PSNR(peak signal to noise ratio)分别比 AT-3DSPIHT(asymmetric transform 3D set partitioning in hierarchical trees)和 3DSPECK 算法高 0.4dB 和 1.4dB.此外,AT-3DSPECK 还具有比零树算法更快的编码速度.

关键词: 超光谱图像;三维图像压缩;嵌入编码;零块编码;小波变换;SPIHT(set partitioning in hierarchical trees);SPECK(set partitioning embedded block)

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

超光谱遥感成像是一种极为重要的技术,被广泛应用于环境监测、地质、农业、医学和军事等领域.它通常由上百个非常窄的连续的光谱波段组成,通过分析图像中近乎连续的光谱曲线,可以分辨出不同物体光谱特征的微小差别,有利于识别更多的目标.但是,在获得较高的谱间分辨率的同时,也产生了巨大的数据量.为了能够快速传输和处理这些数据并减少存储空间,必须对数据进行有效的压缩编码,但目前国内外还没有一种标准的超光谱(多光谱)遥感图像的压缩标准.与普通二维静止图像不同,超光谱图像数据可以被看作由 2D 的空间域和 1D 的频谱域组成 3D 体数据,图像中不仅存在空间相关,还存在谱间相关.目前普遍采用变换的方法去除相关性,比如利用三维 DCT(discrete cosine transform)变换^[1],或者先利用 Karhunen-Loeve 变换(Karhunen-Loeve,简称 KLT)去除谱间相关,再利用 DCT 去除空间相关^[2].由于 DCT 变换编码会产生方块效应,因此越来越多的变换方法都采用小波变换(wavelet transform,简称 WT)^[3-11],因为小波变换能够产生高度集中的能量,且没有 DCT 变换的方块效应,同时,它的复杂度适中.在文献[4-6]提出的方法中,在利用 KLT 去谱间相关的同时,还利用 WT 去除空间相关,最后利用改进的 3DSPIHT(3D set partitioning in hierarchical trees)算法编码变换后的系数.在文献[3,5]中还使用了矢量量化(vector quantization,简称 VQ)来提高编码效率.尽管 KLT 是一种在统计意义上最优的变换方法,VQ 是最优块编码策略^[7],但它们的计算复杂度很高.由于三维图像的数据量非常大,我们不仅要提高压缩比,还要想办法减少计算复杂度;同时,为了传输和浏览这些压缩的图像,算法应该支持图像的渐进传输.为了实现上述目标,文献[7-11]中提出了基于三维小波变换(3D wavelet transform,简称 3DWT)的零树或零块编码算法,其中,Kim 和 Pearlman^[8]提出的 3DSPIHT 是 2DSPIHT(2D set partitioning in hierarchical trees)^[12]的扩展.在 3DSPIHT 中,利用三维的零树结构对变换后的系数进行编码.文献[9]中提出的方法和 AT-3DSPIHT(asymmetric transform 3DSPIHT)^[10]则进一步改进了 3DSPIHT 算法中的小波变换和零数结构,使编码性能进一步提高.Tang 和 Pearlman^[7]提出了一种对超光谱遥感图像具有很高压缩性能的 3DSPECK(3D set partitioning embedded block)算法.3DSPECK 采用与 3DSPIHT 相同的三维小波变换方法,但在对变换后的系数编码时,采用了扩展的 SPECK(set partitioning embedded block)^[13]零块编码算法.与 3DSPIHT 算法相比,3DSPECK 算法的复杂度更低,而且在对高频内容较多和纹理复杂的遥感图像进行编码时,其性能比 3DSPIHT 更优越.

通过对以上算法的分析和实验,本文提出了一种基于非对称三维小波变换的三维嵌入零块压缩编码算法 AT-3DSPECK(asymmetric transform 3DSPECK).该算法采用最优三维系数树结构算法^[9]和 AT-3DSPIHT^[10]中的不对称三维小波变换,并根据变换后的小波系数子带能量分布的特点,设计了新的三维块分裂编码策略.由于采用嵌入编码,新算法支持图像的渐进传输.通过选择不同的小波基,可以实现有损和无损的压缩方式.

