

改进的整型 KL 变换和 SPECK 编码的彩色图像 压缩方法

卢 山, 焦李成, 吴家骥

(西安电子科技大学 智能感知与图像理解教育部重点实验室 710071 西安, lumaomaommbb@126.com)

摘 要: 为了解决彩色图像的无损压缩问题, 提出了一种改进的整型 KL 变换(Improved Integer Karhunen-Loeve Transform, IIntKLT)和 SPECK 编码相结合的彩色图像压缩方法. 该算法首先设计了一种新的 IIntKLT 方法, 以去除 R, G, B 颜色分量之间的相关性, 并保证了变换的完全无损可逆性, 然后再结合改进的 SPECK 编码方法进一步的提高了编码性能. 通过对标准测试彩色图像的实验结果表明: 此方法无损压缩比平均提高 0.1 bpp, 有损压缩下, 最高优于 JPEG2000 0.88 dB.

关键词: 完全可逆 KL 变换; SPECK 编码; 彩色图像编码; 无损压缩; 去相关性

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)03-0123-05

Color image compression based on improved integer karhunen-loeve transform and SPECK

LU Shan, JIAO Li-Cheng, WU Jia-Ji

(Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China, Xidian University, 710071 Xi'an, China, lumaomaommbb@126.com)

Abstract: A lossless compression method for 3-D color images is proposed based on Improved Integer Karhunen-Loeve Transform (IIntKLT), incorporated with SPECK for color image compression. First, the IIntKLT is applied to reduce the redundancies between the color components, so that the complete reversible transform is guaranteed, and then by using SPECK, the performance of coding is improved. The results of experimentation of standard testing color image, show that the new approach has an increase of 0.1 bpp in lossless image compression, and in the case of complete reversible lossy compression, compared with JPEG2000, it at most has a increase of 0.88 dB.

Key words: complete reversible KL transform; SPECK coding; color image coding; lossless compression; decorrelation

随着信息网络化的发展, 数字彩色图像作为最重要的信息之一, 被愈来愈广泛地使用, 因而对彩色图像的压缩编码研究倍受人们的重视. 事实上, 彩色图像的 R, G, B 各颜色分量间的相关性很强, 每一分量都几乎可以反映除颜色外的全部信

息. 近几年 JPEG2000 针对彩色图像中的 3 个颜色分量 R, G, B 采用不可逆分量变换 (ICT) 或可逆分量变换 (RCT)^[1], 去除其相关性, 可以实现去相关无损变换, 但性能不高. 此外, 一些子带变换的方法也在去除图像分量间的相关性中进行过尝试, 例如主分量分析 (KLT) 方法^[2], 可以较好的去除色彩分量间的相关性, 但其不具备能量集中性, 并且仅局限于进行图像的有损压缩. 在一些特殊领域中, 例如医学和航空方面, 对传输图像的细节信息质量要求很高, 这就凸显出了高性能图

收稿日期: 2011-07-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61075041, 61001206);
国家教育部博士点基金资助项目 (200807010003).

作者简介: 卢 山 (1982—), 女, 博士研究生;
焦李成 (1959—), 男, 教授, 博士生导师.

像无损压缩的重要性.

针对上述问题的考虑,本文设计了一种改进的 HntKLT 方法,该方法实现了对彩色图像的完全可逆去相关变换,大幅度的减少了彩色分量间的冗余信息,之后再应用整形小波变换进一步进行空间上的能量集中处理,经过两次去相关变换后,再采用高性能、低复杂度的改进 SPECK 编码方法来实现彩色图像的渐进压缩编码. 对标准彩色测试图像的实验表明,本文方法不仅具有比 JPEG2000 标准采用的 RCT 方法更高的无损压缩性能,而且在有损模式下,接近传统 KLT 的编码方法.

1 主分量分析方法

主分量分析也称为主成分分析,是从图像统计特性出发,用一组不相关的系数来表示连续信号,实现正交变换,因而在均方误差准则下,它是失真最小的一种变换,故称作最佳变换. 与其他正交变换相比,它的能量最集中,这样就有可能在允许的失真度下,把图像数据压缩到最小.

