

# 高分辨率星载 SAR 单视图像斑点噪声抑制实现方法

李春升, 燕 英, 陈 杰, 黄 岩, 周荫清

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 本文提出了实现高分辨率星载合成孔径雷达单视图像斑点噪声抑制的 TDRGMAP 方法. 它以最大后验概率滤波器实现斑点平滑, 以无偏修正使其适用于单视图像, 结合边缘和线条检测, 并加以点目标检测及保持, 获得高空间分辨率和高辐射分辨率的 SAR 单视图像. 本文详细阐述了 TDRGMAP 方法的机理和实现, 最后利用仿真生成的星载 SAR 单视图像进行实验, 证明了 TDRGMAP 方法的有效性.

**关键词:** 斑点噪声抑制; 局域方差系数; 点目标检测

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0013-04

## Speckle Reduction for High Resolution One-Look Spaceborne SAR Images

LI Chun-sheng, YAN Ying, CHEN Jie, HUANG Yan, ZHOU Yin-qing

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, a method is developed for speckle reduction of high resolution one-look spaceborne synthetic aperture radar images. This method, named TDRGMAP, makes high spatial resolution and high radiometric resolution one-look SAR image possible by means of smoothing speckle with MAP filter, removing bias for one-look image, using edge and line detector, and preserving detected point targets. TDRGMAP is discussed in detail, and its efficiency is demonstrated with simulated spaceborne SAR image.

**Key words:** speckle reduction; local coefficient of variation; point target detection

### 1 引言

斑点噪声严重影响了 SAR 图像的判读和解译. 多视处理可以抑制斑点噪声, 但牺牲了图像的空间分辨率. 近年来一些空域滤波算法被用于 SAR 斑点抑制, 其中局域自适应滤波是一个重要概念, 它是在图像上取一个滑动窗口, 对窗口内的像素进行滤波处理得到窗口中心像素 (当前滤波像素) 的滤波值. 典型的局域自适应滤波器中, 一类是 Lee 算法、Frost 算法和 Kuan 算法, 都以滑动窗口内像素的均值和方差作为参数, 按照一定的估计原则进行滤波; 为了更好地保留边缘及点目标等特征, Lopes 等人又提出了相应的增强算法. 另一类是 Sigma 滤波器、Weighting 滤波器和改进 Sigma 方法, 将所有与窗口中心像素具有相同分布的像素平均作为滤波值<sup>[1]</sup>. Donoho 还提出了基于小波变换的软阈值法<sup>[2]</sup>. 顺序统计量法则以非线性排序和加权组合两步完成滤波操作<sup>[3]</sup>.

为满足高分辨率的要求, 对单视 SAR 图像直接进行空域平滑处理来抑制斑点噪声是一种较好的技术途径. 由于单视 SAR 图像特有的统计规律, 以往的平滑算法都不能取得理想的效果. 例如 Lee 算法系列、软阈值法和顺序统计量法, 因未考虑 SAR 图像特性而只适用于一般数字图像处理; Sigma 滤波器系列因其高斯噪声假设, 只适用于多视 SAR 图像.

Kuan 提出的最大后验概率 (MAP) 算法, 同时考虑了斑点

噪声的特点和地物目标散射特性的统计规律, 在平滑斑点的同时能很好地保持图像纹理; 经 MAP 算法修正得到的无偏 MAP 方法<sup>[4]</sup>适用于单视图像; 结合边缘和线条检测<sup>[5]</sup>的 MAP 方法 (RGMAP) 增强了保持边缘细节信息的能力. 本文在将无偏 MAP 和 RGMAP 综合的基础上, 加入对图像中点目标的考虑, 提出了 TDRGMAP (基于点目标检测的 RGMAP) 方法. 利用在多视图像中检测到的点目标, 有效地保留点目标信息, 完善了对图像各种结构特征的处理, 实现了对 SAR 单视图像处理获得高空间分辨率、高辐射分辨率的雷达图像. 计算机仿真结果证明了该算法的有效性.