1 非对称 3D 小波变换

因为图像信号经过多级小波分解后,能量高度集中在低频子带,能够有效地去除图像相关,并且不会像 DCT 那样产生方块效应,所以,目前绝大多数嵌入编码方案都采用基于小波变换的比特面编码技术,如 EZW (embedded zerotree wavelet)^[14],SPIHT(set partitioning in hierarchical trees)^[12],SPECK^[13],EZBC(embedded zero block coding)^[15],EBCOT(embedded block coding with optimized truncation)^[16]等.对于普通二维图像,小波变换只是在空间域的两个方向上进行,为了对超光谱序列图像进行压缩,三维小波变换需要对谱方向也进行小波变换.文献[7,8]中采用的是如图 1 所示的小波分解方式.在图 1 中,每一级小波分解是先对谱方向作小波变换,然后再对空间域中的水平方向和垂直列方向作小波变换.在下一级分解时,对最低频子带再进行一次三维变换.如图 1 所示,经过 3 级小波分解后就产生了一个类似金字塔形状的三维对称子带结构,其中最上端最小的块是频率最低的子带,其能量也最高.三维小波变换的过程也是一个三维图像去相关的过程,变换后的最低频集中了图像的绝大部分能量,子带频率越高,其系数的值就越小,这样,在后面的量化编码中可以把更多的比特分配给低频能量高的系数,而高频子带就可分配较少的比特.

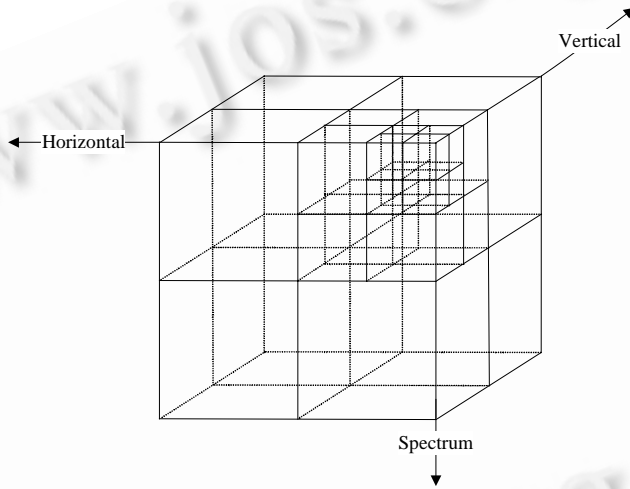


Fig.1 Symmetric 3DWT structure

图 1 对称三维小波变换结构

尽管对称 3D 小波变换被广泛应用于 3DSPIHT 和 3DSPECK 等算法中,然而大量的实验显示,对于超光谱遥感图像(或其他三维图像序列),图像在三维方向上的统计特性并不是对称的^[8].通常,谱方向(波长轴方向)的平均标准背高度 STD(the average standard deviations)远小于空间域中两个方向的平均 STD,见表 1.这里,

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}, \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \tag{1}$$

Table 1 Average standard deviations (STD) of “Jasper1” and “Moffett1” hyperspectral images along horizontal, vertical, and spectrum directions

表 1 超光谱图像“Jasper1”和“Moffett1”在水平、垂直和谱方向的平均标准背高度 STD

STD	Jasper1	Moffett1
Horizontal	504.00	603.47
Vertical	498.91	672.63
Spectral	291.05	525.46

这说明在超光谱图像序列中,图像的谱间相关性要远高于空间域的相关性.为了更有效地去除谱间相关,一些基于非对称三维小波变换的算法^[9-11]相继被提出来.图 2 显示了一个空间域和谱方向都是 3 级变换的非对称 3D 小波变换的结构.它通常有两种实现方法:

1) 一级空间域的双尺度小波(dyadic wavelet)分解,然后进行一级波长轴方向的小波分解.接下来,相同的过程被重复两次.

2) 空间域的 3 级双尺度小波分解,接着再进行波长轴方向的 3 级层叠小波(cascaded wavelet)变换^[9].

实验显示:上述两种实现方法具有相同的性能,其中,3D-ESCOT(three-dimensional embedded subband coding with optimized truncation)^[11]算法还对谱方向作了更多级数的小波包变换.但是,通常对谱方向高频子带作小波包变换很难进一步去除高频子带内的冗余.从 Tang^[7]和我们的实验中均发现,在谱方向作更多的小波包变换可能使编码性能下降.因此,本文采用如图 2 所示的非对称三维小波变换.通常,超光谱图像的空间分辨率要大于它的谱间分辨率,所以,对空间域可以做更多级数的小波分解.

