

## 基于 Karhunen-Loeve 和小波变换的多光谱图像 三维集合嵌入块编码压缩算法

吴家骥 吴成柯

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 目前多光谱成像已被广泛应用在遥感领域中,但巨量的多光谱图像数据导致存储和传输的困难,这就需要对多光谱图像数据进行高效的压缩。该文提出了一种新的多光谱图像压缩算法(KLT/WT-3DSPECK),首先利用二维小波变换(2DWT)去除多光谱图像的空间相关冗余,然后利用 Karhunen-Loeve 变换(KLT)减少频域的相关性,最后对变换后的系数利用改进的三维集合块分裂算法(3DSPECK)进行编码。根据变换后子带能量分布的特点,提出了新的 3D 八度音符分裂方法(octave partitioning)和改进的集合零块分裂算法。为了加速本文算法和优化嵌入码流的率失真性能,还给出了一种零块优化排序的快速算法。对两组多光谱和超光谱图像的测试表明,该算法不仅明显优于 KLT/WT-3DSPIHT 算法,也远优于基于 3D 小波变换的 AT-3DSPIHT 和 3DSPECK 等算法,同时该算法还支持图像的渐进传输。

**关键词:** 多光谱图像压缩, 嵌入编码, 零块编码, SPECK, 小波变换, Karhunen-Loeve 变换

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1244-05

## Compression of Multispectral Image Using Three-Dimensional Embedded Block Coding Algorithm Based on Karhunen-Loeve and Wavelet Transforms

Wu Jia-ji Wu Cheng-ke

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

**Abstract** Multispectral imaging has been widely used in the field of remote sensing. The storage and transmission of large volumes of multispectral data have become significant concerns. Therefore efficient compression is required for storage and transmission. This paper proposes a new multispectral image data compression algorithm (KLT/WT-3DSPECK). First, a 2D wavelet transform is applied to reduce the spatial redundancies. Next a Karhunen-Loeve Transform (KLT) is used to remove the correlation between adjacent spectral bands. Finally a modified 3DSPECK method is proposed and is used to code the transformed coefficients. According to the distribution of energy of the transformed coefficients, a novel 3D octave partitioning scheme and an improved set partitioning zeroblock method are presented. 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. Numerical experiments on two sample multispectral images show that the proposed KLT/WT-3DSPECK algorithm outperforms either the KLT/WT-3DSPIHT algorithm or the 3DWT-based AT-3DSPIHT and 3DSPECK algorithms. Besides having high performance, the KLT/WT-3DSPECK algorithm support progressive transmission.

**Key words** Multispectral image compression, Embedded coding, Zeroblock coding, SPECK, Wavelet transform, Karhunen-Loeve transform

### 1 引言

多光谱(或超光谱)图像被广泛应用在环境监测、地质、农业、医学和军事等领域。它通常由几个到几百个谱带组成,可以被看作为由 2D 的空间域和 1D 的频谱域组成 3D 体数据。当多光谱图像的谱分辨率较高时,也就是说谱段较多时,

数据量会变的非常大。传输和处理这些多光谱数据时,需要占用大量的链路带宽。为了能快速传输和处理这些数据并减少存储空间,需要对图像数据进行压缩编码。在多光谱图像中,不仅有空间相关,还存在谱间相关。为了去除这些图像数据中的冗余信息,通常采用 3 种方法: (1)矢量量化(VQ)<sup>[1]</sup>, (2)预测编码<sup>[2]</sup>, (3)变换编码<sup>[3]</sup>。为了获得更好的编码性能,

