

星载 SAR 图像的斑点噪声抑制与滤波研究

周建民 ,何秀凤

(河海大学卫星及空间信息应用研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 根据斑点噪声的来源 ,分析和比较了抑制 SAR 图像斑点噪声的 Lee 滤波、Gamma MAP 滤波、Frost 滤波算法 ,并用台湾地区的 SAR 图像数据验证了不同滤波算法对斑点噪声的抑制效果 .结果表明 ,Lee 滤波抑制斑点噪声的综合性能最好 .

关键词 合成孔径雷达 ;SAR 图像 ;斑点噪声 ;滤波技术 ;干涉测量

中图分类号 :TP79 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2006)02-0189-04

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar ,SAR)是 20 世纪 50 年代研制成功的一种利用微波的主动式传感器 ,它不受光照和天气条件的限制 ,具有全天时、全天候、多视角、多俯角的数据获取能力和对一些地物的穿透能力 .与其他传感器获取的图像相比 ,SAR 能获得更多观测目标的信息 ,包括目标的细节、大小和特征等 .由传统的 SAR 技术与干涉测量技术相结合发展起来的合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR) ,是通过 2 部保持某一恒定距离且相互独立的 SAR 天线 ,分别对地面的同一区域进行成像 ,得到 2 幅满足一定相干条件的 SAR 图像 ,经干涉处理来获得数字高程模型(DEM)的 .而差分干涉测量(D-InSAR)是 InSAR 技术的进一步扩展 ,可以对地球表面进行形变监测 ,精度可达 cm 级甚至更高^[1] .

类似于其他的相干测量系统 ,合成孔径雷达的成像过程会受到斑点噪声的影响 .斑点噪声是由一个分辨单元内众多散射体的反射波叠加形成的 ,表现为图像灰度的剧烈变化 ,即在 SAR 图像同一片均匀的粗糙区域内 ,有的分辨率单元呈亮点 ,有的呈暗点 ,直接影响了 SAR 图像的灰度分辨率 ,隐藏了 SAR 图像的细节部分 ,从而给 SAR 图像的解译和定量化应用带来很大困难 ,这是雷达遥感和数字信号处理领域长期以来讨论的课题 .当图像像素间距与雷达分辨率相当时 ,噪声功率是非相关的 .Goodman 等证实^[2] ,SAR 图像斑点噪声可模型化为一种乘性噪声 ,这为后续研究奠定了理论基础 .

由于斑点噪声的存在直接影响干涉测量技术的顺利实施 ,因此作为前期处理工作的斑点噪声的抑制与滤波非常重要 .对斑点噪声抑制技术的研究一直是 InSAR 成像技术的热点 .目前斑点噪声的抑制技术主要可以分为 2 大类 ,即成像之前的多视处理技术和成像后的滤波技术 .前者用多视平均的方法 ,以空间分辨率降低 N 倍为代价提高 $N/2$ 倍的信噪比 ;后者可分为空间滤波技术和频域滤波技术 2 个分支 ,其中以空间滤波技术为基础的斑点噪声抑制算法结果较理想 ,近几年成为雷达图像斑点噪声抑制技术的主流 .在众多空间滤波算法中 ,通常采用统计学方法利用局部统计信息估计去除斑点噪声后的数据 ,此外 ,也可以采用正交变换 ,如多项式变换等 ,将乘性噪声模型转化为加性噪声模型进行滤波 .本文分析比较了抑制 SAR 图像斑点噪声的几种经典算法 ,并用实验数据验证了不同滤波算法对斑点噪声的抑制效果 .

1 SAR 图像斑点噪声

1.1 斑点噪声的物理描述

由于雷达发出的是单色的相干波 ,因此由 2 个或 2 个以上频率相同、振动方向相同、相位差恒定的相干电磁波在空间叠加 ,合成振幅为各个波振幅的矢量和^[3]时 ,会出现交叠区某些地方振动加强 ,某些地方振动减弱或完全抵消的现象 ,称之为干涉 .相干成像包括 2 方面^[4] (a)雷达干涉测量的出发点 (b)雷达影像因此

而产生相干波成像固有的问题——斑点噪声.较之其他来源的噪声,斑点噪声更难有效去除.雷达的分辨率不足以使1个分辨单元对应于1个微散射体,因而在1个分辨单元内实际包含许多微散射体.雷达图像上每个像素的信号实际上是这些电磁波与微散射体相互之间加强或减弱作用的集成,在影像中以斑点的形式表现出来.

