

干涉多光谱图像压缩编码新技术*

马 静¹ 吴成柯¹ 李云松¹ 周有喜¹ 相里斌² 陈 东¹

(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 提出一种基于运动估计的三维小波变换和非对称零树编码的干涉多光谱图像压缩方案. 该方案利用大孔径静态干涉成像光谱仪推扫成像特点, 对图像进行分区域运动估计的三维小波变换. 采用了一种新型非对称零树编码方法, 该方法可在较少的图像间建立较长的零树, 增加了系数编码时由重要结点变为不重要结点并趋于零的概率, 使编码的效果更好. 该方案消耗内存少, 延时小, 有利于卫星上的图像压缩, 有效地保护了图像的光谱特性. 在 8 倍压缩下, 满足干涉多光谱图像的质量要求.

关键词 图像压缩; 干涉多光谱图像; 小波变换; 非对称零树编码; 成像光谱技术

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在普通照相系统中加入横向剪切干涉仪^[1], 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”, 它是一种谱像合一的特殊图像. 目前已经有文献提出了一些解决干涉多光谱图像压缩的方法, 但这些方法都没有充分利用干涉多光谱图像成像特点, 压缩效果不是很理想.

依据大孔径静态干涉成像光谱仪的成像原理, 干涉多光谱图像可以看成三维立体数据, 并且相邻图像间有很明显的运动特性. 本文提出一种基于运动估计的三维小波变换, 这种小波变换充分利用了图像间的相关性, 有利于图像的压缩. 另外利用非对称零树编码方法对图像进行压缩. 该方法的依据是对称三维零树编码方法虽然压缩三维图像时性能良好, 但它已经不适应于干涉多光谱图像这样的谱像合一图像的压缩. 而且由于对称零树编码方法消耗内存大, 编码延时长, 更不利于干涉多光谱图像的卫星上压缩. 利用非对称零树编码方法对图像压缩可有效地克服以上对称零树编码方法的弊端. 在 8 倍压缩下, 不但恢复出高质量的图像, 而且使干涉多光谱图像复原的光谱信息失真小.

1 大孔径静态干涉成像光谱仪成像特点分析

图 1 是某大孔径静态干涉成像光谱仪获得的干涉多光谱图像序列, 它是利用大孔径静态干涉成像

光谱仪的面阵探测器依靠推扫获得空间信息和光谱信息. 图像间的空间信息以光谱仪的推扫步长进行平移. 每帧图像中, 光谱信息以干涉条纹形式存在, 这些干涉条纹的坐标位置基本固定. 在图像中部干涉条纹很明显, 景物的空间信息则有些模糊; 在图像的边缘, 物像对应关系很明显, 却几乎看不到干涉条纹. 这是由大孔径静态干涉成像光谱仪干涉系统的特点决定的: 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. 因此, 可将干涉多光谱图像分为强干涉区和弱干涉区. 如图 1, 其中 δ_0 为零光程点, $\Delta\delta$ 为干涉强度的光程范围.

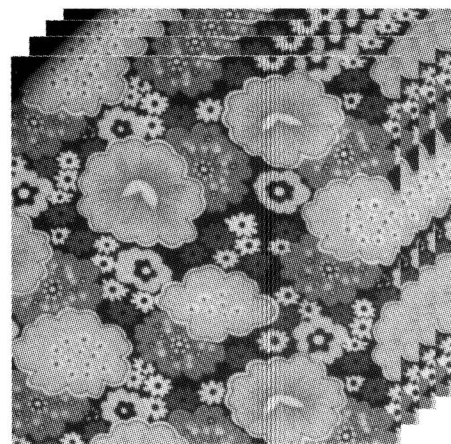


图 1 干涉多光谱图像序列
a, c: Weak interference area .b: Intensive interference area

图 1 干涉多光谱图像序列

Fig. 1 The interferential multispectral images

2 基于运动补偿的三维小波变换

近年来, 小波变换广泛运用于图像压缩, 如 JPEG2000、MPEG4 等国际压缩标准已采用小波变换. 干涉多光谱图像压缩很早就采用小波变换, 但

* 国家自然科学基金(60532060 和 60507012)资助
Tel: 029-88203110 Email: jingma@mail.xidian.edu.cn
收稿日期: 2005-06-30

仅对单帧图像做小波变换^[2]. 虽然近期有些研究注意到图像帧间的平移特性,也仅仅对图像做匹配以减小差值图像^[3]. 本算法提出一种更加适合于干涉多光谱图像的小波变换,先对原始图像序列进行分区域运动估计,再沿平移运动轨迹进行一维小波变换,最后对分解后的各子带进行二维小波变换.

