

文章编号: 0253-2239(2006)03-0336-5

环境卫星多光谱图像压缩算法*

周有喜 李云松 吴成柯

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 基于环境卫星多光谱图像特点的分析, 提出了一种新的基于三维等级树集合划分算法(3D-SPIHT)和感兴趣区域(ROI)编码相结合的多光谱图像压缩算法。首先在谱间采用两种小波基相结合的三维离散小波变换(3D-DWT), 去除多光谱图像在空间和谱间的冗余信息, 减少恢复光谱的误差值, 然后采用部分三维等级树集合划分算法和小波系数提升的感兴趣区域编码相结合的方法。该方法对小波系数从空间方向树上按对恢复光谱信息的重要性不同进行合理的码率分配, 使得恢复光谱具有更好的分辨率, 并依据比特平面层中重要系数的统计概率来自适应地进行 3 种编码模式的选择, 提高了编码效率。实验数据结果表明, 该算法比传统算法更好地保护了多光谱图像中的光谱信息, 在压缩比为 8:1 的情况下, 满足了环境卫星多光谱图像压缩系统的要求。

关键词: 信息光学; 多光谱图像压缩; 部分三维等级树集合划分算法; 三维离散小波变换; 多小波基; 感兴趣区域编码

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A

Environmental Satellite Multispectral Images Compression Algorithm

Zhou Youxi Li Yunsong Wu Chengke

(National Key Laboratory on Integrated Service Networks, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: Based on the analyses of environmental satellite multispectral images, a new compression algorithm is proposed based on the three-dimensional set partitioning in hierarchical trees (3D-SPIHT) and region of interest (ROI) coding. To reduce the redundancies in the spatial and spectral domain and decrease the reconstructed spectrum error, a three-dimensional discrete wavelet transformation (3D-DWT) which combines two wavelet bases in the spectral domain is carried out. Then, a method which unites partial 3D-SPIHT with lifting the wavelet coefficients of ROI coding algorithm, is adopted to allocate the coding rate in reason according to the different significance of the reconstructed spectrum in the spatial orientation tree wavelet coefficient. The new algorithm on the probability of the significant coefficients in each bit plane to select one of three different coding modes, which enhances the coding efficiency. Finally, the experimental results show that the proposed algorithm achieves improved performance over the conventional algorithm. With the 8:1 compression ratio, the algorithm satisfies the requirement of the satellite multispectral image system.

Key words: information optics; multispectral image compression; partial three dimensional set partitioning in hierarchical trees; three-dimensional discrete wavelet transformation; multi-wavelet bases; region of interest coding

1 引 言

高分辨率成像光谱技术是新一代遥感技术, 它能够获得地面目标的空间特征, 同时也能获得丰富的光谱信息, 可定性定量地对被测对象进行物理分析和识别。它通常由几个到几百个谱带组成, 数据

量非常大, 传输和处理这些多光谱数据需要占用大量的链路带宽。在带宽有限的卫星信道实时传输时, 必须进行数据压缩。如何在破坏恢复光谱数据前提下, 有效地进行数据压缩是目前环境卫星多光谱技术中迫切需要解决的难点。近年来, 多光谱

*“十五”军事通信技术预研项目(410010302)、国防科技预研基金(J20121DZ01)、国家 863 计划(高光谱图像 8 倍压缩技术研究)资助课题。

作者简介: 周有喜(1979~), 男, 福建三明人, 西安电子科技大学博士研究生, 主要从事遥感图像的压缩编码技术的研究。
E-mail: ken@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2005-05-18; 收到修改稿日期: 2005-07-18

数据压缩得到了国内外广泛关注,通常采用三种方法:1)矢量量化(VQ)^[1~3],2)预测编码^[4~7],3)变换编码^[8~11,15]。矢量量化和预测编码都有严重的不足,矢量量化的复杂度较高,很难实现无损压缩,预测编码虽能实现无损压缩,但压缩率较低。而这些方法都没有充分利用环境卫星多光谱成像特点。

