

基于改进预测树的超光谱遥感图像无损压缩方法

夏 豪 张 荣

(中国科学技术大学信息处理中心 合肥 230027)

摘 要: 该文在传统预测树方法的基础上提出一种改进方法,该方法定义一个幅度拉伸因子来表达相邻波段的局部灰度变化,通过比较局部上下文梯度来估算该幅度因子,并用它对当前的预测值进行修正。此外,还结合 AVIRIS 超光谱遥感图像的相关性特性提出一种谱间预测和空间预测相结合的综合预测无损压缩方案,在不同波段范围内采用可选的预测方式进行预测。在 AVIRIS 遥感图像数据集上的实验结果表明,该方案在计算复杂度较低的情况下,能够更好地消除冗余信息,具有良好的压缩性能。

关键词: 遥感; 超光谱; 无损压缩; 预测树

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0813-05

The Lossless Compression Method for Hyperspectral Images Based on Optimized Prediction Tree

Xia Hao Zhang Rong

(Information Processing Center, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Prediction tree is a traditional and efficient method for lossless compression of hyperspectral image. In this paper an optimized method based on prediction tree is presented. To express the variation of local context of two neighboring bands, a partial extending factor is introduced to compensate the predicted value of current pixel so as to reduce the prediction error. Furthermore, a synthetical prediction based lossless compression scheme for AVIRIS hyperspectral images is proposed. Experimental results demonstrate that the proposed method works efficiently on AVIRIS images with low complexity and limited memory.

Key words: Remote sensing; Hyperspectral; Lossless compression; Prediction tree

1 引言

成像光谱技术由于其在资源探测、环境检测和军事侦察中的广泛应用,在近些年获得了非常迅速的发展。和普通的自然图像不同,超光谱遥感图像由二维的空间域和一维频谱域组成。随着空间分辨率和谱间分辨率的不断提高,超光谱遥感图像的数据量剧增,这使得数据的传输和存储压力巨大。为此,大量针对超光谱遥感图像的压缩方法被提出。由于遥感数据的获取代价昂贵,并且在应用邻域对信息恢复的准确度要求较高,所以人们对无损或近无损压缩方法给予更高的关注。目前,超光谱遥感图像的压缩方法主要分为预测编码,变换编码,矢量量化,以及各种方法的组合^[1]。

基于预测的方法因其直观的去相关效果和较低的计算复杂度很早就被用于遥感图像压缩领域,近年来有许多非常有效的预测方法涌现出来。例如,Zhang 和 Liu 提出了一种基于自适应谱间重排序和带反馈的前向最近邻预测方法(ABPCNEF)^[2],Slyz 和 Zhang 提出了一种基于分块的预测方法(BH)^[3],将输入图像分成许多小方块,用相邻波动中的参考块对当前块进行预测,该方法支持空间随机访问。

Mielikainen 和 Toivanen 提出了聚类 DPCM(C-DPCM)无损压缩方法^[4],它首先对波段分类,然后为每个聚类计算一个最优的线性预测器,保证每个聚类的均方误差的期望值最小。Rizzo 等人提出一种基于线性预测器的谱间最小误差预测器(SLSQ)^[5],并对算法进行了一些优化(SLSQ-OPT)。Wang 和 Babacan 等人提出了一种基于上下文的条件均值预测器(CCAP)^[6],它的基本思想是利用超光谱图像具有相似的全局结构这一特点,采用相邻波段中与当前上下文最相关的那个上下文对当前值进行预测。Jain 和 Adjeroh 提出了一种针对超光谱图像的非线性预测方法(NPHI),并通过划分边界像素和非边界像素来进行基于边界的上下文预测(EBHI)^[7]。此外,还出现了一些适用于波段交织格式(band-interleaved-by-line)的超光谱遥感图像的压缩算法,如 Mielikainen 在 2006 年提出了查找表方法(LUT)^[8],以及 Aiazzi 和 Alparone 等人提出的基于单纯谱间预测的 S-RLP 和 S-FMP 无损/近无损压缩算法^[9]。

预测树方法是一种有效的多光谱图像无损压缩方法,Memon 在 1994 年提出了基于预测树模型^[10]的多光谱图像压缩方法,随后又将其推广到 3D-CALIC^[11](3D Context-based Adaptive Lossless Image Codec)。张荣、阎青等人对预测树

