

文章编号: 1007-4619(2004)01-0051-05

基于光谱信息的遥感图像空间域自适应滤波

吴传庆, 赵永超, 童庆禧, 郑兰芬

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

摘 要: 遥感图像往往由于内外因素的干扰含有各种噪声, 为提高图像质量人们对其进行滤波。常规的滤波方式完全基于图像空间域, 在消除异常点使图像平滑的同时使边界变得不清楚从而使图像模糊; 或者正相反, 在边缘信息得到增强时也放大了图像噪声而使图像变得粗糙。该文的自适应滤波方法充分利用多光谱和高光谱遥感图像的光谱维信息, 滤波时不仅要使均匀的地块得到平滑, 而且要使地块间的边缘、局部的异常点、线仍然得到保存, 在平滑的同时尽量保持原有的数值特征。

关键词: 遥感图像; 平滑; 自适应滤波

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

遥感技术由多光谱遥感发展到高光谱遥感阶段, 传感器的波段数和光谱分辨率逐渐增加。虽然传感器在提高空间和光谱分辨率的同时信噪比也有所提高, 但图像获取时像元间经常存在一些扰动, 在空间和光谱维上像元间和波段间都可能相互影响, 随机噪声往往影响一些地块的均匀性及其边界的稳定性。因此, 有必要对图像进行平滑滤波以消除噪声。常规的滤波方式在消除异常点使图像平滑时同时使边界变得不清楚从而使图像模糊; 或正相反, 在边缘信息得到增强时也放大了图像噪声而使图像变得粗糙。造成这种结果的原因是由于这些滤波方式完全基于图像的空间域, 没有利用遥感图像所特有的光谱信息; 并且滤波时所用的模板是固定不变的。本文提出的自适应滤波方法—基于光谱信息的自适应滤波器 AFS (Adaptive Filter based on Spectral) 充分利用了多光谱和高光谱遥感图像的光谱维信息, 滤波时不仅要使均匀的地块得到平滑, 而且要使地块间的边缘、局部的异常点、线仍然得到保存, 使不均匀地块的不均匀性得到保持, 在平滑的同时尽量保持原有的数值特征。

2 常规的滤波方式

常用的滤波方法如自适应滤波器, 平滑滤波器, 中值滤波器, 定向滤波器和边缘增强的罗伯特 (Roberts)、索伯尔 (Sobel)、拉普拉斯算子 (Laplacian) 等^[1]。可以表述为图像卷积运算:

$$R = R_0 \ominus K \quad (1)$$

其中 R_0 是经噪声叠加的原始图像矩阵, R 是噪声消除后的图像矩阵, K 是滤波用的模板, \ominus 代表了一个算法即“卷积运算, 移动平均”。对于非自适应滤波来说, K 的元素 k_{ij} 一般不变, 代表了像元间相互影响的权重系数; 自适应滤波的 k_{ij} 是可变的, 常常是基于局部统计 σ 的权重函数, 如 Lee^[2], Local sigma, Bit error^[3], Kuan, Gamma, Frost^[4], Modified Lee^[5,6] 等。这些方法都是针对单波段图像而设计的, 一般利用模板内像元的统计值 σ 选取合适像元值作滤波处理。往往只考虑图像空间数字分布特征而不能利用像元间根本的属性联系即像元的光谱信息, 大部分算法因而不得不简单假设随机噪声是乘性的或加性的, 因而这类方法不能有效地兼顾遥感图像的边缘增强和噪声消除。

收稿日期: 2002-05-23; 修订日期: 2003-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目“光谱指数时间谱特性研究”(40271085)和国家“973”重点基础研究发展规划项目(G2000077901-05)资助。

作者简介: 吴传庆(1977—), 男, 硕士。1999年毕业于北京大学地质系构造地质专业, 并获得理学学士学位。同年保送到中科院遥感应用研究所攻读硕士学位。主要从事高光谱图像几何校正、图像和光谱数据处理、信息提取和特征分类等研究。

