

文章编号: 0253-2239(2004)11-1499-4

干涉多光谱卫星图像序列编码

邓家先 吴成柯 李云松 庄怀宇

(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: 星载干涉多光谱图像序列通过图像匹配实行定位形成光谱序列, 相邻图像之间具有很强的相关性, 与一般图像序列不同的是, 相邻图像之间具有明显的平移特点。为了充分利用这一特点实现有效的图像压缩, 同时减少编码系统复杂度, 提出了一种新的图像序列编码方法, 通过小波域系数匹配算法检测出相邻图像之间的相对位移量, 然后对差值图像进行类似于单幅图像的编码, 从而提高了总体编码效率。本算法具有与相同单幅图像编码算法相当的低复杂度特点, 只需要对单幅图像与模板的差值进行基于小波变换的编码, 从而避免了基于三维小波变换的编码算法对系统存储量要求大以及编码延时大的缺陷。仿真结果表明, 本算法比基于三维小波变换的编码算法效果更好。

关键词: 图像处理; 图像压缩; 光谱图像序列; 小波域匹配; 相对位移量; 差值图像编码

中图分类号: TN919.81 文献标识码: A

An Algorithm for Multi-Spectral Image Series Coding

Deng Jiaxian Wu Chengke Li Yunsong Zhuang Huayu

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

(Received 4 July 2003; revised 11 February 2004)

Abstract: Satellite multi-spectral image series are produced by image location, so there is strong correlation between neighbor images. The difference from usual image series is that there are apparent shift features between the image series. In order to use this feature to improve the compression efficiency and decrease the complexity of the coding system, a novel multi-spectral image series coding algorithm is proposed. When the relative shift between two images is detected by the match algorithm in wavelet field, the error image between the images is coded in stead of the following image coding such that the whole coding efficiency is improved. The algorithm is simpler than the one based on three-dimensional wavelet transform, and the disadvantage with large memory requirement and big coding delay is overcome. The simulation results show that better effect is achieved than the one based on three-dimensional wavelet transform.

Key words image processing; image coding; optical image series; match in wavelet field; relative shift; error image code

1 引 言

随着航空遥感成像技术的发展, 干涉多光谱图像在环境保护、资源探测等方面的应用日渐受到关注。成像光谱器是一种新型的航空遥感设备, 具有成像仪和光谱仪的功能, 获取的遥感图像包含了二维空间信息和一维光谱信息, 而且相邻的干涉多光

谱卫星图像之间具有强的相关性^[1,2]。

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新的静态图像国际压缩标准 JPEG2000^[3,4], 分层树集合分割编码 (Set partitioning in hierarchical trees, SPIHT)^[5,6] 都能够充分利用图像冗余进行单幅图像的有效压缩, 取得了好的效果。干涉多光谱图像序列压缩还可以充分利用图像之间的相关性提高编码效果。基于三维小波变换的图像序列压缩算法利用图像序列相关性进一步提高了压缩效果^[7,8], 但存在明显的

E-mail: dengjiaxian@163.net

收稿日期: 2003-07-04; 收到修改稿日期: 2004-02-11

缺点,由于需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如系统存储量和编码延时大。此外由于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平移特性,而三维小波变换没有利用平移特性,因此对应算法并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平移特性的,而编码复杂性又低的算法是十分必要的。本文根据干涉多光谱图像的特点,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,从而降低了对系统存储量的要求,减少了编码的延时。

2 小波变换对差值图像编码的影响

为了提高编码效率,静态图像序列编码可以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,后面图像与模板进行匹配,得到差值图像并对差值图像进行编码。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,即设两幅图像像素点之间存在下列关系:

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

其中 M, N 分别表示图像的宽度、高度, $x_1(i, j)$ 、 $x_2(i, j)$ 为相邻两幅图像在坐标 (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

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

其中 $\bmod(\cdot)$ 表示模运算。将(1)式代入(2)式,除右边界 m 列,下边界 n 行之外,满足下列式子:

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

其中

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

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

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

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

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(3)式不直接对 $x_2(i, j)$ 进行小波变换的原因。 $x_2(i, j)$ 的小波变换表示式为

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

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, $y_2(l, k)$ 可以表示为

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

如果 m, n 有一个不为偶数时, (8) 式不成立。显然(7)式不能总是得到(8)式的显式关系。尽管理论 $y'_2(l, k)$ 与 $y_2(l, k)$ 都包含了变换所有信息,但 $y_2(l, k)$ 相对 $y'_2(l, k)$ 而言引入了附加误差。这是小波变换时对系数下采样形成的,也就是由小波变换使用起始点的不同引起的。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(5)式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

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

3 小波域匹配算法

现在的问题在于,如何确定(1)式中的平移参量 (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：

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

$$z_2(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l) g_2(k) \hat{x}_1[(i - 1) \bmod(M) - 2l, j - 2k], \quad (10b)$$

$$z_3(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l) g_2(k) \hat{x}_1[i - 2l, (j - 1) \bmod(N) - 2k], \quad (10c)$$

$$z_4(l, k) = \sum_{i,j} g_1(l) g_2(k) \hat{x}_1[(i - 1) \bmod(M) - 2l, (j - 1) \bmod(N) - 2k], \quad (10d)$$

并对 $x_2(i, j)$ 直接进行一次小波变换，

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

计算 4 种系数模板当前编码图像的系数之间的相关系数

$$\rho_p(m_1, n_1) = \frac{\sum_{l,k} z(l, k) z_p(l - m_1, k - n_1)}{\sqrt{\sum_{l,k} z^2(l, k) \sum_{l,k} z_p^2(l, k)}}, \quad (11)$$