假设彩色图像数据为

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3]^T.$$

式中 X_n 为各个色彩分量的图像. 对 \mathbf{X} 利用 KL 变换矩阵 \mathbf{T} 进行线性组合,产生新的去相关彩色图像 \mathbf{Y} 可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{TX}.$$

虽然 $\text{KLT}^{[3]}$ 是一种最优线性变换,但由于其变换矩阵的元素是浮点数不能实现整型变换,所以不能应用于图像的无损压缩.

2 改进的整型 KL 变换

本文在 KLT 原理的基础上,通过改进的矩阵分解方法实现了可逆的整型 KL 变换 (HntKLT), 与无损编码结合在高压缩比的情况下,能够实现高性能的彩色图像完全可逆有损压缩.

文献[4]中证明非奇异矩阵最多可以分解为 3 个三角基本可逆矩阵 (Triangular Elementary Reversible Matrix, TERM), TERM 矩阵的属性是能够实现整型到整型的可逆变换,并运用该属性提出一种矩阵分解方法,变换后,变换基矩阵 \mathbf{T} 被分解为 $\mathbf{T} = \mathbf{PLUS}$, 其中 \mathbf{P} 为置换矩阵, \mathbf{L} 为单位下三角阵, \mathbf{U} 为单位上三角阵, \mathbf{S} 为对角阵. 虽然可以实现整型到整型的可逆变换,但应用该算法变换得到的高频系数不稳定,导致能量集中性不好,进而影响压缩性能. 经过实验发现对角矩阵 \mathbf{S} 中 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_N$ 选取的越小,则变换误差越小,则

变换越稳定,因此本文主要针对传统算法中对角矩阵 \mathbf{S} 中元素的选取原则进行了改进,提出了相应的改进方法,这也是比传统方法表现性能优越的关键所在. 具体的实现步骤如下:

假设一个非奇异矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 的行列式为 1, 则

$$\mathbf{A}^{(0)} = \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1}^{(0)} & a_{1,2}^{(0)} & \cdots & a_{1,N}^{(0)} \\ a_{2,1}^{(0)} & a_{2,2}^{(0)} & \cdots & a_{2,N}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N,1}^{(0)} & a_{N,2}^{(0)} & \cdots & a_{N,N}^{(0)} \end{bmatrix}.$$

在方法中参数 s_k 的选择并不像传统方法那样在每次变换时仅局限于在一个向量模块中寻找最小值,向量模块形式为

$$\left[(a_{i,k}^{(k-1)} - 1) / a_{i,N}^{(k-1)} \right]_{k \leq i \leq N} = \begin{bmatrix} (a_{k,k}^{(k-1)} - 1) / a_{k,N}^{(k-1)} \\ (a_{k+1,k}^{(k-1)} - 1) / a_{k+1,N}^{(k-1)} \\ \vdots \\ (a_{N,k}^{(k-1)} - 1) / a_{N,N}^{(k-1)} \end{bmatrix}.$$

使用此模块的前提是要保证每行的末尾元素非零,即 $a_{i,N}^{(k-1)} \neq 0 (k \leq i \leq N)$. 改进的方法是将参数 s_1 的选取范围扩大,在一个矩阵模块中选取最小值^[5],不局限于仅利用矩阵 \mathbf{A} 中的每行末尾非零元素进行计算. 过程如下:

首先应用矩阵 \mathbf{A} 中的各元素构造出一个新矩阵 \mathbf{Sc}_1 为

$$\mathbf{Sc}_1 = \begin{bmatrix} (a_{1,1}^{(0)} - 1) / a_{1,2}^{(0)} & \cdots & (a_{1,1}^{(0)} - 1) / a_{1,N}^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{N,1}^{(0)} - 1) / a_{N,2}^{(0)} & \cdots & (a_{N,1}^{(0)} - 1) / a_{N,N}^{(0)} \end{bmatrix}.$$