2.1 沿平移运动轨迹的一维小波变换

干涉多光谱图像是由探测器经过推扫产生,因此图像帧与帧之间的空间信息存在平移关系,但光谱信息即强干涉区中的干涉条纹却相对静止. 类似活动图像中的运动估计^[4],本算法采用分区域块匹配方法,即将强、弱干涉区分开处理,强干涉区在下一帧的强干涉区寻找匹配块,弱干涉区在下一帧的弱干涉区寻找匹配块. 这样,可以提高匹配块的准确度,减少运动估计时间.

假设原始干涉多光谱图像序列中有 E, A, B 三个相邻帧(如图 2),先将 B 图像划分为大小为 $I \times J$

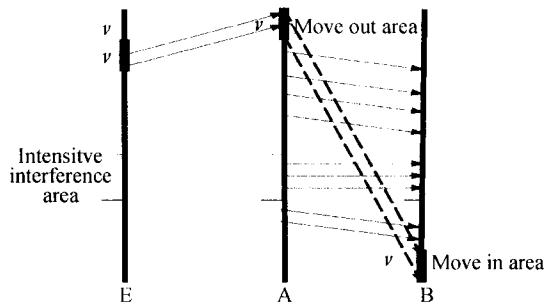


图 2 运动估计

Fig. 2 Motion estimate

的不重叠块. 对于 B 中坐标为 $(i \times I, j \times J)$ 的块,求位移矢量 $[k, l]^{(i,j)}$ 的算法公式为

$$[k, l]^{(i,j)} = \arg \min_{[k, l] \in \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3} \sum_{m=i+I}^{(i+1)I+I-1} \sum_{n=j+J}^{(j+1)J+J-1} d(B(m, n), A(m+k, n+l)) \quad (1)$$

式中, $d(\square, \square)$ 为误差准则, Ω_1 表示强干涉区, Ω_2 , Ω_3 表示两个弱干涉区, $B(m, n)$ 表示图像 B 中坐标为 (m, n) 点的像素值, $A(m+k, n+l)$ 表示 A 中坐标为 $(m+k, n+l)$ 点的像素值.

从图 2 可见,将进入图像 B 的地面空间信息称为“移入区”,图像 A 中不存在这部分像素. 将移出图像 B 的地面空间信息称为“移出区”,图像 A 中存在这部分像素而图像 B 中却不存在. 为了便于进行小波变换,须将两帧之间的像素变为一一对应的形式. 由于干涉多光谱图经过校准后只存在平移运动(不存在扭曲),并且“移出区”和“移入区”的大小、坐标位置只与大孔径成像光谱仪的面阵探测器推扫步长 ν 有关,因此 B 帧的“移入区”中任何一点在 A 帧中的“移出区”都有点与之对应.

对于图像 B 中除“移入区”以外的区域,可根据

上述运动估计方法,求出 B 帧的平移运动估值 B'

$$B'(i, j) = A(i+k(i, j), j+l(i, j)) \quad (2)$$

式中, $(k(i, j), l(i, j))$ 表示图像 B 中点 (i, j) 的平移矢量.

欲对图像 A, B 沿平移运动轨迹方向作小波变换,就可转化为对 B 和 B' 作变换. 选取 Haar 函数作为小波基,其低、高通小波系数分别为

$$\begin{cases} L(i, j) = \frac{\sqrt{2}}{2} (B(i, j) + B'(i, j)) \\ H(i, j) = \frac{\sqrt{2}}{2} (B(i, j) - B'(i, j)) \end{cases} \quad (3)$$

对于“移入区”,低、高通小波系数另行处理为

$$\begin{cases} L(i, j) = B(i, j) \\ H(i, j) = E(i_1 - \nu, j_1) - A(i_1, j_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, (i_1, j_1) 点对应 A 帧的“移出区”中的点, ν 为大孔径成像光谱仪推扫步长. 取高通为 $E(i_1 - \nu, j_1)$ 与 $A(i_1, j_1)$ 的差值,是因为 A 帧的“移出区”中的点是由前一帧 E 中同一地面物点经过一次推扫而形成,取二者的差值可减小高通部分的能量,有利于进行压缩.

