

文章编号: 0253-2239(2004)11-1494-5

# 大孔径静态干涉光谱仪图像压缩技术\*

肖江<sup>1</sup> 周有喜<sup>1</sup> 吴成柯<sup>1</sup> 杨建峰<sup>2</sup> 相里斌<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071)  
(<sup>2</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘要:** 从图像压缩的角度分析了大孔径静态干涉成像光谱仪成像原理, 并提出了一种新的遥感多光谱图像压缩方案。新方案利用大孔径静态干涉成像光谱仪推扫成像特点提出了一种低存储量, 帧间小波域匹配的图像序列压缩方法, 提高图像质量 3~4 dB。为了保证图像的光谱信息在 8 倍压缩比下有效应用, 系统采用了一种新的感兴趣区域(ROI)编码技术。感兴趣区域编码时, 由于方案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。实验结果表明, 算法大大保护了图像的光谱特性, 在 8 倍压缩比下, 满足了该类干涉多光谱遥感图像的质量要求。

**关键词:** 图像压缩; 干涉光谱图像; 离散小波变换; 率失真提升; 成像光谱技术

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A

## The Image Compression Technology of the Large Aperture Static Imaging Interference Spectrometry

Xiao Jiang<sup>1</sup> Zhou Youxi<sup>1</sup> Wu Chengke<sup>1</sup> Yang Jianfeng<sup>2</sup> Xiang Libin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xian 710071)  
(<sup>2</sup> Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)

(Received 17 December 2003; revised 11 March 2004)

**Abstract:** A new compression scheme of interferential multispectral images is proposed based on the analyses of large aperture static imaging spectrometry. 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, a new ROI (Region of interest) coding algorithm is adopted, in which the lifting procedure is carried out in code stream organization stage instead of the DWT as suggested by JPEG2000. As a result, 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.

**Key words:** image compression; interference multispectral image; discrete wavelet transform; rate-distortion lift; imaging spectrometry technology

## 1 引 言

成像光谱技术是 20 世纪 80 年代出现的一项融光学、光谱学、电子技术、计算机技术及精密机械于

一体的高新科技。由于它能获得被测目标的空间和光谱的丰富信息, 因此在航空航天遥感、军事侦察、环境检测、资源勘测等方面具有重要应用价值。

从 20 世纪 80 年代开始, 干涉型光谱仪发展成应用于航空航天环境下第一代的具有空间分辨率的干涉型成像光谱仪。第一代的干涉型成像光谱仪(时间调制型干涉成像光谱仪)在继承高通量、多通

\* 十五军事通信技术预研(410010302)资助课题。

E-mail: riverxj@hotmail.com

收稿日期: 2003-12-17; 收到修改稿日期: 2004-03-11

道优点的同时,还要有一套超精密的动镜驱动机构,该机构的可靠性问题大大限制了它在航天航空对地侦察中的应用。针对上述问题,上个世纪末,不需要超精密动镜驱动机构的干涉成像光谱仪——空间调制型干涉成像光谱仪及其应用得到了学者们的关注和研究<sup>[1]</sup>。新一代的干涉光谱成像技术带来了具有新特点的图像系统和数据信息,如何寻找一种理想的干涉成像方案,并根据其成像特点和应用环境,实现对干涉光谱图像数据的处理压缩是本文研究的核心。在研究中,我们关注以下几个方面的系统特点和要求:干涉多光谱图像除了具有空间二维信息,同时还具有一维光谱信息,信息压缩后要求从图像中能够完整恢复各像素点的光谱曲线;航空航天应用环境要求系统重量轻,低存储,低功耗,高稳定;信道带宽要求图像的压缩比大于 8:1。

## 2 大孔径静态干涉成像光谱仪原理及成像特点分析

大孔径静态干涉成像光谱仪<sup>[2]</sup>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”,原理如图 1 所示。“大孔径静态”的提法是针对干涉系统的特点而言的。与通常意义上的空间调制性干涉成像光谱仪不同,此干涉系统没有入射狭缝,因而是“大孔径”的,与时间型干涉成像光谱仪不同,此干涉系统没有扫描运动部件,因而是“静态的”。

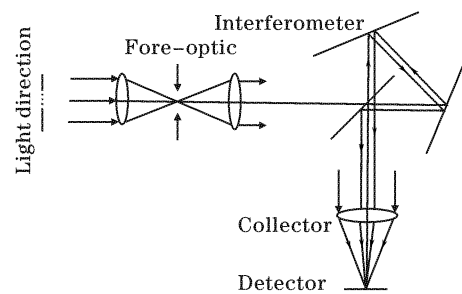
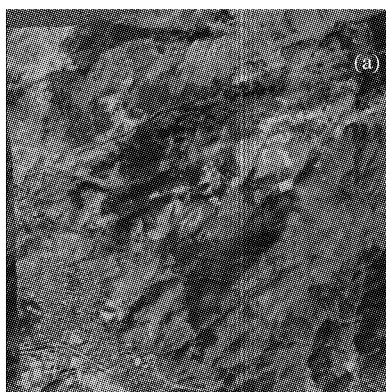


