

一种亚像元遥感图像的小波复原方法^{*})

张 智 韦志辉 夏德深

(南京理工大学计算机学院 南京 210094)

摘 要 为了复原在轨卫星拍摄的退化遥感图像,以达到精确的对地观测的目的,利用交错半个像素的“亚像元”图像进行交错采样,重建成分辨率更高的网格,然后对新建出的空格点进行小波插值估计。对插值后图像的高频进行中值滤波,融合两幅错半个像元的图像信息,最后复原成一幅地貌信息更丰富、分辨率更高的遥感图像。试验的仿真图像证明了这种小波复原方法的有效性。

关键词 交错采样,复原,亚像元,小波插值

A Way of Remote Sensing Image Wavelet Interpolation and Filter Based on Subpixel Technology

ZHANG Zhi WEI Zhi-Hui XIA De-Shen

(Computer Department, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract In order to raise spatial resolution of the remote sensing image, the two offsetting subpixel image are interlace sampled, the data of new high resolution grid are estimated by the way of wavelet interpolation, and then the median filter technology is combined. After denoising the high frequency with median filter technology, fusing and reconstructing two low-resolution images offsetting half a pixel into a high-resolution remote sensing image, the result of test proves that the wavelet interpolation and median filter technology is very useful.

Keywords Interlace sampling, Restoration, Subpixel, Wavelet interpolation

1 引言

现代遥感技术已实现对地的多平台、多传感器、多时相、全天候的观测。但是,由于成像设备硬件技术方面的原因,使得获取的遥感图像信息是地面真实信息的欠采样。另外,由于光照、大气及传感器的运动,会使得图像退化、降质,从而降低遥感图像的分辨率,所以要对退化图像进行复原。

亚像元^[1]技术是高分辨率遥感图像的一种新型方法。亚像元成像技术是通过提高采样式成像系统的空间采样频率或时间采样频率来提高传输型光学遥感相机图像空间分辨率的一种新型技术。该技术相对常规采样技术,其地面采样间距小于两个像元的间距。

利用采样点在水平和垂直方向分别错开半个像元的两帧图像,进行插值、融合、去噪,可以得到清晰的高分辨率图像。这种图像可以通过采用两排在空间位置错开半个像元的 CCD 探测器,在卫星飞行方向错开 $n+0.5$ 个像元,并且把探测器飞行方向的时间采样频率提高一倍来实现。

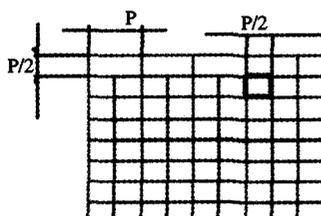


图 1 两幅亚像元图像的空间结构

图 1 表示相差半个像元的两幅图像插值的示意图。其中

每个像元用 p 表示,这就提高了采样密度,采样间隔变为 $p/2$,使得图像的分辨率在理论上能提高 2 倍。法国 SPOT5^[2,3] 卫星采用超模式”,以交错采样的方式,通过地面处理获得更高分辨率的图像。在国内,刘新平^[4]等人采用棱镜分光技术,得到四帧亚像元图像,合成一幅高分辨率图像。

交错采样与插值:高分辨率复原后的图像网格是由原始网格得到的,但由于其采样间隔为原始网格的一半。实际上是把两排阵列获取的两帧图像交错插出原始网格两倍采样密度的新网格中,然后利用不同的插值方法对没有值的区域进行估计。经验表明,在偏移量不是半个像素时,对其处理并不损失质量,因为只有在偏移量很小(如 0.1 个像素)时才会引起问题。

2 常用的插值方法

(1)最近邻插值^[5]:输出像素的值指定为当前点所属像素的值,而不考虑其他像素。

(2)双线性插值^[6]:输出像素的值是最近的 2×2 邻域内像素的加权平均值,利用周围 4 个点确定一个平面,并且在矩形栅格上进行一阶插值,它需要用到双线性函数。

(3)双三次插值^[7]:输出像素的值是最近邻的 4×4 邻域内像素值的加权平均值。

几种常用的插值方法的原理基本相同。每次处理时,首先在输入图像中找到与输出图像中对应的点,然后计算点附近的像素值的加权平均值。上述常用的插值方法可以快速、方便地对图像进行插值。但是,由于它们是对图像像素灰度值直接进行处理,因此只考虑到邻近点像素的关联,并未考虑到图像中高频细节的完整特征。

