

# SAR 图像组合降斑算法

刘振华<sup>1</sup>, 于文震<sup>1</sup>, 毛士艺<sup>2</sup>

(1. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013; 2. 北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘要:** SAR 图像存在较强的相干斑点噪声, 严重的影响了地物信息的提取与 SAR 图像的应用效果, 作者在研究分析斑点噪声产生机理以及统计特性的基础上, 提出了一种组合降斑重构算法, 该算法与降斑重构性能优异的模拟退火算法降斑重构性能相当, 但极大的减少了计算代价; 与许多其它 SAR 降斑算法相比, 组合降斑重构算法具有很好的降斑以及场景结构保持性能, 并有较好的实用性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 降斑; 自适应; 模拟退火; 重构

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 03-0363-05

## Compounding Reconstruction for Synthetic Aperture Radar Images

LIU Zhenhua<sup>1</sup>, YU Wenzhen<sup>1</sup>, MAO Shi-yi<sup>2</sup>

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China;

2. Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Synthetic aperture radar (SAR) images are usually corrupted by strongly speckle noise, which blocks scene information abstracting and the application of SAR images. A combination despeckle reconstruction algorithm is proposed based on generation principles and statistic characters of speckle noise. The despeckle and reconstruction performance of this algorithm is as good as simulated annealing algorithm, but it reduces the computation cost and still has excellent despeckle and scene structure keeping performance. It is a practical algorithm for SAR image reconstruction.

**Key words:** SAR; segmentation; adaptive; simulated annealing; reconstruction

### 1 引言

SAR 图像中存在较强的乘性相干斑点噪声, 特别是对于低视数的 SAR 图像, 斑点噪声更强, 例如当强度 SAR 图像数据的视数  $L=1$  时, 真实场景信号与斑点噪声比的统计最大为 1. 随着图像数据的视数增加, 斑点强度减弱, 但其图像分辨率会随之降低. SAR 图像的这一特性使其应用(例如图像分割与分类、目标检测与识别、多传感器图像融合等)受到很大影响; 多年来, 如何在尽量保持图像分辨率, 保持图像场景结构的基础上, 抑制斑点噪声, 重构出原图像场景, 即对雷达散射截面(RCS)的估计, 一直是 SAR 图像理解研究的重要方向. 由于 SAR 图像是通过合成天线获得的, 即对电磁回波采用相干叠加的方法提高方位方向的分辨率, 在图像中产生随机分布的斑点噪声, 所以, 应当利用其斑点统计分布特性, 设计降斑重构算法. 利用 SAR 数据统计模型设计出的降斑重构算法, 不仅应当适用于不同视数的 SAR 图像, 而且应当适用于不同分辨率的 SAR 图像, 滤波器的算法设计应当充分利用 SAR 图像的基本理论以及数据特性. 一个好的 SAR 降斑重构算法应当具有以下特性:

(1) 有效的抑制斑点; (2) 尽量保持图像场景的结构; (3) 对图像处理时不引入其它结构; (4) 保持图像的雷达散射测量幅度.

多年来, 人们根据 SAR 图像数据的统计特性, 设计出了

许许多多的降斑重构算法, 例如基于自适应原理的 Lee 滤波器<sup>[2]</sup>、Frost 滤波器<sup>[3]</sup>、Kuan 滤波器<sup>[4]</sup>、自适应降斑滤波器<sup>[5]</sup>等; 利用雷达散射截面模型设计的伽马分布最大后验概率降斑滤波器<sup>[6]</sup>; 利用相关邻域模型设计的相关邻域模型最大似然(CML)降斑滤波器<sup>[6]</sup>、相关邻域最大后验概率(CMAP)降斑滤波器<sup>[6]</sup>等; 利用迭代结构邻域模型重构图像的模拟退火降斑重构算法<sup>[1]</sup>; 以及利用数学形态学处理的重构算法<sup>[7]</sup>等. 在这些降斑重构算法中, 模拟退火重构算法充分利用了 SAR 图像的斑点统计特性, 在尽量保持图像分辨率, 图像场景的结构信息、保持图像的雷达散射测量幅度基础上, 充分抑制了斑点噪声; 取得了非常好的重构效果. 但该算法存在的弱点就是运算代价太大, 它需要反复叠代以获得一个全局最优解, 所以该算法在实际应用中受到很大限制. 其它许多算法虽然运算代价少, 但存在要么降斑能力不足, 要么降斑后对图像场景结构破坏较大(例如边缘模糊、平滑掉弱的边缘以及小目标等); 所以计算代价与重构效果常常是一对矛盾.

在对 SAR 图像数据特性以及重构模型进行详细研究的基础上, 作者提出一种将模拟退火与自适应窗口重构算法相结合的组合降斑重构算法. 该算法在很大程度上解决了计算代价与重构性能的这一矛盾, 该算法充分利用了 SAR 图像斑点数据的统计模型, 并且在很大程度上克服了自适应窗口重构算法中用幅度斑点的高斯统计模型对 Rayleigh 统计分布模型的在低视数时不合理的近似, 取得了非常好的图像重构效

果,并且计算代价比模拟退火重构算法减少了将近三十倍(256@256 像素,图像越大减少的倍数越大).对实际图像数据的处理可以看到,组合降斑算法具有非常优异的降斑性能,对图像结构以及小目标的保持与模拟退火重构算法相近.

