

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0470-05

SAR 图像斑点噪声抑制的本质

韩春明, 郭华东, 王长林

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 合成孔径雷达(SAR)图像的斑点噪声阻碍 SAR 的应用。在过去 20 多年中,提出了许多 SAR 图像去除斑点噪声方法。虽然每种去除斑点噪声方法都能有效去除斑点噪声,但都不同程度地损失了图像的边缘信息。本文首先以数学物理的观点描述了 SAR 图像斑点噪声抑制问题。其次分析了斑点噪声的统计特性和几种典型的去除斑点噪声方法并进行了简单的比较。在最后研究了 SAR 图像斑点噪声抑制的本质。这对开发既能有效去除斑点噪声,又能有效保持边缘信息的去除噪声方法十分重要。

关键词: SAR; 斑点噪声

中图分类号: TP751.1/TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

每一时刻,合成孔径雷达发射的相干电磁波照射的地表单元包含了大量随机分布的散射体,这一单元总的回波是各散射体反射的电磁波的相干叠加,使 SAR 图像出现随机分布的黑白斑点,这被称为斑点(Speckle)噪声^[1]。合成孔径雷达图像的斑点噪声阻碍了合成孔径雷达图像的校正和解译。因此,在大多数的实际应用中,去除斑点噪声是我们追求的首要目标^[2]。

在过去的二十多年中,人们提出了许多去除斑点噪声方法。这些方法基本上能被分为两大类^[3]。第一类是多视处理,即平均同一区域的几个视(look)。多视处理相当于图像的低通滤波。这个方法简单有效,能够有效地抑制斑点噪声,但降低了图像的空间分辨率、模糊了图像的边缘^[4]。第二类技术是在图像生成之后平滑斑点噪声,此类技术都是基于数字图像处理技术,而这些技术基本上又可以分为两大类:一类是基于合成孔径雷达图像斑点噪声统计特性的滤波算法,如 Lee 滤波^[5], Kuan 滤波^[6], Frost 滤波^[7], Gamma Map 滤波^[8]等;另一类不是基于合成孔径雷达图像局域统计特性的滤波算法,如均值滤波以及基于小波技术的滤波技术。这

些方法的主要目的是在减少斑点噪声的同时又不破坏图像的空间分辨率以及纹理、边缘等信息。但测试表明这些方法总是在去除斑点噪声和保持有用信息之间的折衷^[4]。此外还有多极化、多波段合成孔径雷达图像去除斑点噪声技术(在本文不讨论)。

本文首先提出了 SAR 图像斑点噪声抑制的数学物理描述。其次介绍了斑点噪声的统计特性,再次分析了最常用的去除斑点噪声的方法: Frost 方法、Lee 方法、Kuan 方法、Gamma MAP 方法,以及均值滤波、基于小波技术的滤波技术和 Han 等^[9]非模型方法并进行了简单的比较,最后研究了抑制 SAR 图像斑点噪声的本质。

2 SAR 图像斑点噪声抑制的数学物理描述

带有斑点噪声的 SAR 图像用 $I(t)$ 表示,图像的真实值用 $R(t)$ 表示, $u(t)$ 为非高斯的随机噪声, $t = (x, y)$ 为空间坐标,则图像可表示为

$$I(t) = R(t) \cdot u(t)$$

从合成孔径雷达图像可以得到 $I(t)$,事实上要得到的是 $R(t)$ 。从 $I(t)$ 得到 $R(t)$ 在数学物理上是一个反问题。反问题一般是通过正问题来求解。由于 $u(t)$ 是一个随机变量,对某一确定 t 无法知道 $u(t)$ 的确定值,所以很难直接精确求得 $R(t)$ 的真实值。

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49989001), 国家 863 计划课题(2001AA132040) 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-312)。

作者简介: 韩春明(1971—),男,现在中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室攻读博士学位,主要研究方向为雷达图像处理。

但在同质区域,因为 $R(t)$ 为常数,还能得到 $R(t)$ 的真实值。

邻近的 n 个像元

$$\begin{cases} I(t_1) = R(t_1) \cdot u(t_1) \\ I(t_2) = R(t_2) \cdot u(t_2) \\ \dots\dots\dots \\ I(t_n) = R(t_n) \cdot u(t_n) \end{cases} \quad (2)$$

将方程组(2)各个方程两边分别相加可得

$$I(t_1) + I(t_2) + \dots\dots + I(t_n) = R(t_1) \cdot u(t_1) + R(t_2) \cdot u(t_2) + \dots\dots + R(t_n) \cdot u(t_n) \quad (3)$$

