

卫星干涉高光谱遥感图像 序列差值压缩编码^{*}

肖 江 吴成柯 邓家先 杨亚东

(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

根据干涉高光谱图像的成像特点和卫星遥感图像压缩编码系统要求,提出了一种新的卫星干涉高光谱图像序列压缩算法.新算法利用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案,提高图像质量 3—4 dB.算法首先通过小波域匹配算法检测出相邻图像之间的推扫位移量并移位求得两帧的最佳差值图像,然后对差值图像进行静止图像 EBCOT 压缩编码,从而提高总体编码效率.该算法具有与单帧图像编码算法相当的复杂度,只需要对当前图像与模板的差值图像进行基于小波变换的编码,避免了目前基于三维小波变换的编码算法对系统大存储量要求以及编码延时大的缺陷.仿真结果表明,本算法针对干涉高光谱图像编码,可获得比基于三维小波变换的算法相当甚至更好的效果,并且大大降低了编码延时.

关键词 干涉高光谱图像序列;离散小波变换;匹配算法;差值图像;压缩编码

1 引言

航天遥感技术是人类认知自然的有效手段,一般成像仪的光谱分辨率非常低,只有几个到十几个谱段,这样就很难分析判断目标的属性,如植被、矿藏等.为了同时获得很高的空间分辨率和光谱分辨率,近几十年来发展了成像光谱技术.光谱图像具有很高的空间分辨率和光谱分辨率,一般的静止图像压缩方法在大于 8 倍压缩比下是很难做到的^[1].随着航空遥感成像技术的发展,干涉高光谱(或超光谱)图像被在环境保护、资源探测、农业、医学和军事等方面的应用日渐受到关注.它通常由几十个到几百个谱带组成,可以被看做为由二维的空间域和一维的频谱域组成的三维立体数据,且相邻的干涉高光谱图像之间具有很强的相关性.当高光谱图像的谱分辨率较高时,也就是说谱段较多时,数据量非常大,传输和处理这些高光谱数据时,需要占用大量的链路带宽.为了能快速处理这些数据并减少存储空间,必须对图像数据进行更高效率的压缩.

静态图像编码利用一幅图像像素点之间相关性实现压缩.基于小波编码压缩算法如 JPEG2000^{[1],[2]},SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees)^{[3],[4]} 都能够充分利用图像冗余进行单幅图像的有效压缩,在干涉高(多)光谱图像压缩方向上取得了一定的效果^{[2],[3]}.但是若要进一步提高压缩效率,就充分利用图像之间的相关性来提高编码效率,但是由于

^{*} “十五”军事通信技术预研项目(410010302)和国防科技预研基金项目(J20.12.1.DZ01)共同资助

2003-10-16 收到原稿, 2004-01-25 收到修定稿

星上载荷的图像压缩系统必须遵守体积小,低功耗的要求,而目前国内外普遍研究和应用的基于三维小波变换的图像序列压缩算法虽然能够利用图像序列相关性进一步提高压缩效果^{[5]~[7]},但必须要多幅图像才能够实现序列之间的小波变换,从而增加了编码系统的复杂度,增大了系统的存储量和编码延时,尤其是大容量的存储器给我们的星上硬件系统的实现带来了过重的负担,使该类算法的应用受到了限制. 本文根据干涉高光谱图像的特点,提出了一种新的干涉高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,从而降低了对系统存储量的要求,同时大大减少了编码的延时. 此外由于干涉高光谱卫星图像序列的相邻图像之间在空间上具有明显的平移特性,而一般算法中的三维小波变换没有利用平移特性,因此也不能够达到最佳效果,所以研究一种能够充分利用这种序列相关性,特别是其平移特性的,低编码复杂性的算法是十分必要的.

2 干涉高光谱遥感图像成像原理

成像光谱仪是一种航空航天遥感设备,它同时具有成像仪和光谱仪的功能,有很高的空间分辨率和光谱分辨率,摄取的遥感图像包含了二维的空间信息和一维的光谱信息. 成像原理如图 1 所示. 成像光谱仪将入射的一束光送入干涉仪,使之分解为具有一定光程差的光线,并在感光设备上干涉叠加,由于成像光谱仪采用行推扫方式产生图像,并且在—