本文在三维等级树集合划分算法^[12~14]的基础上,提出了一种易于硬件实现的低存储量、高性能的多光谱图像压缩编码算法。该算法针对环境卫星多光谱成像光谱仪成像特点和应用环境,实现系统化地对多光谱图像数据的压缩处理。在研究中,我们关注以下几个方面的系统特点和要求:多光谱图像具有空间二维信息,同时还具有一维光谱信息,该信息要求在压缩后的图像中完整恢复各像素点的光谱曲线;信道带宽要求图像压缩比大于 8:1。

2 环境卫星多光谱成像原理及特点分析

环境卫星多光谱成像仪如图1所示,与传统的

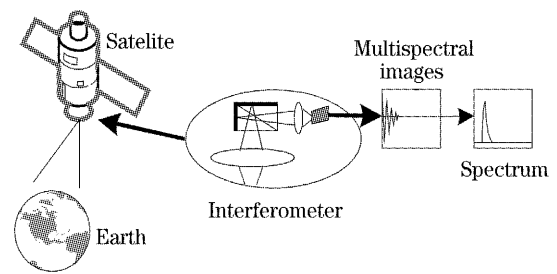


图 1 光谱信息获取示意图

Fig. 1 Acquisition of spectral images

色散型光谱仪不同,采用基于迈克耳孙干涉仪方式,从而使相面上得到的是干涉光谱图像数据,生成的光谱图像经过傅里叶变换得到相应的光谱曲线。图 2 显示光谱图像与数据波形,从图 2(b)中可以明显地看出 X 轴从 20 到 40 点之间是主要的能量集中区,根据傅里叶变换光谱学原理,光谱图与光源的光谱分布之间存在傅里叶变换关系,这正是环境卫星多光谱成像光谱仪获得光谱信息的依据。因此环境卫星多光谱图像压缩不仅要实现一般图像压缩意义下的一定压缩比,还要完成对光谱信息的有效合理处理,以便在目标判读时,有效分析目标性质、成份等。

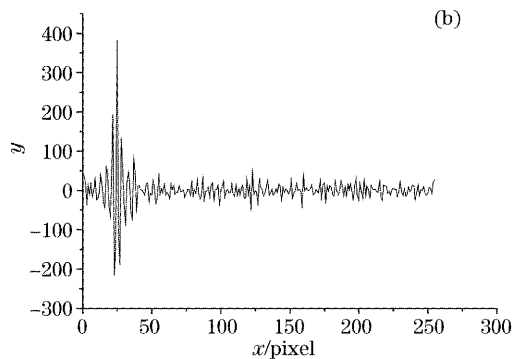
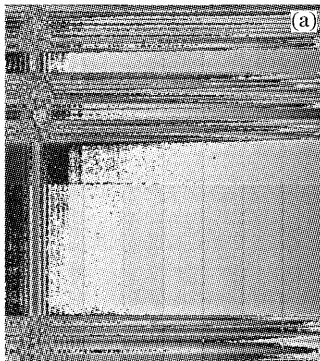


图 2 多光谱图像。(a)光谱图像,(b)数据波形

Fig. 2 Multispectral image. (a) The raw spectral image, (b) a row data curve

3 图像压缩系统

3.1 改进三维小波变换

多光谱图像不仅存在空间相关性,还存有谱间相关性。我们采用三维小波变换来去除其相关性如图 3 所示。但因存储空间和实时性的限制,在系统中采用 16 帧为一组进行处理。很多文献中在空间域和谱间都采用 Daubechies9/7 小波,为了减少边界效应,在空间和谱间上要做对称延拓处理,在 16 帧时,做 4 级分解已经无法进行延拓。因此系统中将采用空间域 Daubechies9/7 变换,谱间 Harr 小波变换。但 Harr 小波基在时间域上不光滑,造成频

率域无限,使沿谱间的小波分解不能达到最佳。在谱间小波变换,大量空间方向树内的自相似性主要在低频分量上,故采用 2 种不同的小波基并不影响其相似性,同时也改善 Harr 小波基的缺点,用 2 次 Daubechies9/7 小波基,然后用 Harr 小波基。实验表明这种方法在一定压缩比条件下能减少恢复光谱的误差值。