如果在同质区域, $R(t)$ 是一个常数,即 $R(t_1) = R(t_2) = \dots\dots = R(t_n) = R$ 由方程(3)可得

$$R = \frac{(I(t_1) + I(t_2) + \dots\dots + I(t_n))}{(u(t_1) + u(t_2) + \dots\dots + u(t_n))} = \bar{I}(t) / \bar{u}(t) \quad (4)$$

从方程(4)可见,只要知道了同质区域噪声 $u(t)$ 的均值,也就得到了同质区域的地物真实值 R 。在非同质区域,如边缘和纹理的区域 SAR 图像的真实值 $R(t)$ 变化比较大,求解 $R(t)$ 很困难。

3 衰落的统计特性^[10]

由于得不到地物微观结构(相对微波的波长)的详细信息,只能研究斑点噪声的统计特性。假设扩展面目标有 N_s 个散射体,设第 i 个散射体反射电磁波产生的电压值为

$$V_i e^{j(\omega t + \theta_i)} \triangleq V_i e^{j\theta_i} \quad (5)$$

式中 V_i 为幅值, $\theta_i = \omega t + \theta_i$ 为瞬时相位值。于是,由 N_s 个散射体产生的瞬时电压为

$$V = \sum_{i=1}^{N_s} V_i e^{j\theta_i} = V_e e^{j\theta} \quad (6)$$

对 V 进行分解

$$\begin{aligned} V_x &= V_e \cos \theta = \sum_{i=1}^{N_s} V_i \cos \theta_i \\ V_y &= V_e \sin \theta = \sum_{i=1}^{N_s} V_i \sin \theta_i \end{aligned} \quad (7)$$

当 N_s 足够大到使中心极限定理成立时, V_x 和 V_y 符合正态分布,其均值为

$$\begin{aligned} \langle V_x \rangle &= \sum_{i=1}^{N_s} \langle V_i \cos \theta_i \rangle \\ \langle V_y \rangle &= \sum_{i=1}^{N_s} \langle V_i \sin \theta_i \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

对随机相位散射体来说,假定 V_i 和 θ_i 均为独立随机变量,其中 θ_i 在 0 到 2π 之间均匀分布,于是(8)式

变为

$$\langle V_x \rangle = \sum_{i=1}^{N_s} \langle V_i \cos \theta_i \rangle = \sum_{i=1}^{N_s} \left[\langle V_i \rangle \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos \theta_i d\theta_i \right] = 0 \quad (9)$$

$$\langle V_y \rangle = \sum_{i=1}^{N_s} \langle V_i \sin \theta_i \rangle = \sum_{i=1}^{N_s} \left[\langle V_i \rangle \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \theta_i d\theta_i \right] = 0$$

另外, $\langle V_x V_y \rangle = 0$, 意味 V_x 和 V_y 不相关,在正态分布的随机变量的条件下,这同样意味着互相独立,因此可以写出 V_x 和 V_y 的正态分布联合概率密度函数

$$p(V_x, V_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(V_x^2 + V_y^2)/2\sigma^2} \quad (10)$$

将(10)式变换到极坐标变量 V_e 和 θ 中可得

$$p(V_e, \theta) = \frac{V_e}{2\pi\sigma^2} e^{-V_e^2/2\sigma^2} \quad (11)$$

$$0 \leq V_e \leq \infty, 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

V_e 和 θ 的独立概率密度函数为

$$p(V_e) = \int_0^{2\pi} p(V_e, \theta) d\theta = \begin{cases} \frac{V_e}{\sigma^2} e^{-V_e^2/2\sigma^2} & V_e \geq 0 \\ 0 & V_e < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$p(\theta) = \int_0^{\infty} p(V_e, \theta) dV_e = \frac{1}{2\pi} \quad (13)$$

假设检波的包络功率是从 1 欧姆电阻上取得,则包络电压预包络功率具有如下关系式:

$P = V_e^2$ 微分关系为 $dP = 2V_e dV_e$ 可将(12)的电压分布变换为功率分布

$$p(P)dP = p(V_e dV_e) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-P/2\sigma^2} dP \quad (14)$$

上式为指数分布。其平均值为 $\bar{P} = \overline{V_e^2} = 2\sigma^2$ 带入(14)可得功率的概率密度函数

$$p(P) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{P}} e^{-P/\bar{P}} & P \geq 0 \\ 0 & P < 0 \end{cases} \quad (15)$$

功率的二阶矩为

$$\overline{P^2} = \int_0^{\infty} \frac{P^2}{\bar{P}} e^{-P/\bar{P}} dP = 2\bar{P}^2$$