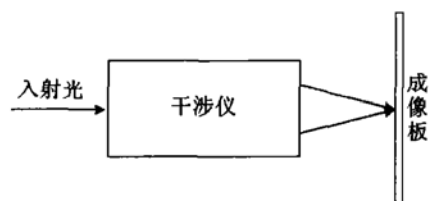


图 1 干涉仪成像原理

Fig.1 The interferometer scheme

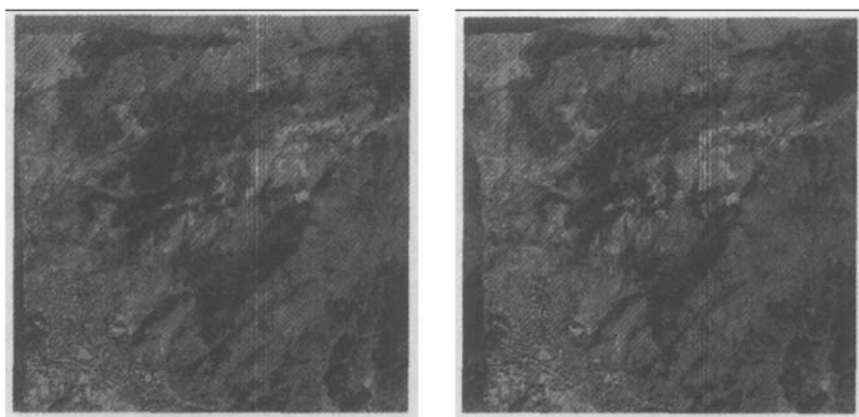


图 2 干涉高光谱序列中先后两帧图像

Fig.2 The two successive frames of the interferential super-spectral image

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高光谱图像序列, 见图 2.

3 小波变换对差值图像编码的影响

为了提高编码效率, 本文的图像序列编码先对一幅图像进行正常编码, 然后将该图像的恢复图像作模板 (不用原始图像是因为解码端只能得到重建的恢复图像, 用恢复图像可以提高编码质量), 后面图像与模板进行匹配, 得到差值图像并对差值图像编码. 如果图像之间的相关性强, 则会取得好的效果. 当前静态图编码大都基于小波变换, 在小波域进行匹配使得误差图像的编码效率更好. 假设两幅图像之间相关性强, 在空间上具有平移特性, 即设两帧图像像素点之间存在下列关系:

$$x_2(i, j) = \begin{cases} x_1(i + m, j + n) + \Delta x(i, j), & 0 \leq i + m < M \text{ 且 } 0 \leq j + n < N; \\ x_2(i, j), & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

其中 m, n 分别表示下一帧图像相对于前一帧图像在 x, y 坐标方向的偏移量, M, N 分别表示图像的宽度、高度, $x_1(i, j), x_2(i, j)$ 为相邻两幅图像、坐标 (i, j) 处的像素值, $\Delta x(i, j)$ 为像素点差值. 为了充分利用相邻图像之间的相关性, 提高编码效率, 对 $x_2(i, j)$ 进行周期移位, 即令

$$x'_2(i, j) = x_2(i_1, j_1) = x_2[(i - m) \bmod (M), (j - n) \bmod (N)]. \quad (2)$$

其中 $\bmod(\cdot)$ 表示模运算. 将式 (1) 代入, 除右边界 m 列, 下边界 n 行之外, 满足下式:

$$x'_2(i, j) = x_1(i, j) + \Delta x(i - m, j - n) = x_1(i, j) + d(i, j). \quad (3)$$

其中, $d(i, j) = \Delta x(i - m, j - n)$.

对 $x_1(i, j), x'_2(i, j)$ 进行一级小波变换得到某子带系数 $y_1(l, k), y'_2(l, k)$ 为

$$y_1(l, k) = \sum_{i, j} g_1(l) g_2(k) x_1(i - 2l, j - 2k), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y'_2(l, k) &= \sum_{i, j} g_1(l) g_2(k) x'_2(i - 2l, j - 2k) \\ &= \sum_{i, j} g_1(l) g_2(k) x_1(i - 2l, j - 2k) + \sum_{i, j} g_1(l) g_2(k) d(i - 2l, j - 2k) \\ &= y_1(l, k) + d(l, k). \end{aligned} \quad (5)$$

其中 (l, k) 表示小波域系数对应坐标, $g_1(l), g_1(k)$ 为该子带水平、垂直方向小波变换使用的滤波器系数.

