

文章编号:1004-4213(2010)07-1248-5

LASIS 高光谱图像的 3D-SPECK 压缩算法*

马冬梅^{1,2}, 马彩文¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:将三维集合分裂嵌入块编码算法结合感兴趣区域的压缩方案用于大孔径静态干涉成像光谱仪图像压缩. 首先,对高光谱干涉图像序列进行三维非对称离散小波变换. 其次,定义零块树作为编码单位. 采用感兴趣区域方法对不同的编码单位赋予不同的比特率,以保护光谱信息. 最后,采用改进的三维集合分裂嵌入块编码算法分别对每个编码单位进行编码. 实验结果表明,该方案在 8:1 压缩比下,获得大于 40dB 的峰值信噪比,同时有效地保护了光谱信息. 该算法复杂度低,实时性好,满足大孔径静态干涉成像光谱仪系统图像压缩要求.

关键词:高光谱图像压缩;3D-SPECK;ROI;LASIS

中图分类号: TN919.81

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103907.1248

0 引言

随着遥感技术的发展,高光谱干涉成像技术获得了日益广泛的应用. 由于光谱干涉成像仪获得的图像同时具有二维空间信息和一维的光谱信息,其海量数据给现有信道和存储能力带来极大的压力,因此必须对其进行压缩. 而光谱干涉图像的特殊性,使得常规图像压缩方法难以奏效. 为此,国内外的众多学者提出了各种有针对性的压缩方案^[1-5]. 本文针对大孔径静态干涉成像光谱仪(Large Aperture Static interference Imaging Spectrometer, LASIS)的成像特点,提出了一种基于三维离散小波变换的三维集合分裂嵌入块编码(3-D Set Partitioning Embedded Block, 3D-SPECK)算法结合感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)的压缩方案:首先对高光谱干涉图像序列进行非对称三维离散小波变换,然后定义“零块树”为编码单位,按每棵树与干涉光谱的关系,赋予各编码单位不同的比特率. 最后采用改进的 3D-SPECK 算法对其编码. 在 8:1 压缩率下,PSNR 大于 40 dB,有效保护了光谱信息.

1 高光谱干涉图像分析

1.1 LASIS 的成像原理

LASIS 是一种推扫式傅里叶变换型成像光谱仪. 其成像原理^[6]如图 1,一束视场角 θ 的光线入射到 LASIS,经 Sagnac 干涉后成为两束平行的相干

光,当其会聚到成像镜的后焦面的同一点时发生干涉. LASIS 沿横向剪切干涉仪剪切方向推扫,与推扫方向平行的“一列”探测器单元输出某像元的一条干涉图. 每推扫完一个视场,就得到像面完整的目标干涉图.

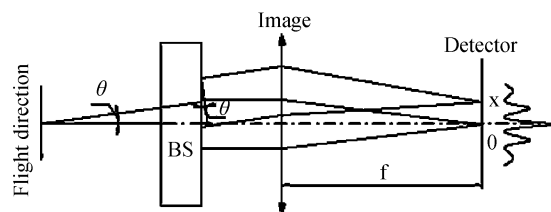


图 1 LASIS 系统成像原理

Fig. 1 Imaging principle of LASIS system

同一列上各点处的光程差不同,这样就在像面上形成了具有横条状干涉条纹的光谱图像,光谱信息就存在于干涉条纹之中. 每帧像面的 0 光程谱线位置基本上是固定的. 对高光谱干涉图像进行压缩,应保证完整恢复图像中各像素点的光谱曲线.

1.2 图像特征

图 2 是 LASIS 获得的一系列高光谱干涉图像. 图中,0 光程差附近的光强调制剧烈,呈现出明显的干涉条纹,而景物的空间信息较为模糊;离 0 光程差越远,干涉条纹越不明显,而物像越清晰. 得到这样的图像是由 LASIS 系统的特点决定的,随着视场角的增大,干涉仪产生的光程差增大,干涉现象减弱,图像被调制的程度就降低. 图像压缩应充分保护 0 光程差附近的主要光谱信息. 为此,文献[7]提出了率失真斜率提升算法,对不同光程差的像素点赋予不等的重要权系数. 这就需要研究有效的匹配算法,

* 国家高技术研究发展计划(2007AA703222)资助

Tel:029-88887641

Email:dr.mdm@opt.ac.cn

收稿日期:2009-05-06

修回日期:2009-06-10

精确定位 0 光程差谱线的位置,并且要考虑在实际应用中推扫平台的姿态稳定性带来的诸如谱线偏移、扭曲等问题,这无疑大大增加了算法的复杂度.本文提出的基于 ROI 的 3D-SPECK 算法对不同的编码单位赋予不同的比特率,大大简化了算法,有效保护了主要的光谱信息.

