

星载 SAR 图象斑点噪声消除方法 效果的比较研究

唐伶俐 江平 戴昌达

(中国科学院遥感卫星地面站 北京 100086)

Thomas J. Jackson

(美国农业部自然资源研究所水文室)

摘要 星载(SAR)图象一般都存在相干斑点噪声,严重干扰地物信息的提取与 SAR 图象的应用效果,因此斑点噪声的消除问题引起微波遥感科技工作者的普遍关注,先后有多位学者提出各种不同的处理方法,其中最为常用的有均值平滑滤波、中值平滑滤波、Frost 自适应滤波、Lee 自适应滤波以及近期由 P. V. Narasimha Rao 等人提出的改良 K-均值自适应滤波等方法。本文分析了这几种方法的数学基础,并选择了有代表性的实验区开展对比试验,结果表明:改良 K-均值自适应滤波法效果最佳。

关键词 SAR 图象, 斑点噪声, 滤波

1 前言

自 1981 年 11 月美国航天飞机第一次进入太空,在 250km 的高度上利用成像雷达 SIR-A 拍摄了地面图象,这一划时代的科学事件标志着航天微波雷达遥感技术有可能实用化,从而将整个航天遥感技术从可见光、红外扩展到了微波雷达遥感的新阶段。微波雷达遥感与可见光、红外遥感相比,有许多优越性,首先,微波可以穿透云层和在一定程度上穿透雨区,以及不依赖于太阳作为照射源的特点,使其具有全天候、全天时的观测能力,这是任何其它遥感手段所不能比拟的;其次,微波遥感还能在一定程度上穿透植被,可以提供可见光、红外遥感所得不到的某些新信息,展示了非常令人鼓舞的应用前景,已经引起从事生态环境监测、冰川制图、地质、水文、海洋、气象、军事等领域的科技人员的广泛关注,并取得初步成效。随着微波雷达遥感技术的不断发展与完善,它的应用领域将进一步扩展。成像雷达获得的 SAR 图象是地物对雷达波的散射特性的反映。由于成像雷达发射的是纯相干波,这种相干信号照射目标时,目标上的随机散射面的散射信号与发射的相干信号之间的干涉作用会使图象产生相干斑点噪声。这种斑点噪声严重影响了 SAR 图象的判读性,噪声严重时,甚至可导致地物特征的消失。因此

收稿日期: 1995 年 10 月 3 日; 收到修改稿日期: 1996 年 4 月 2 日

滤除 SAR 图象中的斑点噪声对 SAR 图象的有效使用有着十分重要的意义。

关于改善和滤除斑点噪声影响的技术路线基本上可分为两类, 一类是成象前的多视平滑预处理, 另一类是成象后的去斑点噪声滤波技术。前者的最大缺陷是会损害象元空间分辨率。因此近年来都转而致力于后者的试验研究, 先后提出了不少斑点噪声分布概率模型以及滤波处理算法。在这些算法中, 目前应用较广泛的有: 均值平滑滤波、中值平滑滤波、Frost 自适应滤波^[1], Lee 自适应滤波^[2,3], 以及由 P. V. Narasimha Rao 等人提出的改良 K-均值自适应滤波^[4]。笔者曾对这些滤波处理算法的数学基础进行较深入的剖析, 并开展对比试验, 以期对这些算法的效果与优缺点做出较客观的评价, 推动 SAR 图象斑点噪声消除技术研究的进一步深化。

2 几种主要消除斑点噪声滤波处理算法的数学基础

2.1 中值平滑滤波

中值平滑滤波技术实质上是一种非线性信号处理技术。它假设噪声具有极端的数值, 即在所定义的平滑模板内为最(较)大或最(较)小值。中值平滑滤波即是含有奇数个象元的平滑模板内的中值象元代替模板正中的那个象元(当前象元)。用数学式表达可以写成:

设 $DN_{i,j}$ 为奇数项离散系列($i=1, \dots, 2n-1; j=1, \dots, 2n-1$)

$DN'_{i,j}$ 为 $DN_{i,j}$ 按大小重新排列的奇数项离散系列($i=1, \dots, 2n-1; j=1, \dots, 2n-1$)

