

文章编号: 0253-2239(2005)11-1477-6

适于干涉多光谱图像压缩的自适应率控制算法*

庄怀宇 吴成柯 李云松 刘 凯

(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: 提出了一种基于优化截取内嵌码块编码(EBCOT)的感兴趣区域(ROI)编码干涉多光谱图像压缩方法。小波变换后,对 1 级分解的高频系数感兴趣区域即包含光谱信息区域进行垂直方向的分解,再对感兴趣区域进行比特平面提升。 T_1 编码器对不同比特平面的编码过程(Coding pass)赋予不同的重要性权值,由高到低依次编码, T_2 编码器根据所得的比特率自适应地反馈控制 T_1 的编码深度,最后进行率失真优化截取。实验结果表明,该方法提高了恢复图像质量,有效地减少了优化截取内嵌码块编码算法的计算量和内存使用量(bpp=1 时,测试图像的整体、感兴趣区域和背景区域平均峰值信噪比均提高 0.1dB 以上,计算量和内存使用量平均减少 40% 和 60% 以上),编码方式适合干涉多光谱图像压缩系统硬件实现。

关键词: 图像处理; 自适应率控制; 优化截取内嵌块编码; 率失真

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A

Adaptive Rate Control Algorithm for Interference Multi-Spectral Image Compression

Zhuang Huaiyu Wu Chengke Li Yunsong Liu Kai

(State Key Laboratory of Integrated Services Network, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: A method for interference multi-spectral image coding is proposed based on region of interest (ROI) coding of embedded block coding with optimized truncation (EBCOT). After wavelet transform, the vertical wavelet decomposition is taken for the ROI which include the multi-spectral information in the high frequency subband, and the coefficients of ROI are lifted by bit-plane. The different significant weights are given to different coding passes in different bit-planes, which are encoded in the significant weights order in T_1 encoder. T_2 encoder gives feedback to control the coding depth according to the accumulated bit rate, and the rate-distortion optimization truncation is completed at last. The experimental results show that the proposed scheme can improve the reconstructed image quality and efficiently reduce the computational complexity and memory usage of EBCOT (for test image at bpp=1, the average peak signal-noise ratio of the whole, the ROI and the background increases more than 0.1 dB, and the average computational complexity and memory usage reduces more than 40% and 60%), which is suitable for hardware implementation of interference multi-spectral image compression system.

Key words: image processing; adaptive rate control; embedded block coding with optimized truncation (EBCOT); rate distortion

1 引 言

随着航空遥感成像技术的发展,光谱图像具有很高的空间分辨力和光谱分辨力。为了有效地保护光谱特性,光谱图像压缩时,要求恢复图像中包含光

谱信息的那部分图像具有较高的峰值信噪比,通常对包含光谱信息的部分采用感兴趣区域(ROI)编码。最新静态图像编码国际标准 JPEG2000(核心是优化截取内嵌码块编码算法)^[1,2]支持感兴趣区

* “十五”军事通信技术预研项目(410010302)、国防科技预研基金(J20121DZ01)、高交时高光谱遥感图像压缩技术研究(708233)资助课题。

作者简介: 庄怀宇(1980~),男,安徽人,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: hyzhuang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2005-01-07; 收到修改稿日期: 2005-03-23

域编码。

在优化截取内嵌码块编码算法中, T_1 编码器是计算量最大的部分, 需要对所有的小波系数进行比特平面编码, 并存储所有编码数据及相关信息, 经过 T_2 编码的率失真优化截取后, 所存储的大量编码数据并未截取到 JPEG2000 的压缩码流中。可见, T_1 编码的很大一部分计算量和存储量是冗余的, 而且编码时间长, 所耗硬件资源大。在光谱图像的压缩领域, 许多学者做出了大量的研究工作^[3~10], 如文献[6]提出了基于率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩方法算法, 其算法不对小波域的系数进行提升, 而是在码流组织时通过对多光谱区域误差跟踪加以实现。算法取得了良好的效果, 但由于须多次对感兴趣区域恢复图像进行本地误差重建, 故迭代的复杂度较高, 不利于多光谱图像压缩的硬件实现。

本文根据多光谱图像压缩编码的实际工程要求和优化截取内嵌码块编码算法特点, 提出了一种高效的基于优化截取内嵌码块编码的感兴趣区域编码干涉多光谱图像压缩方法。实验结果表明: 本方法重建图像质量高, 有效地减少了编码的计算量和存储器用量, 提高了编码器的效率, 易于硬件实现。