通常将上述方法结合使用<sup>[4-6]</sup>。但 VQ 和预测编码都有重要的不足: VQ 的复杂度较高且不能实现嵌入编码, 而预测编码的压缩率较低。为了更有效地去除图像的相关性, 目前人们普遍采用变换的方法。众所周知, Karhunen-Loeve 变换(KLT)是一种统计特性意义上最优的变换方法<sup>[7,8]</sup>, Lee 提出了利用 1D 的 KLT 和 2D 的 DCT, 并通过四叉树决定变换块的大小和变换后系数的量化编码方法<sup>[9]</sup>。然而 DCT 变换编码会产生方块效应, 因此越来越多的算法都采用基于 2D 小波变换(WT)的方法, 这是因为小波变换能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。近来人们为了压缩超光谱图像, 提出了一些基于 3D 小波变换的编码方法, 如: AT-3DSPIHT<sup>[7]</sup>, 3DSPECK<sup>[8]</sup>和 3DSPIHT<sup>[10]</sup>等。然而对于谱段较少的多光谱图像, 在谱间应用小波变换时, 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。因此人们普遍采用了 KLT 和 WT 相结合的方法, 其中最引人注目是 Dragotti 等人提出了 KLT/WT-3DSPIHT<sup>[11,12]</sup>算法, 它在利用 KLT 和 WT 去相关后, 还利用改进的 3DSPIHT 算法进行编码量化。3DSPIHT 是 2DSPIHT<sup>[13]</sup>的改进, 是一种零树编码策略, 它具有极高的编码性能和较低的复杂度, 而且支持图像的渐进传输。最近 Pearlman 等人提出了一种新的集合块 SPECK<sup>[14]</sup>算法, 它不仅具有更低的复杂度, 而且在编码复杂纹理的图像时具有比 SHPIHT 更高的编码性能。在本文, 我们提出了一种新的 KLT/WT-3DSPECK 算法, 它是对 2DSPECK 算法的改进和扩展。在 KLT/WT-3DSPECK 算法中, 我们根据 3D 子带的分布特点设计了新的 3D 八度音符分裂(3D octave partitioning)规则和零块分裂方法, 同时我们也给出了零块率失真优化快速排序的具体方法。

## 2 多光谱图像的空间和谱间变换去相关

与普通二维图像不同的是: 多光谱图像不仅有空间相关性, 还含有谱段间的相关性。通常谱方向(波长轴方向)的平均标准背离度 STD(the average STandard Deviations)远小于空间域中两个方向的 STD<sup>[7,15]</sup>, 也就是说, 谱段间系数的相关性要远大于空间域的系数相关性。由于 KLT 是一种最优线性变换, 与其他正交变换相比, 它的能量最集中, 误差最小, 所以本文采用 KLT 去除图像中的谱间相关性。但 KLT 的复杂度较高, 而且变换基矢量与数据有关, 变换后需要把 KLT 基矢量写进码流中, 无法应用在空间域二维图像的变换中, 因此我们对空间域采用复杂度适中的小波变换。即利用小波变换(WT)去空间域的相关冗余, 再利用 KLT 去谱间相关冗余。一般变换的顺序有两种: (1)KLT-WT 对频谱间的图像进行 KL 变换, 然后再进行空间的小波变换。(2)WT-KLT 对各谱段图像先进行空间域小波变换, 然后再对谱段间进行 KLT。

本算法试验发现, WT-KLT 略优于 KLT-WT。文献[12]也给出同样的结论。

假设多光谱图像数据

$$X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]^T \quad (1)$$

其中  $n$  表示谱段数,  $X_n$  表示第  $n$  个谱段的图像。对  $X$  作小波变换:

$$X \xrightarrow{WT} W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]^T \quad (2)$$

$$C_w = E[(W - m_w)(W - m_w)^T] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} (W_i - m_w)(W_i - m_w)^T \quad (3)$$

其中

$$m_w = E[W] = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} W_i$$

其中  $C_w$  为式(2)中  $W$  向量的协方差矩阵,  $M$  为小波向量中系数的个数。令  $\lambda_i$  和  $e_i$  分别是  $C_w$  的特征值和特征向量, 将特征值按减序排列  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_l$ , 则与每个特征值对应的特征向量  $e_i$  组成变换矩阵  $T = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_n]^T$ , 则 KL 变换矩阵  $Y = TW$ 。由此, 多光谱图像数据经过 WT 和 KLT 后的能量高度集中在空间域的最低频子带和频谱域的第 1 个谱段, 这样就为我们进一步高效的编码和量化提供了基础。