为了改进精确度增强稳定性,选择矩阵 \mathbf{Sc}_1 中的最小元素作为参数 s_1 . 即

$$s_1 = \min \{ \mathbf{Sc}_1 \} = (a_{i,j}^{(0)} - 1) / a_{i,j}^{(0)}.$$

如果其中 $i \neq 1$,也就是说 s_1 不在矩阵的第 1 行,那么就要采用一个置换矩阵 \mathbf{P}_1 将第 i 行置换为第 1 行,即

$$\mathbf{P}_1 \mathbf{A} = \begin{bmatrix} q_{1,1}^{(1)} & \cdots & q_{1,N}^{(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N,1}^{(1)} & \cdots & q_{N,N}^{(1)} \end{bmatrix}.$$

也就相当于将 s_1 变换为形式 $s_1 = (q_{1,1}^{(1)} - 1) / q_{1,1}^{(1)}$, 其中 $q_{1,j}^{(1)}$ 并不像传统方法中那样规定选择某一行末尾的非零元素,而是可以任意的从属于某一列,这样就构造出了矩阵 $\mathbf{S}_1 = \mathbf{I} - s_1 \mathbf{e}_j \mathbf{e}_1^T$ 为

$$P_1 A S_1 = P_1 A \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & & & & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ -s_1 & & & 1 & & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & q_{1,2}^{(1)} & \cdots & q_{1,N}^{(1)} \\ q_{2,1}^{(1)} - s_1 q_{2,j}^{(1)} & q_{2,2}^{(1)} & \cdots & q_{2,N}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N,1}^{(1)} - s_1 q_{N,j}^{(1)} & q_{2,N}^{(1)} & \cdots & q_{N,N}^{(1)} \end{bmatrix}$$

将所得的矩阵 $P_1 A S_1$ 与初等高斯矩阵 L_1 相乘,对矩阵的第1列进行前项消去,得到

$$A^{(1)} = L_1 P_1 A^{(0)} S_1 = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ s_1 q_{2,N}^{(1)} - q_{2,1}^{(1)} & 1 & & & \\ \cdots & & I & & \\ s_1 q_{N,N}^{(1)} - q_{N,1}^{(1)} & & & & 1 \end{bmatrix} P_1 A S_1 = \begin{bmatrix} 1 & a_{1,2}^{(1)} & \cdots & a_{2,N}^{(1)} \\ 0 & a_{2,2}^{(1)} & \cdots & a_{2,N}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & a_{N,2}^{(1)} & \cdots & a_{N,N}^{(1)} \end{bmatrix}$$

按照这样的步骤循环计算,最终可以得到三角形矩阵为

$$A^{(N-1)} = L_{N-1} P_{N-1} \cdots L_2 P_2 L_1 P_1 A^{(0)} S_1 S_2 \cdots S_{N-1} = \begin{bmatrix} 1 & a_{1,2}^{(N-1)} & \cdots & a_{1,N-1}^{(N-1)} & a_{1,N}^{(N-1)} \\ 0 & 1 & \cdots & a_{2,N-1}^{(N-1)} & a_{2,N}^{(N-1)} \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 1 & a_{N-1,N}^{(N-1)} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \pm 1 \end{bmatrix} = U. \quad (1)$$

式中 P_k 为将矩阵 $A^{(k-1)}$ 中与最小元素 s_k 相对应的行置换为第 k 行的置换矩阵,式(1)中的 $S_k = I - s_k e_j e_k^T$,元素 s_k 的形式为

$$s_k = (a_{i,k}^{(k-1)} - 1) / a_{i,j}^{(k-1)} = (q_{k,k}^{(k)} - 1) / q_{k,j}^{(k)}.$$

可以得到转置矩阵 P^T 与 2 个下三角矩阵 L^{-1} 和 S^{-1} ,分别表示为

$$S_1 S_2 \cdots S_{N-1} = S^{-1}, \\ L_{N-1} P_{N-1} \cdots L_2 P_2 L_1 P_1 = L_{N-1} (P_{N-1} L_{N-2} P_{N-1}^T) \cdots (P_{N-1} \cdots P_2 L_1 P_2^T \cdots P_{N-1}^T) (P_{N-1} \cdots P_2 P_1) = L^{-1} P^T.$$

将其结合完整表示为 $L^{-1} P^T A S^{-1} = U$,到这里便得出了矩阵分解式的最终完整表述为

$$A = PLUS.$$

对 KLT 变换矩阵 T 进行上述分解后,浮点型

变换用 $Y = PLUSX$ 整型实现,这样就完成了 $IIntKLT$.

