

一种基于修正 Frost 核的 SAR 图像斑点 噪声抑制方法

张朝晖^{1),2)} 潘春洪¹⁾ 马颂德¹⁾

¹⁾(中国科学院自动化研究所模式识别实验室,北京 100080)

²⁾(河北师范大学数学与信息学院计算机科学系,石家庄 050016)

摘要 针对合成孔径雷达(SAR)图像的斑点噪声抑制问题,给出了一种新的基于斑点噪声统计特性的滤波方法。该方法是对 Frost 滤波核的修正,综合考虑滤波窗口内的中心像元以及其他像元的局部统计信息,克服了传统 Frost 滤波器由于等权运算所带来的边缘等结构信息的模糊;同时也弥补了增强型 Frost 滤波器保留过多“假细节”的不足。实验结果表明,该方法在噪声抑制和细节保持方面取得了较好的折衷。

关键词 SAR 图像 斑点噪声 滤波 修正 Frost 核

中图分类号: TP75 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)04-0431-05

SAR Image De-speckling Based on Modified Frost Filter

ZHANG Zhao-hui^{1),2)}, PAN Chun-hong¹⁾, MA Song-de¹⁾

¹⁾(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²⁾(Department of Computer Science, School of Mathematics & Information, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016)

Abstract In this paper, a new filter method is proposed for SAR image de-speckling. As a modified version of Frost filter structure, the given method combines the statistical information from both the central pixel and other pixels within the filter window, therefore it not only avoids over-smoothing of SAR image structural information caused by Frost filter's iso-weighting operation, but also amends the deficiency of "false edges" by enhanced Frost filter. The experimental results confirm the new filter method can efficiently reduce speckle while preserve useful image formation details.

Keywords SAR images, speckle, filter, modified frost filter kernel

1 引言

合成孔径雷达(SAR)技术利用信号的相干性提高图像的空间分辨率,由于其特有的成像机理,使反映地面目标微波散射特性的 SAR 图像存在许多斑点噪声,其严重降低了 SAR 图像的质量,造成了图像的模糊,甚至特征的消失。为了有效地实现 SAR 图像的解译,需要对 SAR 图像进行滤波。SAR 图像的斑点噪声抑制技术通常分成两大类^[1]:多视处理和基于图像处理技术的滤波。多视处理大多发生在 SAR 成像之前,但多视处理过程中斑点噪声的抑制是以牺牲

方位向空间分辨率为代价的。随着 SAR 图像应用的拓展,对高空间分辨率图像的需求不断增加,成像前的多视处理已不能满足要求。因此,以图像处理技术为基础的成像后斑点噪声抑制算法在近 30 年来大量涌现,并已成为 SAR 图像滤波技术的主流。

到目前为止,基于图像处理技术的滤波方法可分成 3 类。第 1 类为传统滤波方法,如:均值滤波、高斯滤波、中值滤波等;第 2 类为不考虑斑点噪声统计特性的自适应滤波,如:Sigma 滤波^[2]、SUSAN 滤波^[3]、Bilateral 滤波^[4]、以及 mean shift 滤波^[5]等;第 3 类为基于斑点噪声统计特性的自适应滤波,如:Lee 滤波^[6]、Kuan 滤波^[7]、Frost 滤波^[8]以及增强型滤波^[9]

收稿日期:2003-10-09;改回日期:2004-09-27

第一作者简介:张朝晖(1969~),女,讲师。2003 于中国科学院自动化研究所获模式识别与智能系统专业博士学位。主要研究方向为图像处理、模式识别等。E-mail:zhangzhaohui_hbed@yahoo.com.cn

等,这类方法虽然可以有效地抑制噪声,但 SAR 图像中的一些有用信息也或多或少地遭到了破坏,或者部分斑点噪声因被误认为有用信息而保留下来。造成上述情况的一个原因就是并没有在滤波器的设计过程中充分考虑滤波窗口内各像元的局部统计信息。

尽管 Huang^[10] 将滤波窗口内中心像元和其他像元的统计信息引入其滤波方法中,但滤波核的设计非常依赖原始图像成像的相关参数。为了在有效抑制斑点噪声的同时,尽量保留 SAR 图像的有用信息,在分析 Frost 滤波器及其增强型的基础上,给出了一种基于滤波窗口内中心像元及窗口内其他像元局部统计信息的自适应滤波方法。