### 2 模型描述

#### 2.1 乘性噪声模型

斑点噪声的乘性模型可以用下式表示

$$I = R \cdot F \quad (1)$$

其中  $I$  是观察到的图像强度 (被斑点污染),  $R$  是随机的地面目标雷达散射特性 (未被斑点污染),  $F$  为表示斑点噪声的随机过程. 如果乘性噪声模型适用于 SAR 图像,  $F$  的标准差应该等于  $I$  的标准差和  $I$  的均值之比, 即  $I$  对  $\bar{I}$  的关系曲线应该是通过原点且斜率为  $F^{1/6}$  的直线.

为了验证模型的正确性, 仿真均匀面目标 L 波段高分辨

率星载 SAR 单视图像,分辨率为  $5 \times 5$  米,其成像处理方法采用文献[7]给出的方法.在该图像上使用  $150 \times 150$  窗口的典型结果如图 1 所示,可见实验结果与上述推断相符.由实验数据拟合的直线斜率近似 1,与单视图像的等效视数为 1 相吻合.

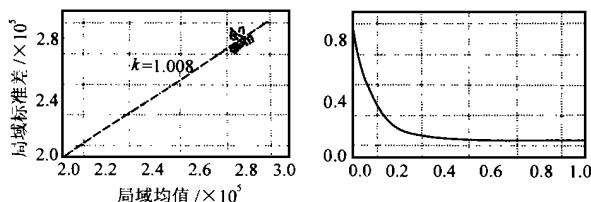


图 1 单视图像乘性噪声模型验证 图 2 直方图统计(归一化)

## 2.2 分布特性研究

斑点噪声服从  $\Gamma$  分布<sup>[8]</sup>:

$$f(F) = \frac{L^{L-1}}{\Gamma(L)} \exp(-FL), F \geq 0 \quad (2)$$

式中  $L$  是图像视数.对于单视图像,斑点噪声为单边指数分布,由上述仿真图像得到的统计分布如图 2 所示.

## 3 基于点目标检测的 RGMAP (IDRGMAP) 方法

本文提出的 IDRGMAP 方法,以斑点噪声抑制的最大后验概率(Maximum A Posteriori)滤波器为基础实现斑点平滑,进行无偏修正使其适用于单视图像,结合边缘和线条检测,再加以点目标检测及保持,从而获得高空间分辨率和高辐射分辨率的 SAR 单视图像.

### 3.1 最大后验概率滤波原则的无偏修正<sup>[4]</sup>

MAP 滤波器属于局域自适应滤波器.它基于斑点噪声的乘性模型,认为斑点是完全发育的,且斑点样本之间统计独立.并假设  $R$  和  $F$  都服从  $\Gamma$  分布(所以又称 Gamma MAP 滤波器),斑点和地面目标雷达散射特性迭加后的分布为  $K$  分布,广泛适用于地杂波. MAP 估计为

$$R = [(-L-1)\mu_I + \sqrt{\mu_I^2(-L-1)^2 + 4L\mu_I}]/2 \quad (3)$$

其中

$$= (1 + C_F^2) / (C_I^2 - C_F^2) \quad (4)$$

为异质参数.图像的局域方差系数  $C_I = 1/\mu_I$ ,  $1/\mu_I$  分别表示滤波窗口内图像像素的标准差和均值,斑点的局域方差系数  $C_F^2 = 1/L$ .

值得注意的是,式(3)只适用于多视 SAR 图像,处理单视图像时会存在估计偏差,必须对式(3)作无偏修正.单视图像的无偏 MAP 估计为

$$R^* = [(-2)\mu_I + \sqrt{\mu_I^2(-2)^2 + 8L\mu_I}]/2 \quad (5)$$

### 3.2 边缘和线条检测<sup>[5]</sup>

$C_I$  很好地表征了窗口内图像像素的非均匀性.均匀区域内  $C_I$  较小,均值即其最小误差估计.孤立强散射体的  $C_I$  较大,应直接保留其像素值.因此只需要在  $C_I$  中等大小的区域进行 MAP 滤波,但由该区域内难以确定  $C_I$  值来源,对于图像中的结构特征如在边缘、公路周围,MAP 的滤波效果不好. Touzi 等人提出了具有恒虚警概率的比值边缘检测,则可以在

所检测到的边缘附近重新定义自适应滤波的邻域,亦即把包含边缘的滤波窗分割为边缘两侧的部分,自适应滤波只在包含中心像素点的那部分区域上进行,因此边缘附近的斑点得到更充分的抑制,边缘也得到了保存.由于比值边缘检测的优越性,还可以将其应用于线条检测.