对于分量较少的彩色图像,若在分量间应用小波变换,因无法做到级数较高的小波分解,使得去除谱间冗余的效果较差,因此要运用 $IIntKLT$ 去除分量间冗余.与普通二维图像不同,彩色图像不仅有彩色分量间的相关性,还含有空间相关性. $IIntKLT$ 的复杂度较高,而且变换基矢量与数据有关,若对空间二维图像应用 $IIntKLT$ 后,产生的 $IIntKLT$ 基矢量码流数据比原始图像的数据量还大,所以无法应用在空间域二维图像的变换中,因此对空间域需要采用复杂度适中的整型小波变换 ($IntWT$)^[6-7] 去除空间域的相关冗余,即对彩色图像采用 $IIntKLT$ 和 $IntWT$ 相结合的变换方法去除相关性.彩色图像数据经过 $IIntKLT$ 和 $IntWT$ 后的能量高度集中在空间域的最低频子带和第1个色彩分量,为进行高效的量化和编码提供了基础.

3 改进的 SPECK 编码方法

彩色图像经过 $IIntKLT$ 和 $IntWT$ 后能量更为集中.为了对变换后的图像进一步编码和量化,提高压缩效率,采用改进的 SPECK 编码方法对彩色图像进行压缩编码.

在彩色图像编码中,图像经过一系列整型变换后会生成大量的变换子带,在谱方向上能量向最上层的谱段集中.根据变换后子带分布的特点,本文设计了新的三维 Octave 分裂方法.如图1(a)所示,假设多光谱图像由 n 个谱段的图像组成,经过两级 $IIntKLT$ 和 $IntWT$ 后,在编码开始时,变换后的图像数据被分裂为 3 个集合,即 1 个 S 类型的集合 S_0 , 2 个 I 类型的集合 I_0 和 I_1 . 这 3 个集合中, S_0 首先被测试其是否重要,如果重要, S_0 则进行四叉树分裂,然后对 I_0 和 I_1 测试.因为最初 I_0 和 I_1 中的系数绝对值比 S_0 中系数的绝对值小的多,这样当 I_0 和 I_1 集合不重要时,就分别各用 2 个“0”bit 表示.

由图1(b)所示,随着测试门限的降低,当 I_0 测试重要时, I_0 中最低频的 3 个子带 S_1 、 S_2 和 S_3 被分裂出去.当 I_1 测试重要时,把 I_1 中最上层的谱段分裂出去作为一个新的 I_1 集合,剩下的部分作为新的 I_2 集合, S_4 为 I_1 中的最低频子带.图1(c)中可以看到 I_0 经过进一步分裂,最终将变为空集;此外 I_1 分裂为 4 个新的集合 (S_8 、 S_9 、 S_{10} 和更新后的 I_1), I_2 分裂为 3 个新的集合 (S_{11} , 更新后的 I_2 和一个新的 I_3). 由于经过 $IIntKLT$ 后的多光谱图像的能量高度集中在上层谱段,越上层谱段的系数也

越大,所以当 I 集合包含多个谱段,并且测试重要时, I 集合最上层谱段首先分离出来,形成一个 I 类和 S 类集合,而剩下的部分作为一个新的 I 集合,随着测试门限的降低, S 类型的集合会分裂的越来越多,并且集合的大小也会越来越小,此外 I 类型的集合也会分裂的越来越小. 为了使比特面

的率失真更为优化, S 类型的集合应按集合大小的升序排列测试,因为集合的尺寸越小,则它周围的重要系数就越多,那么下次测试时它就越有可能是重要的^[8]. 通过此方法,可以提高 0.1 ~ 0.3 dB PSNR 性能.