2 方法描述

2.1 Frost 滤波法及其增强型

假定分辨率单元内的地形对微波信号的散射作用是一个渐变的过程^[11],根据 Frost 滤波算法,SAR 图像任意像元 (i,j) 处强度信号观测值 z_{ij} 为

$$z_{ij} = x_{ij}n_{ij} \quad (1)$$

其中, x_{ij} 、 n_{ij} 分别表示像元 (i,j) 处的原始无噪声污染信号及乘性斑点噪声信号。进一步,以 SAR 图像为平稳过程,且滤波器的冲击响应以双边指数函数为前提条件,对于矩形滤波模板 $(2N+1) \times (2M+1)$,得到 Frost 滤波器的输出:

$$x_{ij} = \frac{\sum_{k=i-N}^{i+N} \sum_{l=j-M}^{j+M} z_{kl}w_{kl}}{\sum_{k=i-N}^{i+N} \sum_{l=j-M}^{j+M} w_{kl}} \quad (2)$$

式中, $w_{kl} = \exp(-d_{kl}\sigma_{ij}^2\rho/\mu_{ij}^2)$, d_{kl} 为滤波窗口内像元 (k,l) 与中心像元 (i,j) 的空间距离, ρ 为微调因子, σ_{ij} 及 μ_{ij} 分别是以 (i,j) 为中心的滤波窗口内各像元的强度值标准差以及均值。

根据式(2),Frost 滤波窗口内任意像元 (k,l) 参与滤波运算的权值 w_{kl} 仅与该像元到滤波窗口中心的空间距离有关。因此,在滤波窗口内,尽管其他像元可以具有不同的局部统计特性,但因它们关于中心像元 (i,j) 的空间距离相同,因而它们关于中心像元的滤波运算具有一致的权值。当滤波窗口对应非均质区域时,这种基于等权运算的平滑作用必然会破坏图像原有的结构信息。

对于增强型 Frost 滤波器,尽管滤波窗口内各像元参与运算的权值在计算上有所调整,但系数的调

整过多依赖滤波窗口中心像元的统计特性,而未考虑滤波窗口内其他像元的局部统计信息,其滤波结果往往包含着一些残留噪声信号因误认为细节特征而造成的“假细节”等现象。

2.2 修正的 Frost 算法

上一小节,简单介绍了 Frost 滤波器以及增强型滤波器,并分析了它们的不足。为克服上述不足,综合考虑滤波窗口内各像元的局部统计信息,给出了一种基于修正 Frost 核的 SAR 图像斑点噪声抑制方法。为便于描述,以方形窗口为例,即 $N=M=N_1$ 时,得到与式(2)类似的滤波器输出:

$$x_{ij} = \frac{\sum_{k=i-N_1}^{i+N_1} \sum_{l=j-N_1}^{j+N_1} z_{kl}m_{kl}}{\sum_{k=i-N_1}^{i+N_1} \sum_{l=j-N_1}^{j+N_1} m_{kl}} \quad (3)$$

式中, m_{kl} 为滤波窗口内 (k,l) 处像元灰度值 z_{kl} 参与运算的权值,表示为

$$m_{kl} = \alpha_{kl}w_{kl} = \alpha_{kl}\exp(-\rho d_{kl}\beta_{ij}) \quad (4)$$

其中, α_{kl} 为修正因子, β_{ij} 为基于窗口统计特性的自适应因子。

定义任意像元 (i,j) 处、 $(2N_2+1) \times (2N_2+1)$ 邻域内乘性斑点噪声的局部均值和标准差分别为

$$\mu_{ij} = \frac{1}{(2N_2+1)^2} \sum_{k=i-N_2}^{i+N_2} \sum_{l=j-N_2}^{j+N_2} z_{kl} \quad (5)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{(2N_2+1)^2 - 1} \sum_{k=i-N_2}^{i+N_2} \sum_{l=j-N_2}^{j+N_2} (z_{kl} - \mu_{ij})^2} \quad (6)$$

假定各分辨率单元对应成像区域为局部均质地形,则关于像元 (i,j) 的 $(2N_2+1) \times (2N_2+1)$ 邻域内,乘性斑点噪声的局部偏差为

$$c_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\mu_{ij}} \quad (7)$$

c_{ij} 值越高, (i,j) 邻域对应成像区域的地形越有可能存在边缘等结构性特征。若取 $\alpha_{kl} = 1$, $\beta_{ij} = c_{ij}$,则式(3)即为 Frost 滤波器的输出。

为了充分利用滤波窗口内各像元局部统计信息,根据文献[12],定义以输入图像任意像元 (i,j) 为中心的 $(2N_3+1) \times (2N_3+1)$ 窗口内各像元 (k,l) 处斑点噪声局部偏差 c_{kl} 的均值,即 (i,j) 处的局部噪声指数(speckle index)为

$$S_{ij} = \frac{1}{(2N_3+1)^2} \sum_{k=i-N_3}^{i+N_3} \sum_{l=j-N_3}^{j+N_3} c_{kl} \quad (8)$$