的定义做了修改, 提出一种侧邻域最小绝对权值(SNMAW)预测树方法^[12], 大大简化了预测树的构造算法, 降低了计算复杂度。此后, 吴铮、何明一等人结合自适应线性预测方法, 利用谱间的局部统计冗余和结构冗余建立自适应预测器, 提出了误差补偿预测树方法^[13], 该方法在对多光谱遥感图像进行压缩时取得了较好的效果。

本文对 SNMAW 预测树模型进行了改进, 在此基础上结合 AVIRIS 超光谱遥感图像的谱内和谱间相关性特性, 提出一种针对超光谱图像的谱间预测和空间预测相结合的综合预测无损压缩方案。在 AVIRIS 多组数据上的测试结果表明, 改进的预测树方法和综合预测无损压缩方案在较低的时间复杂度和空间复杂度下, 可以获得较好的压缩性能。

2 基于改进预测树的压缩方法

提高超光谱图像无损压缩的性能就是要致力于消除图像数据的冗余信息, 降低残差图像的一阶熵, 从而获得低的码率。超光谱遥感图像表达的是同一地表在不同波长光谱下的反射率, 它有两类冗余: (1)空间冗余; (2)谱间冗余。空间冗余是指一个波段内相邻像素之间的灰度值相似, 谱间冗余则不仅表现为相邻波段同一空间位置上的像素灰度值相近, 而且局部上下文的纹理和结构通常也很相似。跟多光谱、高光谱遥感图像相比, 超光谱遥感图像具有更高的谱间分辨率, 因此谱间冗余信息也更多。预测树方法正是一种利用相邻波段的相关性建立起来的基于上下文的预测模型。

2.1 侧邻域最小绝对权值预测树

SNMAW 预测树模型基于这样一个事实, 某一位置上的像素灰度值与其上下文的关系在相邻波段中是相似的。侧四邻域最小绝对权值预测树的基本思想是把图像当作加权图, 顶点即图像的每个像素, 图中的边即相邻像素的连线, 权值即边两端的像素灰度差。一颗预测树对应图像的一个去相关方案, 根据存储的预测树的边和权值信息可以准确地恢复出原始图像。相比于传统的四邻域预测树, 侧邻域最小绝对权值预测树消除了生成树中的环路, 因此构造算法更加简单。侧四邻域的定义如图 1 所示。

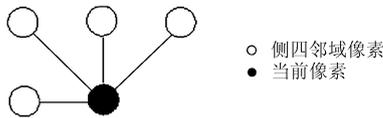


图 1 预测树中侧四邻域的定义

2.2 对预测树方法的改进

考虑到超光谱遥感图像较高的谱间相关性, 相邻波段在很大程度上具有相似的结构, 因此它们的预测树是相似的, 前一波段的最优预测树对当前波段而言是近似最优的。为了减小保存预测树信息带来的开销, 对第一波段进行无损压缩, 从第二波段开始, 用前一波段预测树对当前波段进行预

测。定义 $I_b(x, y)$ 的预测值为 $\tilde{I}_b(x, y)$, 前一波段同一位置像素 $I_{b-1}(x, y)$ 的相邻像素记为 $I_{b-1}^n(x, y)$, $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ 表示左、左上、上、右上方向的相邻像素。按照 SNMAW 预测树模型,

$$\text{dir} = \arg \left\{ \min \left| I_{b-1}(x, y) - I_{b-1}^n(x, y) \right|, n = 1, 2, 3, 4 \right\} \quad (1)$$

则当前像素的预测值为

$$\tilde{I}_b(x, y) = I_b^{\text{dir}}(x, y) \quad (2)$$

这种预测模型很好地利用了当前像素与上下文之间的梯度方向信息, 当相邻波段的灰度动态范围相近时能够较好地消除冗余信息。但是在用前一波段预测树对当前波段进行预测时, 该方法没有考虑到相邻波段幅度动态范围上的拉伸(或者压缩)对权值的影响。图 2 绘出了 16bit 的 AVIRIS Jasper Ridge 图像各个波段的最大值和最小值, 从图中可以粗略看出, 超光谱遥感图像各个波段灰度值的动态范围差别是比较明显的, 而这种差别也会在局部上下文中体现出来。如果能够在预测的时候把相邻波段动态范围的拉伸考虑进来, 预测误差将有可能进一步减小。