## 3 基于 KLT/WT 的三维集合块编码(KLT/WT-3DSPECK)

原始的 2DSPECK 是一种基于四叉树分裂的零块图像编码算法。近年来, 四叉树技术已被广泛运用到比特面编码的算法中, 如 SPECK<sup>[14]</sup>、EZBC<sup>[16]</sup>、SBHP<sup>[17]</sup>和 EBCOT<sup>[18]</sup>等。它采用简单直观和有效的块分裂方法: 只要一个给定的集合被测试是重要的, 那么它就会分裂成四个近似相等的子块。在零树算法中, 对于一个包含大量不重要系数的树, 只需用一个“0”比特就可表示。同理, 在运用到内嵌零块比特面编码中时, 对不重要的块也只需一个“0”比特即可表示, 而那些重要的用“1”表示的块进行四叉树迭代分裂, 直到分裂为单独的元素为止。本文中, 称那些未被测试的块为集合, 而那些包含大量不重要系数的集合被称为“零块”。

我们用函数:

$$\Gamma_n(\tau) = \begin{cases} 1, & 2^n \leq \max_{(i,j,k) \in \tau} |c_{i,j,k}| < 2^{n+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

来测试集合  $\tau$  的重要性。  $c_{i,j,k}$  表示多光谱图像经过小波变换和 KLT 后的系数, 并且至少存在一个  $c_{i,j,k}$  在门限为  $n_{\max}$  时是重要的。

对于一个二维图像来说, 经过多级小波分解后, 会形成多个小波子带, 其中最低频子带的能量最高, 系数的绝对值也最大, 而随着子带频率的增高, 子带内的系数绝对值也就会相

应减小。因此在 2DSPECK 中还采用了八度音符分裂<sup>[13]</sup>(octave partitioning), 它的作用是: 进行比特面编码时, 先编码最低频率子带内的元素, 而其它不重要的子带尽量用一个比特表示。如图 1 所示, 最低频的子带用集合  $S$  表示, 其它的子带用集合  $I$  表示。首先对  $S$  进行二叉树编码, 然后测试集合  $I$ , 假如  $I$  被测试不重要, 则所有  $I$  内的子带只需用一个“0”比特表示; 如果  $I$  重要, 则把  $I$  中的最低频的 3 个子带分裂出去, 形成 3 个新的  $S$  类型的集合和一个新的  $I$  类型的集合, 然后对这 4 个新的集合再做重要性迭代测试。

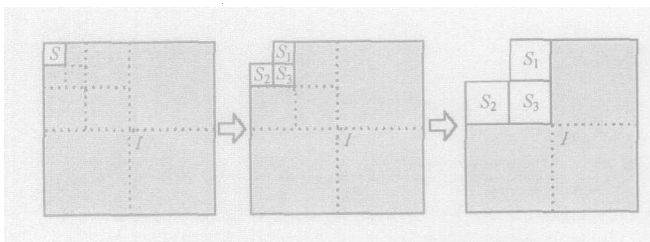


图 1 在空间域中, 集合  $I$  的八度音符分裂

在多光谱图像编码中, 图像经过 KLT/WT 后会生成大量的变换子带, 而且变换后的图像有一个显著的特点: 在谱方向, 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 3D 八度音符分裂方法。如图 2(a)所示, 假设多光谱图像由  $n$  个谱段的图像组成, 经过两级小波变换和 KLT 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,  $S_0$  则进行二叉树分裂, 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”比特表示。图 2(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 1 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 2(c)可以看到  $I_0$  经过进一步分裂, 变为空集,  $I_1$  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 KLT 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,  $I$  集合最上层谱段分离出来作为一个  $I$  类和  $S$  类集

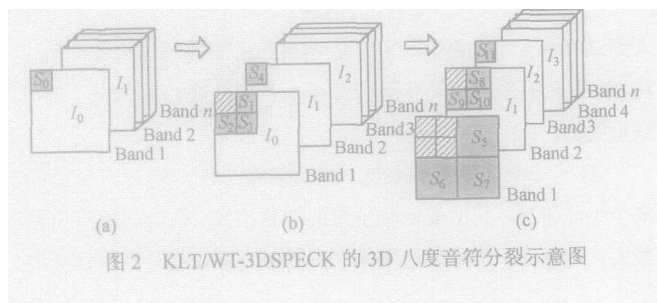


图 2 KLT/WT-3DSPECK 的 3D 八度音符分裂示意图

合, 而剩下的部分作为一个新的  $I$  集合。实际上, 可以把谱方向理解成作了二叉树的分裂。算法实现的简要步骤如下:

(1) 测试门限, 把集合  $S_0, I_0$  和  $I_1$  加入到 LIS(List of Insignificant Sets)中。

(2) 取出 LIS 中的每一个集合, 测试是否重要:

(a) 对于一个只包含一个元素的  $S$  类集合  $S_i$ , 如果  $S_i$  重要, 则把  $S_i$  加入到重要元素链表 LSP(List of Significant Pixels)中。如果  $S_i$  不重要, 则把  $S_i$  加入到不重要元素链表 LIP(List of Insignificant Pixels)中。

(b) 对于一个包含多个元素的  $S$  类集合  $S_i$ , 如果  $S_i$  重要, 则对  $S_i$  进行二叉树迭代分裂, 生成 4 个新的子集合, 并对所有子集合作(a)和(b)步骤迭代测试。如果  $S_i$  不重要, 则把  $S_i$  加入到不重要集合链表 LIS 中。

(c) 对于包含单个谱段的  $I$  类型的集合  $I_i$ , 如果  $I_i$  重要, 则把  $I_i$  分裂为 1 个或 3 个  $S$  类集合和一个新的  $I_i$  集合, 并对所有子集合作(a), (b)和(c)步骤迭代测试。如果  $I_i$  不重要, 则把  $I_i$  加入到 LIS 中。

(d) 对于包含多个谱段的  $I$  类型的集合  $I_i$ , 如果  $I_i$  重要, 则把  $I_i$  分裂为 1 个  $S$  类集合, 1 个新的  $I_i$  集合和 1 个新的  $I_{i+1}$  集合, 并对所有子集合作(a), (b), (c)和(d)步骤迭代测试。如果  $I_i$  不重要, 则把  $I_i$  加入到 LIS 中。

(3) 对 LIP 中上一比特面生成的元素进行精细量化。

(4) 更新测试门限, 重复步骤(2)。

在编码过程中, 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, 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, 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<sup>[13]</sup>, 通过这一步, 可以提高 0.1—0.3dB PSNR 性能。然而我们的试验和文献[8,14]证明, 任何对集合的排序算法都会使算法速度非常慢, 试验显示对单幅遥感图像作 1bpp 编码时, 通常需要 200s 以上, 这是因为每次排序需要对 LIS 链表进行大量的删除和插入操作, 当链表内存在大量集合时, 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的按照集合分裂深度排序的方法。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  $S$  经过一次二叉树分裂, 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, 只需按照不同的分裂深度对不同的集合进行测试。由于避免了对链表的复杂操作, 从而大大加快了计算速度, 对单幅图像 1bpp 编码时, 速度可以达到 1s 左右。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  $S$  进行四叉树分裂处理。

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

for each set  $S$  in LIS, do

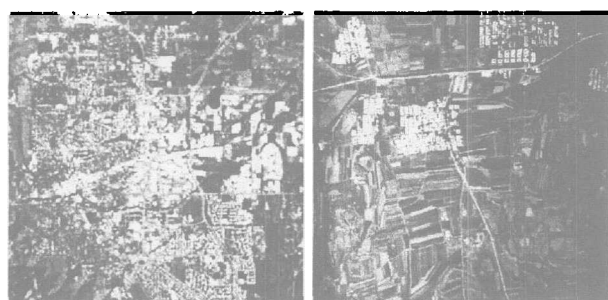
if  $d(S) = l$  do  $O(S)$ , else skip.

我们可以发现,在四叉树算法中,对于一个重要的集合,它的四叉树子孙中的4个子集合中,如果有3个子集合不重要,那么显然剩下的那个子集合一定重要。如果我们输出3个0表示不重要的子集合,则剩下的那个重要的子集合不用输出1,在解码时我们也知道它是重要的。利用这个思想,我们改进了四叉树算法,减少了一些比特的输出,以提高编码效率。