类似,得到以 (i,j) 为中心的滤波窗口内关于各像元

(k, l) 局部偏差 c_{kl} 的统计偏差:

$$\sigma_{c_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{(2N_3 + 1)^2 - 1} \sum_{k=i-N_3}^{i+N_3} \sum_{l=j-N_3}^{j+N_3} (c_{kl} - S_{ij})^2} \quad (9)$$

当 N_3 足够大 ($N_3 \geq N_1 \geq 1$) 时,用 S_{ij} 、 $\sigma_{c_{ij}}$ 表示以 (i, j) 为中心的、包含 $(2N_1 + 1) \times (2N_1 + 1)$ 大小滤波窗口所在区域的统计特性。

在此,引入两个参数,用于描述 $(2N_1 + 1) \times (2N_1 + 1)$ 大小滤波窗口对应成像区域的地形类型,分别定义为 $k_0 = S_{ij}$, $k_1 = S_{ij} + \sigma_{c_{ij}} \lambda$, 其中, λ 为适用于整个图像的微调常量,通常 $\lambda = 1, 2$ 。

对于像元 (i, j) 的 $(2N_1 + 1) \times (2N_1 + 1)$ 邻域,若 $c_{ij} \leq k_0$, 则为均质区;否则,该区域存在边缘、孤立点等图像的结构性特征。因此,关于滤波窗口噪声统计特性的自适应因子 β_{ij} 可定义为

$$\beta_{ij} = \begin{cases} \frac{c_{ij} - k_0}{k_1 - k_0} & \text{若 } c_{ij} > k_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

考虑滤波窗口内各像元 (k, l) 与窗口中心 (i, j) 所在邻域的对应地形类型的相似性,引入关于 z_{kl} 的权值修正因子

$$\alpha_{kl} = \begin{cases} 1 & |c_{kl} - c_{ij}| \leq \lambda_1 \sigma_{c_{kl}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中, λ_1 为用户指定的常量, $\lambda_1 = 1, 2$ 。

于是,得到滤波器的最终输出:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \frac{\sum_{k=i-N_1}^{i+N_1} \sum_{l=j-N_1}^{j+N_1} z_{kl} m_{kl}}{\sum_{k=i-N_1}^{i+N_1} \sum_{l=j-N_1}^{j+N_1} m_{kl}} \\ &= \frac{\sum_{k=i-N_1}^{i+N_1} \sum_{l=j-N_1}^{j+N_1} z_{kl} \alpha_{kl} \exp(-\rho d_{kl} \beta_{ij})}{\sum_{k=i-N_1}^{i+N_1} \sum_{l=j-N_1}^{j+N_1} \alpha_{kl} \exp(-\rho d_{kl} \beta_{ij})} \quad (12) \end{aligned}$$

从上式可以看出,图像中每个像元 (i, j) 处的滤波值是由滤波窗口内各像元的局部统计特性共同决定的,借助局部噪声指数 S_{ij} 的统计信息,可区分图像中的均质区、边缘等结构性特征,进而,根据滤波窗口内其他像元的局部统计特性与中心像元的相似性,调整它们参与滤波运算的权值,不仅可以较好地抑制斑点噪声,而且又可以保留更多有用的细节信息。

2.3 计算流程

滤波算法的计算流程具体如下:

(1) 输入 SAR 图像 z_{ij} , 定义模板参数 N_1 、 N_2 、

N_3 , 从而确定:滤波窗口大小 $(2N_1 + 1) \times (2N_1 + 1)$ 、用于估计图像的任意像元局部均值及方差的邻域 $(2N_2 + 1) \times (2N_2 + 1)$ 、以及用于估计图像中各像元局部噪声指数的邻域 $(2N_3 + 1) \times (2N_3 + 1)$ 。

(2) 对于输入图像的任意像元 (i, j) , 按照式(3)~式(7)分别计算局部均值、局部偏差以及斑点噪声局部偏差: μ_{ij} 、 σ_{ij} 、 c_{ij} 。

(3) 按照式(9)、式(10)分别估计输入图像任意像元 (i, j) 处的局部噪声指数以及斑点噪声统计偏差: S_{ij} 、 $\sigma_{c_{ij}}$ 。