$p = 1, 2, 3, 4$

为了避免图像中光谱信息对图像位移量检测的影响，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

$$\rho_{\max} = \max\{\rho_1(m_1, n_1), \rho_2(m_1, n_1), \rho_3(m_1, n_1), \rho_4(m_1, n_1)\}, \quad (12)$$

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

$$\begin{cases} m = 2m_2 + (n_3 - 1) \& 1, & (13a) \\ n = 2n_2 + [(n_3 - 1) \& 2] \gg 1, & (13b) \end{cases}$$

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。

综合上文，本算法具体实现如下：

1) 对选定模板按照(10)式进行一级小波变换，

得到小波域系数。并对当前图像进行一级小波变换。

2) 按照(11)式计算 LL 子带相关系数(不包括光谱区域系数)，并根据(13)式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 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。

4 实验结果

图 1 为 Test 光谱序列采用本文算法得到的两幅相邻图像的差值图像进行 3 级小波变换结果(x4)，图 2 为两幅相邻图像直接相减的差值图像进行 3 级小波变换结果(x4)。图 1 和图 2 的比较可以看出，除了光谱区域外图 1 中幅度值小的系数很多，因此更容易对其进行压缩。因此也不难理解即使采用基于三维小波变换 EBCOT 算法，由于序列之间的平移特性存在，小波变换会产生许多幅值小系数，

从而降低整体编码效率。

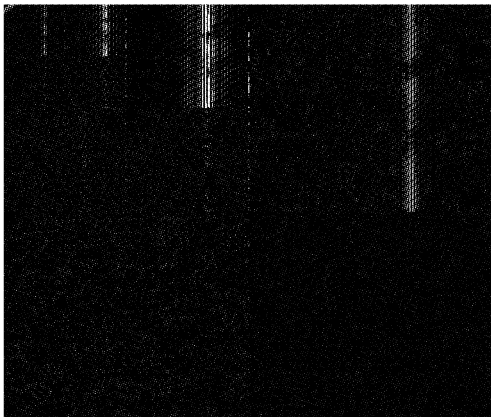


Fig. 1 Coefficients of the error image from the algorithm in this paper

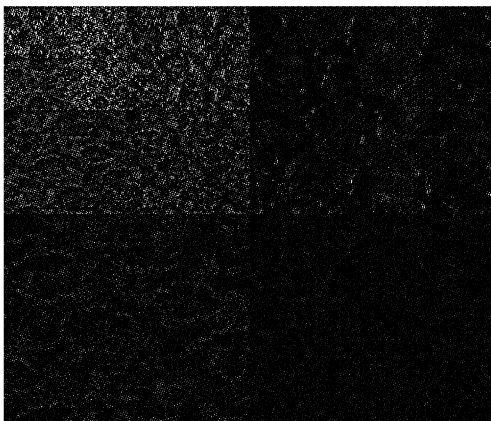


Fig. 2 Coefficients of the error image between two images

为了与基于三维小波变换 EBCOT 算法进行比较,本文也采用 EBCOT 对差值图像进行编码。图 3 为本文算法与三维小波变换 EBCOT 算法对一组 Test 光谱图像序列编码的结果比较,从中可以看

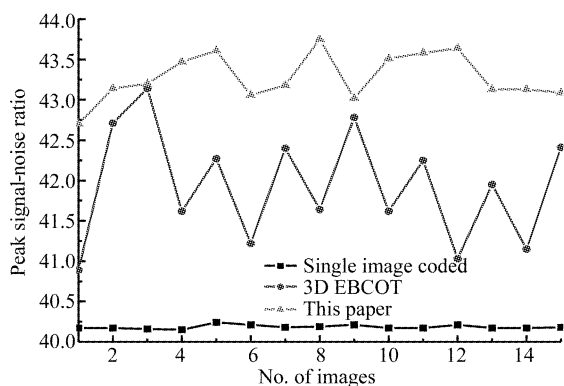


Fig. 3 Comparison between the algorithm and three-dimensional wavelet transform EBCOT algorithm

出本文算法编码效果更好。

结论 根据干涉多光谱图像序列的特点,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量的方法,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基于三维小波变换 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,具有与单幅图像独立编码相当的复杂度,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大以及编码延时大的缺陷,且压缩压果更好。

参 考 文 献

- 1 Li Yunsong, Wu Chengke, Cheng Jun *et al.*. Spectral satellite image compression based on wavelet transform. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6): 691~695 (in Chinese)
- 2 Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiangli Bin *et al.*. Analysis and calculation of throughput of the polarization interference imaging spectrometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(2): 192~197 (in Chinese)
- 3 Christopoulos C, Askelof J, Larsson M. Efficient methods for encoding regions of interest in the upcoming JPEG2000 still image coding standard. *IEEE Signal Proc. Lett.*, 2000, **7**(9): 247~249
- 4 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. *IEEE Trans. on Image Proc.*, 2000, **9**(7): 1158~1170
- 5 Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. *IEEE Trans. on Circuits and System for Video Technol.*, 1996, **6**(3): 243~249
- 6 Yan Jingwen, Shen Guiminng, Hu Xiaoyi. An improved biblock zero tree coding for hyperspectral data compression. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 834~837 (in Chinese)
- 7 Dragottie P L, Poggi G, Ragozini R P. Compression of multispectral images by three-Dimensional SPIHT algorithm. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000, **38**(1): 416~428
- 8 Fowler J E, Fox D N. Embedded wavelet-based coding of three-dimensional oceanographic images with land masses. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**(2): 284~290