2 优化截取内嵌码块编码算法分析

2.1 T_1 编码器

令 $B_i (i=1, 2, \dots)$ 表示为小波变换后, 各小波子带划分的独立进行 T_1 编码的码块, 在任意 B_i 中, 对比特平面 p 编码时, JPEG2000 使用了四种编码单元^[1,2]: “零编码”(ZC)、“符号编码”(SC)、“幅值细化”(MR)和“游程编码”(RLC)。这四种编码单元是按下列三个编码步骤(Pass 或者 Sub-bitplane)顺序进行编码的, 在每个步骤中使用了上述四种编码单元一种或多种操作: 重要性传播 (Significance propagation pass); 幅值细化 (Magnitude refinement pass)清理更新 (Cleanup pass)。

令 $P_i^{p,1}, P_i^{p,2}$ 和 $P_i^{p,3}$ 是码块在比特平面 p 时三个步骤的编码信息, 图 1 为比特平面编码的流程。其中比特平面 M_i-1 时所有状态变量为 0, 所以只进行清理更新。比特平面编码结束后进入无乘法器的 Q(MQ)编码器。

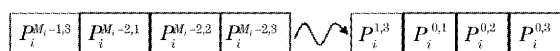


图 1 比特平面编码步骤

Fig. 1 Bit-plane coding pass

2.2 率失真优化算法

T_1 编码器产生的比特流是内嵌的, 利用率失真优化截取算法^[1,2]可以获得最优的压缩性能。设码块 B_i 在 T_1 部分产生的内嵌比特流的码率截止到 $R_i^{n_i}$, n_i 是某个截取点, 即 T_1 某个编码过程 (Pass) 的结束点, 则图像总的码率为:

$$R = \sum_i R_i^{n_i}, \quad (1)$$

设码块 B_i 的系数在恢复图像中产生的失真为 $D_i^{n_i}$ 且其失真是加性的^[1], 即:

$$D = \sum_i D_i^{n_i}, \quad (2)$$

其中, D 表示整幅图像的失真大小。

现在需要找到一组 n_i , 使得在满足 $R \leq R_{\text{target}}$ 时 D 最小。解决这种条件极值问题可以通过拉格朗日算法。因此问题等价于使下式最小化:

$$\sum_i (R_i^{n_i} + \lambda D_i^{n_i}), \quad (3)$$

其中调整 λ 直到产生一组截取点使得上式在满足 $R \leq R_{\text{target}}$ 时最小。对于上式最小化问题很明显可以归结为单个码块的最小化问题。即对于码块 B_i 找到截取点 n_i , 使得 $(R_i^{n_i} + \lambda D_i^{n_i})$ 最小。查找算法^[1]如下:

- 1) 令 $n_i = 0$ (即没有比特流), 对于 $k = 1, 2, 3, \dots$;
- 2) 计算 $\Delta R_i^k = R_i^k - R_i^{n_i}, \Delta D_i^k = D_i^k - D_i^{n_i}$;
- 3) 若 $\Delta/\Delta R > \lambda^{-1}$, 则 $n_i = k$ 。

由于这个算法要对不同的 λ 进行查找, 因此先剔除一些奇异点, 使率失真斜率 $S_i^k = \Delta D_i^k / (\Delta R_i^k)$ 随着 k 严格单调减。确定候选截取点算法^[1]如下:

- 1) 令 $n_i = \{n\}, n \in N$, 即所有过程的截止点;
- 2) 令 $p = 0$;
- 3) 对于 $\forall k, k \in n_i$ 。

计算 $\Delta R_i^k = R_i^k - R_i^p, \Delta D_i^k = D_i^k - D_i^p, S_i^k = \Delta D_i^k / \Delta R_i^k$;

若 $p \neq 0$ 且 $S_i^k > S_i^p$, 则从 n_i 剔除 p 并返回 2); 否则, 令 $p = k$ 。

3 基于优化截取内嵌码块编码的感兴趣区域编码干涉多光谱图像压缩方法

3.1 干涉多光谱遥感图像成像原理与小波分解结构

成像光谱器是一种新型的航空遥感设备, 兼有成像仪和光谱仪的功能。获取的遥感图像包含了二维的空间信息和一维的光谱信息, 其成像原理如图 2 所示。成像仪将入射的一束光送入干涉仪, 将之