3 AFS 滤波器原理

0,2	1,2	2,2
0,1	1,1	2,1
0,0	1,0	2,0

图 1 滤波模板中 9 个像元位置示意图

Fig. 1 Location relationship of Nine pixels in 3×3 filter mask

AFS 的关键在于如何在模板内完成基于光谱信息的像元选择。对有效的像元，在模板的相应位置赋予一定的权值；对无效的像元，将模板的相应位置的权值置为零。这样就把通常的移动平均(或滤波)模板由原来死板的 K 变成了可变的、智能的、自适应的 K'

$$K'_{p,q} = K \otimes S_{p,q} = \begin{pmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,n} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & k_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m,1} & k_{m,2} & \cdots & k_{m,n} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m,1} & S_{m,2} & \cdots & S_{m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{1,1}S_{1,1} & k_{1,2}S_{1,2} & \cdots & k_{1,n}S_{1,n} \\ k_{2,1}S_{2,1} & k_{2,2}S_{2,2} & \cdots & k_{2,n}S_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m,1}S_{m,1} & k_{m,2}S_{m,2} & \cdots & k_{m,n}S_{m,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$p = 1, \dots, N; q = 1, \dots, M$

其中 $K'_{p,q}$ 是修正后的滤波模板； (p, q) 为模板的空间定位； N, M 是图像的大小； n, m 是模板的大小， K 是常规的低通滤波模板，其中的元素固定不变。 $S_{p,q}$ 是第 (p, q) 像元所在窗口内各像元间的逻辑关系矩阵，由相似性判断函数 $f_L(t_1, t_2)$ 确定，其中的元素定义为：

$$S_{p,q;i,j} = f_L \left(t_{p-i, n/2, q-j, m/2}, t_{p,q} \right), \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m; p = 1, \dots, N; q = 1, \dots, M \quad (3)$$

其中 $S_{p,q;i,j}$ 意指 $S_{p,q}$ 中的元素 (i, j) ， t 是相应像元

的光谱向量， $f_L(t_1, t_2)$ 为逻辑变量，当阈值满足时，表示两者是同一类，它为 1，否则取 0。

这样的可变模板能够确保只有与目标像元同类的像元才计入平均值作光滑，因而是一个智能化的自适应滤波，对像元的相似性判断函数 $f_L(t_1, t_2)$ 有距离法和光谱角法两种。这里以大小为 3×3 模板为例， n 波段遥感图像进行说明：

3.1 距离法 (DASF, Distance ASF)

以 $(1, 1)$ 为中心像元，周围 8 个像元为待测像元，以距离为判别准则，对周围 8 个像元进行选择。应用比较广泛而简单的距离函数有两个：欧几里德距离和绝对距离^[7]：

(1) 欧几里德距离：

$$D_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - M_i)^2} \quad (4)$$

(2) 绝对距离：

$$D_2 = \sum_{i=1}^n |x_i - M_i| \quad (5)$$

这里 i 为波段序数， x 为周围待测像元， M 为中心像元， D_1, D_2 为距离。当 D_1, D_2 小于某一个阈值时，则 x 为有效像元。这里我们还可以增加一个判据，波动阈值 D_{max} (式(6))，当像元 x 的 D_{max} 同时小于波动阈值时，则其为有效像元。该阈值的作用是保证两个像元的光谱形状尽量一致。

$$D_{max} = \max |x_i - M_i| \quad (6)$$

3.2 光谱角 (SAFS, Spectral angle AFS)

以待测像元和中心像元之间在光谱维空间的夹角为判据来对周围像元进行选择，像元之间的光谱形状相似，就认为像元为同类。由于相邻像元所代表的实际地物同谱异物的现象很少，以此该方法结果很好。光谱角公式为：

$$Angle = \arccos \left(\frac{(x \cdot M)}{\|x\| \|M\|} \right) \quad (7)$$

3.3 具体步骤

1. 选定一个 $n \times m$ 的移动平均模板 K ， m, n 以奇数为好，本文数据实验中采用模板是 3×3 大小， $K = [[1, 1, 1], [1, 2, 1], [1, 1, 1]]$ 。