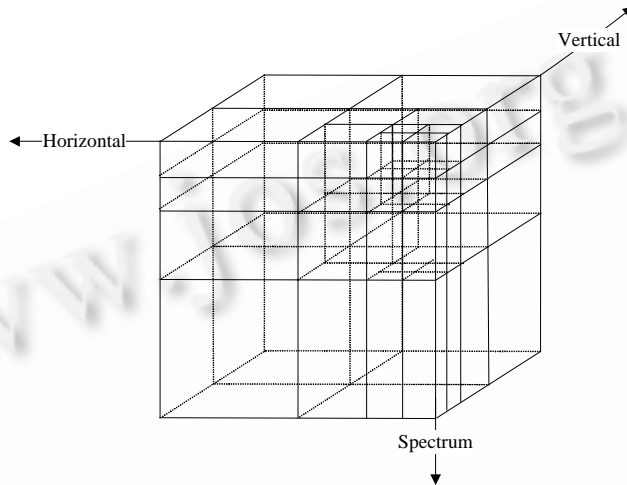


Fig.2 Asymmetric 3DWT

图 2 非对称三维小波变换

2 非对称三维集合分裂块算法(AT-3DSPECK)

在传统的三维零树算法中,一旦零树被测试为重要的,则会被分裂为一些更小的子树.假如零树被测试为不重要的,则整个零树中的变换系数可用一个“0”比特表示.而 3DSPECK 算法与传统的三维零树算法最大的不同在于它的三维零块处理算法.假如一个包含大量系数的块 S 被测试为不重要的,那么整个块被称为零块,可以用一个“0”比特表示;如果 S 被测试为重要的,则输出比特“1”,并被分裂为一些更小的子块 $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8\}$,如图 3 所示.原始的 3DSPECK 算法采用的是如图 1 所示的对称三维小波变换,假如各个方向作 l 级小波分解,那么会生成 $7l+1$ 个三维子带,编码开始时,3DSPECK 把所有 $7l+1$ 个三维子带都当作三维零块集合加入到 LIS(list of insignificant sets)中,然后对 LIS 中 $7l+1$ 个零块集合进行测试,假如任何一个三维集合(零块)被测试为重要的,那么这个集合就被分裂为大小相近的 8 个子集合(子块),再对各子块作迭代测试.

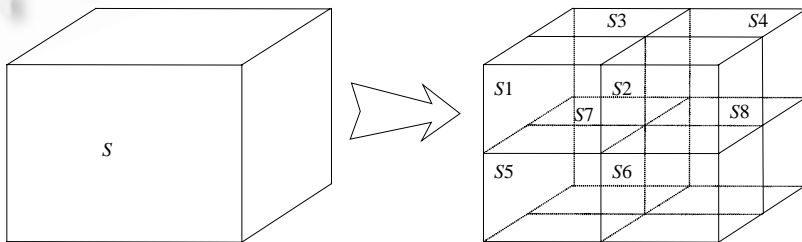


Fig.3 Partitioning of set S

图 3 集合 S 的分裂

在本文提出的 AT-3DSPECK 算法中,由于改进了三维小波变换的方法,所以变换后生成的子带数目会比采用如图 1 所示的方法生成的更多,而且低频的能量也更加集中.实验显示,编码过程中一些比特面的扫描中没有 LIS 中的集合是重要的.如果像 3DSPECK 那样把所有子带都作为零块加入到 LIS 中,那么在编码过程中,那些包含系数非常小的零块总是会反复输出“0”.为了进一步提高编码性能,我们根据非对称小波变换后三维子带分布的特点以及 2DSPECK(2D set partitioning embedded block)^[12]算法中的 octave 子带分裂算法,设计了全新的三维 octave 子带分裂算法.如图 4(a)所示,在编码初始化时,LIS 中只有两个零块集合,即 S 和 I_0 ,其中, S 集合是最低频子带, I_0 集合则包含了其余子带.在编码初始阶段,由于 I_0 集合中的系数的绝对值要比 S 集合中的系数绝对值小得多,所以在开始的比特面编码中,只需一个比特“0”就可以表示 I_0 集合中的所有系数.随着编码的继续,当测试到 I_0 集合重要时,如图 4(b)所示, I_0 就分裂为 3 部分:一个新的 I_0 集合、一个新的 I_1 和紧邻 S 的 3 个子带.在这一步中,我们并不把 S 块下面的谱方向的子带分裂出来,这是因为三维小波变换后,能量在谱方向比在空间方向更加集中,小波金字塔中谱方向每级子带的系数绝对值均比上一级子带系数绝对值小得多.在下一步分裂中,如图 4(c)所示,如果 I_0 集合重要,则 I_0 只进行水平的分裂,并且 I_0 集合也会越来越小,直至消失.当测试 I_1 重要时, I_1 也分裂为 3 个集合:一个新的 I_1 、一个新的 I_2 和一个新的 S 类型的集合.随着编码的继续,会进一步分裂成如图 4(d)所示的形式.

