

基于率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩*

邓家先 吴成柯 陈 军

(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块编码的矩形感兴趣区域编码的干涉多光谱卫星图像压缩方法,不需要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自适应失真跟踪实现。解码器不需要进行小波域系数的逆提升,即可达到感兴趣区域的恢复质量要求。改变感兴趣区域的失真指标,只需要再次进行码流组织,而不需要重复进行优化截取内嵌块编码的 T_1 编码,因此更为有效、灵活。同时提出了一种整型率失真斜率估计值快速算法,既可以保证率失真优化截取的精度,又避免了率失真斜率的浮点除法计算和浮点表示,降低了系统的复杂度。该算法适合干涉多光谱卫星图像压缩。

关键词: 信息光学; 图像处理; 图像压缩; 优化截取内嵌块编码; 感兴趣区域; 多光谱图像; 率失真
中图分类号: TN919.81 文献标识码: A

Multi-Spectral Image Compression Based on Rate-Distortion Slope Lifting

Deng Jiaxian Wu Chengke Chen Jun

(National Key Laboratory of Integrated Service Network, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 30 November 2002; revised 6 May 2003)

Abstract: A method is proposed for multi-spectral image compression based on rectangle region of interest (ROI) coding of EBCOT, which does not lift the coefficients of wavelet domain and is complemented by code stream organization. When the code stream is organized, the distortion of ROI can be calculated approximately, which is used to adjust the code stream organization to meet the need of the peak signal-to-noise ratio (PSNR) of ROI. This procedure is adaptive. The decoder needs not to lift reversely the coefficients and works normally. If the distortion requirement is changed, the organization can be done again, but the T_1 coding of EBCOT needs not be done again, so the algorithm is more efficient and more flexible. A fast computation of the slopes is proposed, by which not only the precision of the slopes is enough but also the floating point division and floating point expression of the slopes are avoided, so the system complexity is decreased. This method is suitable for multi-spectral image compression.

Key words: information optics; image processing; image compression; embedded block coding with optimized truncation (EBCOT); region of interest (ROI); multi-spectral image; rate distortion

1 引 言

近年来,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率和光谱分辨率。为了有效

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(如大于 36 dB)。

在基于小波变换的现代静态图像压缩技术中,感兴趣区域编码往往在小波域实现,即提升小波变换后的系数^[1,2,3,6],用户根据需要事先确定提升系数。如果要求恢复图像感兴趣区域是无损或近无损的,则可以对小波系数进行“最大提升”^[6]。但通常情况下,用户不能确定提升系数的大小。如果提升

*“十五”军事通信技术预研项目(410010302)、国防科技预研基金(J20.12.1.DZ01)、高交时高光谱遥感图像压缩技术研究(708-2-3-3)资助课题。

E-mail: dengjiaxian@163.net

收稿日期:2002-11-30;收到修改稿日期:2003-05-06

系数小,则恢复图像的感兴趣区域可能无法满足用户要求;如果提升系数大,则恢复图像背景的峰值信噪比太小,导致整幅图像的主观质量差。由于不同图像的复杂程度不同,在不进行人工干预情况下,这类采用固定提升系数的方法不能达到最优的图像压缩效果。

David Taubman^[7]提出的优化截取内嵌块编码是最新静态图像编码国际标准 JPEG2000 的核心算法^[8,9]。JPEG2000 支持感兴趣区域编码,其实现方法也是对小波系数进行直接提升。优化截取内嵌块编码的编码器分为 T_1, T_2 编码器。 T_1 编码器将各子带的小波系数划分成相互独立的码块,对各个码块独立进行比特平面编码并提供参量(如率失真斜率等)供 T_2 编码器使用。 T_2 编码器根据 T_1 提供的参量进行率失真优化截取,形成码流。本文提出一种基于优化截取内嵌块编码的感兴趣区域编码实现方法,该方法可以根据恢复图像感兴趣区域的峰值信噪比最低要求自动进行优化截取,而且保留了优化截取内嵌块编码的分辨率渐进性、峰值信噪比渐进性等特性。

2 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,具有成像仪和光谱仪的功能。获取的遥感图像包含了二维空间信息和一维光谱信息^[4,5]。其成像原理如图 1 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,由于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。多光谱区域的位置是由成像光谱仪确定的,为一固定区域。在本文中该区域的二维坐标为 $\{[250,0],[352,512]\}$ 。