$R_{i,j} = DN'_{n,n}$

其中: $R_{i,j}$ 为平滑处理后的象元灰度值; $DN_{i,j}$, $DN'_{i,j}$ 分别为模板内象元重新排列前后的原始灰度值。

2.2 均值平滑滤波

均值平滑滤波法与中值平滑滤波法类似, 不同的是将平滑模板中当前象元邻域内的各点灰度值的平均值来代替当前象元的原始灰度值, 其数学表达式为:

$$R_{i,j} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n DN_{i,j}$$

其中: $R_{i,j}$ 为平滑处理后的象元灰度值; $DN_{i,j}$ 为平滑模板内各象元的原始灰度值; n^2 为平滑模板的大小。

3.3 Frost 自适应滤波

Frost 自适应滤波是以权重 M 值为自适应调节参数的滤波器, 其数学表达式为:

$$R_{i,j} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (P_{i,j} \times M_{i,j}) \left/ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{i,j} \right., \quad M_{i,j} = \exp(-A_{i,j} * T_{i,j}),$$

$$A_{i,j} = \text{DAMP} * (V_{i,j} / I_{i,j}^2)$$

其中: $R_{i,j}$ 为平滑处理后的象元灰度值; $P_{i,j}$ 为平滑模板中各象元的原始灰度值; $M_{i,j}$ 为平滑模板中每个对应象元的权重指数; $T_{i,j}$ 为平滑模板内中心象元到其邻象元的绝对

距离; $DAMP$ 是指数衰减值(用户可根据需要选择 $DAMP$ 值, 以达到最佳平滑效果); $V_{i,j}$ 为平滑模板中象元值的方差; I_i 为平滑模板中象元值的均值平方; n^2 为平滑模板的大小。

3.4 Lee 自适应滤波

Lee 滤波器假设雷达相干斑点噪声是相乘性噪声, 并采用自适应迭代法, 它的数学表达式可写为:

$$R = I + K*(CP - U*I), K = (U*V) / (V*U^2 + I^2*MVAR), MVAR = (SD / I)^2$$

其中: R 为平滑处理后的象元灰度值; I 为平滑模板中象元值的均值; CP 为平滑模板中心点象元的灰度值; U 是相乘噪声的均值(基于假定, 一般取 $U=1$); V 为平滑模板中象元值的方差。

SD 是平滑模板内的噪声标准差(在确定此值时, 用户需预知试验区有一块平坦区域, 并对其直方图信息进行统计分析, 或利用多视处理数据来确定 SD 值)。

3.5 改良 K-均值自适应滤波

改良 K-均值自适应滤波法首先计算确定平滑模板内象元的方差值, 并将它与整个试验区的最大方差与最小方差进行比较, 得到阈值 K ; 再由 K 值决定模板内参加平均值计算的象元个数(K 值可作适当调整, 确保参加平均值计算的象元以模板中心象元为对称); 最后以平均值代替当前象元值, 可用下列数学式表达:

$$Sf = (V_{Loc} - V_{min}) / (V_{max} - V_{min}), K = n^2(1 - Sf), R_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k DN_i$$

其中: R_i 为平滑处理后的象元灰度值; DN_i 为平滑模板内各象元的原始灰度值; C_{Loc} 是平滑模板内象元值的方差; V_{min} 是整个研究区域最小方差值; V_{max} 是整个研究区域最大方差值; n^2 为平滑模板的大小。

该滤波器实际上是以当前区域自身的方差为调节, 以达到自适应滤波的目的。如当前区域方差小, Sf 也小, K 值就大, 参加平滑的象元个数就多, 因而平滑效果强, 保留高频信息少; 反之, 如当前区域方差大, 参加平滑的象元个数就少, 平滑效果弱, 可保留较多的高频信息。

3 实验方法

上述 5 种滤波处理算法各有其数学依据, 为了对它们的消斑效果做出较全面客观的评估, 笔者首先采用对比实验的方法, 对实验区的原始 SAR 图象, 分别采用上述 5 种方法进行滤波消斑处理。

实验区选在美国俄克拉荷马州 Washita 地区, 该地区位于美国大平原南部, 地势较平坦, 土壤为受地下水影响发育的潮土类型。土地利用方式包括农田、森林、草场、采油废弃地、采石场、城镇居民点、水域等^[5]。有较大代表性。

供试图象系 1992,6,10 过境的 ERS-1 SAR, SGF(Georeferenced Fine-Resolution)