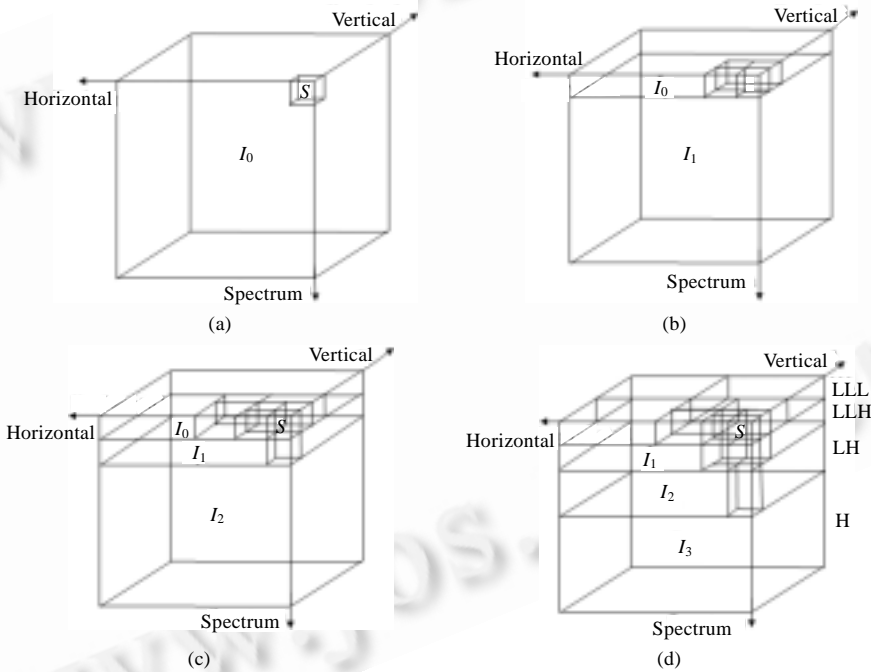


Fig.4 Illustration of 3D octave band partitioning of AT-3DSPECK

图 4 AT-3DSPECK 的三维 octave 子带分裂示意图

简而言之,分裂的子带构成了一个类似于树型的结构,我们优先分裂出能量较大且最有可能是重要的子带,而那些不重要的系数则尽量用大的集合块表示,这样,对于那些不重要的系数我们就可以用很少的比特来表示.对于所有已经从 I 类型集合分裂出来的子带,如果测试是重要的,则进行像图 3 那样分裂成 8 个或 4 个更小的块,否则就用一个比特“0”表示.在实际实验中,子带在空间方向总是分裂得较快,而在谱方向分裂得较慢. S 类型集合和 I 类型集合的分裂算法如下:

$I(k,i,j)$:位于谱段 k ,行位置 i 和列位置 j 的 I 类型的集合.

$S[(k,i,j)t,h,v]$:位于谱段 k ,行位置 i 和列位置 j 的 S 类型的集合; t,h 和 v 分别表示 S 类型集合的 3 个边长.

B :最低频子带的谱段数目.

R :最低频子带的行数.

C :最低频子带的列数.

$O(x)$:把集合 x 分裂为一些更小的子集合.