1.2 斑点噪声的数学表达

根据 SAR 图像是乘性噪声模型的假设^[2],斑点噪声可表示为非相关的乘性噪声,则 SAR 图像观测数据可表示为^[3]

$$g = fn \tag{1}$$

式中: g ——观测数据; f ——去除斑点噪声后的数据; n ——与 f 相对独立的斑点噪声随机变量.由于斑点噪声由回波信号中均值为0、标准差与图像场景无关的随机相位干扰产生,因此服从均值 μ 为1、方差为 σ_u^2 的指数分布^[5].在单视数时,可计算出其标准差 σ_u 的理论值约为0.5227,相对标准差 $R_V = 0.5227$.在多视数条件下,随着有效视数 L_E 的增加,斑点噪声趋于高斯分布,标准差 σ_u 仅与图像视数有关,则相对标准差^[3]

$$R_V = \frac{\sigma_u}{\mu} = \frac{\sigma_u}{\sqrt{L_E}} = \frac{0.5227}{\sqrt{L_E}} \tag{2}$$

1.3 斑点噪声的统计特性

单视图像的斑点噪声幅度 A 服从高斯分布,亮度 u 服从指数分布,则对于亮度,分布函数可写成

$$P(u) = \frac{1}{\bar{u}} e^{-u/\bar{u}} \tag{3}$$

式中 $\bar{u}$ 为 u 的均值.

实际上最终获得的 SAR 图像像素代表场景的反射强度,图像亮度可写成

$$I(t) = R(t)U(t) \tag{4}$$
$$t = (x, y)$$

式中: t ——图像上一点; $R(t)$ ——理想图像亮度,反映了目标的反射特性; $u(t)$ ——降质模型. $U(t)$ 与 $R(t)$ 统计独立.

2 几种消除 SAR 图像斑点噪声的滤波算法

2.1 Frost 滤波

Frost 滤波认为,目标的反射特性可以通过观察图像与系统脉冲响应的卷积来估计,则滤波公式为

$$m(t) = \exp(-KC_I^2(t_0)|t|) \tag{5}$$

式中: K ——常数; t_0 ——被处理的像素点; $C_I(t_0)$ ——标准方差.可以看出,当 $C_I(t_0)$ 很小时, $m(t)$ 相当于一个低通滤波器,可以很好地平滑掉均匀场景的噪声;当 $C_I(t_0)$ 很大时, $m(t)$ 趋向于保持原来观察的像素值.

2.2 Lee 滤波

在 Lee 滤波方法中,乘性噪声经过对数交换可以近似为线性模型.根据最小均方误差准则,可得到 Lee 滤波器公式

$$\hat{R} = \tilde{I}(t) + (I(t) - \tilde{I}(t))W(t) \tag{6}$$
$$W(t) = 1 - \frac{C_U^2}{C_I^2}$$

式中: $\tilde{I}(t)$ —— $I(t)$ 的均值; $W(t)$ ——权函数; $C_I(t)$, $C_U(t)$ —— $U(t)$, $I(t)$ 的标准方差.