在 SAR 功率图像中进行比值边缘检测时,定义中心像素相对两侧的互不重叠邻域的  $N$  个像素值的平均值  $P_1$ 、 $P_2$ ,计算两者比值

$$r_E = \begin{cases} P_1/P_2, & P_1/P_2 \leq 1 \\ P_2/P_1, & P_1/P_2 > 1 \end{cases} \quad (6)$$

及对比度

$$C_r = \max(P_1/P_2, P_2/P_1) \quad (7)$$

对于均匀区域  $C_r = 1$ ,  $r_E$  的概率密度函数为

$$f(r_E | P_1/P_2) = \frac{(2NL)^2}{(NL)^2} \left[ \frac{(P_1/P_2)^{NL}}{(r_E + P_1/P_2)^{2NL}} + \frac{(P_2/P_1)^{NL}}{(r_E + P_2/P_1)^{2NL}} \right] r_E^{NL-1} \quad (8)$$

其中  $L$  是图像视数,  $r_E \in [0, 1]$ . 给定一个判决门限  $r_{Emin}$ , 判决为边缘的检测条件概率  $P_d$  (这个边缘两边是对比度为  $C_r$  的两块均匀区域) 为

$$P_d(r_{Emin}, C_r) = P(r_E < r_{Emin} | C_r) = \int_0^{r_{Emin}} f(r_E | C_r) dr_E \quad (9)$$

因此虚警概率

$$P_{fa}(r_{Emin}) = P_d(r_{Emin}, 1) \quad (10)$$

在滤波窗口的四个方向(常见边缘的方向)上分别计算  $C_r$ ,  $C_r$  最大的方向表示最可能存在边缘,判断若  $r_E < r_{Emin}$ ,则认为该方向上存在边缘.重新定义计算比值的邻域,可以将比值边缘检测应用于线条的检测.

### 3.3 点目标检测

由于斑点噪声的存在,在滤波前单视图像中进行点目标检测的效果不是很理想,而在多视图像中检测到的点目标可信度高,这是因为:

(1) 多视处理通过降低处理器带宽形成多视图像,然后对多视图像进行非相干叠加来降低斑点噪声.它虽然降低了点目标空间分辨率,但不会丢失点目标.

(2) 由于多视处理较好地平滑了斑点噪声,提高了图像的信噪比,与滤波前单视图像相比:

(a) 多视图像中斑点噪声被压低,而滤波前单视图像中某些点目标会被强的斑点噪声淹没,因此前者比后者的点目标检测漏警数目小.

(b) 多视图像中斑点噪声被压低,大大减少了将斑点噪声错当成点目标的虚警数目.

因此,应该在多视图像中进行点目标检测.

在多视图像中,采用了下述经典但有效的恒虚警点目标检测方法.在 SAR 功率图像  $I(i, j)$  中,若某一点  $(i_p, j_p)$  满足以下两个条件则认为是点目标:

(1) 此点的功率值应大于与它相邻的每一点的功率值.

(2) 此点的功率值与其邻域平均功率的比值应大于某一门限值  $T$ , 即

$$10\log \frac{I(i_p, j_p)}{\mu} > T(\text{dB}) \quad (11)$$

其中,  $\mu$  是以  $(i_p, j_p)$  为中心的  $(2w+1) \times (2w+1)$  区域内除去该点以外的所有点的平均功率。

### 3.4 TDRGMAP 方法的实现

TDRGMAP 方法的实现步骤如下:

(1) 首先对多视图像进行点目标检测, 存储点目标的位置及其在单视图像中的值。

(2) 在单视图像中将点目标邻域的均值代替点目标, 得到一幅新的图像。

(3) 对新图像使用 RGMAP 滤波器进行滤波:

(a)  $C_l < C_{\min}$  时, 则以局域窗口内各像素均值代替中心像素的值。

(b)  $C_l > C_{\min}$  时, 进行边缘和线条的检测。如果滤波窗口的中心像素处于边缘或线条, 则选择包含边缘或线条的子窗口进行 MAP 估计; 如果没有检测到边缘和线条, 再分两种情况: 若  $C_{\min} < C_l < C_{\max}$ , 在原窗口内使用式 (5) 进行无偏 MAP 估计。若  $C_l > C_{\max}$ , 认为存在强散射体, 保留该中心像素值。其中  $C_{\min} = C_F$ ,  $C_{\max} = \sqrt{2} C_F^{[9]}$  (或令  $C_{\max}$  为均匀区域中  $C_F$  的最大值)。

(4) 将所存储的点目标的值还原, 输出图像。

### 3.5 TDRGMAP 方法的点目标保持分析

RGMAP 滤波虽然能在平滑斑点的同时能很好地保持图像纹理和平后向散射系数, 也能良好地保持图像中的边缘、线条, 但点目标保持能力较差:

(1) 若当前处理的像素是均匀场景中的像素, 而在以它为中心的滤波窗内有点目标出现, 如图 3 所示, 则此邻域内不再满足斑点是完全发育的假设, 使用 RGMAP 滤波器进行处理时, 有两种情况:

第一种情况, 该像素的局域方差系数  $C_l$  超过上限值  $C_{\max}$ , 在 RGMAP 滤波器中又没有检测到边缘与线条存在的情况下, 就认为是强散射体, 因而保留该像素点的值。这样在点目标周围斑点噪声没有得到平滑, 并且增加了点目标虚警数目。第二种情况, 如果由于窗口内其它像素的影响, 该像素的  $C_l$  没有超过  $C_{\max}$ , 则滤波器认为该邻域仍然满足斑点是完全发育的假设, 将利用滤波方程式 (5) 计算该像素的估计值, 因

为此邻域内不满足斑点是完全发育的假设, 失去了使用上式的前提条件, 故而得到的估计值是有偏的。

(2) 若当前处理的像素就是点目标, 即点目标是滤波窗口的中心像素。但由于窗口内其它像素的影响, 其  $C_l$  并没有超过  $C_{\max}$ , 滤波器没有保留原值, 相反, 在式 (5) 的平滑作用下估计值比原值降低了许多。此即产生了点目标漏警, 同时点目标空间分辨率有所损失。

对于上述 RGMAP 方法中的不足, TDRGMAP 方法有了明显改进:

(a) 针对 (1) 中的情况, 即若当前处理的像素是均匀场景中的像素, 而在以它为中心的滤波窗内有点目标出现。在 TDRGMAP 中, 将点目标代以点目标邻域的均值后, 则可以认为当前处理的像素的邻域中斑点是完全发育的。此时采用式 (5) 滤波, 能够得到正确的滤波估计。因此点目标周围的斑点噪声得到了有效的滤除。

(b) 针对 (2) 中的情况, 即当前处理的像素就是点目标, TDRGMAP 保留了点目标的值。

(c) 综上所述, TDRGMAP 方法既保留了点目标的值又滤除了点目标周围的斑点噪声, 可以实现点目标空间分辨率的保持。

## 4 计算机仿真及分析

### 4.1 点目标保持性能比较

将 TDRGMAP 滤波应用于一幅高分辨率星载 SAR 仿真单视图像。该图像在均匀背景下叠加了四组点目标阵, 每组 100 个点目标, 具有相同的 RCS 特性。1~4 组 RCS 由低到高递增  $2\text{m}^2$ , 目标与背景的平均后向散射系数之比最低为  $11.5\text{dB}$ 。多视处理是方位向和距离向各两视。实验结果见表 1、表 2。其中, 点目标检测门限  $T = 5.19\text{dB}$ 。