Fig. 1 Large aperture static imaging spectrometry

### 2.1 成像特点分析

该设计使得系统结构简化,系统设计难度降低,在满足光通量的要求下可以大大减小仪器的体积、重量、功耗等。没有运动部件,提高了系统的稳定性、可靠性、抗震动性和抗冲击性,使之能适用于野外和航空航天环境。利用连续推扫成像不需要严格的相机姿态校正或瞬时多拍技术,在一定的成像谱段情况下,大大提高了空间信息量。因为光谱的恢复工作可在地面进行,使得数据量传输的带宽要求大大降低,提高了整个系统的数据处理效率,潜在提高图像压缩比(谱段数/2)。

### 2.2 图像特点与数据处理

图 2 是干涉成像光谱仪连续获得的两幅干涉图像,在图中有明显的干涉条纹,根据傅里叶变换光谱学原理,干涉图与光源的光谱分布之间存在傅里叶变换关系<sup>[3]</sup>,这正是大孔径静态干涉成像光谱仪获得光谱信息的依据。大孔径静态干涉成像仪数据处理包含两个主要内容,即从干涉图像复原原物点的

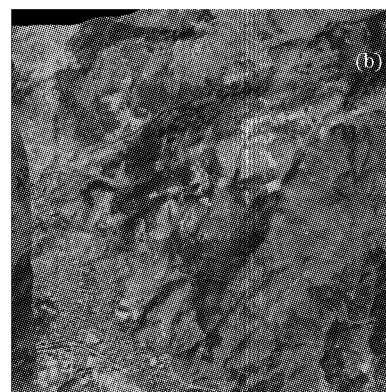


Fig. 2 The two successive frames of the interferential multispectral image

光谱分布和景物的真实图像。所以该类图像压缩不仅要实现一般图像压缩意义下的一定压缩比下的高图像质量,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。

## 3 图像压缩

### 3.1 利用推扫特性的率失真优化截取内嵌码块编码压缩编码(EBCOT)

干涉多光谱卫星图像序列的相邻图像之间在空

间上具有明显的推扫平移特性,如果直接使用高存储的三维小波变换<sup>[4]</sup>而且不利用平移特性,对应算法并不能够达到理想效果。所以研究一种能够充分利用这种序列相关性特别平移特性的,而编码复杂性低的算法是十分必要的。根据干涉多光谱图像的特点和应用环境要求,这里提出了一种干涉多光谱卫星图像序列压缩算法。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的两帧图像间的差值图像,在对差值图像进行编码时,系统存储量只有两帧要求,减少了编码的延时和功耗。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,图像质量比单帧 JPEG2000 压缩平均可提高约 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。

### 3.2 保证光谱特性的率失真提升无损编码

利用推扫的帧间相关性可以大大提高图像的压缩质量,在我们的试验中图像的恢复质量平均提高约 2~3 dB,但仍然不能满足光谱恢复要求(一般大于 45 dB),见图 3,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)<sup>[5,6]</sup>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<sup>[7]</sup>,在保证相同光谱质量的同时,使图像的质量更高。

#### 3.2.1 率失真优化截取

给定码率  $R_{\max}$ ,设码块  $B_i$  在 T1 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,则图像总的码率  $R$  为

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

设码块  $B_i$  的系数在恢复图像中的失真为  $D_i^{n_i}$ ,假设码块小波系数的失真测度是加性的,则整幅图像的失真大小  $D$  为

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

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:

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

其中调整  $\lambda$  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  $\lambda$  的优化任务是简单地让  $n_i$  等于  $N_i$ (候选截取点集合)中的最大  $k$  值,使得  $k$  点的斜率  $s_i^k > \lambda^{-1}$ 。

在确定候选截取点过程中要计算斜率,即使  $\Delta D_i^{n_i}, \Delta R_i^{n_i}$  选为整型的,下列的斜率计算也会导致浮点数出现:

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

注意到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,我们可以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:

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

上式  $\alpha, \beta$  为常数,  $\beta$  值的取法是保证  $\hat{S}_i^n \geq 0$ ,  $\alpha$  则保障两个斜率估计值之间的比较精度。