2.3 Gamma MAP 滤波

应用最大后验概率(MAP)滤除斑点噪声,必须知道影像概率密度函数 pdf 的先验知识.通过假设影像 pdf 的 Gamma 分布,可得 Gamma MAP 滤波器为

$$\hat{R}(t_0) = \begin{cases} \tilde{I}(t_0) & C_I(t_0) < C_U \\ \frac{(\alpha - L - 1)\tilde{I}(t_0) + \sqrt{(\alpha - L - 1)^2\tilde{I}(t_0)^2 + 4\alpha\tilde{I}(t_0)}}{2\alpha} & C_U \leq C_I(t_0) \leq C_{\max} \\ \tilde{I}(t_0) & C_I(t_0) > C_{\max} \end{cases} \tag{7}$$

$$C_{\max} = \sqrt{2} C_U \quad \alpha = \frac{1 + C_U^2}{C_I^2 - C_U^2} \quad C_U = \frac{1}{\sqrt{L}} \quad C_I = \sqrt{\frac{V}{I}}$$

式中： L ——视数； V ——滤波窗口内方差； I ——滤波窗口内的均值。对于幅度图像，滤波窗口内的每一个像元灰度值取平方，滤波后的结果取平方根。

本文介绍的都是空域中进行的滤波。如果先将原始图像进行傅立叶变换，在其频域内根据斑点噪声和信号的频谱特性进行滤波，即为频域滤波。然而傅立叶变换要花费较多的时间，而且有些图像会产生低频干涉效应^[6]，因此，傅立叶变换只适合平稳信号。近年来，傅立叶变换已逐渐被兴起的小波变换所取代。Giusto 等^[7]提出了一种基于小波变换和多尺度分析的滤波方法，即先将原始图像进行对数变换，再进行小波分解（水平，垂直方向）。在每一级上有低频图像 SLL 和 3 个高频图像 SLH、SHL、SHH，这 3 个高频图像代表了水平边缘、竖直边缘和对角边缘信息。处理时对 SLL 进行低通滤波去除噪声，再加上 SLH、SHL、SHH 提供的边缘信息，就可以在滤除斑点噪声的同时保持边缘信息。

本文采用 SAR 图像数据，分别利用 Lee 滤波、Gamma MAP 滤波、Frost 滤波算法对星载 SAR 图像斑点噪声进行研究。选取台湾地区一幅 ERS-2 卫星的 SAR 图像，其经纬度为 91.13°E、36.31°N。将试验结果取同一局部，尺寸为 256 像素 × 256 像素，如图 1 ~ 图 4 所示。评价斑点噪声滤波效果必须同时考虑目视效果、去斑点噪声能力和保持图像边缘、细节能力等 3 个方面。综合评价一个斑点噪声滤波器的主要指标有均值（ μ ）、相对标准差（ R_V ）和有效视数（ L_E ）。均值反映的是图像灰度的集中程度，滤波前后均值应保持不变；相对标准差反映了图像灰度动态变化的范围，在保持均值不变的前提下，相对标准差越小，越有利于 SAR 图像的分割与分类等后续应用^[8]；有效视数 L_E 反映了去除斑点噪声的能力，在综合考虑前 2 个指标的前提下， L_E 越大，去斑点噪声的能力越强。