^{*})香港特区政府研究资助局资助项目(编号 CUHK/4180/01E);江苏省教育厅自然科学基金资助项目(04KJD520037)。张 智 博士生,研究方向为图像处理、模式识别;夏德深 教授,研究方向为图像处理、模式识别。

3 小波复原滤波器设计

小波变换是一种带通滤波器,即把原图像的低频、高频分

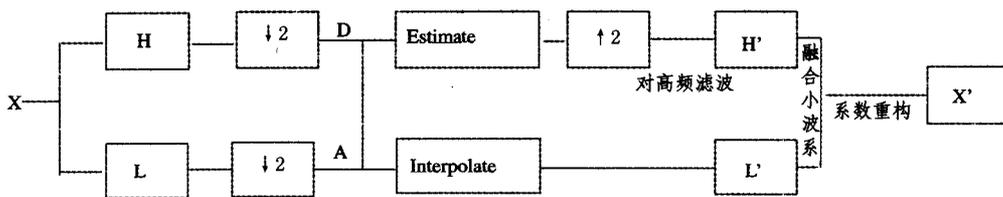


图2 小波复原滤波器结构图

图2所示的是本文算法的重构过程。 X 是源图像信号, L 、 H 表示低通、高通滤波器。 A 表示从低通滤波器出来的低频信号, D 表示从高通滤波器出来的高频细节信号。估计出各个方向的高频系数。采用对脉冲噪声处理效果较好的中值滤波,对高频系数进行处理,相当于把图像信号用离散小波分解做一次带通滤波,再对分解后的高频系数做一次中值滤波。这种二次滤波的方法可以很好地去噪。最后把两帧错半个像元的欠采样图像高、低频系数融合,根据高低频部分进行小波反变换,重构出高分辨率图像。

(1)小波系数的提取:两帧错半个像元的欠采样图像可用二维离散小波分解,可表示为

$$f = \Phi_J a_J + \sum_{d \in A_J} \sum_{j \geq J} \Psi_J^d b_J^d \quad (3)$$

其中 f 代表图像灰度, a_J 代表尺度系数, b_J^d 代表小波系数, Φ_J 代表尺度函数, Ψ_J^d 代表小波函数。这样, $\Phi_J a_J$ 就可以表示某尺度 J 分解后的图像低频部分,而 $\sum_{d \in A_J} \sum_{j \geq J} \Psi_J^d b_J^d$ 则可以表示水平、竖直和对角线方向上的高频细节之和。

在二维离散小波变换中,

$$\begin{aligned} \Phi_{J,p,q}(x,y) &= \phi_{J,p}(x) \otimes \phi_{J,q}(y), \Psi_{J,p,q}^0(x,y) = \varphi_{j,p}(x) \otimes \varphi_{j,q}(y), \Psi_{J,p,q}^{\pm 45^\circ}(x,y) = \varphi_{j,p}(x) \otimes \varphi_{j,q}(y) \text{ 和 } \Psi_{J,p,q}^{90^\circ}(x,y) = \phi_{j,p}(x) \otimes \varphi_{j,q}(y) \end{aligned} \quad (4)$$

$\Phi_{J,p,q}(x,y)$ 和 $\Psi_{J,p,q}(x,y)$ 分别为尺度 J 上的二维尺度函数和尺度 j 上各个方向上的二维小波函数, $\phi_{j,p}(x)$ 和 $\phi_{j,q}(y)$ 代表水平和竖直方向上的尺度函数矩阵, $\varphi_{j,p}(x)$ 和 $\varphi_{j,q}(y)$ 代表水平和竖直方向上的小波函数矩阵, \otimes 是Kronecker张量积。其中, $J \leq j \leq -1$ 为小波变换尺度, p 和 q 分别表示尺度或小波函数在水平和竖直方向上的位移。而均匀采样的高分辨率图像中对应像素的尺度系数和各方向上的小波系数分别为

$$\begin{aligned} a_{J,p,q} &= \iint f(x,y) \Phi_{J,p,q}(x,y) dx dy \\ b_{J,p,q}^d &= \iint f(x,y) \Psi_{J,p,q}^d(x,y) dx dy, d \in A \end{aligned} \quad (5)$$