2. 对图像所需处理波段进行移动平均。其中的 R_0 为某波段的原始值，对各个波段都要做同样处理。对于图像的边缘来说，可能会超出图幅取值范围，此时可用零值扩大原图大小或者减小搜索范围

来解决, 不会影响分析结果。

3. 其中逻辑值 S 由距离法或光谱角法获得。小于阈值 S 为 1, 否则为 0。最后得平滑模板 $K'_{k,l}$, 推荐的判据为:

距离法: 欧几里德距离阈值: $D = 0.008$, 波动阈值: $D_{max} = 0.2$

光谱角法: 光谱角阈值: 0.02

$$R'_{kl} = R_{kl} \odot K'_{kl} \quad (8)$$

4. 平均的模板总和也需要根据判断结果相应变化, 像元 (k, l) 值最后为:

$$Dn(k, l) = \sum_{i=0}^{n,m} R'_{kl(i,j)} \circ K'_{kl(i,j)} \setminus \sum_{i=0}^{n,m} K'_{kl(i,j)} \quad (9)$$

如果将条件放宽, 则光滑平均化效果越好, 而条件越严, 则数据保真度越好。上面给出的阈值只是本次实验的多次尝试所得, 对其它遥感数据并不一定适合。读者使用时可以适当地调整以得到最佳效果,

对同一图像还可以多次用此方法进行迭代平滑, 效果更好。

4 实际应用

利用上面所提出的 AFS 方法对日本 OMIS 高光谱图像进行了滤波处理。图 2 给出原始图像 (A)DAFS 和 SAFS 滤波结果 (B-E), 从中可以清晰看出该方法滤波可以光滑平均地块内部、消除“麻点”状噪声、保持并相对增强边缘、保持非均匀地块光谱的特点; 调整阈值的大小和迭代次数都会影响滤波结果, 读者应该反复调整以求最佳效果。图 3 给出了四个区域的原始图、SAFS 三次迭代和 5 次迭代的结果图的光谱分布图。可以看出四个区域光谱分布点逐渐地向各自的中心会聚, 即各区光谱趋于同一化, 相当于相同地物的光谱进行了空间和光谱维的平均, 这样有助于提高信噪比。