#### 4 实验结果与分析

为了测试本文方法,我们选择了一组6个谱段,  $256 \times 256$  空间分辨率的 Landset TM 图像 Boulder(位于美国 Colorado, 图3(a)所示)和一组128个谱段,  $512 \times 512$  空间分辨率的多光谱图像 Village (位于中国山东省内, 如图3(b)所示), 它们都具有8bpp的灰度。两组图像均用双正交9/7小波<sup>[19]</sup>作4级小波变换,然后再作谱间KLT,最后进行3DSPECK编码压缩。同时我们也用2DSPIHT<sup>[13]</sup>, 2DSPECK<sup>[14]</sup>, AT-3DSPIHT<sup>[7]</sup>, 3DSPIHT<sup>[10]</sup>, 3DSPECK<sup>[8]</sup>和 KLT/WT-3DSPIHT<sup>[12]</sup>方法对图像进行了对比测试。所有测试均在硬件平台 CPU P4 2.4G 的 PC 机上完成。在对 Village 测试时,为了提高编码速度和减少对内存的消耗,把128个谱段按16个谱段为一个编码单元进行编码,尽管编码单元中的谱段越多,编码性能越高,但超过16个谱段后对性能的提高实际非常有限<sup>[8,12,15]</sup>,最终的PSNR结果为各编码单元结果的平均值。

图4和图5显示了利用KLT/WT-3DSPECK, KLT/WT-3DSPIHT, AT-3DSPIHT, 3DSPECK, 3DSPIHT, 2DSPECK和2DSPIHT对两组图像分别编码后重构图像的率失真曲线。从试验结果明显可以看出,所有基于3D变换的编码方法要



(a) Boulder 的第2谱段的原始图像 (b) Village 第18谱段的原始图像

图3

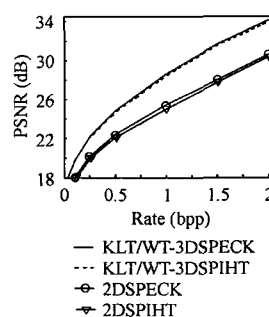


图4 对于 Boulder 图像应用 KLT/WT-3DSPECK, KLT/WT-3DSPIHT, 2DSPECK 和 2DSPIHT 编码的率失真曲线

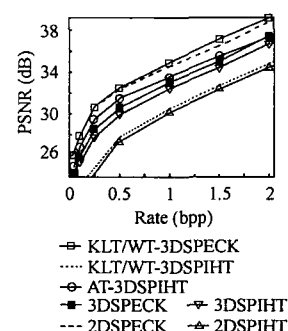


图5 对于 Village 图像应用不同算法编码后的率失真曲线

优于基于2D变换的方法,在所有码率下KLT/WT-3DSPECK比2DSPECK和2DSPIHT的PSNR高3—5dB,其中2DSPECK和2DSPIHT仅仅对各谱段的图像进行空间域的2D变换编码压缩。在图4中,KLT/WT-3DSPECK大约比KLT/WT-3DSPIHT高0.15dB左右。在图5中,KLT/WT-3DSPECK比KLT/WT-3DSPIHT高0.2—0.5dB,而且随着码率的增加,优势越明显。对比那些基于3DWT的AT-3DSPIHT,3DSPECK和3DSPIHT算法,可以发现,基于KLT/WT的方法具有很明显的优势,如KLT/WT-3DSPECK比AT-3DSPIHT高1.5dB以上。KLT/WT-3DSPECK不仅具有非常高的编码性能,还具有较低的复杂度。表1显示,KLT/WT-3DSPECK的编码速度比KLT/WT-3DSPIHT快2倍,解码速度与KLT/WT-3DSPIHT相当。此外KLT/WT-3DSPECK还支持码流的渐进传输,可以使用户快速浏览超大数据量的多光谱数据,通过码率的设定,可实现从有损压缩到几乎无损压缩。在抗误码方面,当基于零树的编码出现误码时,误码易扩散,导致解码失败。而本文方法由于是基于块的编码,误码不易扩散,抗误码能力较好。

表1 KLT/WT-3DSPECK与KLT/WT-3DSPIHT在编解码一个编码单元(16个谱段)的Village图像时所用的CPU时间(s)

| CPU 时间<br>(s)      | 0.5bpp     |        |        |                 | 1bpp       |        |        |                 |
|--------------------|------------|--------|--------|-----------------|------------|--------|--------|-----------------|
|                    | KLT<br>/WT | 编<br>码 | 解<br>码 | 逆<br>KLT<br>/WT | KLT<br>/WT | 编<br>码 | 解<br>码 | 逆<br>KLT<br>/WT |
| KLT/WT-<br>3DSPECK | 13.06      | 3.50   | 1.67   | 14.06           | 13.07      | 5.62   | 4.23   | 14.20           |
| KLT/WT-<br>3DSPIHT | 13.06      | 7.84   | 1.20   | 14.11           | 13.08      | 12.05  | 3.56   | 13.58           |