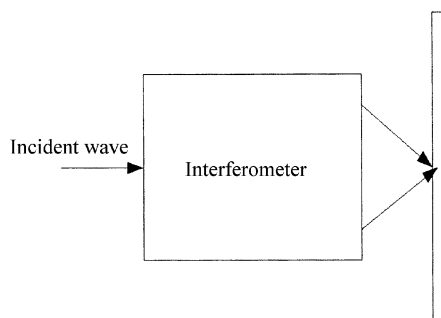


Fig. 1 Diagram of interferometer

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 级分解的高频系数进行垂直方向的分解,如图 2 所示。该结构使光谱信息的能量更加集中,从而有利于提高光谱区域的编码效果。

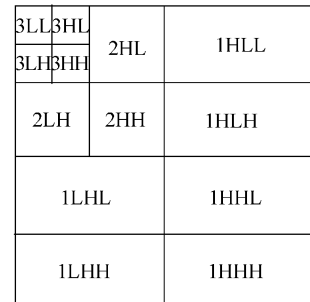


Fig. 2 The decomposition structure of spectral images

3 率失真优化快速算法

优化截取内嵌块编码的 T_2 编码器是根据率失真斜率进行优化截取,从而组织码流^[7~9],使得在每个截取点恢复图像的峰值信噪比最佳,其基本原理如下:

给定码率 R_{\max} ,设码块 B_i 在 T_1 产生的内嵌比特流的码率截止到 $R_i^{n_i}$, n_i 是截取点,则图像总的码率为

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

设码块 B_i 的系数产生的失真为 $D_i^{n_i}$,并假设码块的失真测度是加性的^[6,9],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 $R \leq R_{\max}$ 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:

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

调整 λ 直到产生一组截取点使得上式在满足 $R = R_{\max}$ 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。一旦这些信息预先计算出来,则对于给定 λ 的优化的任务是简单地让 n_i 等于候选截取点 N_i 中的最大 k 值,使得 $s_i^k > \lambda^{-1}$ 。

确定候选截取点过程中要计算斜率,由于 $\Delta D_i^{n_i}, \Delta R_i^{n_i}$ 可以是整型的,而下列的斜率计算要进行浮点除法运算:

$$S_i^n = \Delta D_i^n / \Delta R_i^n, \quad (4)$$

而在选择优化截取点时仅进行斜率比较运算,为了避免浮点除法运算以及浮点表示,本文使用整数化的斜率估计值 \hat{S}_i^n 来近似这种单调减的斜率值。

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

其中 α, β 为常数, β 值的取法是保证 $\hat{S}_i^n \geq 0$, α 的取值则保障两个斜率估计值之间的比较精度。显然 $\alpha \text{lb}(\Delta D_i^n)$ 和 $\alpha \text{lb}(\Delta R_i^n)$ 的计算可以通过查表实现,因此采用这种斜率计算方法可以快速进行优化截取。

4 自适应失真跟踪感兴趣区域编码

由上所知,优化截取内嵌块编码码流是根据候选截取点的率失真斜率组织的,如果调整各个码块的率失真斜率即可改变最终的码流。本文讨论一种调节感兴趣区域所对应的码块的斜率实现感兴趣区域编码的方法,该方法不会破坏优化截取内嵌块编码的分辨率渐进性和峰值信噪比渐进性等特性。

假设矩形感兴趣区域图像域所对应的坐标为 $\{[x_1, y_1], [x_2, y_2]\}$, 对图像进行 l 级小波变换,感兴趣区域在小波域所对应的坐标为 $\{[x_1^{l,b}, y_1^{l,b}], [x_2^{l,b}, y_2^{l,b}]\}$, 则

$$\begin{cases} x_1^{l,b} = \left\lfloor \frac{x_1}{2^l} \right\rfloor, & x_2^{l,b} = \left\lfloor \frac{x_2}{2^l} \right\rfloor, \\ y_1^{l,b} = \left\lfloor \frac{y_1}{2^l} \right\rfloor, & y_2^{l,b} = \left\lfloor \frac{y_2}{2^l} \right\rfloor, \end{cases} \quad (6)$$

其中 l, b 分别为尺度、子带类型。

各子带进行 T_1 编码时,感兴趣区域所对应的区域独立进行码块编码,即感兴趣区域对应的码块中不包含其他区域的系数,反之亦然。设斜率提升系数为 γ , 如果对感兴趣区域所属码块的候选截取点的斜率进行提升,提升后的斜率 $S_i^n(\gamma)$ 为

$$S_i^n(\gamma) = \gamma \cdot S_i^n = \gamma \cdot \Delta D_i^n / \Delta R_i^n, \quad (7)$$