从而得到方差

$$\sigma_p^2 = \overline{P^2} - \bar{P}^2 = \bar{P}^2 \quad (16)$$

以均方差表示为

$$\sigma_p = \bar{P} \quad (17)$$

这表明负指数分布的均方差等于改变量的平均值。

如果 SAR 图像是功率图,那么 $\sigma_1 = \bar{I}$, 由

$$\sigma_1 = \sqrt{((I(t_1) - \bar{I})^2 + (I(t_2) - \bar{I})^2 + \dots + (I(t_n) - \bar{I})^2) / n}$$

可得

$$\sqrt{((I(t_1) - \bar{I})^2 + (I(t_2) - \bar{I})^2 + \dots + (I(t_n) - \bar{I})^2) / n} \\ = \bar{I}$$

$$(I(t_1)^2 + I(t_2)^2 + \dots + I(t_n)^2) - 2\bar{I}(I(t_1) + I(t_2) + \dots \\ + I(t_n)) + n\bar{I}^2 = n\bar{I}^2$$

$$I(t_1) + I(t_2) + \dots + I(t_n) = n\bar{I}$$

将方程组(2)带入上式,假设均质区域 $R(t)$ 为常数,经简单推导得

$$R(u(t_1) + u(t_2) + \dots + u(t_n)) = n\bar{I}$$

$$R = \frac{n\bar{I}}{u(t_1) + u(t_2) + \dots + u(t_n)} = \bar{I}/\bar{u} \quad (18)$$

这个等式与(4)在形式上完全一样,但推导过程表明,方程(4)得到的是精确结果,由方程(18)似在统计意义下的结果。在非均质区域,很难求 SAR 图像的真实值。

4 基于统计模型的斑点噪声滤波

4.1 Frost 滤波器

SAR 图像的简单模型可表示为

$$I(t) = [R(t) \cdot u(t)] * h(t)$$

这里 $t = (x, y)$ 是空间坐标, $R(t)$ 是一个描述同质区域地物后向散射强度的平稳随机变量, $u(t)$ 是由于衰弱(Fading)而产生的非高斯分布的随机噪声, $h(t)$ 是 SAR 系统的脉冲响应。假设图像数据是平稳的,利用最小均方差原理来估计图像真实值 $R(t)$ 。在有限带宽的情况下,系统脉冲响应 $h(t)$ 假定为常量。这样可推导出非相关乘性噪声模型:

$$I(t) = R(t) \cdot u(t)$$

这里 $u(t)$ 是假的白噪声。另外,假设地物后向散射强度 R 为自回归的变量,其自相关函数为

$$R_R(\tau) = \sigma_R^2 \exp(-a|\tau|) + \bar{R}^2$$

\bar{R} 是信号的局部均值, σ_R 是局部均方差, a 是自相关的参数。不同地物的这三个参数不同。这个模型也不必适合不同纹理特征的地物,所以也可以用其它模型。由最小均方差原理可得出脉冲响应为

$$m(t) = K_2 a \exp(-a|t|)$$

这里 $a^2 = a^2 + 2a \cdot (\bar{u}/\sigma_u)^2 / (1 + (\bar{R}/\sigma_r)^2)$, K_2 是归一化常量。这个变量是局部统计量的函数。经过很多简化,可以将 a 消掉,简化的表达式为 $a^2 = K \cdot C_I^2$, 这里 $C_I = \sigma_I/\bar{I}$ 是被观测的变化系数。这样可以得到 Frost 滤波器对每个脉冲的响应

$$m(t) = k_1 \exp[-kC_I^2(t)|t|] \quad (19)$$

K 是滤波器的参数, $C_I(t_0)$ 是从以 t_0 为中心的窗口计算得到, K_1 是归一化参数。

4.2 Kuan 滤波

首先提出一个加性噪声滤波器。SAR 图像的灰度值 I 包含图像真实灰度 $R(t)$ 和零均值的非相关噪声

$$I(t) = R(t) + N(t)$$

假设图像的模型是非平稳均值和非平稳方差。那么图像的协方差矩阵可以认为是对角型。对于给定 SAR 图像 $I(t)$, 图像真实灰度 $R(t)$ 可以通过最小均方差原理来估计。