下面分析公式 (3) 不直接对 $x_2(i, j)$ 进行小波变换的原因. $x_2(i, j)$ 的小波变换表达式为

$$y_2(l, k) = \sum_{i, j} g_1(l) g_2(k) x_2(i - 2l, j - 2k). \quad (6)$$

显然,除了边界处几个系数外,将式(1)代入式(6), y_2 可以表示为

$$\begin{aligned} y_2(l, k) &= \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)x_1(i+m-2l, j+n-2k) + \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)\Delta x(i-2l, j-2k) \\ &= \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)x_1(i+m-2l, j+n-2k) + \Delta y(l, k). \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\Delta y(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)\Delta x(i-2l, j-2k)$. 当 m, n 都为偶数时, $y_2(l, k)$ 可表示为

$$y_2(l, k) = y_1(l-m/2, k-n/2) + \Delta y(l, k). \quad (8)$$

如果 m, n 有一个不为偶数时, 式(8)不成立. 显然式(7)不能总是得到式(8)的显式关系. 尽管理论 $y'_2(l, k)$ 与 $y_2(l, k)$ 都包含了变换的所有信息, 但相对于 $y'_2(l, k)$ 而言, $y_2(l, k)$ 引入了附加误差. 这是小波变换时对系数进行上采样形成的, 也就是由小波变换使用起始点的不同而引起的. 这种附加误差会传递给差值图像小波变换后的系数, 从而不利于差值图像编码.

使用式(5)对后续图像进行小波变换得到的系数不会引入附加误差, 从而有利于差值图像压缩. 本文对差值图像进行编码, 其小波变换即

$$\Delta y'_2(l, k) = y'_2(l, k) - y_1(l, k) = y_1(l, k) + d(l, k). \quad (9)$$

4 小波域匹配算法

现在的问题在于如何确定式(1)中的平移参数 (m, n) 以获得更好编码效果. 显然可以通过图像匹配解决. 但图像光谱存在给图像的匹配带来困难, 所以有效检测相邻图像的空间位移量十分重要. 为了有效实现小波域匹配, 利用恢复图像建立小波域的四种模板. 对图像 $x_1(i, j)$ 的恢复图像, 即模板, $\hat{x}_1(i, j)$ 进行一级小波变换, 得到4种不同起始点对应的某子带系数模板如下:

$$z_1(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)\hat{x}_1(i-2l, j-2k), \quad (10)$$

$$z_2(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)\hat{x}_1[(i-1)\bmod(M)-2l, j-2k], \quad (11)$$

$$z_3(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)\hat{x}_1[i-2l, (j-1)\bmod(N)-2k], \quad (12)$$

$$z_4(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)\hat{x}_1[(i-1)\bmod(M)-2l, (j-1)\bmod(N)-2k], \quad (13)$$

对 $x_2(i, j)$ 直接进行一次小波变换, 有

$$z(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l)g_2(k)x_2(i, j). \quad (14)$$

计算 4 种系数模板当前编码图像的系数之间的相关系数,

$$\rho_p(m_1, n_1) = \frac{\sum_{l,k} z(l, k) z_p(l - m_1, k - n_1)}{\sqrt{\sum_{l,k} z^2(l, k) \sum_{l,k} z_p^2(l, k)}}, \quad p = 1, 2, 3, 4. \quad (15)$$

为了避免图像中光谱信息对图像位移量检测影响, 相关系数的计算不考虑光谱区域, 由于光谱区域是固定的, 因此容易实现. 如果两幅图像水平、垂直位移量较大, 图像之间的相关性就会较弱, 此时对差值图像进行编码是不能提高编码效率的. 所以将相关系数的计算限定在一定的取值范围内, 即 m_1, n_1 的取值不能够太大. 为了判别两幅图像之间的位移量, 找到各个 LL 子带对应的最大相关系数

$$\rho_{\max} = \max\{\rho_1(m_1, n_1), \rho_2(m_1, n_1), \rho_3(m_1, n_1), \rho_4(m_1, n_1)\}, \quad (16)$$

及 $\rho_{\max}$ 对应的坐标值 (m_2, n_2) , 以及模板类型, 根据这些参数即可计算出两幅图像之间的偏移量, 如果 $\rho_{\max}$ 取自 $\rho_{n_3}(m_2, n_2)$, 则位移量为

$$m = 2m_2 + (n_3 - 1) \& 1 \quad (17)$$

$$n = 2n_2 + [(n_3 - 1) \& 2] \gg 1 \quad (18)$$

其中, $\&$ 表示位与操作, $\gg$ 表示算术移位操作.