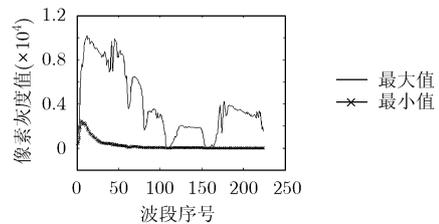


图 2 Jasper Ridge sc1 各个波段的灰度值动态范围

因此, 本文引入一个拉伸因子来表达这种相邻上下文的拉伸幅度, 它定义如下

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j \frac{I_b(x-i, y-j)}{I_{b-1}(x-i, y-j)} \quad (3)$$

N 是上下文像素数目, 本文中的上下文即当前像素的侧四邻域像素, $N = 4$ 。 α 是对相邻波段上下文的灰度增益的一个简单而有效的评估, 它描述了上下文动态范围上的差别。利用 α 对当前预测值进行修正,

$$\tilde{I}_b(x, y) = I_b^{\text{dir}}(x, y) + \alpha \cdot (I_{b-1}(x, y) - I_{b-1}^{\text{dir}}(x, y)) \quad (4)$$

由于局部上下文的平稳性, 因此上下文动态范围的拉伸在当前像素中会表现出来。式(4)把上一波段同一位置上的最小绝对权值在当前波段中的变化考虑进来, 因而使得预测值更加精确。

3 综合预测压缩方案

与多光谱遥感图像相比, 超光谱遥感图像具有更高的谱间分辨率, 因此谱间冗余通常要比谱内的空间冗余大。对于给定的两幅图像 $A(i, j)$ 和 $B(i, j)$, 定义它们的互相关系数 $r(A, B)$ 为

$$r(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A(i, j) - m_A][B(i, j) - m_B]}{\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i, j) - m_A)^2 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (B(i, j) - m_B)^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

其中 m_A 和 m_B 是 A 和 B 各自的均值。根据式(5)计算 Jasper Ridge scene 1 的相邻波段的相关系数如图 3 所示。可以看到，绝大多数相邻波段之间的相关性系数接近于 1.0，但是少数相邻波段相关系数非常小，所有波段的相关系数呈非平稳分布。因此要想更好的消除冗余，单纯的谱间预测或谱内预测并不总是最优的。

为了进一步说明这一点，对 Jasper Ridge scene 1 的所有波段进行空间预测和谱间预测，其中空间预测器采用的是 JPEG 标准中无损模式预测器： $\tilde{I}_b(x, y) = I_b(x - 1, y)$ ，得到残差图像的熵如图 4 所示。图 4 表明，对于部分波段，空间预测的效果比谱间预测的效果更好。这是因为部分波段的空间相关性很强，图像本身非常平滑，波动范围比较小。因此对于所有波段而言，无论谱间预测还是空间预测，单一的预测方式并不总是最优的。对 AVIRIS 中其它几组图像进行实验得到的结果与图 4 类似。

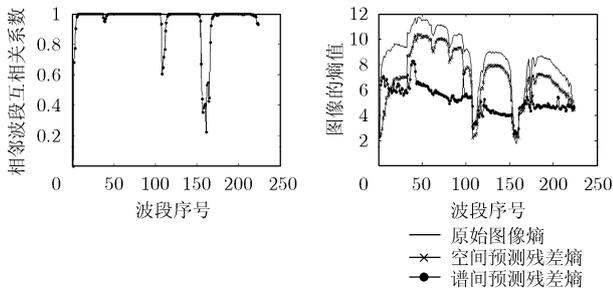


图 3 Jasper Ridge sc1 相邻波段的相关系数

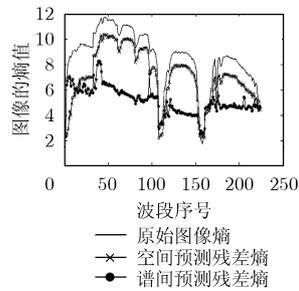


图 4 Jasper sc1 不同预测模式下的残差图像

因此，本文综合利用不同预测器在不同波段的优势，提出谱间预测和空间预测相结合的综合预测方法。该方法的基本流程是计算当前波段与前一波段的相关系数，如果相关系数大于一个预先给定的阈值 T ($0 < T < 1$)，则采用改进预测树方法用前一波段预测树对当前波段进行预测，否则直接进行空间预测，最后对预测残差进行自适应算术编码。综合预测压缩方案的流程图如图 5 所示，具体实施步骤如下：