## 5 结束语

在本文中,首先利用小波变换(WT)去除多光谱图像的空间相关冗余,然后利用 KLT 去除频域的相关性。同时根据子带能量的分布特点,我们改进了集合块的分裂算法,实现了对多光谱图像的高效压缩。本文的 KLT/WT-3DSPECK 方法由于完全采用嵌入编码,所以适合多种码率的渐进传输,而且具有较低的复杂度和很高的编码性能,是一种性能优异的多光谱压缩编码算法。

## 参考文献

- [1] Gupta S, Gersho A. Feature predictive vector quantization of multispectral images. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 491 – 501.
- [2] Rao A K, Bhargava S. Multispectral data compression using bidirectional interband prediction. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 385 – 397.
- [3] Saghri J A, Tescher A G, Reagan J T. Practical transform coding of multispectral imagery. *IEEE Signal Processing Mag.*, 1995, 12(1): 32 – 43.
- [4] Gelli G, Poggi G. Compression of multispectral images by spectral classification and transform coding. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, 8(4): 476 – 489.
- [5] Vaisey J, Barlaud M, Antonini M. Multispectral image coding using lattice VQ and the wavelet transform. *IEEE International Conference on Image Processing 1998*, Chicago, 1998: 307 – 311.
- [6] Saghri J A, Tescher A G, Reagan J T. Terrain-adaptive transform coding of multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994. *IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation*, International. 1994: 313 – 316.
- [7] Tang X, Cho S, Pearlman W A. 3d set partitioning coding methods in hyperspectral image compression 2003. *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing*, Barcelona, Spain, 2003: 239 – 242.
- [8] Tang X, Pearlman W A, Modestino J W. Hyperspectral image compression using three-dimensional wavelet coding. *SPIE/IS&T Electronic Imaging 2003*, Santa Clara, 2003, (5022): 1037 – 1047.
- [9] Lee Jungwoo. Optimized quadtree for Karhunen-Loeve transform in multispectral image coding. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1999, 8(4): 453 – 461.
- [10] Kim B-J, Pearlman W A. An embedded wavelet video coder using three-dimensional set partitioning in hierarchical trees (SPIHT). *IEEE Data Compression Conf. (DCC'97)*, Snowbird, 1997: 251 – 260.
- [11] Tae-Su Kim, Seung-Jin Kim, Byung-Ju Kim, Jong-Won Lee, Seong-Geun Kwon, Kuhn-Il Lee. Multispectral image data compression using classified prediction and KLT in wavelet transform domain. *Proc. of ITC-CSCC2002*, Phuket, Thailand, 2002: 204 – 207.
- [12] Dragotti P L, Poggi G, Ragozini A R P. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 416 – 428.
- [13] Said A and Pearlman W A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits and Syst. for Video Technol.*, 1996, 6(3): 243 – 250.
- [14] Islam A, Pearlman W A. An embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder. in *Proc. of SPIE Vol.3653, Visual Communications and Image Processing' 99*, San Jose, CA, 1999: 294 – 305.
- [15] He C, Dong J, Zhang Y F. Optimal 3-D coefficient tree structure for 3-d wavelet video coding. *IEEE Trans. on Circuits and Syst. for Video Technol.*, 2003, 13(10): 961 – 972.
- [16] Hsiang S-T, Woods J W. Embedded image coding using zeroblock of subband/wavelet coefficients and context modeling. *IEEE Int. Conf. on Circuits and Systems (ISCAS2000)*, Geneva, Switzerland, 2000: 662 – 665.
- [17] Chrysafis C, Said A, Drukarev A, Islam A, Pearlman W A. SBHP — A low complexity wavelet coder. 2000. *ICASSP'00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Istanbul, Turkey, 2000, 4(6): 2035 – 2038.
- [18] Taubman D. EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation): A complete reference. *ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N988*, Sept. 1998.
- [19] 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: 男, 1973年生, 博士, 主要从事图像处理及静止图像、三维图像的压缩编码方面的研究。

吴成柯: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 从事图像通信、图形学、计算机视觉和模式识别等方面的研究。