

遥感干涉超光谱图像压缩编码*

周有喜¹ 肖江¹ 吴成柯¹ 李云松¹ 相里斌² 张金²

(1 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 基于卫星干涉超光谱成像光谱仪成像原理的分析, 提出了一种新的遥感超光谱图像压缩方案, 利用成像推扫平移特性提出一种低存储量, 帧间小波域匹配的序列压缩, 只需存储两帧图像, 比起单帧处理提高图像 PSNR 3-4dB. 为了保护图像的光谱特征, 系统采用了一种新的感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 编码技术, 使系统的压缩比提高 8 倍以上. 该感兴趣区域 (ROI) 编码采用率失真优化斜率提升, 而不是比特平面移位, 使图像在相同的光谱分辨率下拥有更好的空间分辨率. 试验数据表明, 算法大大保护了图像的光谱特性, 在 8 倍压缩比情况时, 满足卫星干涉超光谱遥感图像要求.

关键词 图像压缩; 干涉光谱图像; 成像光谱技术; 感兴趣区域编码

中图分类号 TN919.81 **文献标识码** A

0 引言

大孔径静态干涉成像光谱仪^[1,8]是在普通照相系统中加入横向剪切干涉仪, 从而使相面上得到的不再是目标的直接图像, 而是目标的“干涉图像”. 而在光谱图像压缩^[7]方面, 已有不少文献报道了一些解决的方法, 如在频率变换的压缩^[2,3]、优化截取内嵌码块编码^[4]和感兴趣区域编码^[5,6], 但这些方法都没有充分利用大孔径静态干涉成像特点.

本文在 EBCOT 算法的基础上, 提出了一种易于硬件实现的低存储量、高性能的干涉超光谱图像压缩编码算法. 该算法针对大孔径静态干涉成像光谱仪成像特点和应用环境, 实现系统化地对干涉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: 干涉超光谱图像具有除具有空间二维信息, 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; 利用航空航天成像时具有明显的推扫特征; 信道带宽要求图像的压缩比大于 8:1.

1 图像压缩

1.1 率失真优化截取内嵌码块编码压缩编码

干涉超光谱卫星图像序列的相邻帧图像之间在空间上具有明显的推扫平移特性, 如果直接采用高存储的三维小波变换^[3], 不能使图像质量达到理想效果. 根据干涉超光谱图像的特点和应用环境要求, 这里提出了一种新的干涉超光谱图像序列压缩

算法. 该算法不需要进行三维小波变换, 只利用小波域匹配算法, 计算连续两帧图像间的差值图像, 再对差值图像进行编码时, 系统只需存储两帧, 减少了编码的延时, 与直接的单帧率失真优化截取内嵌码块编码压缩编码相比, 图像质量可提高约 3~4 dB.

算法具体实现如下:

- 1) 对选定模板图像进行一级小波变换, 得到小波域系数, 并对当前图像进行一级小波变换
- 2) 计算 LL 子带相关系数 (不包括光谱区域系数), 并计算最佳匹配对应的位移量. 当 LLL HHL 子带相关系数同时满足误差要求时, 执行 3); 否则对当前图像进行正常编码, 并将其恢复图像作为模板, 返回 1)
- 3) 根据得到的位移量对当前图像进行周期移位, 并与模板相减得到差值图像
- 4) 对差值图像进行小波变换和编码
- 5) 返回 1) 对下一幅图像进行编码

1.2 率失真提升准无损编码

利用推扫平移的帧间相关性可大大提高图像的压缩质量, 在试验中图像的恢复质量平均提高约 2~3 dB, 但仍不能满足光谱恢复要求 (一般 >45 dB), 见图 2, 所以我们提出了一种新的基于率失真优化截取内嵌码块编码 (EBCOT)^[4,5] 算法的率失真提升感兴趣区域 (ROI) 编码方法. 该方法克服了 JPEG2000 标准中比特平面提升方法降低的编码效率损失^[6], 在保证相同光谱质量的情况下, 使图像的质量更高.