与一代小波变换相比,二代提升算法除具有速度快的优点外,还具有以下特点:能实现任意图像尺寸的小波变换,而一代二进小波变换要求图像的长度为 2 的幂数;不依赖傅里叶变换实现小波构造,直

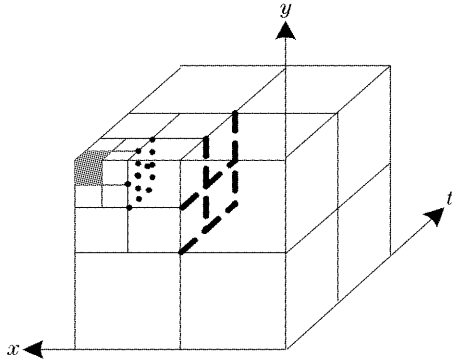


图3 空间和谱间域分解结构

Fig. 3 Decomposition structure in the spatial and spectral domain

接在时域中完成小波构造;对内存的需求量小,在当前位置即可进行小波变换,便于用硬件实现;提升算法不受边界延拓方式的影响等。我们在谱间方向采用的 Harr 变换的提升公式如下,式中 s_i 和 d_i 是信号序列中的偶数序列和奇数序列:

$$d_i \leftarrow d_i - s_i, \quad s_i \leftarrow s_i + \frac{1}{2}d_i,$$

$$d_i \leftarrow d_i \times \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad s_i \leftarrow s_i \times \sqrt{2}.$$

另外考虑到多光谱图像的特点,纵深方向像素数较少,如果进行多级三维分解,纵深方向的像素数将更少,延拓误差也会相应更大,因此选择分解级数时必须考虑到这个影响。在实际测试时发现,当对 16 帧环境卫星多光谱图像进行 4 级分解时,重建图像恢复出的光谱质量不能令人满意。因此,我们采用非对称的小波分解结构,最终为三维小波空间分解级数为 5,谱间为 3 级。

3.2 感兴趣优先编码

三维等级树集合划分算法本质上是一种比特平面编码方法,幅值大的小波系统将被优先编码。因此对各小波子带内的感兴趣区域所对应的小波系统进行一定量的比特平面提升,使其在小波系数编码时分配更多的码流,与背景区域(BG)的系数相比能够更精确地传送到解码端,从而使恢复光谱数据的二次误差(RQE)最小。

进行感兴趣区域编码首先要计算在小波域各子带中对应的感兴趣区系数的位置,即建立感兴趣区域模板 $M(x, y, z)$ 。对于任意形状的感兴趣区域,在边界上逐点确定 $M(x, y, z)$ 将是很复杂的,但从图 2(b)数据曲线中可以看出,我们所需的感兴趣区域是矩形的,就变得非常简单,只需计算长方体对角线两个顶点的感兴趣区域系数坐标,落于这个区域

之中的所有系数都属于感兴趣区域系数。假设长方体感兴趣区域在图像域所对应的坐标为 $\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)\}$, 进行 L 级小波变换,则感兴趣区域在小波域所对应的坐标为 $\{(x_1^{l,b}, y_1^{l,b}, z_1^{l,b}), (x_2^{l,b}, y_2^{l,b}, z_2^{l,b})\}$, 具体如下:

$$x_1^{l,b} = \left\lfloor \frac{x_1}{2^l} \right\rfloor, \quad y_1^{l,b} = \left\lfloor \frac{y_1}{2^l} \right\rfloor, \quad z_1^{l,b} = \left\lfloor \frac{z_1}{2^l} \right\rfloor,$$

$$x_2^{l,b} = \left\lfloor \frac{x_2}{2^l} \right\rfloor, \quad y_2^{l,b} = \left\lfloor \frac{y_2}{2^l} \right\rfloor, \quad z_2^{l,b} = \left\lfloor \frac{z_2}{2^l} \right\rfloor,$$

其中 l, b 分别为尺度,子带类型。在实际系统中,感兴趣区域是由多光谱仪确定的,为一固定区域。在本系统中感兴趣区域坐标为 $\{(20, 0, 0), (40, 512, 15)\}$ 。