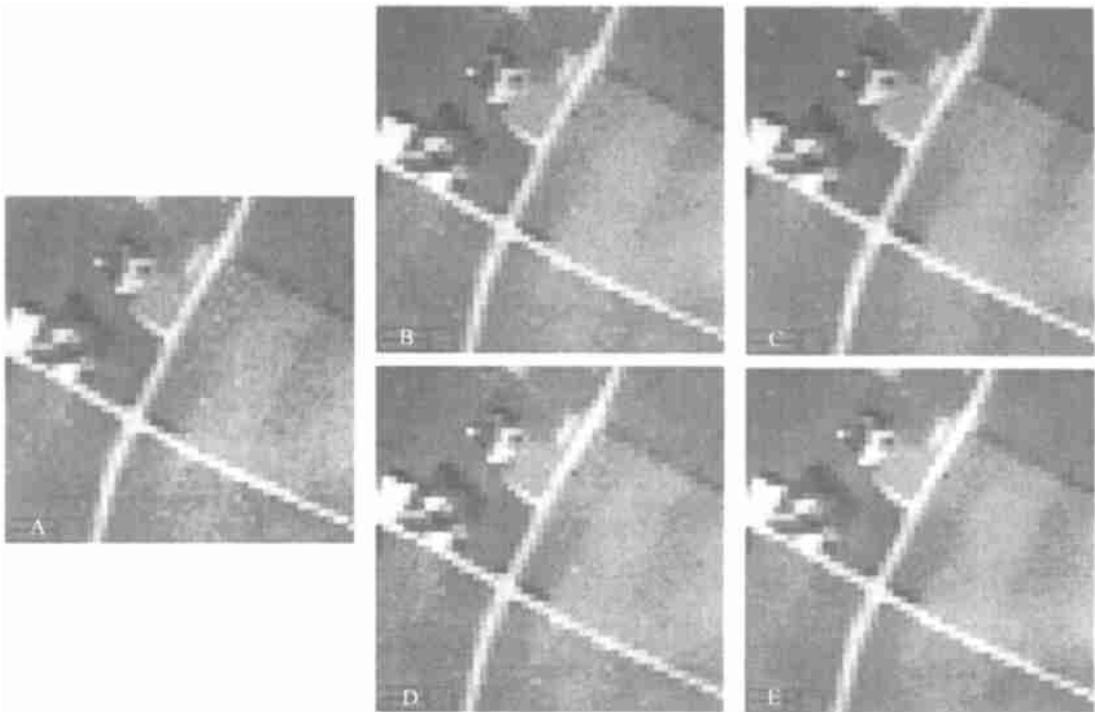


图 2 2001 年日本 omis 图像 4-1-1 条带部分图, A 为原始图; B 为 1 次 SAFS 光滑结果; C 为 5 次 SAFS 光滑结果; D 图为 $D=0.005, D_{max}=0.2$ 结果, E 为 $D=0.008, D_{max}=0.2$ 结果

Fig. 2 One part of OMIS image gained in Japan 2001, picture A is raw image; picture B is the result of one time SAFS smooth; picture C is the result of five times SAFS smooth; picture D is the result of SAFS smooth with $D=0.005, D_{max}=0.2$; picture E is the result of SAFS smooth with $D=0.008, D_{max}=0.2$

为了比较, 我们还采用了其他光滑或滤波方法对相同的图像进行了处理。从图 4 中可以看出 AFS

方法要比普通移动平均光滑好得多, 也比一般的自适滤波要好。

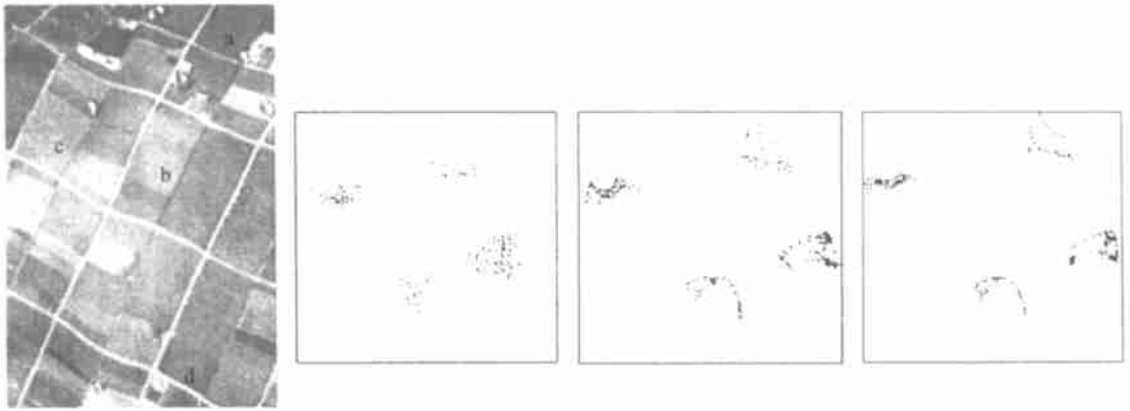


图 3 最左边为原始图像, 后面为原始图像、SAFS3 次迭代和 5 次迭代结果图中 a b c, d 四区的光谱分布图
 Fig. 3 Left picture is raw image, next three pictures are spectral distributing sketch maps of areas a, b, c, d in the raw image, the result of three times SAFS and five times SAFS in turn