1.2.1 率失真优化截取

设码块 B_i 在 T_i 部分产生的内嵌比特流的码率截止到 R_i^n , n_i 是某个截取点, 则图像总的码率为

*十五军事通信技术预研资助项目 (410010302)

Tel: 029-88203110 Email: ken@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2004-10-11

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

设码块 B_i 的系数在恢复图像中的失真为 $D_i^{n_i}$, 码块的小波系数的失真测度是加性的^[4], 即

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

式中 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 $R \leq R_g$ (R_g 为给定图像码率) 时 D 最小. 解决这种条件极值问题可以通过 Lagrange 算法. 因此问题等价于使式 (3) 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式 (3) 在满足 $R = R_{\max}$ 时最小. 对于式 (3) 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 等于优化截取点集合 N_i 中的最大值 k , 使得 k 点的斜率 $S_i^k > \lambda^{-1}$.

在确定候选截取点的过程中要计算斜率, 虽然 $\Delta D_i^{n_i}$ 和 $\Delta R_i^{n_i}$ 可以用整数表示, 但下列的斜率计算要进行浮点除法运算

$$S_i^{n_i} = \Delta D_i^{n_i} / \Delta R_i^{n_i} \quad (4)$$

然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, 使用整数化的斜率估计值 $\hat{S}_i^{n_i}$ 来近似这种单调减的斜率值.

$$\hat{S}_i^{n_i} = \alpha (\log_2 \Delta D_i^{n_i}) - \log_2 (\Delta R_i^{n_i}) + \beta \quad (5)$$

式 (5) α, β 为常数, β 值的取法是保证 $\hat{S}_i^{n_i} \geq 0$, α 则保证两个斜率估计值之间的比较精度.

1.2.2 基于率失真优化截取的感兴趣区域编码

既然 EBCOT 码流是根据候选截取点的率失真斜率组织的, 那么调整各个码块的率失真斜率就可改变最终的码流. 这里提出一种调整感兴趣区域 (ROI) 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 EBCOT 的分辨率渐进性, PSNR 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, 则感兴趣区域在小波域所对应的坐标

为 $\{[x_1^{l,b}, y_1^{l,b}], [x_2^{l,b}, y_2^{l,b}]\}$, 则

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

式中 l, b 分别为尺度, 子带类型.

各子带进行 T_1 编码时, ROI 所对应的区域独立进行码块编码, 即 ROI 对应的码块中不包含其它区域的系数, 反之类似. 设斜率提升因子为 γ , 如果对 ROI 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

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

由于使用式 (5) 进行了斜率变换, 因此提升后的斜率估计值 $\hat{S}_i^n(\rho)$ 为

$$\begin{aligned} \hat{S}_i^n(\rho) &= \alpha (\log_2 (\Delta D_i^n) - \log_2 (\Delta R_i^n) + \\ &\log_2 (\gamma)) + \beta = \hat{S}_i^n + \rho \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\rho = \alpha \log_2 (\gamma)$, 即斜率提升 γ 倍, 对应估计斜率增加 ρ . 以一定的步距 ρ 提直至 $S_i^n(\rho)$ 约等于 1, 则可实现感兴趣区域的准无损压缩.

2 试验与分析

实验参数:

测试图像序列: 512 帧连续推扫序列;

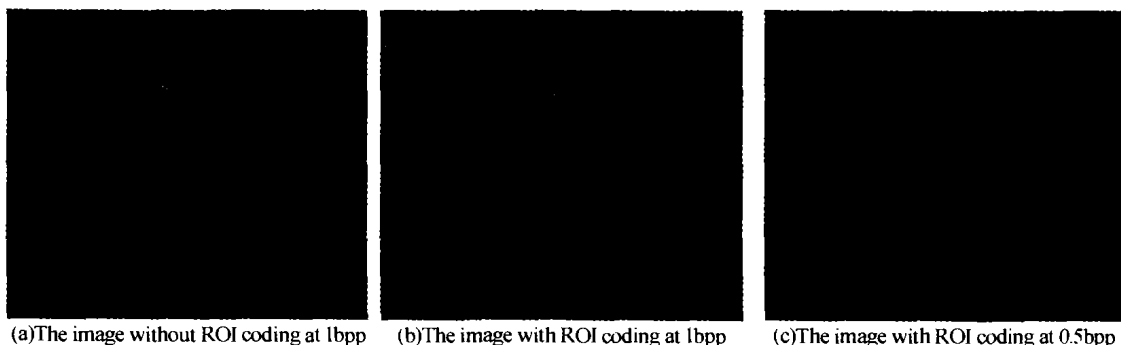
小波: 9/7; 小波级数: 3;

平均码率: 1bpp;

感兴趣区域对角坐标: ((256, 0), (384, 512));

恢复谱段: 46;

图 1 显示了对于序列中的任意单帧图像感兴趣区域处理的效果图. 在 16 倍压缩时, 从视觉效果上明显看到, 光谱条纹集中的感兴趣区域在背景区域随着码率降低变模糊时, 仍保持最佳的图像质量, 从而使光谱信息被很好的保留. 在试验中同 JPEG2000 标准提供的 MAXSHIFT ROI 处理方法针对图 1 等三组不同复杂度的图像进行比较. 实验数据如表 1.