(1)读入第 1 波段图像，采用 JPEG 无损预测器 $\tilde{I}_b(x, y) = I_b(x - 1, y)$ 对其进行空间预测，得到残差图像，并将第 1 波段图像读入缓冲区；

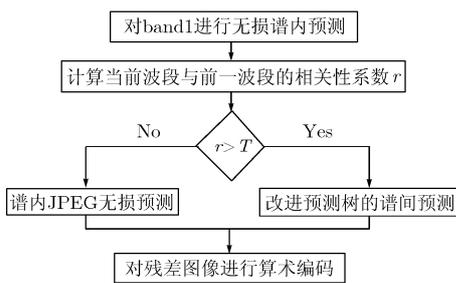


图 5 综合预测压缩方案的流程图

(2)读入下一波段，并计算它与前一波段图像的相关性系数 r ，如果 $r \geq T$ ，则表明当前波段与前一波段相关性很强，计算前一波段图像的最小绝对权值预测树 t ，根据式(4)用 t 对当前波段进行谱间预测，反之，则对当前波段进行空间预测，同时将当前波段读入缓冲区；

(3)重复第(2)步，直到所有波段图像都被处理。

(4)对所有残差图像进行自适应算术编码，得到压缩码流。

4 实验结果与分析

仿真实验数据采用的是 AVIRIS 提供的 3 个场景的 224 波段超光谱遥感图像，图像尺寸为 614×512 像素，每个像素由 16bit 有符号的整数表示。为了便于计算和比较结果，把图像切割成 512×512 像素，图 6 所示是经过简单量化后的 256 值图像。

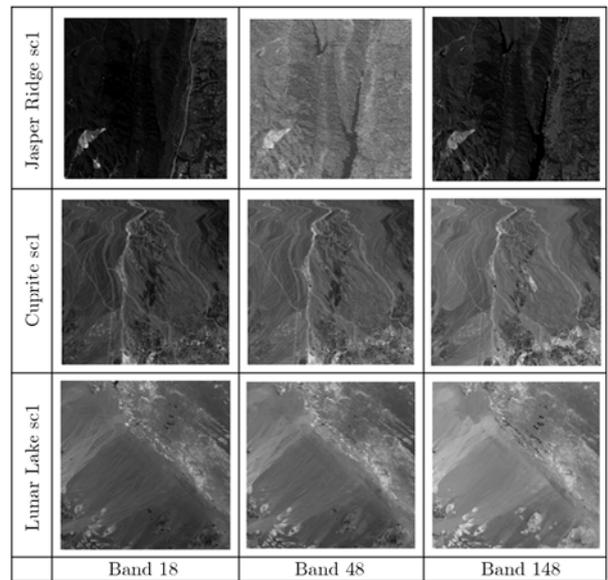


图 6 实验采用的超光谱图像

为测试改进的预测树方法的压缩性能，以 Jasper Ridge scene 1 为例，统计各个波段图像的原熵、侧四邻域预测树预测残差熵和改进预测树方法的残差熵，如图 7 所示。

表 1 列出的是对多组数据采用传统预测树方法和改进预测树方法进行压缩的压缩比。从表 1 中可以看出，同传统预

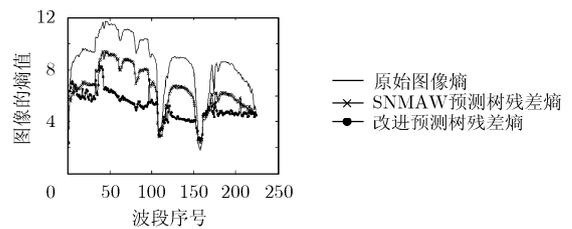


图 7 改进预测树方法的改进效果(Jasper Ridge sc1)