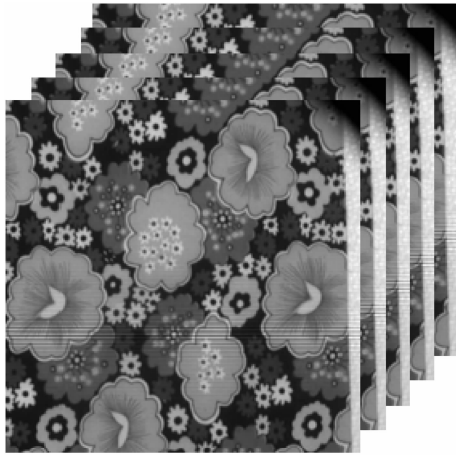


图 2 干涉高光谱序列
Fig. 2 Interference hyperspectral image sequence

2 图像压缩

2.1 非对称三维小波变换

干涉高光谱图像序列由推扫形成,相邻帧间存在较大的冗余,同时,也具有普通图像的帧内冗余,因此,可采用 3 维离散小波变换(3D-DWT)进行分解.因为高光谱干涉图像序列的帧内冗余与帧间冗余不同质,故采用非对称 3D-DWT 变换去相关,如图 3.本实验中,对于大小为 512×512 的图像,每连续 16 帧图像为一组,首先对每一帧分别进行 5 级的 2D-DWT,然后沿帧方向做 3 级的 1D-DWT,则最低分辨率子带由 $16 \times 16 \times 2$ 的像素块组成,对应 64 个 $2 \times 2 \times 2$ 的“零块树”(Zero Block Tree, ZBT)树根,如图 4.

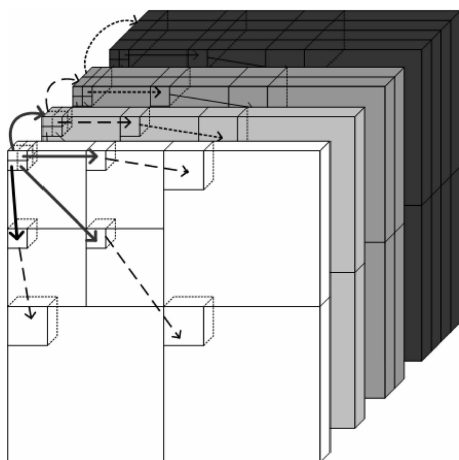


图 3 非对称 3 维离散小波变换
Fig. 3 Asymmetric 3D-DWT

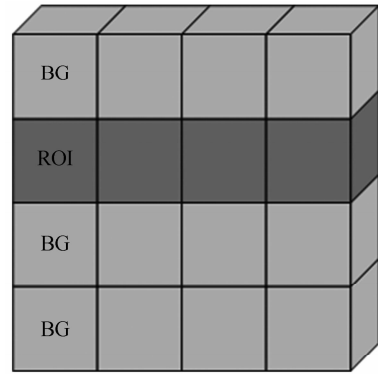


图 4 零块树树根在最低分辨率子带
Fig. 4 Roots of Zero Block Tree in the lowest resolution subband

2.2 ROI 系数保护

LASIS 像面的零光程谱线在第 175 行附近,而光谱信息主要集中在约第 140~210 行.为方便处理,固定选取每帧中光谱信息集中的第 129~256 行为 ROI 区,其余为背景区(BG).