随着两幅图像之间偏移量的增加, 子带系数之间的相关性减弱, 并且不同子带的系数相关性差异也很大. HH 子带的系数表示水平和垂直方向的高频信息, 容易受到各种干扰的影响, 因此不适合用于匹配. LL 子带的系数表示水平和垂直低频信息, 适合用作图像匹配基准. 由于基于小波变换的编码技术主要是通过高频子带 (LH、HL 和 HH) 系数实现压缩, 差值图像在对应子带的系数直接影响编码效率. 当差值对应系数较大时, 利用差值图像进行压缩不能够提高压缩效率, 已经没有必要对差值图像进行压缩. 因此本文算法需要计算 LL、LH、HL 子带系数的相关系数, 只有当其都满足预先设定的门限才使用差值图像进行编码, 否则直接对图像进行编码.

综上所述, 本算法具体实现步骤如下:

(1) 对选定模板按照式 (10)–(14) 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) 按照式 (15) 计算 LL 子带相关系数 (不包括光谱区域系数), 并根据式 (17) (18) 计算最佳匹配对应的位移量. 当 LL、LH、HL 子带相关系数同时满足要求时, 执行步骤 (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, 返回步骤 (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) 返回步骤 (1) 对下一幅图像进行编码.

5 实验结果

图 3 为先对图 2 干涉光谱图像序列采用本文匹配算法进行空间移位操作, 再对相邻两帧图像的相减得到的差值图像进行 3 级小波变换的结果, 图 4 为两幅相邻图像不做空间移位, 直接相减得到的差值图像进行 3 级小波变换结果. 从图 3 和图 4 的比较中可以明显看出, 图 3 中除了光谱区域外, 图像变化均匀 (大多是黑的 0 值), 空间相关性很强, 因此容易对其进行压缩. 而图 4 布满了像噪声一样的低幅值系数 (不均匀的小亮点), 图像变化复杂, 不易压缩. 即便采用三维 EBCOT 算法, 由于序列之间的平移特性导致的, 在小波变换后也会产生许多这样的小系数, 使其不能得到更高的编码效率.

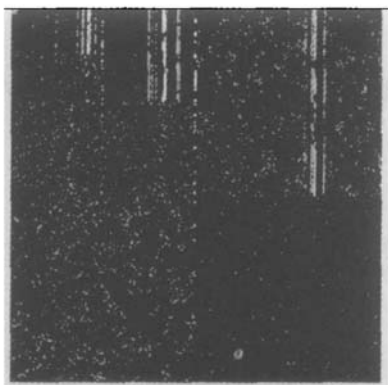


图 3 移位后的差值图像三级小波变换

Fig.3 The 3-level DWT error image after move

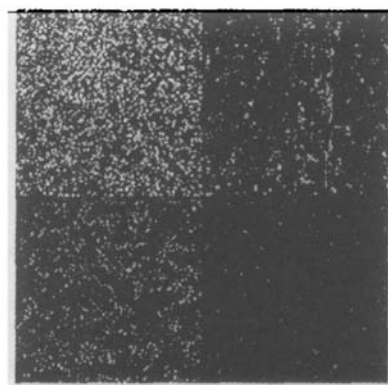


图 4 没有移位的差值图像三级小波变换

Fig.4 The 3-level DWT error image without move

为了与 JPEG2000 (二维 EBCOT) 和三维也纳 EBCOT^[8] 算法进行比较, 本文也采用 EBCOT 对差值图像进行编码. 算法参数: 图像大小 $512 \times 512 \times 8(\text{bit})$, 压缩比 8, 小波 CDF5/3, 小波级数 3, 匹配距离 2 (即系统存储量只需 2 帧图像大小). 图 5 为本文算法与三

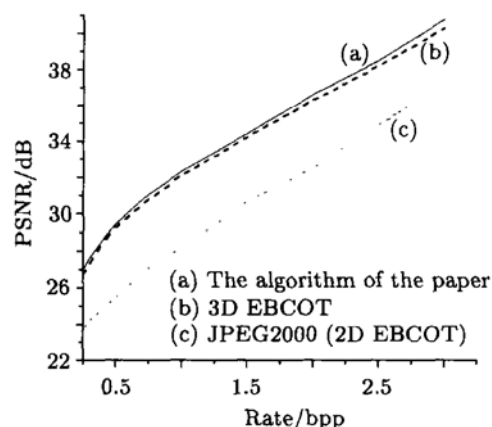


图 5 各种方法在不同码率下的 PSNR 性能比较

Fig.5 The PSNR of different methods

维 EBCOT 算法对一组 512 帧的干涉高光谱图像序列编码的结果比较 (PSNR/ n), 从中可以看出本文算法编码质量优于三维 EBCOT, 高于 JPEG2000 近 3 dB. 从算法的平均单帧图像编解码时间看, 本算法为 3.36 s 相当于二维 JPEG2000 算法 1.38 s 的两倍半, 而一个短短的 16 帧序列对于三维 EBCOT 而言编解码时间就需要 26.35 s, 本文算法的代价是非常小的.