表 1 改进的预测树与传统预测树的压缩比比较

	Jasper Ridge		Cuprite		Lunar Lake	
	Scene 1	Scene 2	Scene 1	Scene 2	Scene 1	Scene 2
	预测树	2.46	2.51	2.75	2.58	2.75
改进的预测树	3.09	3.10	3.09	3.04	3.05	3.06
改进效果 (%)	25.6	23.5	12.4	17.8	10.9	14.25

测树方法相比,采用改进的预测树方法对 AVIRIS 系列图像进行压缩,各组数据的压缩比有显著的提高,这表明对预测树的改进算法是非常有效的。

在上述算法中阈值 T 是一个关键因素,它的选取直接关系到算法的压缩比。图 8 所示的是三组实验数据的压缩比与阈值 T 的变化关系曲线,由于 T 值过大时大部分波段都采用了谱间预测,而 T 值过小时采用谱内预测的波段数目增多,因此在 T 的影响下,对于每组图像压缩比存在一个峰值。可以预见,对于不同成像光谱仪获取的超光谱遥感图像, T 的取值是不同的。对于本文中的 AVIRIS 超光谱图像,整体而言,经过权衡 T 取 0.98 可以获得最好的压缩效果。

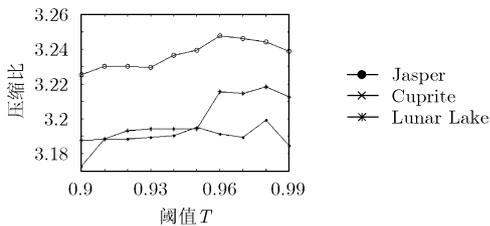


图 8 阈值 T 对压缩比的影响

阈值 $T = 0.98$ 时,计算本文提出的综合预测压缩方案的压缩比,并和当前其他一些预测方法的结果进行比较,如图 9 所示。

实验结果表明,C-DPCM 获得的压缩比是最高的,SLSQ 和 SLSQ-OPT 也取得了不错的效果,而 CCAP 算法则在对 Cuprite 进行压缩时表现优异。但是应该注意到,C-DPCM 是一个非常复杂的预测器,它首先需要计算所有波段图像的相关性,根据波段相关性进行聚类,然后在每个聚类内部进行优化线性预测。SLSQ-OPT 算法由于要对线性预测器进行

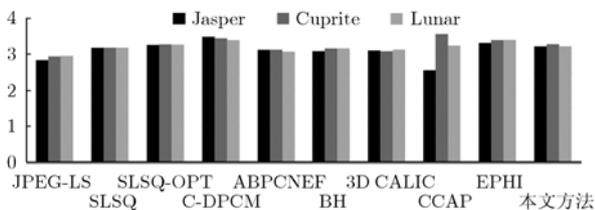


图 9 不同压缩方法针对 AVIRIS 遥感图像的压缩比比较

最小化均方误差优化,算法复杂度也较高。CCAP 方法需要在前一波段中搜索最匹配的上下文,然后还要计算搜索窗口中每个像素的相关系数。EPHI 除了需要对每个像素根据上下文计算权重外,还必须对上下文中的每个像素进行边界分类,区分哪些像素在边界上,哪些不在边界上。所以,这些算法虽然具有良好的压缩性能,但是相应的计算复杂度也很高。而 JPEG-LS 和 CALIC 这些在自然图像压缩中表现优秀的算法由于忽略了谱间冗余,并不适合直接用来进行超光谱图像的压缩。

相比之下,本文提出的综合预测压缩方案在相邻波段相关性弱的时候进行谱内预测,相关性强的时候进行谱间预测,可以更加充分的消除超光谱图像的谱内冗余和谱间冗余,因而对 AVIRIS 的多组数据都具有良好的压缩效果。从原理上看,改进的 SNMAW 预测树方法在构造最小绝对权值预测树时对每个像素只需 4 次减法和 3 次比较计算,在预测当前值时也只需要 4 次乘法和 1 次加法,进一步分析发现,由于相邻像素的上下文存在重叠区,在计算上下文幅度拉伸因子时通过更优化的程序设计可以使乘法运算次数进一步减少。同时,本文算法只需要增加一幅图像大小的缓冲区来存放前一波段,用于计算它与当前波段的互相关系数,辅助存储空间也较小,对处理器性能要求不高。总之,本文算法的时间复杂度比 C-DPCM、SLSQ-OPT、CCAP、EPHI 等都低,这种低复杂度算法非常适合于计算能力和存储空间有限的设备上。