3.3 部分三维等级树集合划分算法

三维等级树集合划分算法定义三维方向树结构以及相应节点之间的父子关系,有效地组织三维小波的系数。令 (i, j, k) 表示小波系数 $C(i, j, k)$ 的位置坐标, $O(i, j, k)$ 表示 $C(i, j, k)$ 的儿女坐标集。若 $C(i, j, k)$ 为空间方向树的叶子,则 $O(i, j, k)$ 为空, $D(i, j, k)$ 表示 $C(i, j, k)$ 的子孙坐标集。 $H(i, j, k)$ 为所有根的坐标集。 $L(i, j, k)$ 表示除去它的儿女的所有子孙集合。等于差集 $D(i, j, k) - O(i, j, k)$ 。 H 表示所有的方向树根节点集合,其儿女的小波系统 $C(i, j, k)$ 的 8 个儿女表示为

$$O(i, j, k) = \{(2i, 2j, 2k), (2i+1, 2j, 2k), \\ (2i, 2j+1, 2k), (2i+1, 2j+1, 2k), \\ (2i, 2j, 2k+1), (2i+1, 2j, 2k+1), \\ (2i, 2j+1, 2k+1), \\ (2i+1, 2j+1, 2k+1)\}.$$

对集合 T 的显著性测试准则如下:

$$S_n(T) = \begin{cases} 1, & \max_{(i,j,k) \in T} \|C(i,j,k)\| \geq 2^n \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

三维等级树集合划分算法简单描述如下:

- 1) 初始化:输出 $n = \lceil \log_2(\max_{(i,j,k)} |c_{i,j,k}|) \rceil$;
- 2) 排序过程:对于所有 $2^n \leq |c_{\eta(k)}| < 2^{n+1}$ 的系数,输出坐标 $\eta(k)$ 和符号位;
- 3) 细化过程:对于所有 $|c_{i,j,k}| \geq 2^{n+1}$ 的系数,输出第 n 层重要位的值;
- 4) 步长更新: n 减 1,跳回步骤 2)。

三维等级树集合划分算法在编码过程中当比特平面层中 1 的个数增多时冗余信息相应地增加,降低编码效率。针对此不足和系统的应用特点,提出了部分三维等级树集合划分算法,由每个比特平面层

中 1 的统计概率 P_1 来决定进行何种编码方式。一共分为三种编码模式: 模式 A, 模式 B 和模式 C。其中模式 A, 就是标准的三维等级树集合划分算法编码。模式 B 将比特平面按空间方向树分成 $2 \times 2 \times 2$ 子块, 如果所有的 8 bits 都为 0, 则编码输出 0, 如果其中有 1 存在, 则直接输出 8 bits, 后跟一位“1”, 进行相应的标识。这样如果当中全 0 的个数增加的话, 则提高了编码效率。而模式 C 中不进行重要性判断, 直接输出所有的 8 bits。编码的三种模式编码由 P_1 的两个门限来区分。计算如下:

门限 1: $X_{k,j}$ 表示为第 k 个像素中第 j 比特平面的值。第 j 比特平面上所有值之间是相互独立, 且均匀分布的。设第 j 比特平面中每个比特为 0 和 1 的概率为 P_0 和 P_1 , 则每 $2 \times 2 \times 2$ 子块中所有比特是 0 的概率为 P_0^8 , 输出比特 0, 否则输出 9 比特数。每个子块中的平均输出比特数为 $P_0^8 + 9(1 - P_0^8) = 9 - 8P_0^8$, 而模式 C 中输出个数为 8, 则模式 B 的平均输出必须小于 8, 否则将采用模式 C。则可从不等式 $P_0^8 + 9(1 - P_0^8) < 8$ 中计算出 $0.771 < P_0$, 此门限取 $P_1 = 1 - P_0 = 0.23$, 同理可得另一门限值为 $P_1 = 0.14$, 具体算法描述如下:

1) 初始化: 令 $n = \lceil \log_2 \max_{i,j,k} C(i,j,k) \rceil$, 对感兴趣区域小波系数进行提升; 输出加强因子 a 和感兴趣区域的坐标信息; 输出新的初始化门限 $n' = \lceil \log_2 \max_{i,j,k} C(i,j,k) \rceil$ 。令 LSP 为空, LIP 为所有 $(i,j,k) \in H$ 的根的坐标, LIS 为所有 $(i,j,k) \in H$ 且有子孙的根的坐标。若 $n' > n$, 则优先对感兴趣系数, 并让 $b = n'$ 进行如下编码, 反之, 令 $b = n$ 对所有的系数进行下述编码。