(a)The image without ROI coding at 1bpp (b)The image with ROI coding at 1bpp (c)The image with ROI coding at 0.5bpp

图 1 ROI 算法图像效果

Fig. 1 The comparison images of ROI processing

表 1 与标准 JPEG2000 的对比

区域	图像	无 ROI 处 理/dB	JP2K Maxshift /dB	率失真 提升/dB
感兴趣 区域 (ROI)	Sp01. raw	29.59	无损	无损
	Sp02. raw	35.77	无损	无损
	Sp03. raw	28.48	无损	无损
背景 (BG)	Sp01. raw	30.16	26.56	26.96
	Sp02. raw	36.14	31.57	32.26
	Sp03. raw	29.33	24.06	24.16
整图	Sp01. raw	30.49	31.46	31.68
	Sp02. raw	36.67	36.26	36.65
	Sp03. raw	29.15	28.43	28.47

数据结果表明,在保证感兴趣区域无损条件下,我们的算法比 JPEG2000 能更好的保护背景质量,使得整图信噪比 PSNR 值更高,这是由于率失真优化截取内嵌码块编码压缩编码 (EBCOT) 是基于比特平面的编码算法,一定区域比特平面移位必然增加更多待编码平面,区域从而降低编码效率,当感兴趣区域较大时就更为明显. 而率失真提升本质上是调整了编码后码流比特的输出先后顺序,避免这一缺陷.

表 2 同时给出了利用干涉图像帧间相关性,512 帧序列压缩结合感兴趣区域处理的数据处理部分结果,图像编号代表序列顺序.

表 2 利用帧间相关与 ROI 处理的数据结果

图像	无 ROI 处理 数据/dB	图像	率失真提升 算法/dB
1000. raw	40.59	1005. raw	39.96
1001. raw	40.77	1006. raw	40.16
1002. raw	40.48	1007. raw	40.41
1003. raw	40.16	1008. raw	39.96
1004. raw	40.14	1009. raw	40.26

值得注意的是,感兴趣区域的提升保护是以降低背景质量为代价的,在率失真优化算法的前提下,同样也出现整图的质量下降. 从恢复光谱的试验结果表明:使用感兴趣区域编码后的实验数据同不带感兴趣区域处理的算法比较如图 1,用 8 倍压缩后,恢复的图像利用光谱图像恢复算法生成 46 幅单色光谱图,随机取一个像素点,描绘的 46 谱段光谱曲线如图 2,实线为原始光谱曲线. 由这些曲线可以

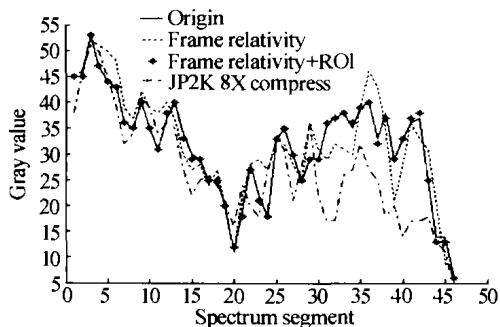


图 2 单点重建光谱曲线
Fig. 2 The reconstructed spectrum curves

看出,带有 ROI 处理的算法在拟合原始光谱曲线的能力上有明显提高. 以均方误差 (MSE) 参考: JPEG2000 单帧 8 倍压缩: MSE = 88.11; 利用帧间相关算法: MSE = 31.39; 帧间相关结合 ROI 处理算法: MSE = 0.

为了衡量全部光谱的恢复效果,我们从恢复光谱图像中取连续的 100 个像素点,绘制不同编码算法对应的 MSE 曲线,如图 3 所示. 其中 JPEG2000 单帧 8 倍压缩 100 个点的平均 MSE = 75.084; 利用帧间相关序列压缩算法 100 个点的平均 MSE = 31.293; 而帧间相关结合 ROI 处理算法的平均 MSE 只有 0.017. 实验数据也表明了带有 ROI 处理的算法在恢复光谱上有更好的效果.