分解为具有一定光程差的光线并进行干涉叠加,成像光谱仪采用行推扫方式产生图像,并且在一行上各点的光程差不同,从而在成像平面形成具有竖条状干涉条纹的多光谱图像。由于多光谱区域的位置是由成像光谱仪确定的,为一固定区域,本文中该区域对应的二维坐标为 $\{[256,0],[352,512]\}$ 。

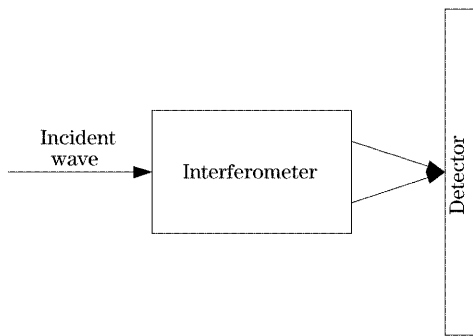


图 2 干涉仪框图

Fig. 2 Diagram of interferometer

由于多光谱信息一般为垂直条纹,为了提高其编码效率,本文使用特殊小波分解结构,即小波的 mallat 分解结束后,对 1 级分解的高频系数感兴趣区域进行垂直方向的分解,背景区域不进行分解,如图 3 所示。该结构使光谱信息的能量更加集中,从

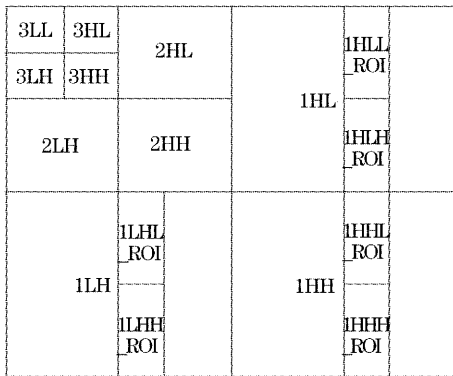


图 3 DWT 分解结构

Fig. 3 The decomposition structure of spectral image

而有利于提高光谱区域的编码效果。然后对小波变换后感兴趣区域进行比特平面提升,进入优化截取内嵌码块编码编码器。

3.2 高效自适应率控制算法

由 2.2 节的优化率失真截取算法可知:必须得知所有过程的率 ΔR_i^t 和它们对失真减少量的贡献 ΔD_i^t ,这也就要求 T_1 编码器必须对所有比特平面编码,并存储每个过程的编码数据和相关信息,如 ΔR_i^t 和 ΔD_i^t 等。显然,其中的大部分编码数据并未包含在最终压缩码流中,这就导致 T_1 编码器的大部分计算量和存储器使用量浪费在对最终压缩码流无用的数据上。为提高工作效率, T_1 编码器无需对所有的比特平面或所有的过程编码,只要能在 T_1 编码的过程中针对不同的比特率自适应确定一个合适编码深度,在这个编码范围内进行率失真优化截取即可。根据优化截取内嵌码块编码实际编码特点可知:第一,斜率在选择优化截取点时仅进行比较运算,其斜率的真实值并不重要,重要的是所用斜率之间的大小关系,这也是我们可对其预测的前提。第二,每个码块的率失真斜率曲线是与编码的比特平面和编码过程的类型相关的,除了个别的奇异点,其基本呈下降趋势,整个图像中比特平面高的过程较比特平面低的过程的率失真斜率大,在同一比特平面内,较早编码的过程比晚编码的过程的率失真斜率大。

基于以上两点,本文在 T_1 编码前,对于每个码块的编码过程,根据其所在的不同比特平面和不同类型,赋予不同的重要性权值,以此模拟率失真斜率曲线, T_1 编码由权值的高低依次编码,并引入编码深度控制系数 d ,根据目标码率和编码深度控制系数 d 确定每个码块的编码深度。然后在编码深度内,确定候选截取点,保证在编码深度内的率失真曲线严格单调下降,最后查找 λ ,完成码流截取。其框图如图 4 所示。

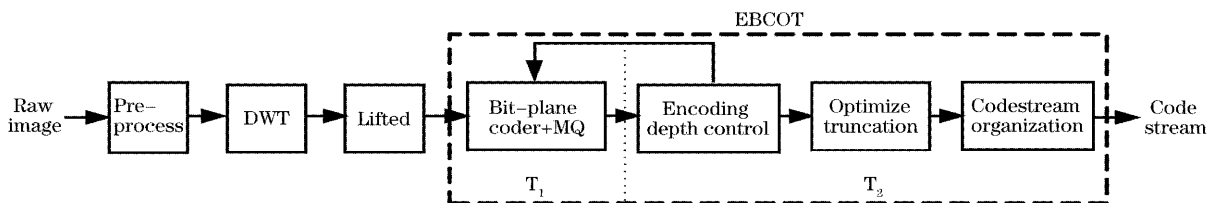


图 4 本文算法的系统框图

Fig. 4 The functional block diagram of the proposed algorithm

算法具体描述如下:

Step1: 初始化,即给每个码块 B_i 的每个过程 P_i^j , 赋重要性权值 p_i^j :

$$\begin{aligned}
 p_i^j &= 3 \times bp(i) - j - 2, \\
 \forall i &\in [0, \text{Block_Num}), \\
 \forall j &\in (0, \text{Pass_Num}(i)],
 \end{aligned} \tag{4}$$

其中 Block_Num 为划分的码块总数, Pass_Num(i) 为码块 i 的过程总数, $bp(i)$ 为码块 B_i 的最大比特平面数。此外还要初始化最大的未编码过程权值 $P_{\max} = \max(p_i^0)$ 和深度控制系数 $d=0$;

Step2: 熵编码, 即按 JPEG2000 标准的块扫描顺序, 对所有码块中权值与 P_{\max} 相等的未编码过程进行编码, 将所得码流和该过程的 ΔR_i^k 和 ΔD_i^k 放入存储器中, 把所有编码码流累加, 然后将 P_{\max} 减 1;

Step3: 编码深度控制, 即:

判断 P_{\max} 是否为 -1 , 如果 $P_{\max} = -1$, 说明所有过程均已编完, 跳到 Step4, 否则执行下面的步骤;

判断深度控制系数 d , 如果 d 等于预设的门限值(如 1 或 2), 说明已经加深了编码深度, 跳到 Step4, 否则继续;

判断累加编码码流是否大于目标码流, 即如果 $R \leq R_{\text{target}}$ 返回 Step2, 否则, 令 $d=d+1$; 返回 Step2;

Step4: 对已编码的过程, 根据得到 ΔD_i^k 和 ΔR_i^k , 按 2.2 节所述确定候选截取点算法, 计算出每个码块中两个候选点之间率失真斜率, 完成码流截取。在实际工程实现中, 计算斜率时, 取对数查找可避免浮点除法运算, 再对结果进行整形处理。令斜率估计值 \hat{S}_i^n 为

$$\hat{S}_i^n = \alpha [\text{lb}(\Delta D_i^n) - \text{lb}(\Delta R_i^n)] + \beta_i, \quad (5)$$

(5) 式中常量 α 保障两个斜率估计值之间的比较精度, β_i 是一个取决于子带类型和分辨力的常量, 其值一是为了保证 $\hat{S}_i^n \geq 0$, 二是为了体现出不同分辨力的不同小波子带对图像质量的贡献。

编码深度控制系数 d 在算法中的作用是控制增加的编码深度, 即 T_1 编码器编完重要性权值 $p_i^j = P_{\max} - d$ 的所有过程后, 所得的压缩码流已经大于目标码流, 编码深度控制通知熵编码再将 $p_i^j \geq P_{\max} - d$ 的过程进行编码。引入编码深度控制系数有以下作用: 首先, 扩大最终码流的选择范围, 尽可能地防止个别率失真斜率大于最终 λ 的过程未被编码; 其次, 可以使率失真曲线与标准算法的率失真曲线尽可能相似, 防止奇异点产生, 影响截取效果。

4 实验结果与分析

采用 5 级 9/7 小波变换, 码块大小为 64×64 , 感兴趣区域提升因子为 2, 深度控制系数 d 门限为 1, 用本文的算法对 “sp01” (512×512)、 “sp02” (512×512)、 “sp03” (512×512)、 “sp04” (512×512) 四幅图像进行压缩编码测试。原始图像以及本文算法恢复图像如图 5、图 6 所示。将本文算法与标准 JPEG2000ROI 算法的实验结果进行对比:

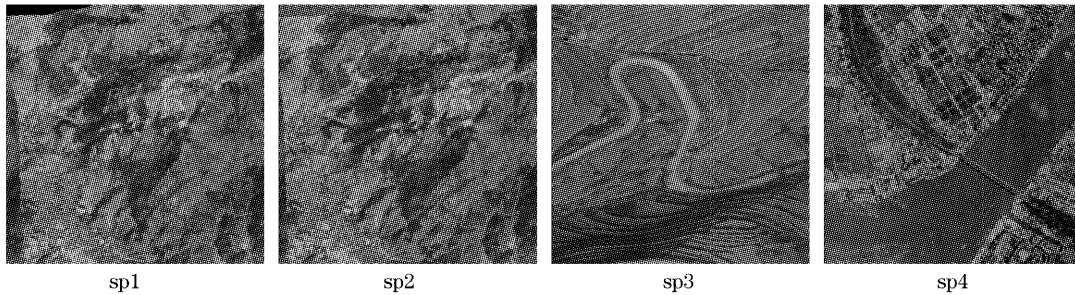


图 5 原始图像

Fig. 5 The raw spectral image

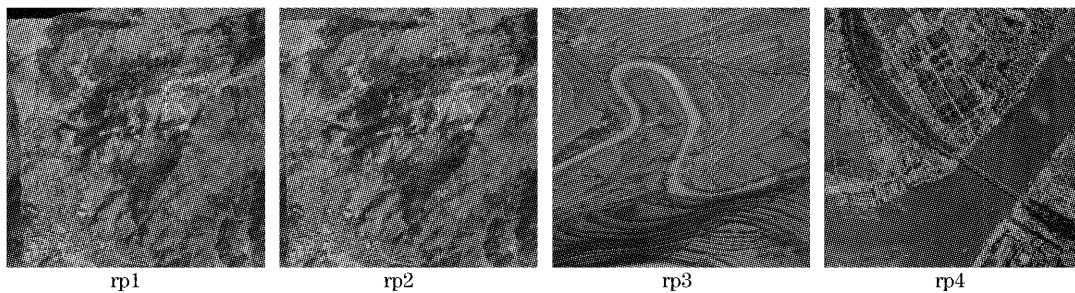


图 6 bpp=1 时重建图像

Fig. 6 The reconstructed spectral image with bpp=1

1) 图像的峰值信噪比 (PSNR), 四幅实验图像用本文算法和标准算法恢复图像的感兴趣区域、背景区域和整体峰值信噪比的平均差值 $\bar{\Delta}_{\text{PSNR}}$, 其定义为式(6),

$$\bar{\Delta}_{\text{PSNR}} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\text{PSNR}_{\text{SWFC}}^k - \text{PSNR}_{\text{JPEG2000}}^k), \quad (6)$$

实验结果由图 7 所示, 本文算法的图像质量大体上优于标准算法, 尤其在常用的压缩比范围内 (每像素比特数 $\text{bpp}=0.25, 0.5, 1$), 本文方法的感兴趣区域、背景区域和整体峰值信噪比均优于标准算法。总体上看感兴趣区域信噪比提升较为明显。

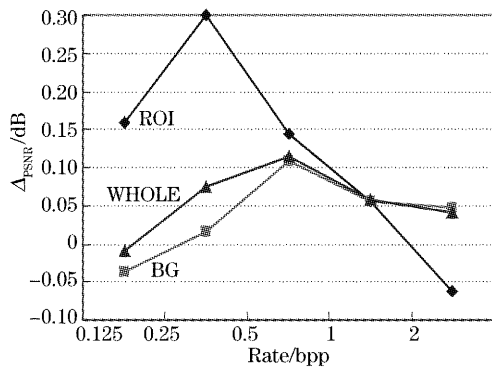


图 7 本文算法与标准算法峰值信噪比平均差值
Fig. 7 Average PSNR difference between the standard and the proposed scheme

2) 优化截取内嵌码块编码算法的计算量, 计算量用 T_1 编码器编码的过程个数衡量。图 8 为在不同的比特率下, 用本文算法与标准算法相比计算量减少的百分比 R ,

$$R = \frac{N_{\text{JPEG2000}}^{\text{pass}} - N_{\text{SWFC}}^{\text{pass}}}{N_{\text{JPEG2000}}^{\text{pass}}}, \quad (7)$$

其定义如(7)式。可见本文算法有效减少了优化截取内嵌码块编码的计算量。

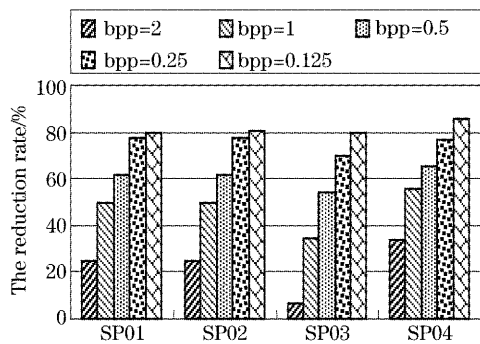


图 8 本文算法与标准算法的计算减少量
Fig. 8 The reduction rate of computational complexity between the standard and the proposed scheme