2.2 二维空间小波变换

三维小波变换时,对每一级,先进行二级沿平移轨迹一维小波变换,分解为 LL、LH、HH 子带,然后,对变换后的各子带的每一帧进行水平、垂直方向二维小波变换. 二维离散小波变换每次分解产生一个低频子带 LL 和三个高频子带,即水平子带 LH、垂直子带 HL 和对角子带 HH. 下一级小波变换是在前级产生的低频子带 LL 的基础上进行的,如此重复三次,可以将原始图像分解成三级十个子带: LL3 与 LH_i, HL_i, HH_i ($i=1, 2, 3$), 其中 LL3 为最低频子带.

3 非对称三维零树编码

3DSPiHT 的三维零树结构是将 2DSPiHT 零树结构对称地延伸到三维坐标^[5]. 然而,对称的三维零树对于干涉多光谱图像压缩并不是最优结构^[6],因为,考虑到卫星上对内存和编码延时的要求,压缩时图像序列的三维坐标并不是对称的,帧内的二维坐标的延伸度比帧间坐标深,这种非对称的数据结构预示着应采用非对称零树. 而且由零树编码理论^[6,7]可知,零树越长,增加了系数编码时由重要结点变为不重要结点并趋于零的概率,使编码的效果更好. 解决零树增长的一种方法是采用非对称零树,这一方法更加适合与卫星上的压缩要求. 本算法选用一种新型非对称零树结构 (Asymmetric Tree Structure). 该非对称零树以 7 帧为一组建立

树形结构,比以 7 帧建立的对称零树长,零树编码后,其压缩效果优于其它零树编码方法.

新型非对称零树具体结构如图 3. 它由 7 帧图像组成,先进行上述基于分区域运动估计的三维小波变换,再对小波系数建立非对称零树,采用零树编码压缩干涉多光谱图像. 新型非对称三维零树结构帧内的零树结构类似于 2DSPIHT 的零树结构,在帧间,LL、LH 和 HH 子带最低频子带的小波系数属于三维零树的结点. 这相当于利用 7 幅图像的帧内最低频子带的小波系数建立起各帧中二维零树之间的关系,使其反映帧间的相关性,形成三维零树. 因此,非对称零树的树根为帧间小波变换 LL 子带的最低频结点,它有 2 个孩子位于 LH 子带的最低频中,有 3 个孩子位于同一帧次低频子带中. 同样,帧间小波变换的 LH 子带的最低频子带的结点有 2 个孩子位于 HH 子带中,3 个孩子位于同一帧的次低频子带中. 帧间小波变换的 HH 子带的最低频子带的结点仅有 3 个孩子位于同一帧次低频子带中.



图 3 非对称零树结构
Fig. 3 Asymmetric tree structure

非对称三维零树结构数学描述如式(5)

$$\begin{aligned}
 Tree(x, y, m, s) = & \\
 & \{(x, y, z, m, s, p)\} \cup Tree(2x, 2y, z, m-1, s, p) \\
 & \cup Tree(2x+1, 2y, z, m-1, s, p) \cup Tree(2x, 2y+1, \\
 & z, m-1, s, p) \\
 & \cup Tree(2x+1, 2y+1, z, m-1, s, p), m \neq 1 \\
 & \text{且 } s \neq LL \\
 & \{(x, y, z, m, LL, LL)\} \cup Tree(x, y, z, m, LH, LL) \\
 & \cup Tree(x, y, z, m, HL, LL) \cup Tree(x, y, z, m, \\
 & HH, LL) \\
 & \cup Tree(x, y, z+1, m, LL, LH) \cup Tree(x, y, z+2, m, \\
 & LL, LH), m=M \text{ 且 } s=LL \\
 & \{(x, y, z, m, LL, LH)\} \cup Tree(x, y, z, m, LH, LH) \\
 & \cup Tree(x, y, z, m, HL, LH) \cup Tree(x, y, z, m, \\
 & HH, LH) \\
 & \cup Tree(x, y, z+2, m, LL, H) \cup Tree(x, y, z+3, m, \\
 & LL, H), m=M \text{ 且 } s=LL \\
 & \{(x, y, z, m, LL, LH)\} \cup Tree(x, y, z, m, LH, LH) \\
 & \cup Tree(x, y, z, m, HL, LH) \cup Tree(x, y, z, m, \\
 & HH, LH) \\
 & \cup Tree(x, y, z+3, m, LL, H) \cup Tree(x, y, z+4, m, \\
 & LL, H), m=M \text{ 且 } s=LL \\
 & \{(x, y, m, s, p)\}, m=1
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

式中, x, y, z 表示系数在子图像中的 3D 坐标. m 表示帧内小波变换后子带层次(1, 2, ..., M), s 表示帧内子带方向(LL, LH, HL, HH), p 表示帧间小波变换后的子带方向(LL, LH, HH). 建立起非对称三维零树后,即可按 2D-SPHIT 算法^[7]完成零树编码的其余过程.