$\hat{R}(t) = \bar{I}(t) \cdot [I(t) - \bar{I}(t)] [\sigma_R^2(t) / (\sigma_R^2(t) + \sigma_N^2(t))]$ 真实图像 $R(t)$ 和噪声是相互独立的, 真实图像的统计量可以由观测图像来估计。对于 SAR 图像乘性噪声情况, 可以利用上面的滤波器推导得出

$$\hat{R}(t) = I(t) \cdot W(t) + \bar{I}(t) \cdot (1 - w(t)) \quad (20)$$

$W(t)$ 为权重函数

$$W(t) = [1 - C_u^2/C_I^2] / [1 + C_u^2]$$

这里 $C_u = \sigma_u/\bar{u}$ 是噪声的变化系数。

4.3 Lee 滤波

在 Lee 滤波方法中, 乘性噪声模型近似为线性模型, 根据最小均方差原理设计滤波器。经典的 Lee 滤波器的公式为:

$$\hat{R}(t) = I(t) \cdot W(t) + \bar{I}(t) \cdot (1 - W(t)) \quad (21)$$

这里

$$W(t) = 1 - C_u^2/C_I^2$$

4.4 Gamma Map 滤波

简单 Gamma Map 滤波器的公式可表示为:

对于功率图像

$$R = I \quad C_i \leq C_u \\ R = (B \times I + \sqrt{D}) / (2a) \quad C_a \leq C_i < C_{\max} \quad (22) \\ R = CP \quad C_i \geq C_{\max}$$

这里 R 为滤波后中心像元灰度值, $NLOOK$ 为视数, VAR 滤波窗口内的方差, I 滤波窗口内的均值, $C_u = 1/\sqrt{NLOOK}$, $C_I = \sqrt{VAR}/I$, $C_{\max} = \sqrt{2} \times C_u$, $a = (1 + C_u^2)/(C_I^2 - C_u^2)$, $B = a - NLOOK - 1$, $D = I^2 \times B^2 + 4 \times a \times NLOOK \times I \times CP$ 。对于幅度图像, 滤波窗口内每一像元灰度值取平方, 滤波后的结果取平方根。

5 SAR图像的非模型去除噪声方法

5.1 均值滤波

均值滤波方法是对原始图像的每一个像元 $p_o(i, j)$ 取一个邻域 w , 计算邻域中所有像元灰度的平均值, 作为这个像元平滑后的灰度值。

$$p_s(i, j) = \frac{\sum_{(i, j) \in w} p_o(i, j)}{M} \quad (23)$$

图像的均值滤波是以图像模糊为代价来换取噪声的减小, 而且邻域 w 面积越大, 噪声减小得越显著, 但图像模糊也越严重。可以证明平滑后的噪声的标准差降为原来的 $1/\sqrt{w}$ 。

5.2 基于小波技术的滤波方法

假设被噪声污染的数据为

$$d_i = f(i) + \sigma, i = 0, \dots, n - 1$$

其中, i 为自然数, σ 为白噪声。基于小波技术的去噪方法有三步组成: (1) 用小波基对信号进行分解。(2) 对小波系数进行域值判别, 通过抑制代表噪声的小尺度成分的小波系数去除噪声。(3) 进行重建, 得到平滑数据。由于小波分析在时域和频率域都具有良好的局部特性, 因此利用小波技术平滑被噪声污染的图像, 能够在去噪的同时保留更多的细节信息。

5.3 Han等^[9](2001)提出的滤波方法

Han等在2001年提出一种新型的去噪方法。这个方法分为三个步骤: 首先探测图像的边缘(在这里边缘定义为图像中像元灰度梯度较大的区域), 记录边缘方向(在数字图像中通过像元方的向只有水平方向、垂直方向、两个对角线方向(+45°-45°))。第二步利用一种名为 Empirical Mode Decomposition 的数据处理方法沿着水平方向、垂直方向、两个对角线方向(+45°-45°)分别平滑图像。第三步根据边缘方向重建图像, 如边缘方向为水平方向, 就用水平方向的平滑数据重建图像, 以此类推; 如果没有边缘, 则利用四个方向的平滑数据的平均值重建图像。利用这个方法得到的去噪图像在视觉特征和边缘保持方面比较好。

6 去除噪声方法的比较

一个好的去除噪声方法应该较好地保持图像的平均值、边缘, 并且减少图像的方差。本文利用机载

L-SAR 图像测试几种典型滤波方法, 结果如下:

表1 滤波结果比较

Table 1 Comparison of speckle suppression ability

滤波器	边缘保持指数	标准差	平均值
原始图像	1	1	1
增强 Lee 滤波	0.403598	0.376503	1.0257408
增强 Frost 滤波	0.394277	0.376503	1.0257408
Gamma 滤波	0.407191	0.376068	1.0211868
Kuan 滤波	0.410772	0.379958	0.9984634
Han 等的滤波	0.799246	0.429413	0.9980070