3) 优化截取内嵌码块编码算法的内存使用量:

内存使用量用 T_1 编码器编码过程中存储的码流字节数和相关信息 (编码过程的 $\Delta D_i^k, \Delta R_i^k$ 和 S_i^k) 字节数衡量。在不同的比特率下, 用本文算法与标准算法压缩五幅图像存储器使用量减少的百分比如图 9 所示。可见本文算法在不同的压缩比下均大大减少了编码所需要的内存量。

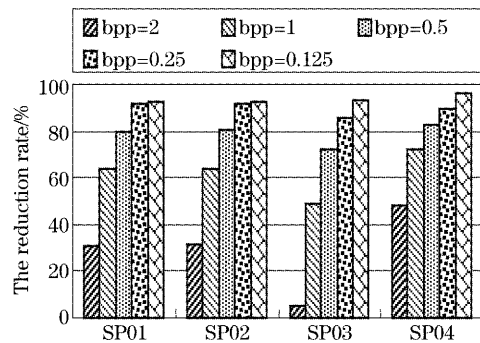


图 9 本文算法与标准算法的存储减少量
Fig. 9 The reduction rate of memory usage between the standard and the proposed scheme

5 结 论

本文提出一种适于干涉多光谱图像压缩的自适应率控制算法, 从实验结果看, 本算法具有下列优点:

1) 根据光谱特性, 对高频系数光谱感兴趣区域进行垂直方向的分解, 背景区域不进行分解, 使光谱信息的能量更加集中, 提高光谱区域的编码效果。

2) 不同于传统的 JPEG2000 感兴趣区域算法提升后以完全比特平面编码的码块为单元的编码方式, 本算法以编码过程的重要性为依据, 进行不完全的比特平面编码, 且不改变 JPEG2000 标准码流格式, 解码器无需改动。

3) 本算法可根据引入编码深度控制系数和目标码率自适应确定编码深度, 并可根据需要改变编码深度控制系数门限值, 灵活地控制编码深度和图像压缩质量。

4) 与标准算法相比, 有效地减少了编码器计算量和存储器使用量, 从而减轻了编码器工作负担, 缩短了编码时间, 提高了编码效率。

5) 与其它改进的算法^[11~13]相比, 本算法更适合实际编码需要, 恢复图像质量高, 易于硬件实现。

因此作为干涉多光谱卫星图像压缩的实现方案, 本算法具有广泛的应用价值, 效果可以满足绝大多数场合的应用要求。

参 考 文 献

- 1 JPEG 2000 Part I Final Draft International Standard[S]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N1890, September 2000
- 2 D. Taubman. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, **9**(7): 1158~1170
- 3 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
- 4 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiang Libin *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 *et al.*. An improved biblock 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 Deng Jiaxian, Wu Chengke, Chen Jun. 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. 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
- 7 Ziqin Li, Qi Li, Zhaoshuo Tian *et al.*. Processing for laser rader range images[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 210~212
- 8 Xu Liu, Yongfeng Huang, Wende Shou *et al.*. Adaptive speckle reduction of ultrasound images based on maximum likelihood estimation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 24~27
- 9 Cheng Lihong, Tian Xiaodong, Xie Cun. Recoded contrast of difform coded aperture in photoelectricity imaging[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 947~950 (in Chinese)
程丽红,田晓东,谢 存. 光电成像中不同形状编码孔径的解码比较[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 947~950
- 10 Nie Shouping, Wang Ming, Liu Feng. Image segmentation algorithm study for low contrast image[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 89~91 (in Chinese)
聂守平,王 鸣,刘 峰. 低对比度图像分割算法研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 89~91
- 11 Zhuang Huaiyu, Wu Chengke, Deng Jiaxian *et al.*. A fast algorithm and hardware implementation for rate-distortion optimization in JPEG2000 [C]. *Proc. IEEE Conf. on Multimedia and Expro.*, 2004, **3**: 1527~1530
- 12 T. Masuzaki, H. Tsutsui, T. Izumi *et al.*. JPEG2000 adaptive rate control for embedded systems[C]. *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*, 2002, **4**: 333~336
- 13 Y. M. Yeung, Oscar C. Au, Andy Chang. An efficient optimal rate control scheme for JPEG2000 image coding[C]. *Proc. IEEE Conf. on Image Processing*, 2003, **3**: 761~764