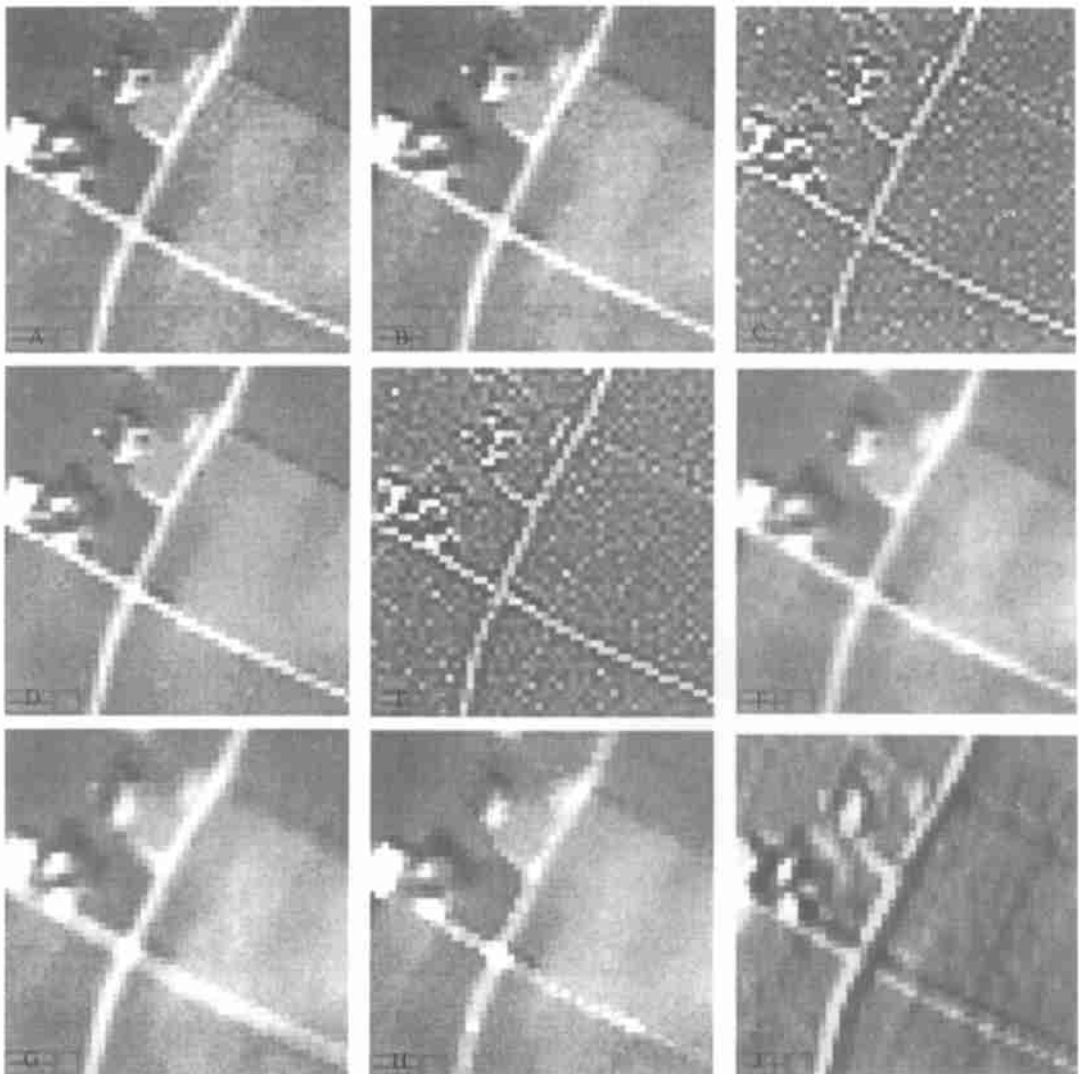


图 4 A 为原图; B 为 Gausslow 滤波结果; C 为 Gausshigh 滤波结果; D 为 SAFS5 次迭代结果; E 为 Laplacian 算子滤波结果; F 为 Lee 滤波结果; G 为 Frost 滤波结果; H 为 Median 滤波结果; I 为零度角方向滤波结果

Fig. 4 Picture A is raw image; picture B is the result of Gausslow filter; picture C is the result of Gausshigh filter; picture D is the result of five times SAFS; picture E is the result of Laplacian filter; picture F is the result of Lee filter; picture G is the result of Frost filter; picture H is the result of Median filter; picture I is the directional filter result of zero angle

5 总 结

本方法充分利用遥感图像中光谱维所体现的像元种类信息从而进行空间维光滑, 与常规的滤波方法相比有着鲜明的特点:

1. 适当地调整阈值和重复迭代次数, 可以使均匀地块因测试误差而引起的不均匀得到光滑平均; 不均匀地块的不均匀性仍能得到保持, 并且不改变光谱特征。

2. 图像的几何特征完全保留; 窄细线状地物只在线的延展方向上得到光滑, 而不会被消除; 边缘结构因为边缘两侧地块的均匀化而会使边缘得到增强突显。

3. 因为用于平均的像元都是同类像元, 模板(移动平均的窗口)的大小不再是重要的影响因素。

4. 局部异常点仍然得到保持。可以证明, 上述光滑过程不会更改异常点的任何光谱特征。例如, 如果有一个异常点不同于它周围的任何一点, 则它的

的 3×3 逻辑判断矩阵为 $S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$, 即此点的光

谱将原封不动地得到保持。这虽然可能无法去除振幅较大的随机噪声, 但从另一个角度讲可以保留面积较小的异常区的光谱特征不会因为滤波而被破坏。

5. 但是这一方法也有一个小小的缺点: 首先是计算量相对变大。因为要对任何两像元间都作一次

距离或者光谱角的阈值判断, 所以比一般的光滑滤波方法计算量大, 费时也较多(但随着目前计算机技术的飞速发展, 计算速率已经没有问题, 程序在 PII-I550 机子上对 500×10000 大小 80 波段的高光谱图像的处理时间只要 1h); 其次是主要适用于多光谱和高光谱遥感图像, 对于单波段图像, 仅在一维上比较相似性, 滤波器应退为一般的条件滤波器。

参 考 文 献 (References)

- [1] Mei Anxin, Peng Wanglu *et al.*, Introduction of Remote Sensing[M] . Beijing: Higher Education Press, 2001. 112—116. [梅安新、彭望等. 遥感导论[M] . 北京: 高等教育出版社, 2001, 112—116.]
- [2] Lee J., Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[C] . IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980 PAMI-2, 165—168.
- [3] Eliason, E. M., McEwen, A. S. Adaptive box filters for removal of random noise from digital images[J] , *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, 56(4):453—458.
- [4] Shi Z, Fung K B, A comparison of digital speckle filters[C] , Proceeding of IGARSS, 1994, 2129—2133.
- [5] Lopes A., Nezry, E., *et al.*, Adaptive speckle filters and scene heterogeneity[J] *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1990a, 28(6), 992—1000.
- [6] Lopes A., Nezry, E., *et al.*, Maximum a posteriori filtering and first order texture models in SAR images[C] . IGARSS 90, 1990b, 2409—2412.
- [7] Zhang Xiaocan, Huang Zhicai, Zhao Yuanhong. Processing of Remote Sensing Data Image[M] , Hangzhou: Publishing House of Zhejiang University, 1996. 214—217. [章孝灿、黄智才、赵元洪. 遥感数字图像处理[M] , 杭州: 浙江大学出版社, 1996, 214—217.]

Remote Sensing Image Spatial Adaptive Filtering Based on Spectral Information

WU Chuan-qing, ZHAO Yong-chao, TONG Qing-xi, ZHENG Lan-fen

(Laboratory of Remote Sensing Information Science, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Because of disturbance from inside or outside of sensors, there is much noise in the remote sensing image. People always filtrate image in order to improve its quality. Traditional filters are based on image's space dimension. As a result, they usually blur the edges while smooth the image; or make image rough while enhance image's edges contrarily.

The adaptive filter in this article, AFS (Adaptive Filter based on Spectrum), uses the spectral information of multispectral or hyperspectral remote sensing images to smooth the even object, strengthen edges and keep the spectra of exceptional point, line or parcel of image. The key of AFS is how to complete the choosing pixels in one filter mask based on pixels' spectral information. This method is also a kind of convolution operation to images, the difference between AFS and traditional smooth method is operating with pixels in filter mask selectively. We give some weight to valid pixels and give zero weight to invalid pixels in the filter mask, then use this filter to operate with image.

Key words: remote sensing image; smooth; adaptive filter