(4) 根据设定的阈值,估计参数 k_0 、 k_1 。

(5) 按照式(10)、式(11)分别估计 (i, j) 处的自适应因子 β_{ij} 及滤波窗口内各像元 (k, l) 处的权值修正因子 α_{kl} 。

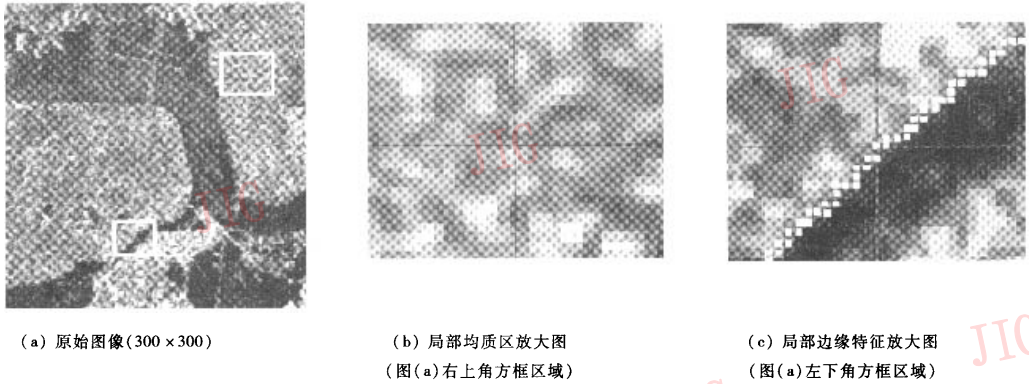
(6) 按照式(12)确定滤波器输出 x_{ij} 。

3 实验结果与分析

选取了 ERS-1 卫星获取的 SAR PRI 图像。分别将 Frost 滤波器、增强型 Frost 滤波器以及本文的滤波方法用于图 1(a) 所示的 SAR 图像,得到图 2 所示的滤波结果,其中,在本文的滤波方法中,分别取 $N_1 = 7$ 、 $N_2 = 3$ 、 $N_3 = 7$ 且 $\lambda = 2$ 、 $\lambda_1 = 1$ 。

从目视效果看,经过 Frost 滤波后的图像过于平滑,相对于原始图像来说,损失了更多有用的细节信息;经过增强型 Frost 滤波后的图像,虽然保留了图像中边缘等结构特征,但在图像中的均质区域也残留了过多的斑点;而利用本文滤波方法得到的图像,不仅均质区得到了较好的平滑,而且,图像的边缘、细节等结构性的特征与原始图像最为接近。

进一步,在原始图像中选择了均质区和代表图像结构特征的边缘(如图 1(b)及图 1(c)),并引入了几个定量评价指标,分别用以衡量各种滤波器在噪声抑制、均质区域平滑、边缘保持等方面的特性。噪声指数 SPI^[12] 用来衡量滤波前后图像斑点噪声的存在情况,滤波后图像的噪声指数越低,表明该滤波器对图像中斑点噪声的整体抑制作用越强烈;相对平滑指数 RSI^[13] 主要用来定量估计滤波器对图像均质区的平滑作用,理论上,该参数不低于 1,愈接近 1,它的平滑作用愈微弱,RSI 愈高,滤波器的平滑作用愈强烈;边缘保持指数 ERI^[14] 是滤波器关于图像边缘保持能力的评价指标,理论上,ERI 不高于 1,它愈接近 1,滤波器的边缘保持能力越强;ERI 越低,滤波器对图像边

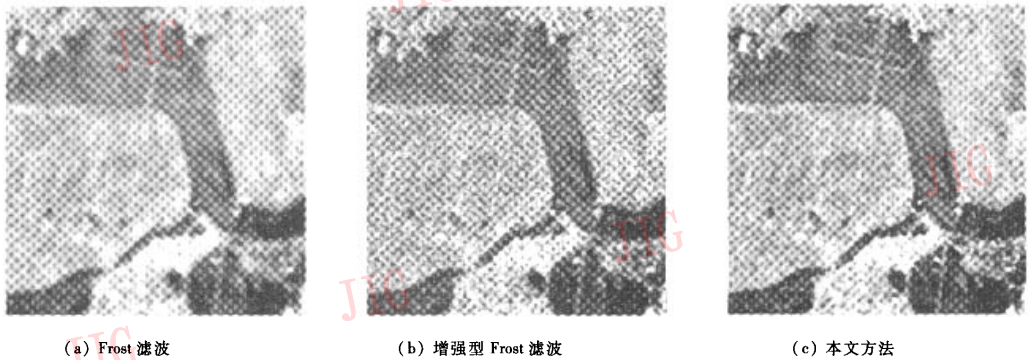


(a) 原始图像 (300 × 300)