4 实验与分析

对一组 512×512×7(分辨率为 512×512, 7 帧图像)的干涉多光谱图像序列用本算法进行 8 倍压缩,压缩结果如图 4. 图 4(a)、(b)为第 1 帧图像压缩结果,(c)、(d)为第 4 帧图像压缩结果.

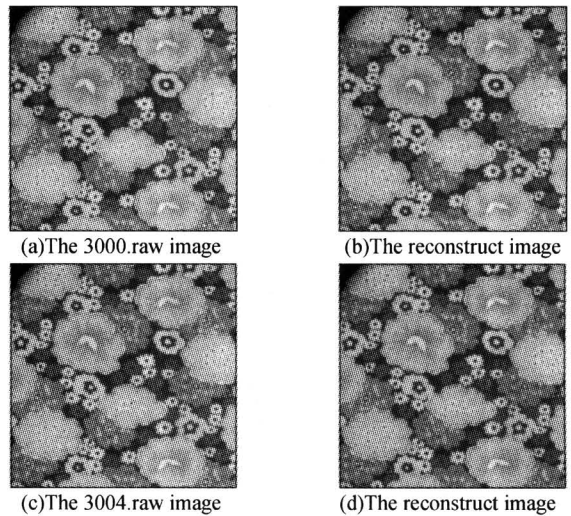


图 4 AT-3DSPIHT 算法压缩图像效果
Fig. 4 AT-3DSPIHT encoding

将本算法的测试结果与用对称 3DSPIHT、2DSPIHT 算法压缩后的结果进行比较. 表 1 中给出了该组干涉多光谱图像用不同算法在 8 倍压缩时的信噪比(PSNR).

表 1 各种算法性能比较

图像名	AT-3DSPIHT 算法	3DSPIHT 算法	2DSPIHT 算法
3000. raw	42.05 dB	41.46 dB	39.62 dB
3004. raw	42.20 dB	41.54 dB	39.66 dB
3007. raw	42.68 dB	41.96 dB	39.69 dB

由表 1 可见,本算法压缩图像的信噪比值比对称 3DSPIHT 算法高 0.59~0.72 dB,比 2DSPIHT 高 2.43~2.99 dB. 因此,本算法提高了整幅图像的信噪比.

对于干涉多光谱图像的压缩的最终目的是使复原的光谱信息失真较小,即要得到效果良好的光谱图. 用光谱恢复算法将压缩后图像复原出 46 幅单色光谱图,图 5(a)是原始干涉多光谱图像复原出的波长为 0.563 μm 光谱图,(b)是用本算法压缩后的干涉多光谱图像复原出的波长为 0.563 μm 光谱图.

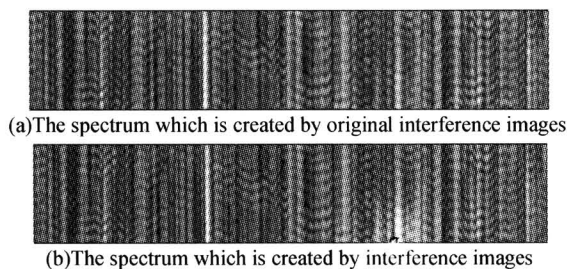


图5 波长为 $0.563\mu\text{m}$ 的光谱图
Fig. 5 The spectrum image at the wavelength of $0.563\mu\text{m}$

将本算法压缩后的干涉多光谱图像复原出的光谱图与 3DSPIHT、2DSPIHT 复原出的光谱图进行比较,46 个波段 MSE 如图 6.