γ 为斜率提升系数。使用(5)式计算斜率估计值 $\hat{S}_i^n(\rho)$

$$\begin{aligned} \hat{S}_i^n(\rho) &= \alpha[\text{lb}(\Delta D_i^n) - \text{lb}(\Delta R_i^n) + \text{lb}(\gamma)] + \beta = \\ &= \hat{S}_i^n + \rho, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\rho = \alpha \cdot \text{lb}(\gamma)$ 为斜率估计值增量,即斜率提升 γ 倍,对应斜率估计值增加 ρ 。

假设感兴趣区域对应的候选截取点的斜率估计值的最大值为 \hat{S}_{\max} , 最小值为 \hat{S}_{\min} , 当 $\rho \geq \hat{S}_{\max} - \hat{S}_{\min}$ 时, $\hat{S}_i^n(\rho) \geq \hat{S}_{\max}$, 此时感兴趣区域对应的候选截取点的最小斜率估计值都大于等于背景的候选截取点的斜率估计值,这就等价于最大提升的感兴趣区域编

码^[6]。当 $\rho = 0$ 时,背景和感兴趣区域对应的斜率估计值保持不变,此时没有进行感兴趣区域编码处理。由于本文讨论感兴趣区域编码,不考虑 $\rho < 0$ 情况。从上述讨论可知, ρ 的取值范围为 $[0 \sim (\hat{S}_{\max} - \hat{S}_{\min})]$ 的整数。

假设 T_2 编码器最终截取码块 i 的码流到候选截取点 n_i , 则恢复图像的失真估计值 e 为

$$e = \sum_i D_i^{n_i} = \sum_i \sum_{n=n_i+1} \Delta D_i^n, \quad (9)$$

上式同样适合恢复图像感兴趣区域的失真估计值 e 的计算,在本文中限定在感兴趣区域对应的码块范围内应用。

对于给定失真 e_g , 自适应失真跟踪感兴趣区域编码框图如图 3 所示,具体实现过程如下:

1) 感兴趣区域码块中候选截取点的斜率进行初步提升,即

$$\hat{S}_i^n = \hat{S}_i^n + \rho_0.$$

2) T_2 编码器查找优化截取点,并根据公式(9)估算恢复图像中感兴趣区域的失真估计值 e 。

3) 如果 $e \geq e_g$, 则 $\hat{S}_i^n = \hat{S}_i^n + \rho_1$, 返回 2)。

4) 完成码流组织,输出码流。

其中 ρ_1 为自适应步长因子,其取值会对自适应循环的次数 m 和恢复图像的感兴趣区域的峰值信噪比产生影响。假设感兴趣区域对应的候选截取点的斜率估计值需要提升 ρ_{\min} 才能够保证恢复图像感兴趣区域的峰值信噪比满足要求, ρ_1 与自适应循环次数 m 之间应当满足下列不等式

$$\rho_{\min} \leq \rho = m\rho_1 \leq \hat{S}_{\max} - \hat{S}_{\min}, \quad (10)$$

从(10)式可知,如果 ρ_1 太大,则自适应循环次数 m 会减少,反之亦然。但如果 m 太大,系统可能找不到最佳截取点使得在满足恢复图像感兴趣区域的峰值信噪比条件下背景的峰值信噪比最大,这是因为 ρ_1 的递增导致系统无法搜索到最优斜率估计值。

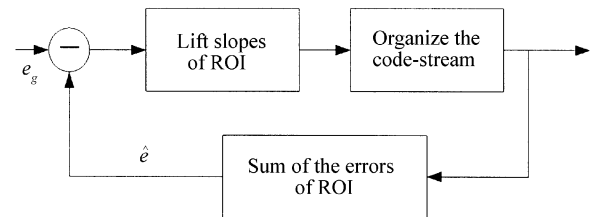


Fig. 3 The adaptive organization of the code stream

5 实验结果

图 4、图 5 分别为 4 幅 512×512 光谱图像的原

始图像 sp1, sp2, sp3, sp4 和恢复图像 rp1, rp2, rp3, rp4(码率为 1 bpp, 步长 $\rho=16$)。其中 sp4 最为复杂。使用该图像进行算法的性能测试, 码率变化对