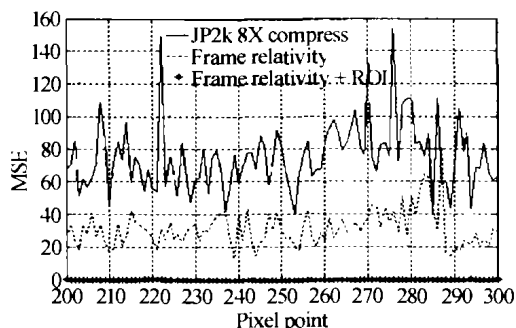


图 3 连续 100 个像素点的 MSE 曲线
Fig. 3 The MSE curve of 100 successive points

3 结论

基于卫星干涉超光谱成像光谱仪成像原理的分析,本文提出了一种新的遥感超光谱图像压缩方案. 新方案利用成像推扫平移特性提出了一种低存储量,帧间小波域匹配的序列压缩方法. 该方法利用图像帧间序列的相关性,在 8 倍压缩比的前提下,平均提高图像质量 3dB 以上. 但仍不能满足干涉超光谱图像恢复光谱信息,识别判读的要求,为了进一步保护图像的光谱特征,本文中提出了一种新的感兴趣区域编码技术. 由于文中采用率失真优化斜率提升,而不是比特平面移位,从而使图像在相同的光谱分辨率下拥有更好的空间分辨率,8 倍压缩比试验数据表明,该方案在干涉超光谱图像应用系统具有实用价值.

参考文献

- 1 相里斌, 赵葆常, 薛明球. 空间调制干涉成像光谱技术. 光学学报, 1998, 18(1): 18 ~ 22
Xiang L B, Zhao B C, Xue M Z. Acta Optica Sinica, 1998, 18(1): 18 ~ 22
- 2 Horton R F. Optical design for a high etendue imaging Fourier transform spectrometer. Proc SPIE, 1996, 2819: 300 ~ 315
- 3 Kim T S, Kim S J, Kim B J, et al. Multispectral Image Data

- Compression Using Classified Prediction and KLT in Wavelet Transform Domain. *Proc. of ITC-CSCC2002*. 2002. 204 ~ 207
- 4 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, **9** (7): 1158 ~ 1170
- 5 肖江, 邓稼先, 吴成柯, 等. 一种支持干涉超光谱图像 ROI 的压缩编码方法. *光子学报*, 2003, **32**(4): 481 ~ 484
Xiao J, Deng J X, Wu C K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 481 ~ 484
- 6 Christopoulos C, Askelf J, Larsson M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, **7**(9): 247 ~ 249
- 7 吕群波, 相里斌. 基于光谱分类的干涉光谱图像压缩. *光子学报*, 2004, **33**(6): 681 ~ 684
Lü Q B, Xiangli B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 681 ~ 684
- 8 相里斌, 计忠瑛, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱差像仪定标技术研究. *光子学报*, 2004, **33**(7): 850 ~ 853
Xiangli B, Ji Z Y, Huang M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 850 ~ 853

The Image Compression Scheme for Remote Sense Superspectral Images

Zhou Youxi¹, Xiao Jiang¹, Wu Chengke¹, Li Yunsong¹, Xiangli Bin², Zhang Jin²

¹ National Key Laboratory of ISN, Xidian University Xi'an 710071

² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS Xi'an 710068

Received date: 2004-10-11

Abstract A new compression scheme of satellite interferential superspectral images is proposed based on the analyses of satellite superspectral images. There are two novelties in the scheme: the first is that the compression coding is an image sequence compression method with low memory, which utilizes the matching algorithm in the wavelet domain to remove the redundancy between the two successive frames; The second is that in order to protect the information of the spectrum the scheme adopts a new ROI (Region Of Interest) coding algorithm, in which the lifting procedure is carried out in code stream organization stage. As results, the low coding efficiency situation due to the nature of the bitplane shift methods could be improved, which enables the high fidelity in the background (BG) and makes better qualities of spectrum curve. The experimental results have been proved to be encouraging.

Keywords Interference superspectral images; ROI; Image compression

Zhou Youxi was born in Fujian, China, on October 19, 1979. He is a Ph. D. student in the Department of Information Engineering of Xidian University. His research interests are in the compression and processing of remote sensing images and in the modeling of telecommunication system.