数据, 由加拿大遥感中心地面站接收处理。ERS-1 即欧洲遥感卫星 1 号, 于 1991,7,17 升空, 轨道高度 785km, 倾角 98.5° , 绕轨道一周时间约 100min, 极化模式 VV, 入射倾角 23° , 工作频率为 C 波段^[6]。SGF 产品的空间分辨率在距离向为 30m, 方位向约 35m, 成象处理后的象元大小(pixel spacing)为 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ 。实验区覆盖 1800(列) \times 1600(行) 象元, 约 450km^2 。前 4 种滤波处理均使用 PCI 图象处理软件包中的现成程序进行。最后一种改良 K-均值自适应滤波则是笔者在参考文献 [4] 的基础上编程实现(图版 I 图 1)。

为了更客观地评价这些图象的实际消斑效果, 笔者采用 2 种评价指标, 暂称之为平滑指数 FI 和边缘保持指数 ESI 。前者系滤波处理后各地类图斑中所有象元的均值 M 与其标准差 SD 的比值, 它表征各滤波器对各种地类图斑的平滑能力, FI 值愈高, 表示平滑作用愈强, 其表达式为:

$$FI = M / SD$$

后者 (ESI) 表征处理后各滤波器对图斑水平向与垂直向边缘的保持能力, ESI 值愈高, 意味着保持能力愈高, 其算式为:

$$ESI = \frac{\sum_{i=1}^m |(DN_{R1} - DN_{R2})|_{\text{滤波器}}}{\sum_{i=1}^m |(DN_{R1} - DN_{R2})|_{\text{原始图象}}}$$

式中: m 是检验样本的个数; DN_{R1} 和 DN_{R2} 分别是沿边缘交接处左右或上下互邻象元的灰度值。

4 结果与讨论

对比实验获得的 6 组 FI 和 ESI 数据(表 1)。分析表 1 数据清楚看出, 经各种处理后图象的 FI 值都普遍高于原始图象, 说明这些滤波器都具有相当的平滑匀化作用。对于水体、农田等地类来说, FI 值愈高, 其平滑匀化作用愈强, 消除斑点噪声的效果就可能愈好。据此可以认为改良 K-均值滤波和中值滤波消除水域、农田的斑点噪声效果最好, 其它几种方法也不错。但是对于城镇居民点来说, 密集的建筑群与街道的有序排列, 导致地物散射面的有规则不均匀性(即形成一定的纹理结构), 此时如果 FI 值过大, 意味着该滤波器有过分平滑作用, 从而损害原图象的纹理信息特征, 使其变得模糊不清, 例如中值、均值滤波处理后图象的 FI 值均高出原始图象近一倍, 匀化过度, 城镇居民点影象相当模糊, 远不如原始图象清晰。分析这 2 种处理方法的数学基础, 中值平滑滤波实际上是将当前象元(模板中心象元)值用模板内中值象元值来代替, 这就是说有 $(n-1)/2$ 个象元其数值小于或等于中值, 还有 $(n-1)/2$ 个象元大于或等于中值。如果当前象元正好是噪声, 就能将它滤去, 但若不是噪声且不等于中值, 滤去的就是信息, 而后者出现的概率远大于前者, 因此信息的损失就很难避免。再分析均值平滑滤波, 是以平滑模板中所有象元的均值代替当前象元值, 显然这种简单的平均也肯定会滤去某些有用的高频信息而使图象模糊。因此采用中值和均值滤波处理均会导致城镇影象