$\lfloor \bullet \rfloor$:对 \bullet 取整.

if (set $I(k,i,j)$ is significant)

{

if ($k=0$ and $i=R$ and $j=C$)

$O(I) = \{S[(0,0,C)B,R,C], S[(0,R,0)B,R,C], S[(0,R,C)B,R,C], I(0,2R,2C), I(B,0,0)\}$

elseif ($i=0$ and $j=0$)

$O(I) = \{S[(k,0,0)k,R,C], I(k,R,C), I(2k,0,0)\}$

else

$O(I) = \{S[(k,0,j)B,i,j], S[(k,i,0)B,i,j], S[(k,i,j)B,i,j], I(k,2i,2j)\}$

}

if (set $S[(k,i,j)s,h,v]$ is significant)

$$O(I) = \left\{ \begin{array}{l} S[(k,i,j)\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], S[(k,i,j+\lfloor v/2 \rfloor)\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor], \\ S[(k,i+\lfloor h/2 \rfloor, j)\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], S[(k,i+\lfloor h/2 \rfloor, j+\lfloor v/2 \rfloor)\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor], \\ S[(k+\lfloor t/2 \rfloor, i, j)t-\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], S[(k+\lfloor t/2 \rfloor, i, j+\lfloor v/2 \rfloor)t-\lfloor t/2 \rfloor, \lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor], \\ S[(k+\lfloor t/2 \rfloor, i+\lfloor h/2 \rfloor, j)t-\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, \lfloor v/2 \rfloor], \\ S[(k+\lfloor t/2 \rfloor, i+\lfloor h/2 \rfloor, j+\lfloor v/2 \rfloor)t-\lfloor t/2 \rfloor, h-\lfloor h/2 \rfloor, v-\lfloor v/2 \rfloor] \end{array} \right\}$$

为了优化比特面的率失真性能, LIS 中的 S 类型的集合应按集合大小的升序排列测试, 即块小的集合排在前面先测试, 块大的排在后面测试. 这是因为集合的尺寸越小, 说明它周围已经被测试为重要的系数就越多, 那么下次测试时它就越有可能是重要的^[13]. 然而, 本文的实验和文献[7,13]显示, 任何对集合的排序算法都会使算法速度变得非常慢. 这是因为每次排序需要对 LIS 链表或数组进行大量的删除和插入操作, 这些操作会严重降低计算速度. 为了加速率失真优化中的排序速度, 本文提出了一种简单而有效的按照集合分裂深度排列测试的方法. 假设图像的空间分辨率为 $H \times V$, 那么尺寸为 $h \times v$ 的集合 S 的分裂深度可定义为 $d = \log_2(H/h)$ 或 $d = \log_2(V/v)$, 如果 S 经过一次零块集合分裂, 那么 S 的子集的分裂深度变为 $d+1$. 这样, 在测试 LIS 内的集合时, 只需按照分裂深度从大到小进行测试. 由于避免了对链表或数组的复杂操作, 从而极大地加快了计算速度. 具体实现如下:

D_{\max}, D_{\min} : 当前 LIS 中所有 S 类型集合中最大的分裂深度和最小的分裂深度.

$d(S)$: 集合 S 的分裂深度.

$O(S)$: 对 S 进行分裂处理.

for $l = D_{\max} : D_{\min}$

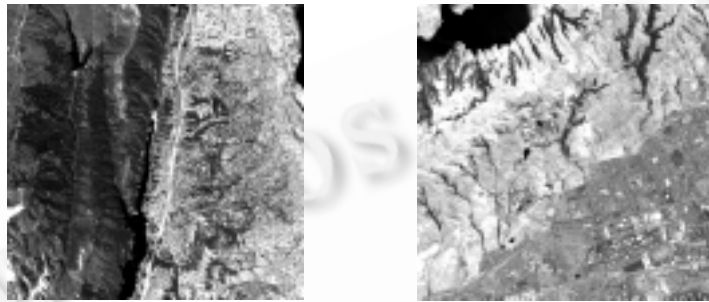
for each set S in LIS, do

if $d(S) = l$ do $O(S)$, else skip.