2) 计算当前平面 P_1 值。

i) 如果 $P_1 < 0.14$, 则输出 0, 表示进行模式 A 编码, 既使用标准三维等级树集合划分算法编码, 编码结束后, b 减 1, 转至 2);

ii) 如果 $0.14 \leq P_1 < 0.23$

输出 10 表示进行模式 B 编码, 将比特平面按空间方向树分成 $2 \times 2 \times 2$ 子块, 依据空间方向树遍历顺序, 先检查 LLL 子带, 如果子块中所有比特都为 0, 则输出 0, 移至下一块, 如果不全为 0, 则先输出子块中所有比特, 后输出 1。同样的方法依次对 LLH、LHL、LHH、HLL、HLH、HHL 和 HHH 进行相应的处理。当该级所有都被处理后, b 减 1, 转至 2);

iii) 如果 $P_1 \geq 0.23$

输出 11 表示进行模式 C 编码, 将比特平面分成 $2 \times 2 \times 2$ 子块。依据空间方向树遍历顺序, 依次输出所有的 LLL、LLH、LHL、LHH、HLL、HLH、HHL 和 HHH 层的比特, 处理结束后, b 减 1, 转至 2);

解码是编码的逆过程, 先进行部分三维等级树集合划分算法解码, 感兴趣区内的小波系数比特平面下移后, 再分别进行感兴趣区和背景区小波反变换, 最后将二者的解码图像组合成整幅解码图像。

4 实验与分析

实验参量:

测试图像序列: 128 帧 256×512 环境卫星多光谱图像; 平均码率: 1 bpp;

感兴趣区域矩形对角坐标: $[(20, 0, 0), (40, 512, 15)]$; 恢复光谱段: 128;

对感兴趣区域进行上移平面数为 2 编码, 表 1 中所示和标准使用谱间 Harr 小波变换的三维等级树集合划分算法 (3D-SPIHT) 编码结果相比较, 在 8:1 压缩比的情况下, 感兴趣区域的提升保护是以降低背景质量为代价的, 这是否会破坏图像中的光谱信息呢?

从两种算法中任意取出恢复的光谱曲线如图 4 所示, 可以看出我们的方法比三维等级树集合划分算法更好地拟合原始光谱曲线。为了衡量全部光谱的恢复效果, 从 128 帧压缩恢复光谱图像中的二次误差值平均曲线进行分析。如图 5 所示, 其中三维等级树集合划分算法的二次误差均值为 4.16%, 我们的算法是 2.02%。整体的实验数据也表明了谱间不同小波基且带有感兴趣区域的部分三维等级树集合划分算法在恢复光谱上具有更好的分辨率效果。