为确定图像变换域的各级小波子带的 ROI 区域,将原始图像定义为虚拟的 0 级二维小波域图像,则定义一级子带的 ROI 区为 0 级子带 ROI 的 PROI,满足式(1)

$$PROI(i, j) = \bigcup_{(k, l) \in O(i, j)} ROI(k, l) \quad (1)$$

以此类推,第 $(n+1)$ 级子带的 ROI 区为 n 级 ROI 的 PROI,详见文献[8].则最低分辨率子带所对应的 ROI 结构如图 4.

2.3 编码单位(Codeunit)

图像序列经三维 DWT 分解后形成的非对称零块树(Asymmetric Zeroblock Tree)如图 3 箭头所示.每棵零块树的结构与小波变换域图像序列的整体结构几何相似,所以可以对每棵零块树分别进行 3D-SPECK 编码,并定义每棵零块树为一个编码单位(Codeunit),如图 5.则一棵树由位于不同级的小波分解子带(Subband)的系数块构成.同一子带内

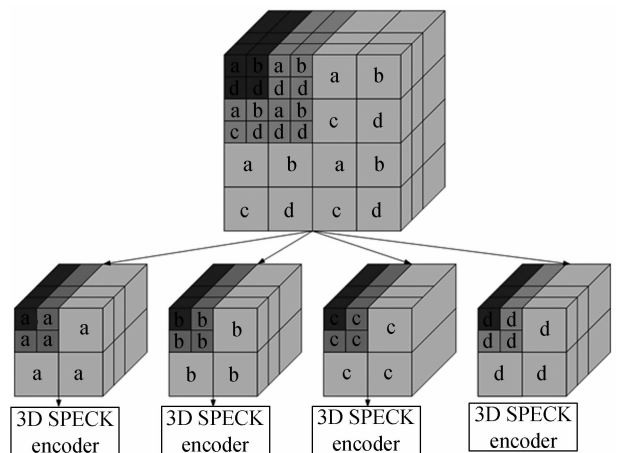


图 5 3D-SPECK 算法的编码单位
Fig. 5 The Codeunits in 3D-SPECK

的系数块作为一个 S 集,所有的 S 集按其所在子带的分解级数从高到低、系数块从小到大排列,组成 3D-SPECK 算法的 64 个 LIS 链表 LIS_m ,其中 $m = 1, 2, \dots, 64$.

2.4 基于 ROI 的 3DSPECK 算法

SPECK^[9] 是 Pearlman 在 SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees)算法^[10]的基础上提出的基于零块的编码方法.虽然它的 PSNR 比 SPIHT 的略低($<5\%$),但具有更低的计算复杂度,并且具有 SPIHT 的其他一切优点,因而广泛应用于图像压缩领域,并由二维扩展到三维^[11].实验中,为保护光谱信息,对位于不同区域的编码单位——零块树赋予不同的比特率.为进一步简化算法、节省内存,省去了 LSP 链表,直接输出当前阈值下的重要系数,虽然牺牲了部分 SNR 渐进性,但对压缩性能并无影响.用 $c_{i,j,k}$ 代替图像小波变换系数,算法的伪代码为:

```

for  $m = 1, 2, \dots, 64$ 
1. Initialization
    • Output  $n = \lfloor \log_2(\max |c_{i,j,k}|) \rfloor$ 
    • Set  $LIS_m = \{ \text{all subbands of transformed images of wavelet coefficients in the } m^{\text{th}} \text{ tree} \}$ 
2. Sorting Pass
    For each set  $S \in LIS$ , ProcessS(S)
    ProcessS(S)
    {
        • Output  $\Gamma_n(S)$  (Whether the set is significant respect to current  $n$  or not)
        • if  $\Gamma_n(S) = 1$ 
            - if  $S$  is a pixel, output sign of  $S$  and the value  $\lfloor |S| - 2^n \rfloor$ .
            - else CodeS(S)
            - if  $S \in LIS$ , remove  $S$  from LIS
    }

CodeS(S)
{
    • Partition  $S$  into 8 equal subsets  $O(S)$ . For the situation that the size of the third dimension of the set is 1, partition the set into 4 subsets.
    • for each  $O(S)$ 
        - Output  $\Gamma_n(O(S))$ 
        - if  $\Gamma_n(O(S)) = 1$ 
            * if  $O(S)$  is a pixel, output sign of  $O(S)$  and the value  $\lfloor |S| - 2^n \rfloor$ 
            * else CodeS( $O(S)$ )

```

```

- else
    * add  $O(S)$  to LIS
}

```

3. Quantization Step

Decrement n by 1 and go to step 2.