3 实验与分析

我们选择两组 512×512 大小空间分辨率, 16bpppb, 224 谱段的超光谱图像 Jasper1 和 Moffett1 作测试(如图 5 所示), 两组图像都来源于 NASA. bpppb(bits per pixel per band)表示每谱段中平均每像素占用的比特数. 在测试中, 我们把每个图像数据按 16 个谱段一组分成 8 组, 分别进行变换编码. 这主要是为了提高编码速度和减少内存消耗. 尽管每次进行变换编码的谱段越多, 性能会越高, 但当编码单元超过 16 个谱段时, 性能上的改善会很小^[5,9,11]. 所有测试图像 3 个方向上均作 4 级 $5/3$ 小波变换^[17]. 同时也用 3DSPECK^[7], AT-3DSPIHT^[10] 和 JPEG2000 算法对图像进行了对比测试, 其中 JPEG2000 采用 $9/7$ 小波. 从图 6 的率失真曲线可以看到, 本文提出的 AT-3DSPECK 算法展示了非常好的性能, 优于其他算法. 在所有码率下, AT-3DSPECK 的 PSNR(peak signal to

noise ratio)比 AT-3DSPIHT 高 0.3dB~0.9dB,比 3DSPECK 高 1.5dB~2dB 以上.AT-3DSPECK 的计算速度非常快,适合于高压缩比的实时编码应用.表 2 显示了在 CPU 1.4GHz 的 PC 中,AT-3DSPECK 与 AT-3DSPIHT 的 CPU 时间,其中,3DWT 为三维正向小波变换,3DIWT(three-dimensional inverse wavelet transform)为三维逆向小波变换.在实验中也发现,对于纹理复杂的超光谱遥感图像,无损压缩比很难超过 2:1.在对图像 Jasper1 利用 5/3 小波及 AT-3DSPECK 实现无损压缩时,码率为 6.71bpppb;而在采用 JPEG2000 算法实现无损压缩时,码率达到 8.83bpppb 以上.由于图像支持嵌入编码,所以,用户能够以很低的码率快速浏览图像,并决定是否终止码流传输;如果对图像感兴趣,则可以继续传输码流.随着码流的增加,图像的质量也会进一步增强.利用本文的 AT-3DSPECK 算法,1bpppb 时图像的所有细节已经几乎被完全正确地重构,图像的质量已经恢复得非常好,与原始图像已经很难区分.



(a) Band 188 of "Jasper1" original images (a) "Jasper1"的第 188 谱段的原始图像
(b) Band 120 of "Moffett1" original images (b) "Moffett1"的第 120 谱段的原始图像

Fig.5
图 5

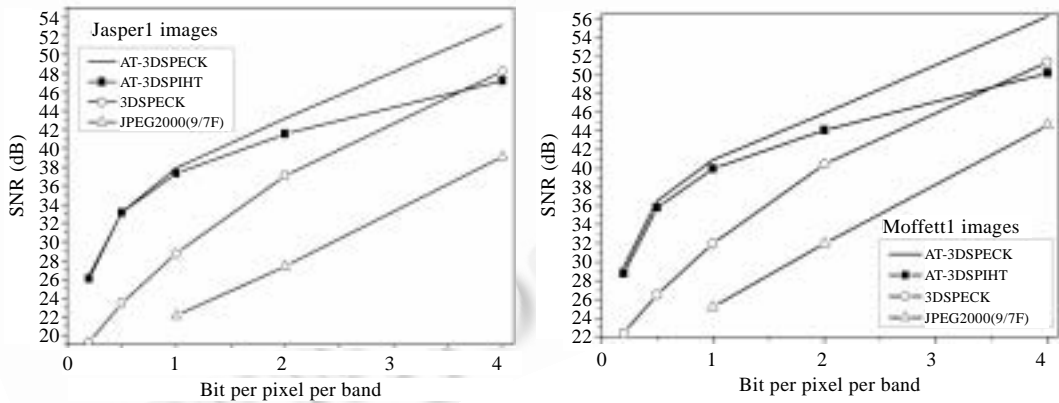


Fig.6 Lossy compression performance comparisons of various methods using 5/3 wavelet

图 6 各方法在 5/3 小波下的有损编码性能比较

Table 2 CPU times comparison for 16 bands (frames) of the "Jasper1" sequence

表 2 对于"Jasper1"序列的 16 个谱段(帧)的 CPU 时间比较

CPU time (s)	0.5bpppb				1bpppb			
	3DWT	Encode	Decode	3DIWT	3DWT	Encode	Decode	3DIWT
AT-3DSPECK	3.06	3.49	1.58	4.12	3.03	5.53	4.78	4.19
AT-3DSPIHT	3.08	7.81	1.21	4.08	3.07	12.11	3.47	4.12