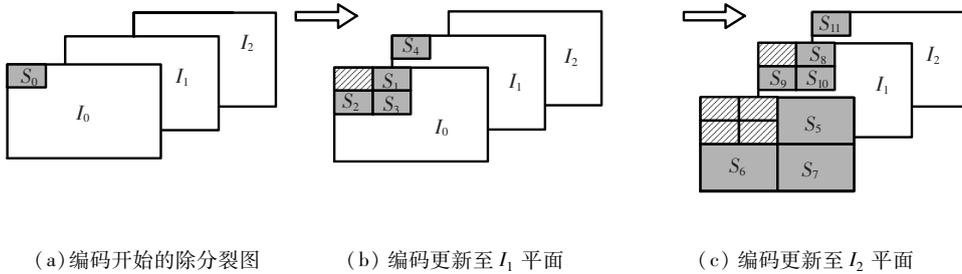


图1 3D Octave 分裂示意图

为了进一步去除变换系数之间相关性,在原 SPECK 算法上采用高阶算术编码器,在进行算术编码时采用了类似 JPEG2000 的上下文模型,细化过程编码采用了 3 个上下文,符号编码采用 5 个上下文,重要性系数和块编码采用 20 个上下文.

4 实验结果

RCT、KLT 和 IIntKLT 这 3 种变换方法在彩色图像压缩过程中起到的作用具有相似性,均是通过变换先去除一定的图像冗余信息,再继续对彩色图像进行有损压缩,其中 RCT 和 IIntKLT 还可以实现图像的无损压缩编码,但性能有所差异.

本文将 3 种方法分别应用于大小为 512×512 的标准测试彩色图像中(图片来源于 <http://sipi.usc.edu/database>),进行具体的有损压缩和无损压缩的实验,直观的从所得结果中对比其性能差异得出相关结论.

将结合了不同编码方法的 RCT、KLT 和 IIntKLT 应用于无损和有损的图像压缩中,进行压缩性能的对比实验. 两种编码方法为:本文所提出的改进 SPECK 编码方法和国际静止图像标准 JPEG2000. 对比有损压缩的性能差异时,分别在 4 种情况:0.25, 0.50, 1.00, 2.00 bpp 上进行比较,以充分证明其普适性. 所得有损压缩的对比实验结果如表 1 所示,无损压缩的结果如表 2 所示.

表1 3种不同变换方法的 PSNR 比较

图像	码率 = 0.25 bpp						码率 = 0.50 bpp					
	改进 SPECK 方法			JPEG2000 方法			改进 SPECK 方法			JPEG2000 方法		
	KLT	RCT	IIntKLT	KLT	RCT	IIntKLT	KLT	RCT	IIntKLT	KLT	RCT	IIntKLT
girl 测试图	34.43	33.10	34.42	34.33	33.2	34.31	36.72	35.25	36.70	36.66	35.27	36.63
pepper 测试图	32.40	31.58	32.39	32.36	31.63	32.35	34.08	33.21	34.06	33.99	32.99	33.97
hill 测试图	28.90	27.71	28.90	28.85	28.00	28.85	31.09	29.70	31.08	31.02	29.69	31.00
water 测试图	37.39	36.72	37.36	37.51	36.73	37.49	39.56	38.46	39.51	39.60	38.49	39.56
图像	码率 = 1.00 bpp						码率 = 2.00 bpp					
	改进 SPECK 方法			JPEG2000 方法			改进 SPECK 方法			JPEG2000 方法		
	KLT	RCT	IIntKLT	KLT	RCT	IIntKLT	KLT	RCT	IIntKLT	KLT	RCT	IIntKLT
girl 测试图	39.39	37.73	39.33	39.24	37.57	39.18	43.36	41.64	43.41	43.33	41.44	43.29
pepper 测试图	36.46	34.99	36.42	36.49	34.78	36.45	41.18	39.32	41.04	41.00	39.09	40.87
hill 测试图	33.77	32.20	33.75	33.65	31.83	33.62	39.20	37.09	39.15	38.93	36.55	38.89
water 测试图	42.20	40.43	42.10	42.30	40.47	41.22	46.25	44.08	45.97	46.18	43.81	45.90

表 2 2 种变换方法在无损压缩中的性能比较

图像	无损压缩			
	改进 SPECK 方法		JPEG2000 方法	
	RCT	IIntKLT	RCT	IIntKLT
girl 测试图	4.48	4.33	4.64	4.49
pepper 测试图	4.81	4.78	4.97	4.93
hill 测试图	5.19	5.12	5.37	5.30
water 测试图	3.88	3.8	3.99	3.90