#### 3.2.2 基于率失真优化截取的感兴趣区域(ROI)编码

率失真优化截取内嵌码块编码压缩编码(EBCOT)是新一代静止图像压缩标准 JPEG2000 的核心算法,分为 T1, T2 两个编码引擎,既然 T1 输出码流是根据候选截取点的率失真斜率由 T2 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。这里提出一种通过调整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,该方法不会破坏原算法的分辨率渐进性,具有功率信噪比(PSNR)渐进性和好的抗误码能力等特性,甚至码流与 JPEG2000 标准完全兼容。

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

$$\begin{cases} x_1^{l,b} = [x_1/2^l], & x_2^{l,b} = [x_2/2^l], \\ y_1^{l,b} = [y_1/2^l], & y_2^{l,b} = [y_2/2^l], \end{cases} \quad (6)$$

其中  $l, b$  分别为尺度,子带类型。

各子带进行 T1 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它区域的系数,反之亦然。设斜率提升因子为  $\gamma$ , 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  $S_i^{\gamma}(\gamma)$  为

$$S_i^{\gamma}(\gamma) = \gamma \cdot S_i^{\gamma} = \gamma \frac{\Delta D_i^{\gamma}}{\Delta R_i^{\gamma}}, \quad (7)$$

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

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

其中  $\rho = \alpha \text{lb}(\gamma)$ , 即斜率提升  $\gamma$  倍,对应估计斜率增加  $\rho$ 。以一定的步距  $\rho$  提升直至  $\hat{S}_i^{\gamma}(\rho)$  约等于 1, 则可实现感兴趣区域的准无损压缩。

#### 4 试验与分析

实验参量:

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: 1 bpp;

感兴趣区域对角坐标: [(256,0),(384,512)];

恢复谱段: 46。

图 3 展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,从视觉效果上可以明显看到,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,仍保持最好的图像质量,从而使得光谱信息被更好地保留。我们在实验中同 JPEG2000 标准提供的 MAXSHIFT 感兴趣区域处理方法针对图 2、图 3 等三组不同复杂度的图像进行了比较,具体数据如表 1 所示。可以发现,在保证感兴趣区域无损条件下,我们的算法比 JPEG2000 能够更好地保护背景质量,使得全图信噪比更高,这是由于率失真优化截取内嵌码块编码压缩编码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,避免了这一缺陷。

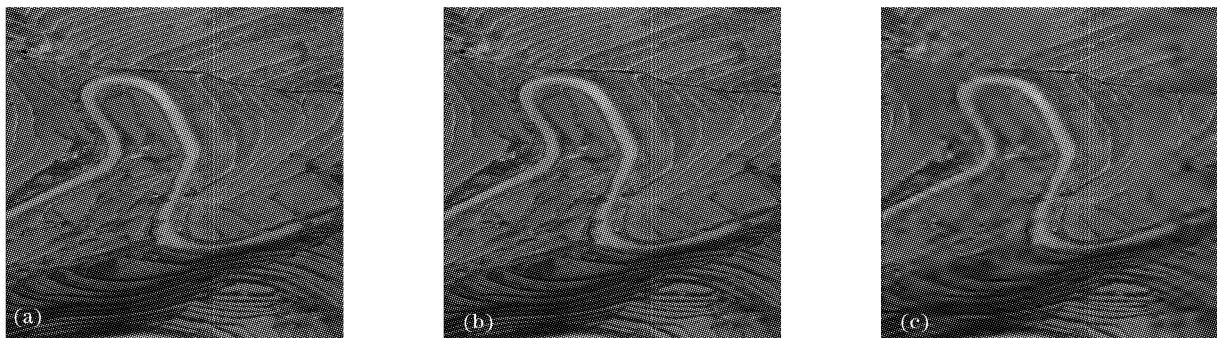


Fig. 3 The comparison images of ROI processing. (a) The image without ROI coding at 1 bpp, (b) the image with ROI coding at 1 bpp, (c) the image with ROI coding at 0.5 bpp

Table1 The comparison of the different ROI methods for the single frame

Region	Image	No ROI processing /dB	JPEG2000 Maxshift method /dB	Rate-distortion lift method /dB
ROI	Sp01. raw	29.59	lossless	lossless
	Sp02. raw	35.77	lossless	lossless
	Sp03. raw	28.48	lossless	lossless
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
The whole image	Sp01. raw	31.69	31.46	31.68
	Sp02. raw	36.67	36.26	36.65
	Sp03. raw	29.15	28.43	28.47

表 2 同时给出图 2(Sp02. raw in table 1)512 帧图像序列,利用干涉图像帧间相关序列压缩结合感兴趣区域处理的部分数据结果,图像编号代表序列顺序。