注: 原始图像的平均值为 107.378, 标准差为 27.1217。

边缘保持指数为:

$$EPI = \frac{\sum |p_s - p_{sn}|}{\sum |p_o - p_{on}|}$$

p_s 为平滑后的像元值, p_{sn} 为 p_s 相邻像元, p_o 为原始图像的像元值, p_{on} 为 p_o 相邻像元。

由表1可知各种滤波器能够有效保持图像的边缘并减小标准差, 但常用的滤波器的边缘保持能力较差, 韩春明等人提出的滤波方法能够有效保持边缘, 是一个较好的滤波方法。

7 SAR图像斑点噪声抑制的本质

由公式(4)和(18)可知, SAR图像斑点噪声抑制是要寻找或假设噪声的平均值或噪声与图像平均值的关系。Lee、增强 Lee、Gamma Map 滤波假设像元真实值等于该像元邻域内的均值。根据公式(4)和(18), 这相当于假设斑点噪声的均值等于 1。在这种情况下, 参与计算的点不能太少, 否则将会产生较大的误差。

在边缘区域(在这里将边缘定义为图像亮度变化迅速的区域), 各种滤波方法的处理方法不同。在模型方法中增强 Lee、增强 Frost 滤波、Kuan 滤波、Frost 滤波、Gamma Map 滤波是通过简化理论模型, 并在一定的约束准则(最小均方差原理)推导出滤波窗口内的真实值与附近像元值的近似关系。Shi 和 Fung^[4]以及 Han 等^[9]的测试表明这些方法不能有效保持边缘, 说明这些方法有在边缘区域误差较大。增强 Lee 滤波、精制 Gamma Map 滤波是通过重新选取滤波窗口来保持边缘。Han 等^[9]的方法在边缘区域时, 相当于选取了一个沿着边缘方向的一个像元宽的窗口去平均。从边缘的特点: 沿着边缘方向的像元灰度值变化缓慢, 垂直边缘方向的像元灰度值变化迅速, 可知 Han 等的方法相当于在边缘区域寻

找真实像元值相近的像元进行平均。

从上面的分析可知, SAR 图像斑点抑制实质上是要寻找足够多的同质地物的像元近似计算图像的真实值,或在一定准则的约束下建立图像真实值与含有噪声的像元值的近似关系。

8 结 论

通过研究 SAR 图像斑点噪声抑制数学物理描述,并在分析噪声的统计特性和典型抑制斑点噪声方法的基础上,提出了 SAR 图像斑点噪声抑制的本质问题是要寻找足够多的同质地物像元来近似计算图像的真实值,或在一定的准则的约束下建立图像真实值与含有噪声的像元值的近似关系。这对抑制 SAR 图像斑点噪声的认识和研究新的方法有着十分重要的意义。

参 考 文 献 (References)

- [1] Guo H D, *et al.* Radar for Earth observation: theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2000. [郭华东等著.《雷达对地观测理论与应用》,北京:科学出版社,2000. [M].]
- [2] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, **66**:1145—1150.

- [3] Lee J S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images [J]. *Optical Engineering*, 1986, **25**:636—643.
- [4] Shi Z H, Fung K B. A comparison of digital speckle filters [A]. *Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS' 94* (New York: IEEE), 1994, 2129—2133.
- [5] 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**:165—168.
- [6] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, and Chavel P. Adaptive restoration of images with speckle [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1987, **35**:373—383.
- [7] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, and Holtzman J C. 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**:157—166.
- [8] Lopes A, Nezry E, Touzi R, and Laur H. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**:1735—1758.
- [9] Han C M, Guo H D, Wang C L, Fan D. A novel method to reduce speckle in SAR images. *International Journal of Remote Sensing* [J]. (In print)
- [10] Ulaby F T. *Microwave Remote Sensing*, Vol. 2, ch. 7 [M]. Beijing: Science Press, 1987. [F. T. 乌拉比等.微波遥感(第二卷,第七章)[M]. 黄培康,汪一飞译]
- [11] Tur M, Chin K C, Goodman J W. When is speckle multiplicative? [J]. *Appl. Opt.*, 1982 **21**, (7):1157—1159.

The Essence of SAR Image Speckle Suppression

HAN Chun-ming, GUO Hua-dong, WANG Chang-lin

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Speckle in SAR images disturbs SAR image application. In the past 20 years numerous methods to reduce speckle in SAR images have been proposed. Although these methods can effectively reduce speckle in SAR images, they blur edge and texture information. In this paper, SAR image speckle suppression is analyzed from the view of mathematical physics. In fact, SAR image speckle suppression is an inverse problem. The essence SAR image speckle suppression is found by analyzing the speckle statistical distribution and the common speckle filters. It is important for developing the method, which can effectively reduce speckle in SAR images and can preserve edge and texture information.

Key words: SAR; Speckle