(2)对高分辨率系数进行最小二乘法估计:在小波变换中,绝对值大的小波系数对应着图像中突出特征,主要是线对和区域边界。而分解后的三个方向的细节子图分别反映了这三个方向上图像的边缘特性。对系数估计,就是用欠采样图像中已知的像素点来估测小波系数,最后由估计出的系数进行图像重建,即完成插值的过程。首先利用最小二乘法估计 $a_j^{[8,9]}$,由近似式 $f = \Phi_J a_J + e_J$,有

$$\begin{aligned} \hat{a}_j &= \arg \{ \min \sum_{j=1}^m (f - \Phi_J a_J) \|^2 \} + \lambda \| a_j \|^2, \text{ 即} \\ \hat{a}_j &= (\Phi_J^T \Phi + \lambda I)^{-1} \Phi_J^T f \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\lambda (\lambda > 0)$ 为平衡因子。若 λ 过大,会使得到的解不够理想;若 λ 过小,则会引出过多噪声。从而有估计 $\hat{f}_j = \Phi_J \hat{a}_j$,再利用 $\Psi_j b_j \approx f - \Phi_J a_J$ 估计小波系数 b_j 。即

开,而且能够保持图像中丰富的细节信息。

$$b_j \approx \frac{f - \hat{f}_j}{H_j}, j > j \quad (7)$$

进一步地,可计算高分辨率图像在各个方向上的细节。

$$f^d = \sum_{j \geq J} \Psi_J^d b_J^d, d \in A \quad (8)$$

(3)中值滤波:在插值的过程中,会引入噪声。为了有效地去噪,并且要求能够保持图像的边缘信息,我们分别对各个尺度下的所有高频部分进行中值滤波。中值滤波是一种线性处理过程。被处理像元灰度值用 $f(x,y)$ 表示,则 $s(x,y)$ 是以 (x,y) 为中心的 $N \times N$ 窗口所框住的各像素灰度的中间值,即

$$\sum_{j \geq J} \overline{\Psi_J^d b_J^d} = \sum_{j \geq J} \text{Medfilt2}(\Psi_J^d b_J^d) \quad (9)$$

值得注意的是,在对退化图像中的水平方向的条带噪声,应在垂直方向进行中值滤波,效果较好。

(4)信息融合:对滤波后的图像细节部分进行融合,并对融合后的低频和各个方向高频部分重构高分辨率图像,再由公式(3)可重建内插后的高分辨率图像。

$$\hat{f} = \Phi_J \hat{a}_J + \sum_{d \in A_J} \sum_{j \geq J} \overline{\Psi_J^d b_J^d} = \Phi_J \hat{a}_J + \sum_{d \in A_J} \sum_{j \geq J} \text{Medfilt2}(\Psi_J^d b_J^d) \quad (10)$$

(5)对实验结果的量化标准

实验时采用图像复原中广泛使用的峰值信噪比(PSNR, Peak Signal-to-noise Ratio)和互相关系数作为客观评价指标。

采用峰值信噪比作为评价指标主要是可以对原始图像与重建图像进行比较,算法如下:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} [255^2 / (\frac{1}{MN} \sum_{i,j} (f(m,n) - f'(m,n))^2)] \quad (11)$$

其中 f 为原始图像, f' 为内插后的图像。 M 、 N 代表图像的长度和宽度。由于PSNR能够客观、稳定地反映图像的质量特征,因而常被采用。

互相关系数(C , cross-correlation coefficient):表示重建图像与原始图像的互相关性,即重建图像与原始图像越相关, C 值越趋近于1,说明重建的效果越好。而重建图像与原始图像不相关,则 C 值为0。 C 的值在0~1之间。

$$C = \frac{[\sum_{m,n} f(m,n) f'(m,n) - MN a_f a_{f'}]}{\sqrt{[\sum_{m,n} f^2(m,n) - MN a_f^2][\sum_{m,n} f'^2(m,n) - MN a_{f'}^2]}} \quad (12)$$

其中 a_f 和 $a_{f'}$ 分别表示两幅图像 f 和 f' 的像素平均值。

4 试验及结果分析

在实验室环境下进行试验,硬件配置为pc机Intel PIV2.94GHz,内存为256M。对(200×200)的两帧错半个像元的靶标图像进行几种插值方法。试验中采用DB3小波对图像进

行 2 层分解后,重构结果较好。

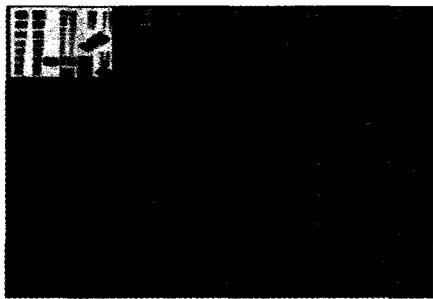


图 3 小波分解细节子图

图 3 表示,进行 DB3 分别以尺度 1 和尺度 2 分解后各个方向的细节部分。经实验发现,小波分解层次超过 2 层以后,结果变得很模糊,图像质量变差。图 4 是分别用几种插值算法对图像处理后的结果。