表中差值算法的存储量只需两帧,感兴趣区域算法不带来任何存储量的增加,而常见的三维算法<sup>[4]</sup>却需要 512 帧的存储量,这是硬件实现时的巨大瓶颈。

Table 2 The result of the method in the paper

Image	No ROI processing /dB	Image	Rate-distortion lift method /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

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意义下,那么这种牺牲是否合适呢?我们恢复光谱的实验结果证明:

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 4 所示,针对图 3 512 帧序列图像用带感兴趣区域的算法进行压缩编码,恢复的图像使用光谱图像恢复算法生成 46 幅单色光谱图,随机取一个象素点,单点的恢复的 46 谱段光谱曲线如图 4 的所示,实线为原始的光谱曲线。由这些曲线可以看出,带有感兴趣区域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:均方误差为 88.11;利用帧间相关算法:均方误差为 31.39;帧间相关结合感兴趣区域处理算法:均方误差为 0。当然,帧间相关结合 JPEG2000 的 MAXSHIFT 感兴趣区域处理,也可实现光谱恢复的均方误差趋近于零,但空间信息保护能力不如本文算法,见表 1。

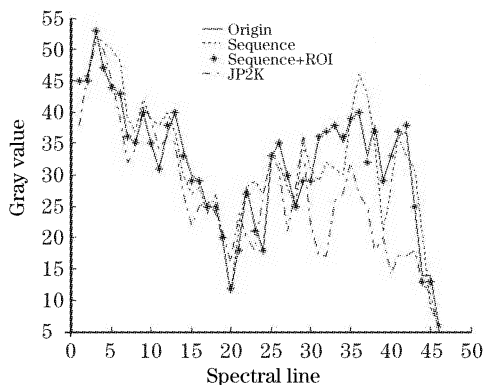


Fig. 4 The reconstructed spectrum curves

为了衡量全部光谱的恢复效果,我们从恢复的光谱图像中取连续的 100 个象素点,绘制不同编码算法对应的均方误差曲线,如图 5 所示.其中, JPEG2000 单帧 8 倍压缩 100 个点的平均均方误差为 75.084;利用帧间相关序列压缩算法 100 个点的平均均方误差为 31.293;而帧间相关结合感兴趣区域处理算法的平均均方差只有 0.017。

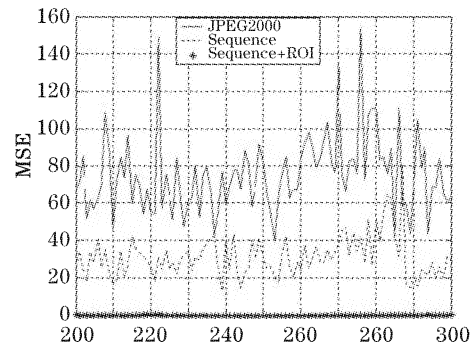


Fig. 5 The MSE curve of 100 successive points

结论 基于对大孔径静态干涉成像光谱仪成像原理的分析,本文提出了一种新的遥感多光谱图像压缩方案,新方案利用成像推扫特点提出了一种低存储量,帧间小波域匹配的序列压缩方法,该方法利用了帧间序列的相关性,在 8 倍压缩比的前提下,只使用两帧存储量,比单帧 JPEG2000 压缩算法平均提高图像质量 3 dB 以上。但仍不能满足干涉多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,文中提出了一种新的感兴趣区域编码技术。感兴趣区域编码时,由于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 倍压缩比实验数据表明,该方案在干涉多光谱图像应用系统具有实用价值。另外,文中的提出的基于小波域匹配的低存储光谱序列压缩算法和率失真提升感兴趣区域算法具有通用性<sup>[6]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 Sellar R G, Raftert J B. Fourier transform imaging spectrometer with single toroidal optic. *J. Appl. Opt.*, 1995, **34**(16): 2931~2933
- 2 Xiang Libin, Zhang Baochang, Xue Mingqiu. The special imaging technology of interferometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(1): 18~22 (in Chinese)
- 3 Raftert J B, Sellar R G. Monolithic fourier transform imaging spectrometer. *J. Appl. Opt.*, 1995, **34**(31): 7228~7230
- 4 Dragotti P L, Poggi G, Ragozini A R. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. *J. IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2000, **38**(1): 416~428
- 5 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. *J. IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, **9**(7): 1158~1170
- 6 Xiao Jiang, Wu Chengke. Interference multispectral image compression using a new JPEG2000 ROI coding method. *J. Opt. Engng.*, 2004, **43**(4): 838~842
- 7 Christopoulos C, Askelf J, Larsson M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *J. IEEE Signal Proc. Lett.*, 2000, **7**(9): 247~249