表 1 点目标检测

		1 组	2 组	3 组	4 组
多视图像	检测到的点目标	66	100	102	104
	检测到的正确点目标	81	112	125	130
滤波后的图像	检测到的点目标	49	95	100	99
	检测到的正确点目标	90	109	107	109
滤波前的单视图像	检测到的点目标	62	100	101	101
	检测到的正确点目标	2105	2022	2092	2089

表 2 点目标性能指标(原图像/RGMAP 滤波后/TDRGMAP 滤波后)

	1 组	2 组	3 组	4 组
方位向分辨率(像元)	1.4/1.3/1.1	1.3/1.4/1.2	1.4/2.0/1.1	1.3/1.3/1.2
距离向分辨率(像元)	1.2/2.0/1.1	1.4/3.1/1.1	1.3/1.6/1.1	1.4/1.6/1.2
点目标峰值( $\times 10^7$ )	4.9/0.8/4.9	10.4/2.7/10.4	8.9/1.7/8.9	9.1/2.7/9.1

由表 1 可见, 对于一定背景下弱目标的检测, TDRGMAP 明显优于 RGMAP。从表 2 中可以看到, TDRGMAP 与 RGMAP 相比点目标性能指标的保持得到了明显改善。通过采用本文所提出的 TDRGMAP 算法, 点目标邻域的斑点噪声得到有效的滤除, 同时点目标的值得到了保留, 从而可以实现点目标空间分辨率的保持。

### 4.2 滤波器综合性能比较

为了比较各种斑点抑制算法的综合性能, 仿真一幅大面积复杂目标场景高分辨率星载 SAR 单视图像。对图像应用下述主要斑点滤波方法: MSIGMA (改进的 SIGMA) 滤波器、MLEE 算法 (改进的 LEE 算法)、ST 滤波器 (基于小波变换的软阈值法滤波器)、OSA 滤波器 (基于顺序统计量的自适应滤波器)、RGMAP 滤波器 (结合边缘检测器的 MAP 滤波器) 和 TDRGMAP 滤波器 (基于点目标检测的 RGMAP 滤波器)。另外, 利用美国

SEASAT 卫星单视 SAR 图像数据进行了斑点平滑效果评估。

为了反映整幅图像斑点抑制的效果,在图像中选取三块均匀场景、五个点目标,分别进行各种斑点噪声抑制,并将各性能指标求平均作为评估结果。测量结果记录见表 3 和表 4。其中, $\mu$ 、 $\sigma$ 、 $M_{ENL}$  和  $\mu(\text{dB})$  分别为 SAR 功率图像的均值、标准差、等

效视数和辐射分辨率, $\mu$  为平均后向散射系数的偏差; $r$ 、 $a$  分别为点目标距离分辨率和方位分辨率, $ISLR_r$ 、 $ISLR_a$  分别为距离积分旁瓣比和方位积分旁瓣比, $ISLR$  为二维积分旁瓣比。

表 3 多种单视图像斑点噪声平滑效果(仿真图像/SEASAT 图像)

指标 方法	$\mu$	$\sigma$	(dB)	$M_{ENL}$	$\mu(\text{dB})$
原图像	1.00/1.00	1.00/1.00	3.01/3.02	1.00/0.99	-/-
MSIGMA	0.79/0.78	0.24/0.24	2.11/2.13	2.57/2.50	-1.05/-1.05
MLEE	1.00/1.00	0.19/0.20	1.59/1.61	5.14/4.95	-0.01/-0.01
ST	0.76/0.76	0.37/0.42	2.54/2.70	1.59/1.35	-1.19/-1.19
OSA	0.95/0.96	0.26/0.27	1.85/1.89	3.54/3.37	-0.22/-0.19
RGMAP	0.99/0.97	0.20/0.21	1.63/1.67	4.84/4.53	-0.07/-0.05
TDRGMAP	0.99/0.97	0.20/0.21	1.63/1.67	4.85/4.56	-0.06/-0.05