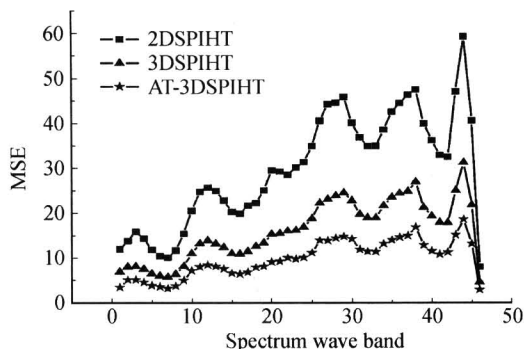


图6 46 个谱段光谱图 MSE
Fig. 6 The MSE of spectrum images

由本算法复原出的 46 个波段光谱图的平均 MSE 为 9.69, 而由 3DSPIHT 复原出的光谱图平均 MSE 为 21.71, 2DSPIHT 的平均 MSE 为 29.65. 由此可见, 本算法利用基于运动估计的小波变换和非对称零树编码, 其压缩效果优于其它算法, 而且使光谱信息失真最小, 符合干涉多光谱图的压缩要求.

5 结论

基于对大孔径静态干涉成像光谱仪成像原理的分析, 本文提出一种新的干涉多光谱图像压缩算法, 新算法根据干涉多光谱图的空间信息具有平移特性, 但光谱信息却相对静止的特点, 对干涉多光谱图像采用基于分区域运动估计三维小波变换. 利用卫星上压缩干涉多光谱图像序列时, 其图像序列的三维坐标的非对称, 提出一种非对称零树结构, 该零树比对称零树长, 使编码效果更好. 本算法压缩图像的 PSNR 比对称 3DSPIHT 高 $0.59\sim 0.72$ dB、比 2DSPIHT 算法高 $2.43\sim 2.99$ dB. 将本算法压缩后

的图像复原出光谱图, 46 个波段的光谱的 MSE 明显优于其它算法.

参考文献

- 相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 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 Q. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22
- 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. 光学学报, 2001, **21**(6): 691~695
Li Y S, Wu C K, Chen J, et al. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 691~695
- 邓稼先, 吴成柯, 李云松, 等. 干涉多光谱卫星图像序列编码. 光学学报, 2004, **24**(3): 299~303
Deng J X, Wu C K, Li Y S, et al. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 299~303
- 林刚, 刘泽民. 基于运动补偿的三维小波视频编码. 中国图像图形学报, 1998, **3**(11): 926~930
Li G, Liu Z M. *Journal of Image and Graphics*, 1998, **3**(11): 926~930
- Namhoon Baek, Jihwan Choe, Chulhee Lee. Compression of hyperspectral images at low bit rates. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003, **6**(21-25): 3555~3557
- Xiaoli Tang, Sungdae Cho, Pearlman W A. 3D set partitioning coding methods in hyperspectral image compression. *IEEE International Conference*, 2003, **2**(14-17): 239~242
- Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, **6**(3): 243~249
- 肖江, 邓家先, 吴成柯. 一种支持干涉多光谱图像 ROI 的压缩编码方法. 光子学报. 2004, **32**(4): 481~484
Xiao J, Deng J X, Wu C K. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **32**(4): 481~484
- 周有喜, 肖江, 吴成柯, 等. 遥感干涉超光谱图像压缩编码. 光子学报, 2005, **34**(4): 594~597
Zhou Y X, Xiao J, Wu C K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 594~597
- 相里斌, 计忠瑛, 黄旻, 等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 850~853
Xiangli B, Ji Z Y, Huang M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 850~853

The New Image Compression Technology of the Interferential Spectral Image

Ma Jing¹, Wu Chengke¹, Li Yunsong¹, Zhou Youxi¹, Xiangli Bin², Chen Dong¹

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

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

Received date: 2005-06-30

Abstract A new compression scheme of interferential multispectral images is proposed based on the analyses of the large aperture static imaging spectrometry. There are two novelties in the scheme. One is that a three-dimension wavelet with special motion compensation is proposed. The other is that a new method of three-dimensional asymmetric zerotree coding (AT-3DSPIHT) is put forward. This AT-3DSPIHT can make a longer tree in fewer images, which increases the probability of a coefficient value being zero when moving from root to leaves. Moreover, this method needs lower memory and shorter time delay than 3DSPIHT. Experimental results show that the scheme provides a better protection of the spectrum curve and a better performance on the compression.

Keywords Image compression; Interference multispectral images; Wavelet transform; The asymmetric tree; Imaging spectrometry technology



Ma Jing was born in Shaanxi, China, on February 7, 1982. She is a Ph. D. student in the Department of Information Engineering of Xidian University. Her research interests are in the compression and processing of remote sensing images and in the modeling of telecommunication system.