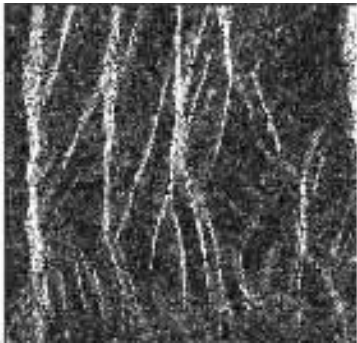


图 1 原始图像

Fig.1 Original image

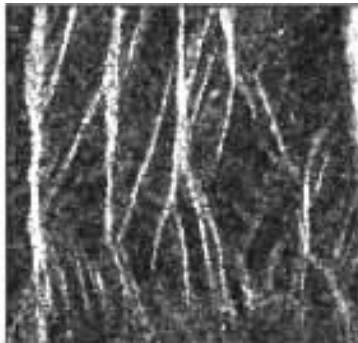


图 2 Lee 滤波

Fig.2 Result of Lee filtering

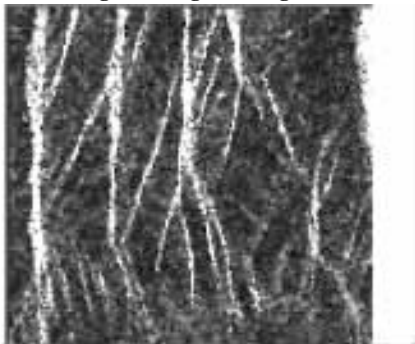


图 3 Gamma MAP 滤波

Fig.3 Result of Gamma MAP filtering

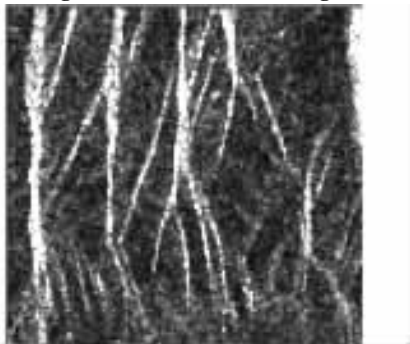


图 4 Frost 滤波

Fig.4 Result of Frost filtering

3 结果及分析

相对标准差可用式(2)来计算完成。有效视数又称等效视数，其计算公式为

$$L_E = \frac{\mu^2}{\sigma^2} \tag{8}$$

式中 μ 、 σ^2 分别为图像均值、方差。

试验中各算法去除斑点噪声能力的评价指标见表 1。从表 1 可以看出, Frost 滤波均值保持最好, 有效视数最大, 说明图像边缘细节保持较好, 去斑点噪声的能力较强, 但是其相对标准差最小, 反映图像灰度动态范围较小, 图像细节损失较多, 不利于 SAR 图像的分割与分类。Gamma MAP 滤波均值偏离原图最远, 有效视数和相对标准差都不是很理想, 滤波效果不明显。Lee 滤波均值保持较好, 有效视数中等, 相对标准差与原始图像最为接近, 说明图像的细节既得到很好保留, 图像的斑点噪声也得到有效的抑制, 并且利于 SAR 图像的分割与分类。综合表 1 中 3 个评价指标, Lee 滤波抑制斑点噪声的综合性能最好。

表 1 不同滤波方法去除斑点噪声能力比较

Table 1 Comparison of effects of different methods on speckle noise removal

算 法	均值	有效视数	相对标准差
原始图像	794	1.09	0.96
Lee 滤波	786	1.87	0.73
Gamma MAP 滤波	758	1.49	0.72
Frost 滤波	789	1.99	0.71

致谢 感谢香港理工大学丁晓利教授和东南大学章国宝教授提供的 SAR 数据和给予的帮助。

参考文献：

[1] 周建民,何秀凤. SAR 差分干涉测量技术及其在地表形变监测中的应用现状[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2005, 33(4): 463-465.

[2] 李小玮,孙洪,管鲍,等. 合成孔径雷达图像统计滤波降噪方法[J]. 武汉大学学报 理学版, 2002, 48(1): 94-98.

[3] FUKUDA S,HIROSAWA H. Suppression of speckle in synthetic aperture radar images[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(3): 507-519.

[4] 廖明生,林琨. 雷达干涉测量学:原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社, 2003: 8-10.

[5] 徐新,廖明生,卜方玲. 一种基于相对标准差的 SAR 图像 Speckle 滤波方法[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 214-218.

[6] LIM J S,NAWAB H. Techniques for speckle noise removal[J]. Proc SP IE, 1980, 243(1): 272-278.

[7] 胡召玲,郭达志,盛业华. 利用小波变换抑制星载 SAR 图像的斑点噪声[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(3): 229-232.

[8] 卜方玲,徐新. 一种基于小波分析的 SAR 图像斑点噪声滤波算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2001, 26(4): 315-330.

Speckle noise suppression and filtering methods for spaceborne SAR images

ZHOU Jian-min, HE Xiu-feng

(Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract According to the sources of speckle noises, different methods for speckle noise suppression, including Lee filtering, Gamma MAP filtering, Frost filtering, were analyzed and compared. With the data of spaceborne SAR images of Taiwan, the effects of speckle noise suppression of different filtering methods were validated, and the result shows that the performance of Lee filter is the best of all the three methods.

Key words synthetic aperture radar; SAR image; speckle noise; filtering technology; InSAR