表 4 多种单视图像斑点噪声抑制后点目标抑制效果

指标 方法	$r$ (m)	$a$ (m)	$ISLR_r$ (dB)	$ISLR_a$ (dB)	$ISLR$ (dB)	$r$ (%)	$a$ (%)	$ISLR_r$ (dB)	$ISLR_a$ (dB)	$ISLR$ (dB)
原图像	3.06	4.54	-15.16	-15.46	-6.38	-	-	-	-	-
MSIGMA	3.00	4.64	-13.51	-13.28	-4.92	-1.96	2.20	1.65	2.18	1.46
MLEE	4.35	8.38	-13.89	-17.63	-7.42	42.2	84.6	1.27	-2.17	-1.04
ST	3.20	4.86	-8.67	-9.12	0.57	4.58	7.05	6.49	6.34	6.95
OSA	3.19	5.22	-13.64	-12.76	-5.30	4.25	15.0	1.52	2.70	1.08
RGMAP	3.29	5.11	-13.61	-14.28	-5.78	7.52	12.6	1.55	1.18	0.60
TDRGMAP	2.93	4.19	-15.57	-16.30	-7.31	-4.25	-7.71	-0.41	-0.84	-0.93

分析各种斑点噪声抑制方法对仿真大面积目标场景单视图像处理的结果,可以看出本文所提出的 TDRGMAP 滤波器综合性能最好。

## 5 结论

SAR 多视处理中图像辐射分辨率的提高是以牺牲空间分辨率为代价的,虽然多视处理因损失空间分辨率而不利于直接应用于高分辨率 SAR 成像,但仍然可以在单视图像斑点抑制过程中利用多视图像进行点目标检测。如前所述,MAP 滤波器在降低斑点的同时能很好地保持图像纹理,对原 MAP 滤波器加以无偏修正后得到的无偏 MAP 滤波器更适用于 SAR 单视图像,结合边缘检测得到的 RGMAP 能够良好地保持图像中的边缘、线条。在此基础上,我们将点目标检测与原 RGMAP 相结合,得到的基于点目标检测的 RGMAP(TDRGMAP)算法,进一步实现了对点目标信息的保留,并保持了图像的空间分辨率,完善了对各种结构特征的考虑。因此,TDRGMAP 算法是 SAR 单视图像斑点噪声抑制的优秀算法。

## 参考文献

- [1] SMITH K. M. . Speckle reduction and segmentation of Synthetic Aperture Radar images. Int. J. Remote Sensing, 1996, 17(11): 2043 ~ 2057
- [2] Donoho D. L. . De-Noising by Soft-Thresholding. IEEE Transac. On Information Theory, 1995, IT-41(3): 613 ~ 627
- [3] Lukin V. V. . Techniques and Algorithms of Speckle Noise Reduction for One-look SAR Images. EUSAR '96

- [4] VALENTIN V. Z. , VADIMIR V. Z. . Analysis of the speckle suppression algorithms based on the MAP approach. EUSAR '96
- [5] NEZRY E. , LOPES A. , TOUZI R. . Detection of Structural and Textural Features for SAR Images Filtering. IGARSS '91: 2169 ~ 2172
- [6] LEE J. S. . Speckle analysis and smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. Computer Graphic and Image Processing, 1981, 17: 24 ~ 32
- [7] 李春升, 黄岩, 王璇, 周荫清. 基于 Chirp Scaling 算法的星载 SAR 成像处理实现方法, 电子学报, 1996, 24(6)
- [8] ULABY F. T. , KOUYATE F. , BRISCO B. LEE WILLIAM T. H. . Textural information in DAR images. IEEE Transac. On Geosci and Remote Sensing, 1986, 24(2): 235 ~ 245
- [9] LOPES A. , NEZRY E. , TOUZI R. , LAUR H. . Maximum A Posteriori Speckle Filtering and First Order Texture Models in SAR images. Proceedings of IGARSS '90: 2409 ~ 2412



李春升 副教授, 博士, 中国电子学会高级会员。主要从事信号与信息处理、高分辨率雷达成像、时空二维自适应信号处理、时变谱估计等方面的研究工作。

燕 英 硕士研究生, 主要从事高分辨率雷达成像方面的研究工作。