3 实验分析

选择分辨率为 $512 \times 512, 8\text{bpp}$ 的高光谱干涉图像序列做测试,每 16 帧为一组.采用 9/7 双正交浮点小波变换去相关.整个算法是在 PC 机上用 MATLAB 7.0 仿真.

表 1 给出了在平均比特率 BR (Bit Rate) 为 1bpp 下,对 ROI/BG 分配不同比特率下的 PSNR 值;我们随机抽取了像面上某一点的光谱曲线,并对其做傅里叶变换.图 6 显示了原始 3D-SPECK 算法、本文算法对干涉光谱反演的影响.实验表明,当干涉光谱的 PSNR 值大于 55 dB ($BR \leq 2.0 \text{ bpp}$) 时,即可获得满意的复原光谱反演效果:无峰-谷漂移,与原始图像的光谱反演曲线密切吻合.图 7 显示了

表 1 不同区域压缩的率失真性能

Table 1 Rate-distortion Performance of ROI/BG

Bit rate distribution of ROI/BR/bpp	ROT/BR PSNR /dB	Average/dB
2.8/0.4	58.44/34.57	40.54
2.5/0.5	55.21/36.76	41.37
2.0/0.65	49.69/39.80	42.27

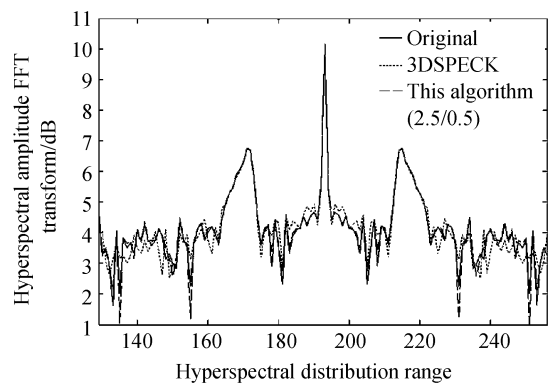
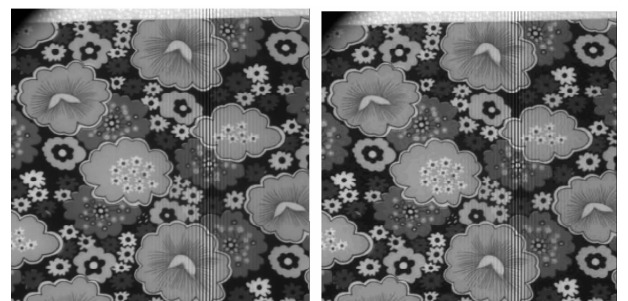


图 6 两种压缩算法的比较

Fig. 6 Comparison of two compression algorithms



(a)Original image

(b)Reconstructed image

图 7 原始图像和恢复图像

Fig. 7 Original image and reconstructed image

原始图像和 ROI/BG 的比特率分配为 2.5/0.5 的压缩复原图像,其视觉效果令人满意.可见,当 ROI/BG 的比特率分配为 2.5/0.5 时算法取得整体最佳压缩性能,较原始的 3D-SPECK 算法更有效的保护光谱信息.

4 结论

本文提出的 3DSPECK 结合 ROI 算法,首先采用非对称三维离散小波变换对高光谱干涉图像序列去相关,并定义零块树为编码单位.考虑到图像序列的位移特性,宜以连续 8~16 帧图像为一组.然后把每幅小波域图像按光谱的分布分为 ROI 区和 BG 区,对属于不同区域的零块树赋予不同的比特率,最后采用改进的 3DSPECK 算法进行编码.通过实验,选定 ROI/BG 的比特率分配为 2.5/0.5 时既能有效保护光谱信息,且不影响恢复图像的视觉效果.仿真结果表明,在 8:1 压缩率下,平均峰值信噪比超过 40dB,满足 LASIS 系统的应用要求.此外,为方便定义不同子带的 ROI 和 BG 区域,帧内二维小波分解级数不宜过大,对于本图像序列而言,不宜超过 6.