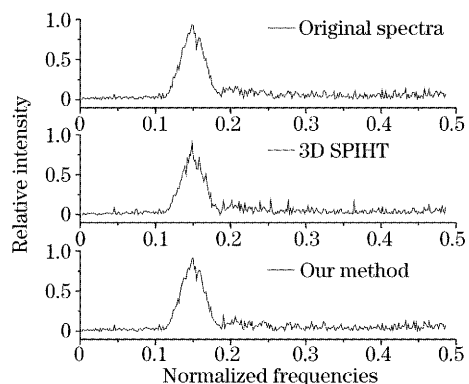


图 4 重建光谱曲线

Fig. 4 Reconstructed spectrum curves

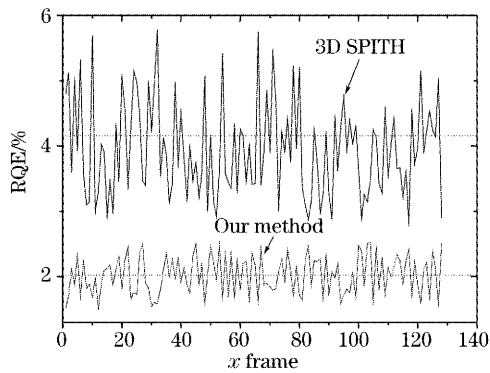


图 5 连续 128 帧的二次误差曲线

Fig. 5 Relative quadratic error curves of successive 128 frames

表 1 不同方法单帧处理比较

Table 1 Comparison of different methods for the single frame

Region	Image	3D-SPIHT /dB	This method /dB
Region of interest	1000. raw	43.36	51.27
	1001. raw	44.50	52.58
	1002. raw	44.62	51.39
Whole image	1001. raw	43.76	40.80
	1002. raw	44.64	41.63
	1003. raw	44.81	41.41

5 结 论

基于环境卫星多光谱成像原理及特点的分析,本文提出了一种新的多光谱图像压缩算法。新算法在谱间采用两种小波基相结合的三维离散小波变换,去除多光谱图像的空间和谱间相关冗余,然后采用部分三维等级树集合划分算法和感兴趣区域编码相结合的方法对小波系数空间方向树上进行重要性合理处理。在 8:1 的压缩比的情况下,恢复光谱曲线的二次误差值比三维等级树集合划分算法提高 2.14% 左右。使得在相同的压缩比情况下,恢复光谱拥有更好的分辨率,实验数据表明,该算法在环境卫星多光谱图像应用系统中具有实用价值。

参 考 文 献

- 1 S. Gupta, A. Gersho. Feature predictive vector quantization of multispectral images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(3): 491~501
- 2 Giacinto Gelli, Giovanni Poggi. Compression of multispectral

- images by spectral classification and transform coding[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(4): 476~489
- 3 Jacques Vaisey, Michel Barlaud, Marc Antonini. Multispectral image coding using lattice VQ and the wavelet transform[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 1998. 307~311
- 4 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bin *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 192~197 (in Chinese)
- 张淳民,赵葆常,相里斌等. 偏振干涉成像光谱仪通量的分析与计算[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 192~197
- 5 Yan Jingwen, Shen Guiming, Hu Xiaoyi. An improved block zero tree coding for hyperspectral data compression[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 834~838 (in Chinese)
- 闫敬文,沈贵明,胡晓毅等. 改进的对块零树编码压缩方法对超光谱数据压缩[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 834~838
- 6 A. K. Rao, S. Bhargava. Multispectral data compression using bidirectional interband prediction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(2): 385~397
- 7 J. A. Saghi, A. G. Tescher, J. T. Reagan. Terrain-adaptive transform coding of multispectral data [C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation, International, 1994. 313~316
- 8 C. Mailhes, P. Vermande, F. Castanie. Spectral image compress[J]. *J. Optics (Paris)*, 1990, **21**(3): 121~132
- 9 J. A. Saghi, A. G. Tescher, J. T. Reagan. Practical transform coding of multispectral imagery [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1995, **12**(1): 32~43
- 10 Li Yunsong, Wu Chengke, Chen Jun *et al.*. Spectral satellite image compression based on wavelet transforms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 691~695 (in Chinese)
- 李云松,吴成柯,陈军等. 基于小波的干涉多光谱卫星图像压缩方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 691~695
- 11 Deng Jiaxian, Wu Chengke, Chen Jun *et al.*. Multi-spectral image compression based on rate distortion slope lifting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 299~303 (in Chinese)
- 邓家先,吴成柯,陈军等. 基于率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 299~303
- 12 P. Luigi Dragotti, G. Poggi, A. R. P. Ragozini. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(1): 416~428
- 13 A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transactions Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, **6**(3): 243~250
- 14 A. Abu-Hajar, R. Sankar. Wavelet based lossless image compression using partial SPIHT and bit plane arithmetic coder [C]. ICASSP 2002 Orlando, Florida, May 2002. 3497~3500
- 15 Jiang Qingsong, Wang Jianyu. Study on signal-to-noise ratio estimation and compression method of operational modular imaging spectrometer multi-spectral images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1335~1340 (in Chinese)
- 蒋青松,王建宇. 实用型模块化成像光谱仪多光谱图像的信噪比估算及压缩方法研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1335~1340