从表 1 和表 2 的实验结果中能够明显看出,就同一种编码方法而言,在无损压缩中,IIntKLT 方法比 RCT 方法达到更高的压缩比率,使无损压缩平均减小 0.1 bpp,在有损压缩时,应用 IIntKLT 方法所得到的峰值信噪比均比 RCT 方法所得数值高,最高优于 RCT 方法 2.34 dB;对比 2 种编码方法所得结果,本文提出的改进 SPECK 编码方法在图像无损压缩中表现出了更好的性能,比国际静止图像标准 JPEG2000 下的无损压缩平均减小 0.1 bpp,在有损压缩时所得的峰值信噪比也明显优于结合国际静止图像标准 JPEG2000 的压缩算法,最高优于该算法 0.88 dB.

实验中只需用 IIntKLT 替换 RCT,而编码不用任何改变,即可集成到现有的 JPEG2000 框架中,并且结合了 IIntKLT 的 JPEG2000 框架在无损和有损压缩中均表现出了优于结合了 RCT 方法的性能,说明 IIntKLT 方法与国际静止图像标准 JPEG2000 具有良好的兼容性.

改进的 IIntKLT 方法比浮点型 KLT 方法的优势在于可以实现图像的无损压缩,但必须以具备高近似性能为前提,只有与浮点型 KLT 方法所得结果近似程度高,改进的 IIntKLT 方法才是有效可行的.表 1 列出了改进的 IIntKLT 方法比浮点型 KLT 方法在两种编码方法下的对比实验结果,可看出在同一种编码方法下,两种变换方法的差值几乎都在 0.05 dB 以下,近乎相等,只有个别值的差异较大,最多相差为 0.28 dB,但在总体上,改进的 IIntKLT 方法表现出了很高的近似性能.

5 结 论

1)充分挖掘和利用了彩色图像色彩空间的相似性,提出了一种改进的整型 KL 变换方法,充分的去除了彩色分量间的相关性,且为无损变换.

2)在改进的 SPECK 算法中进行算术编码时,采用了类似 JPEG2000 的上下文模型,细化过程编码采用了 3 个上下文,符号编码采用 5 个上下文,重要性系数和块编码采用 20 个上下文.

3)将改进的整型 KL 变换方法和整型小波变换(IIntKLT/IntWT)与 SPECK 编码相结合实现从有损到无损的彩色图像压缩方法.

4)对比实验结果,可以明显的看出该压缩算法在彩色图像的有损和无损压缩中表现出了更好的性能,并且编(解)码速度快,有较好的信噪比、压缩比及视觉效果.

参考文献:

- [1] RABBANI M, JOSHI R. An overview of the JPEG2000 still image compression standard[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2002, 17(1): 3-48.
- [2] KOUASSI R K, DEVAUX J C, GOUTON P, *et al.* Application of the Karhunen-Loeve transform for natural color image analysis[C]//Conference Record of the 31st Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Washington, DC: IEEE, 1997: 1740-1744.
- [3] LEE Junwoo. Optimized quadtree for Karhunen-loeve transform in multispectral image coding[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(4): 453-461.
- [4] HAO P, SHI Q. Matrix factorizations for reversible integer mapping[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(10): 2314-2324.
- [5] GALLI L, SALZO S. Lossless hyperspectral compression using KLT[C]//Proceedings 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2004. Washington, DC: IEEE, 2004: 313-316.
- [6] BILGIN A, ZWEIG G, MARCELLIN M W. Three-dimensional image compression with integer wavelet transforms[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(11): 1799-1814.
- [7] CALDERBANK A R, DAUBECHIES I, SWELDENS W, *et al.* Wavelet tranforms that map integer to integer[J]. *Appl Comp Harm*, 1998, 5(3): 332-369.
- [8] ISLAM A, PEARLMAN W A. Embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder[J]. *Visual Communications and Image Processing*, 1998, 3653: 294-305.

(编辑 张 红)