(b) 局部均质区放大图
(图(a)右上角方框区域)(c) 局部边缘特征放大图
(图(a)左下角方框区域)

图 1 原始 ERS SAR PRI 图像

Fig.1 The original images of ERS SAR PRI



(a) Frost 滤波

(b) 增强型 Frost 滤波

(c) 本文方法

图 2 基于 Frost 核的滤波算法比较 (7 × 7)

Fig.2 Comparison of filter algorithms based on Frost kernel (7 × 7)

缘特征的“污染”作用越强。最后,按照滤波器有关指标的定义^[12-14],可计算出 Frost 滤波、增强型 Frost 滤波以及本文方法的性能指标,如表 1 所示。

表 1 不同滤波方法的性能比较

Tab.1 Performance comparison of different filter methods

| 滤波器的评价指标 | 噪声指数 SPI | 相对平滑指数 RSI | 边缘保持指数 ERI |
|---------------|----------|------------|------------|
| 原始图像 | 0.404 8 | - | - |
| Frost 滤波器 | 0.141 4 | 2.707 0 | 0.659 |
| 增强型 Frost 滤波器 | 0.322 2 | 1.064 0 | 0.737 |
| 本文方法 | 0.209 1 | 2.562 1 | 0.810 |

由表 1 可知,相对于原始图像,3 种滤波器的噪声指数均有明显下降,其中,Frost 滤波器的噪声指数下降幅度最大,而增强性 Frost 滤波器的下降幅度最小。对于均质区的平滑作用,按照 RSI 值由大到小依次为 Frost 滤波、本文方法、增强型 Frost 滤波;关于滤波器的边缘保持能力,由强至弱依次为本文

方法、增强型 Frost 滤波、Frost 滤波器。

由于滤波窗口内各像元参与滤波运算的权值仅取决于它与中心像元的空间距离,而与滤波窗口对应的地形区域无关,因此,Frost 滤波器的平滑作用是盲目的;增强型 Frost 滤波器则是将斑点噪声引起图像强度的亮暗变化视为图像的细节,因而,其关于均质区的平滑作用最为微弱,而且,在边缘保持方面强于 Frost 滤波器;不同于上述两种滤波器,本文方法综合考虑滤波窗口内各个像元的局部统计特性、以及它们与中心像元邻域内的一致性,不仅可以有效地抑制均质区的噪声,而且很好地保留了图像的边缘等结构性的细节。

4 结 论

事先给定图像的任何成像参数,综合考虑滤波

窗口的中心像元及其他像元邻域的局部统计信息,实现了有效抑制 SAR 图像斑点噪声的滤波方法。关于 ERS-1 SAR 图像的滤波实验结果表明,该滤波方法一方面克服了由于 Frost 滤波器等权运算所造成的边缘或结构信息的模糊,尽可能地保留了图像的细节信息;另一方面,也克服了增强型 Frost 滤波器过多保留“假细节”的不足,有效地抑制了图像的斑点噪声。因而,相对于 Frost 滤波器和增强型 Frost 滤波器来说,该方法在噪声抑制和细节保持两方面取得了较好的折衷。

参考文献 (References)

- 1 Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar system and signal processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- 2 Lee J S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1983, 13(1): 85 ~ 89.
- 3 Smith S M, Brady J M. SUSAN-a new approach to low level image processing [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45 ~ 78.
- 4 Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [A]. In: Proceedings of Sixth International Conference on Computer Vision[C]. Bombay, India, 1998: 839 ~ 846.
- 5 Comanicu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 1 ~ 18.
- 6 Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(2): 165 ~ 168.
- 7 Kuan D T, Sawchuk A. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(2): 165 ~ 177.
- 8 Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(2): 157 ~ 165.
- 9 Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1990, 28(6): 92 ~ 100.
- 10 Huang Y, Genderen J L, Veen B S. The ITC filter: a new adaptive filter for SAR speckle reduction [A]. In: Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition [C], San Francisco, USA, 1997.
- 11 Touzi R. A protocol for speckle filtering of SAR images [A]. In: Proceedings of Committee on Earth Observing Satellites [C], Toulouse, France, 1999.
- 12 Crimmins T R. Geometric filter for reducing speckle [J]. Optical Engineering, 1986, 25(6): 651 ~ 654.
- 13 Zhang Chao-hui. Study on Automatic Registration of Multi-Sensor Satellite Images [D]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2003. [张朝晖. 多传感器卫星图像配准技术的研究[D]. 北京:中国科学院自动化研究所, 2003.]
- 14 Guo Hua-dong, et al. Theory and applications of radar earth observation [M]. Beijing: Science Press, 2000. [郭华东等. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2000.]