纹理信息的损失, 其它几种自适应滤波则是采用调节因子来实现消除或减少斑点噪声, 同时又尽可能保留图象细节, 如城镇纹理等, 所以用自适应滤波法, 城镇影象仍能保持得相当清晰。再从 *ESI* 指数分析, 各种处理方法的 *ESI* 均低于原始图象(均小于 1), 说明进行平滑滤波处理时, 边缘信息必会受到损失, 尤其是中值、均值处理, *ESI* 值仅 0.3—0.6 不等, 边缘信息比原始图象减弱很多。而改良 K—均值自适应滤波法, 无论是水平向或垂直向的 *ESI* 值均最高, 几乎接近于 1, 与原始图象相差无几, 表明采用此法消除斑点噪声时, 边缘信息几乎未受损失。分析改良 K—均值自适应滤波法的数学表达式, 可以看出该滤波器实际上是以当前区域的方差为自适应调节因子, 如果当前区域边缘信息丰富, V_{Loc} 值大, S_f 值也大, 导致 K 值趋小, 参加平滑的象元个数少, 平滑效果弱, 从而可保留边缘信息, 防止滤波后图象模糊; 反之对于低频信息丰富的区域, 平滑效果强, 能较大程度地消除斑点噪声, 最终使影象得到最大程度的改善。仔细对比 5 种方法处理过的新图象与未经处理的原始图象, 上述分析得到有力的验证, 表明采用 *FI* 和 *ESI* 指标来评价现有各种消斑方法效果的优劣切实可行, 改良 K—均值自适应滤波处理得到的图象最佳, 不仅消除斑点噪声的效果不错, 城镇的纹理结构以及许多边缘信息也保持得较好, 是目前最值得推广使用的处理方法(图版 I 图 1)。中值、均值滤波法虽然消斑效果也不错, 但损失纹理信息和边缘信息太多, 特别是城镇影象变得模糊不清, 不符合处理要求。

表 1 不同滤波器消斑效果评价

Table 1 Evaluation of filter systems for SAR data speckle suppression

地物类别	平滑指数 $FI(M/SD)$			边缘保持指数 ESI	
	水体	农地	居民点	水平向	垂直向
原始图象	2.48	3.42	3.00	1.0	1.0
中值滤波(5*5)	5.76	7.69	5.44	0.398	0.383
均值滤波(5*5)	5.00	5.78	5.74	0.444	0.568
Lee 滤波(5*5)	5.06	5.87	5.01	0.890	0.803
Frost 滤波(5*5)	4.98	6.23	4.98	0.901	0.899
改良 K—均值滤波(5*5)	6.02	6.86	3.56	0.992	0.998

随着 ERS、JERS 以及 Radarsat 等雷达卫星的成功入轨, SAR 图象的应用处理, 包括斑点噪声消除等技术必将日益受到普遍关注。笔者期望在推广应用改良 K—均值法的过程中能发展出更好的新方法。

参 考 文 献

- [1] Zhenghao Shi, Ko B. Fung. A Comparison of Digital Speckle Filter. Proceedings of IGRASS94, 1994, 8—12.
- [2] J. S. Lee. Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. Computer Graphic and Image Processing 15, 380—389.
- [3] J. S. Lee. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. IEEE Transactions on

Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980, PAMI-2, (2).

- [4] P. V. Narasimha Rao. An Adaptive Filter for Speckle Suppression in Synthetic Aperture Radar Images. INT. J. Remote Sensing, 1995, 16(5), 877—889
- [5] Thoms. J. Jackson. Hydrology Data Report WASHITA '92. 1993.
- [6] 郭华东. 90年代的星载雷达遥感. 雷达图象分析及地质应用. 北京: 科学出版社, 1991, 144—146.

作者简介

唐伶俐, 女, 1955年7月生, 副研究员。1980年毕业于中国科技大学近代力学系, 曾多次作为访问学者在荷兰、法国、美国等国家进修, 目前主要从事图象处理与应用分析, 发表论文及学术报告30余篇。

Evaluation of Smoothing Filters Suppressing Speckle Noise on SAR Images

Tang Lingli Jiang Ping Dai Changda

(Remote Sensing Satellite Ground Station CAS)

Thomas J. Jackson

(USDA / ARS Hydrology Lab USA)

Abstract Synthetic Aperture Radar (SAR) images are usually corrupted by speckle noise. In order to suppress the speckle noise and improve interpretation of the radar images, smoothing filters have been proposed in the literature. Among them, the most popular are used. Several types of filters are: the average filter, the median filter, the Frost adaptive filter, the Lee adaptive filter. Recently, Rao *et al.* (1995) proposed a new method called the modified K -value adaptive filter. This paper is an intercomparison study of these filters using ERS-1 SAR data of the Washita area in Okalahoma, United States acquired on June 10, 1992. Summaries of these filters are given. Results of applying these filters to the data are evaluated with two quantitative measures. Based on the intercomparison, the most appropriate filter of SAR image speckle noise in this study was the modified K -value adaptive filter.

Key words SAR image, Speckle noise, Smoothing filter