峰值信噪比的影响如图 6 所示, 当码率足够大(如大于等于 0.4)时, 恢复图像感兴趣区域的峰值信噪比大于给定指标 36 dB。

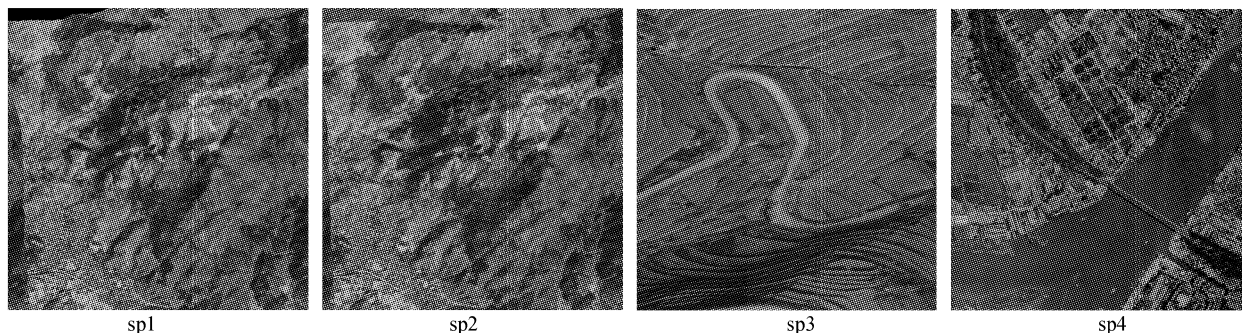


Fig. 4 Original images

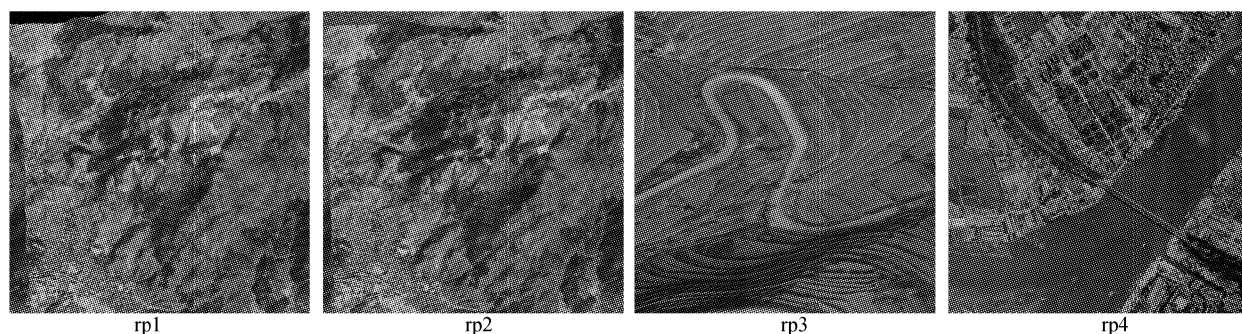


Fig. 5 Reconstructed images

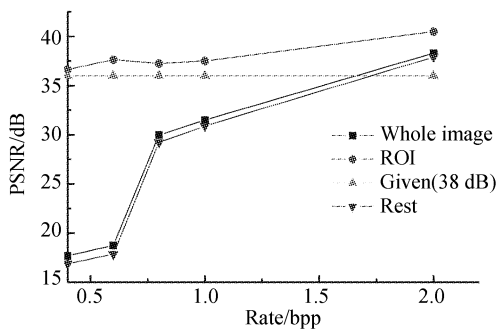


Fig. 6 Influence of rate on the PSNR. bpp: bit per pixel

自适应步长因子 ρ_1 对自适应循环的次数 m 和感兴趣区域的峰值信噪比的影响分别如图 7、图 8

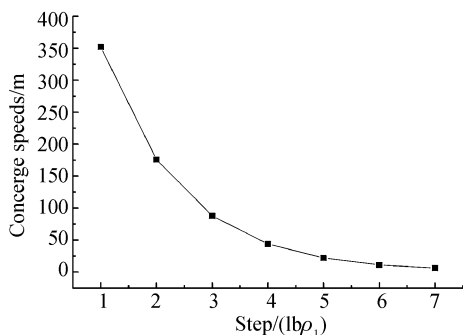


Fig. 7 Influence of ρ_1 on the converged speed

所示, 结果表明 ρ_1 越大, 感兴趣区域的峰值信噪比越高, 这就意味背景区域的峰值信噪比相应下降。所以 ρ_1 的取值应当合适, 如果太大, 收敛速度加快但感兴趣区域的峰值信噪比较高; 如果取值较小, 收敛速度太小系统编码时间太长。