6 结论

本文从干涉高光谱图像序列的特点出发, 研究了小波变换不同起始点对差值图像小波变换后的系数影响, 提出了一种基于小波域匹配检测模板与当前编码图像之间平移参数的方法, 在此基础上提出了一种差值图像编码算法, 并将该算法的编码结果与三维 EBCOT 进行了比较. 实验结果表明由于本文算法将序列之间的平移特性引入编码算法, 从而有效提高了系统的编码效率. 同时本算法没有进行三维小波变换, 只是通过模板匹配提高压缩效果, 具有与单帧图像独立编码时相当的复杂度, 避免了基于三维小波变换的编码算法对系统大存储量要求及编码延时大的缺陷, 使得遥感图像序列的帧间相关信息得以利用, 获得了更好的压缩效果.

参 考 文 献

- [1] Taubma D. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Trans. Image Proc.*, 2000, **9**(7):1158—1170
- [2] Xiao Jiang et al. A method for multi-spectral image coding based on Rectangle ROI Coding. *Acta Photonica Sinica*, 2003, (4):481—484. in Chinese (肖江等. 一种支持干涉多光谱图像 ROI 的压缩编码方法. 光子学报, 2003, (4):481—484)
- [3] Li Yunsong, Wu Chengke, Chen Jun. Spectral satellite image compression based on wavelet transform. *Acta Opt. Sinica*, 2000, **26**(6):691—695. in Chinese (李云松, 吴成柯, 陈军. 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)
- [4] Said A, Pearlman W. A new fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. Circ. Sys. Video Tech.*, 1996, **6**(3):243—249
- [5] Dragottie P L, Poggi G, Ragozini R P. Compression of superspectral images by three-dimensional SPIHT algorithm. *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing*, 2000, **38**(1):416—428
- [6] Fowler J E, Fox D N. Embedded wavelet-based coding of three-dimensional oceanographic images with land masses. *IEEE Trans. Geos. Remote Sensing*, 2001, **39**(2):284—290
- [7] Wang J, Huang H K. Medical image compression by using three-dimensional wavelet transform. *IEEE Trans. Med. Image*, 2000, **15**(4):547—554
- [8] Li S, Li W, Sun H, Wu Z. Shape adaptive wavelet coding. In: *Proc. IEEE Intern. Symp. Circ. Sys. Mont.*, ISCAS, 1998, **5**:281—284

THE COMPRESSION CODING OF SECONDARY PLANET INTERFERENTIAL SUPERSPECTRICAL IMAGE SERIES

XIAO Jiang WU Chengke DENG Jiaxian YANG Yadong

(*National Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xian 710071*)

Abstract

A new second planet superspectral image series compression coding algorithm is proposed in the paper. The algorithm adopts the still image compression method EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) as the coding engine, but it can efficiently reduce the redundancy among the frames. In the most documents on multispectral or superspectral images compression, the redundancy among the frames were usually reduced by 3 dimensional compression algorithm, such as 3 dimensional SPIHT, which in general based on 3 dimensional transform. Therefore, the huge memory is necessary when the transform is done, but the hardware system on the second planet must be lightest and with the lowest power consumption, and 3 dimensional compression algorithms are difficult to be used on the remote-sensing second planet. The novelty of the proposed compression coding method is that the interferential imaging characteristic of progressive scan is utilized to do the matching operation in the wavelet domain, when the relative shift between the two successive images is detected by the match method, the difference (error) image of the two images is encoded in stead of the origin image. Therefore the whole coding efficient is improved and the fidelity of the images can be improved by 3—4 dB. Since the complexity and memory is similar to the 2 dimensional compression algorithm, the algorithm is easier than the one based on 3 dimensional wavelet transform to be implemented on the second planet, and the disadvantage of large memory requirement and long encoding delay is overcome also. Numerical experiments on the 512-frame superspectrum image series show that the reconstructed images after using the proposed algorithm exhibit a comparative or even better effect at the same compression ratio than the 3 dimensional methods.

Key words Interferential superspectral image series, The match method, Discrete wavelet transform, The error image, Compression coding