表 1 是使用几种方法的峰值信噪比。

表 1 各种插值方法的峰值信噪比和互相关系数

| | 最近邻插值 | 双线性插值 | 双三次插值 | 小波插值 |
|------|------------|------------|------------|------------|
| PSNR | 25.0043 dB | 25.5382 dB | 26.3923 dB | 29.5357 dB |
| C | 0.9810 | 0.9792 | 0.9802 | 0.9906 |

由表 1 可以看到,用小波插值的算法对两帧错半个像元的图像进行融合、去噪,峰值信噪比比最近邻插值高 4.5314dB,比双线性插值高 3.9975dB,比双三次插值高 3.1434dB。而从互相关系数上来看,用小波插值的相关度最大,重建图像更接近于原始图像。这是由于小波插值方法能够完整地保持原图像高频细节部分,不是简单地插值。两帧用小波进行图像插值融合的方法,效果好于传统的插值方法。

结论 本文提出了一种结合亚像素技术的小波插值及滤波方法。该方法在插值的过程中能够完整地保留图像中的高频信息,结合对高频部份中值滤波,能达到对图像进行平滑、去噪、保留阶梯函数的不连续性的目的。因此,这种小波插值方法与传统方法相比,更能提高遥感图像的空间分辨率。

参考文献

- 1 Zhang H, Zhao J f, Shi J C. Comparing Four Sub-pixel Algorithms in MODIS Snow Mapping. IEEE, 2005. 3784~3787
- 2 Seguela D, Fratter C, Munier P. SPOT5 System[C]. In: Proceedings of SPIE, 1999, 3750: 212~220
- 3 Latry C, Rouge B. SPOT THR Mode[C]. In: Proceedings of SPIE, 1998, 3439: 480~491
- 4 刘新平,王虎,汶德胜. 亚像素线阵 CCD 焦平面的光学拼接[J]. 光子学报, 200, 31(6): 781~784
- 5 Rossi R E, Dungan, J L, Beck L R. Geostatistical interpolation for remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1994, 49 (1): 32~40
- 6 Castleman K R. Digital Image Processing[M]. Prentice-Hall International Inc, 1998. 117~119
- 7 苏金明,王永利. MATLAB7.0 实用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 41~43
- 8 王广君,房建成. 一种星图识别的星体图像高精度内插方法. 北京航空航天大学学报[J], 2005, 31(5): 566~569
- 9 Ford C, Etter D. Wavelet basis reconstruction of nonuniformly sampled data. IEEE Trans on Circuits and Systems II[J], 1998, 45(8): 1165~1168

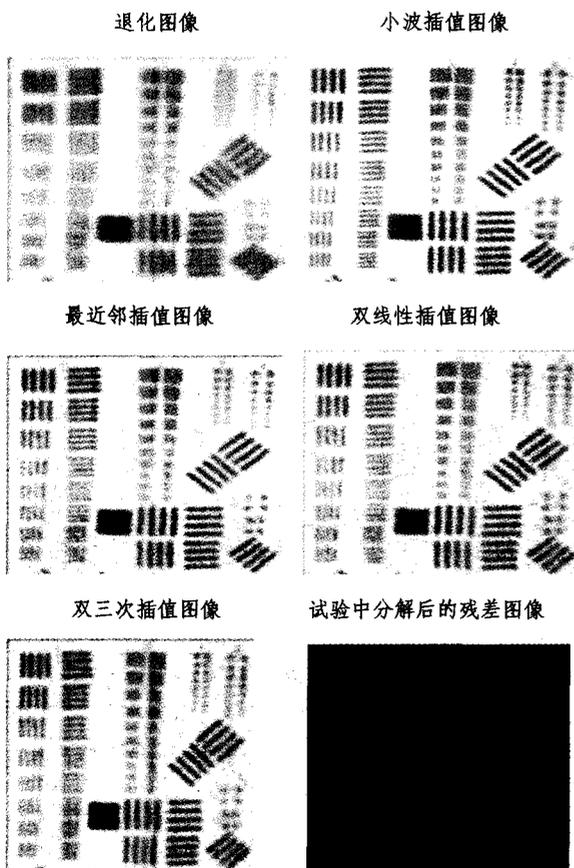


图 4 不同方法的插值结果