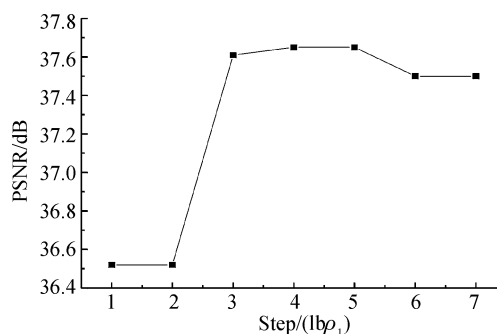


Fig. 8 Influence of ρ_1 on the PSNR

表 1 为 JPEG2000 的感兴趣区域编码的测试数据, 表 2 为本文算法的测试数据。从表 1 可以看出提升系数较小(如提升系数为 2)时, 简单图像(sp1, sp2, sp3)感兴趣区域的峰值信噪比已经超出给定值但背景区域峰值信噪比小, 复杂图像(sp4)的感兴趣区域区域的峰值信噪比小于给定值。如果不进行人工干预编码系统, 不能选择合适提升系数使得 4 幅

同时满足给定指标并达到最优的图像压缩效果。从表 2 可以看出,本文算法能够保证感兴趣区域的峰值信噪比满足要求,背景的峰值信噪比下降较小。

Table 1 Results of JPEG2000 ROI encoding (Rate=1.0)

Image name	Lifting factor	PSNR of ROI /dB	PSNR of background /dB	PSNR of whole image /dB
sp1	1	33.81	32.10	33.00
	2	37.14	31.60	32.50
	4	40.43	30.26	31.16
	8	44.32	28.54	28.45
sp2	1	33.72	32.36	33.26
	2	37.26	31.90	32.81
	4	40.99	30.65	31.55
sp3	1	39.07	37.90	38.80
	2	42.15	37.00	37.91
	4	45.90	35.78	36.68
sp4	1	31.04	30.00	30.90
	2	34.52	28.94	29.84
	4	39.35	27.92	28.83
	8	42.18	27.59	26.69

Table 2 Results of the paper (Rate=1.0, $\rho_1=4.0$)

Image name	PSNR of ROI /dB	PSNR of background /dB	PSNR of whole image /dB
sp1	36.33	32.21	32.88
sp2	36.30	32.51	33.15
sp3	39.38	37.43	38.93
sp4	37.16	28.14	28.92

结论 提出了一种基于优化截取内嵌块编码的矩形感兴趣区域的自适应失真跟踪的多光谱图像编码方法。试验结果表明该方法具有下列优点:

1) 该方法不同于一般小波提升实现的编码方法,是通过自适应调节率失真斜率实现的,不需要对小波域的系数进行提升,更为重要的是解码器无需知道是否存在感兴趣区域或者感兴趣区域形状信息。

2) 优化截取内嵌块编码一些固有的特性如分辨率渐进性、峰值信噪比渐进性都得以保持。

3) 由于该方法是自适应的,能够使得多光谱区域峰值信噪比达到给定指标。

4) 自适应步长因子 ρ_1 对自适应循环次数 m 和恢复图像感兴趣区域的峰值信噪比的影响与本文的理论分析是相符的。

5) 用斜率估计值替代斜率,不仅避免了原始优化截取内嵌块编码算法斜率计算中的浮点除法运算,而且将自适应失真跟踪过程中的斜率提升由浮点乘法运算变换为加法运算,减小了计算复杂度,便于快速实现。

由于克服了通过提升小波域系数实现感兴趣区域编码方法的不足,本文提出的算法具有广泛的使用价值,而且特别适合光谱图像这类固定区域有特殊要求的图像编码。

参 考 文 献

- Li Yunsong, Wu Chengke, Chen Jun *et al.*. Spectral satellite image compression based on wavelet transform. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **26**(6):691~695 (in Chinese)
- Chen Jun, Wu Chengke, Li Yunsong. Embedded coding of images with regions of interest based on zero tree. *J. Xidian University* (西安电子科技大学学报), 2002, **29**(3):343~346 (in Chinese)
- Yan Jingwen, Shen Guiminng, Hu Xiaoyi. An improved biblock zero tree coding for hyperspectral data compression. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):691~695 (in Chinese)
- Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bin *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(2):192~197 (in Chinese)
- Liu Liangyun, Yuan Yan, Xiang Libin *et al.*. High-throughput computed-tomography imaging spectrometer and its simulated experiment. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(2):198~201 (in Chinese)
- Christopoulos C, Askelof J, Larsson M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *IEEE Signal Proc. Lett.*, 2000, **7**(9):247~249
- Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Trans. on Image Proc.*, 2000, **9**(7):1158~1170
- Boliek M. *JPEG 2000 Part I Final Draft International Standard (corrected and formatted)*. ISO/IEC JTC1/SC29 WG1, 25 September 2000
- Charilaos Christopoulos, MediaLab, Ericsson Research, Sweden. JPEG2000 Verification Model 8.0 (Technical description). ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 WG1 NXXXX, July 31, 2000