参考文献

- [1] DU Shu-song, YUAN Yan, XIANG-LI Bin, *et al.* Experimental study on interference spectral image series compression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9):1672-1676.
杜述松,袁艳,相里斌,等.干涉光谱图像序列压缩的实验研究[J].*光子学报*,2007, **36**(9):1672-1676.
- [2] LÜ Qun-bo, YUAN Yan, XIANG-LI Bin. Fourier transform imaging spectral data compression [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):573-576.
吕群波,袁艳,相里斌.傅里叶变换成像光谱数据压缩[J].*光子学报*,2008, **37**(3):573-576.
- [3] DUTRA A J S, PEARLMAN W A, DA-SILVA E A B. Compression of Hyperspectral Images with LVQ-SPECK[C]. *IEEE Proceedings of the Data Compression Conference*, 2008: 93-102.
- [4] WANG Ke-yan, WU Cheng-ke, KONG Fan-qiang, *et al.* A Novel algorithm for satellite interferential multispectral images compression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3):555-560.
王柯俨,吴成柯,孔繁锵,等.卫星干涉多光谱图像压缩新算法[J].*光子学报*,2008, **37**(3):555-560.
- [5] SU Ling-hua, YI Tong-sheng, WAN Jian-wei. Compression of hyperspectral image based on independent component analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5):973-976.
苏令华,衣同胜,万建伟.基于独立分量分析的高光谱图像压缩[J].*光子学报*,2008, **37**(5):973-976.
- [6] DONG Ying, XIANG-LI Bin, ZHAO Bao-chang. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):330-334.
董瑛,相里斌,赵葆常.大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J].*光学学报*,2001, **21**(3):330-334.
- [7] LI Xiao-yi, KONG Fan-qiang. Interference multi-spectral image compression based on weighted rate-distortion slop lifting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(Sup):290-294.
李晓翼,孔繁锵.基于不等权重率失真斜率提升的干涉多光谱图像压缩算法[J].*光子学报*,2007, **36**(Sup):290-294.
- [8] PARK Keun-hyeong, CHUL Soo-lee, HYUU Wook-park. A multiresolutional coding method based on SPIHT[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2002, **17**:467-476.
- [9] PEARLMAN W A, ISLAM A, NAGARAJ N, *et al.* Efficient, low-complexity image coding with a set-partitioning embedded block coder [J]. *IEEE Trans. Circuits Systems for Video Technology*, 2004, **14**(11):1219-1235.
- [10] BEONG-JO K, PEARLMAN W A. An embedded wavelet video coder using three-dimensional set Partitioning in hierarehical trees (SPIHT) [C]. *IEEE Data Compression Conf*, 1997:251-260.
- [11] TANG X, PEARLMAN W A. Lossy-to-lossless block-based compression of hyperspectral volumetric data [C]. *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2004: 3283-3286.

An Algorithm of 3D-SPECK for LASIS's Hyperspectral Image Compression

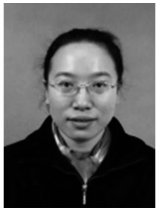
MA Dong-mei, MA Cai-wen

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A 3D-SPECK in conjunction with ROI is applied to compress hyperspectral image sequences produced by the LASIS system. Firstly, the hyperspectral image sequences are decomposed with three-dimensional asymmetric DWT. Secondly, the Zero Block Tree is defined as codeunits. Then different coding rates are distributed to each codeunits in different regions (ROI or BG) to protect the hyperspectral information. Finally, the adapted 3D-SPECK algorithm is used to encode the codeunits individually. The numerical experiment results show that the PNSR is more than 40dB at 8:1 compression rate, and achieve the efficient protection of hyperspectral information. It is of lower computational complexity and higher real time performance, which can satisfy LASIS's compression requirements.

Key words: Hyperspectral image compression; 3DSPECK; ROI; LASIS



MA Dong-mei was born in 1976. She is a Ph. D. degree candidate and her major research interests focus on image compression, image processing, etc.



MA Cai-wen was born in 1965. He is a researcher and his research interests focus on photoelectric monitoring, precision tracking and measure technology.