4 结束语

本文所提出的基于非对称三维小波变换的 AT-3DSPECK 算法具有以下优点:(1) 该算法是更为有效的三维

小波变换方法,能够更好地去除光谱图像的相关性;(2) 新的三维零块分裂和子带分裂算法提高了比特面编码性能;(3) 采用零块分裂深度优化排序的策略,明显提高了编码性能.当采用整数小波时,本文的算法可以实现图像的无损压缩.此外,本文的方法还支持渐进传输,而且也适用于其他三维图像序列的压缩编码,如三维医疗图像和视频图像序列.

References:

- [1] Aboussleman GP, Marcellin MW, Hunt BR. Compression of hyperspectral imagery using the 3-D DCT and hybrid DPCM/DCT. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1995,33(1):26-34.
- [2] Saghri JA, Tescher AG, Reagan JT. Practical transform coding of multispectral imagery. IEEE Signal Processing Magazine, 1995, 12(1):32-43.
- [3] Vaisey J, Barlaud M, Antonini M. Multispectral image coding using lattice VQ and the wavelet transform. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing'98. Chicago: IEEE, 1998. 307-311.
- [4] Wu JJ, Wu CK. Multispectral image compression using three-dimensional transform zeroblock coding. Chinese Optics letters, 2004,2(6):325-327.
- [5] Dragotti PL, Poggi G, Ragozini ARP. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2000,38(1):416-428.
- [6] Kim TS, Kim SJ, Kim BJ, Lee JW, Kwon SG, Lee KI. Multispectral image data compression using classified prediction and KLT in wavelet transform domain. IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, 2003, E86-A(6):1492-1497.
- [7] Tang X, Pearlman WA, Modestino JW. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet coding. In: Vasudev B, Hsing TR, Tescher AG, Ebrahimi T, eds. Proc. of the SPIE/IS&T Electronic Imaging 2003, Vol 5022. Santa Clara: SPIE, 2003. 1037-1047.
- [8] Kim BJ, Pearlman WA. An embedded wavelet video coder using three-dimensional set partitioning in hierarchical trees (SPIHT). In: Bailly G, Benoit C, eds. Proc. of the IEEE Data Compression Conf. DCC'97. Snowbird: Elsevier Science, 1997. 251-260.
- [9] He C, Dong J, Zhang YF. Optimal 3-D coefficient tree structure for 3-d wavelet video coding. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2003,13(10):961-972.
- [10] Tang X, Cho S, Pearlman WA. 3D set partitioning coding methods in hyperspectral image compression. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Image Processing, ICIP2003. Barcelona: IEEE, 2003. 239-242.
- [11] Xiong Z, Wu X, Cheng S, Hua J. Lossy-to-Lossless compression of medical volumetric data using three-dimensional integer wavelet transforms. IEEE Trans. on Medical Imaging, 2003,22(3):456-470.
- [12] Said A, Pearlman WA. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1996,6(3):243-250.
- [13] Islam A, Pearlman WA. An embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder. In: Proc. of the SPIE Vol.3653, Visual Communications and Image Processing'99. San Jose: SPIE, 1999. 294-305.
- [14] Shapiro JW. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993,41(12): 3445-462.
- [15] Hsiang ST, Woods JW. Embedded image coding using zeroblock of subband/wavelet coefficients and context modeling. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Circuits and Systems (ISCAS 2000). Geneva: IEEE, 2000. 662-665.
- [16] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. IEEE Trans. on Image Processing, 2000,9(7): 1158-1170.
- [17] Antonini M, Barlaud M, Mathieu P, Daubechies I. Image coding using wavelet transform. IEEE Trans. on Image Processing, 1992, 1(2):205-220.



吴家骥(1973 -),男,湖北沙市人,博士,讲师,主要研究领域为基于三维子带/小波变换的三维图像编码,静止图像编码,视频图像编码.



吴成柯(1938 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为图像通信,图形学,计算机视觉,模式识别.



吴振森(1946 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为目标与环境特性,图像处理.