5 结束语

基于预测的方法是超光谱遥感图像无损压缩的主流方法之一。本文从传统的侧邻域预测树方法出发,采用幅度拉伸因子表达相邻波段上下文的灰度增益,对预测树方法进行修正,最后根据 AVIRIS 遥感图像波段相关性分布特性,提出谱间预测和空间预测相结合的综合预测压缩方案。从实验结果看到,改进的预测树方法在无明显增加计算复杂度的情况下,对压缩效果有显著的改善。由于具有较低的时间和空间复杂度,本方法具有一定的实用性。然而,拉伸幅度因子对上下文变化的刻画和表达能力仍然有限,将来的工作可以考虑寻求更好的信号表示和信号分解方法,进一步刻画上下文的冗余信息,从而进一步提高超光谱遥感图像的无损压缩性能。

参考文献

[1] 张晓玲,沈兰荪. 高光谱图像的无损压缩研究进展[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 23-27.
Zhang Xiao-ling and Shen Lan-sun. Research advances on lossless compression of hyperspectral image [J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(5): 23-27.

[2] Zhang Jing and Liu Guizhong. An efficient reordering prediction-based lossless compression algorithm for

- hyperspectral images [J]. *IEEE Geosci. & Remote Sens Letters*, 2007, 4(2): 283-287.
- [3] Slyz M and Zhang L. A block-based inter-band lossless hyperspectral image compressor [C]. Proc. DCC' 2005, Utah, US, 2005: 427-436.
- [4] Mielikainen J and Toivanen P. Clustered DPCM for the lossless compression of hyperspectral images [J]. *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sens.*, 2003, 41(12): 2943-2946.
- [5] Rizzo F, Carpentieri B, and Motta G, *et al.* Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via linear prediction [J]. *IEEE Signal Process. Lett.*, 2005, 12(2): 138-141.
- [6] Wang H, Babacan S D, and Sayood K. Lossless hyperspectral image compression using context-based conditional averages [C]. Proc. DCC, Snowbird, Utah, US, 2005: 418-426.
- [7] Jain S K and Adjeroh D A. Edge-based prediction for lossless compression of hyperspectral images[C]. DCC'2007, Utah, US, 2007: 153-162.
- [8] Mielikainen J. Lossless compression of hyperspectral images using lookup tables[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2006, 3(3): 157-160.
- [9] Aiazzi B, Alparone L, and Baronti S. Crisp and fuzzy adaptive spectral predictions for lossless and near-lossless compression of hyperspectral imagery [J]. *IEEE Geosci. & Remote Sens. Letter*, 2007, 4(4): 532-536.
- [10] Memon N D, Sayood K, and Magliveras S. Lossless compression of multispectral image data [J]. *IEEE Trans. on Geosci. & Remote Sensing*, 1994, 32(2): 282-289.
- [11] Wu X and Memon N. Context-based lossless interband compression-extending CALIC [J]. *IEEE Trans. on Image Process*, 2000, 9(6): 994-1001.
- [12] 张荣, 阎青, 刘政凯. 一种基于预测树的多光谱遥感图像无损压缩方法[J]. *遥感学报*, 1998, 2(3): 171-175.
Zhang Rong, Yan Qing, and Liu Zheng-kai. A prediction tree-based lossless compression technique of multispectral image data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(3): 171-175.
- [13] 吴铮, 何明一, 冯燕, 等. 基于误差补偿预测树的多光谱遥感图像无损压缩方法[J]. *遥感学报*, 2005, 9(2): 143-147.
Wu Zheng, He Ming-yi, and Feng Yan, *et al.* Lossless compression of multispectral imagery by error compensated prediction tree [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(2): 143-147.
- 夏 豪: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为数据压缩、遥感图像压缩与编码。
- 张 荣: 女, 1968年生, 博士, 副教授, 研究方向为数字图像处理、遥感图像处理、数据压缩、计算机视觉等。