## 2 模拟退火重构算法

模拟退火算法是基于 Metropolis 算法,它是根据在整个图像上定义的一个目标函数,求函数的全局最优的方法<sup>[8]</sup>.当它用于 SAR 图像降斑处理时,假设图像的雷达散射截面是一个马尔可夫(Markov)随机场,可以利用吉布斯(Gibbs)分布描述散射截面 R 的条件概率密度函数,当给定噪声估计 x 时,吉布斯分布为:

$$P(R|x) = \frac{1}{Z} \exp\left[-\frac{W}{T}\right] \quad (1)$$

其中 Z 是分布的归一化常数, T 称为退火温度, W 称为势函数,它包括了整个图像的多点统计,采用模拟退火方法如果满足下列条件,可以保证找到图像处理模型的全局最佳解.

(1) 温度 T 以非常缓慢的速度趋向于零,例如

$$T \sim \frac{T_0}{\ln(1+k)} \quad (2)$$

k 为当前的迭代次数, T<sub>0</sub> 为初始温度,描述开始退火时吉布

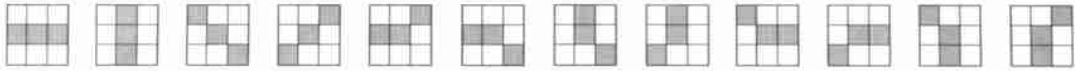


图 1 围绕中心像素的结构相关邻域模型的 12 个方向结构

## 3 自适应窗口降斑重构算法

由 SAR 图像的分布特性知道,单视幅度 SAR 图像服从 Rayleigh 分布<sup>[9]</sup>:

$$P_A(y) = \frac{2y}{R^2} \exp\left[-\frac{y^2}{R^2}\right] \quad (4)$$

对于等效视数为 L 的幅度 SAR,变化系数 CV 为<sup>[9]</sup>:

$$CV = \frac{\text{标准差}}{\text{均值}} = \frac{0.5227}{\sqrt{L}} \quad (5)$$

当 SAR 图像数据的视数大于 4 时,可以用高斯分布很好地近似 Rayleigh 分布<sup>[10]</sup>,斑点噪声可以建模为乘性斑点模型<sup>[11]</sup>:  $y(i, j) = x(i, j) \cdot n(i, j)$ , 其中 y 为幅度图像的像素值, x 为图像的真实值,斑点噪声 n 的均值为 1,斑点噪声的标准差由式(5)得:  $R_n = \frac{0.5227}{\sqrt{L}}$ .

为了简化运算,假设斑点噪声服从高斯分布,在乘性斑点噪声模式下对图像某一点  $y(i, j)$  及其邻域取平均,假设图像场景和斑点噪声不存在相关,可得:

$$y = x \cdot n = x \quad (6)$$

SAR 图像方差为:

$$\begin{aligned} R_y^2 &= E[(y - \bar{y})^2] = E[(x \cdot n - x \cdot \bar{n})^2] \\ &= E[x^2] E[n^2] - x^2 n^2 \end{aligned} \quad (7)$$

在图像均匀区域,由式(7)可得,图像变化系数为:

分布的平缓程度, B 为控制退火收敛速率的参数.

(2) 图像中每一个像素都有很多次机会被访问处理.

模拟退火处理算法的处理过程如下:

1 随机扰动(改变)某一像素的像素值;

2 根据目标函数计算图像的联合概率值;

3 如果扰动后的概率大于扰动前的概率,接受该像素值的这种改变,如果扰动后的概率小于扰动前的概率,则以一定的概率接受这种改变;

4 随机选择一个新的像素重复 1 的处理.

当经过长时间的对图像中的每一个像素值进行扰动变化以及计算整个图像的联合概率值,该方法可以获得目标函数 W 的全局最优.由于势函数(目标函数)是定义在整个图像上的,所以利用该方法获得它的全局最优需要非常长的时间,很难实现,减少计算量的办法为,目标函数只定义在图像的局部而非整个图像.

对于结构邻域模型,White<sup>[1]</sup>通过定义势函数 W 为斑点模型的对数似然将相关邻域模型于函数 W 连续起来,如下式:

$$-WS - KS - \ln P(I_0/R) - \ln P_R(R) \quad (3)$$

K 的全局最大后验概率对应于将函数 W 最小化,分别计算图 1 中的 12 个 3 像素邻域结构的联合概率.

$$CV = \frac{R_y}{y} = R_n \quad (8)$$

在图像非均匀区域,由于  $E[x^2] > x^2$ ,由式(7)可得,此时图像变化系数:

$$CV = \frac{R_y}{y} > R_n \quad (9)$$

在对 SAR 图像利用自适应窗口进行降斑重构的主要思想是,根据图像变化系数(CV)将场景分成均匀区域和非均匀区域,当由成像数据计算得到的变化系数 CV 小于某一阈值时,表示该场景为均匀区域,这时自动增大处理窗口;大于某一阈值时,为非均匀区域,自动减小降斑处理窗口.增大或减小处理窗口的策略可以按以下方法进行<sup>[5]</sup>.

定义重构处理的最大和最小窗口大小,如  $W_{\max} @ W_{\max}$  和  $W_{\min} @ W_{\min}$ .用于重构处理的窗口边长 W 大小为:  $W_{\min} [W_{i,j} | W_{\max}]$ .取  $W_{\min}, W_{i,j}, W_{\max}$  为奇数.对于当前像素(i, j),窗口内的像素为:  $\{(k, l) | i - N_{i,j} \leq k \leq i + N_{i,j}, j - N_{i,j} \leq l \leq j + N_{i,j}\}$ ,  $W_{i,j} = 2N_{i,j} + 1$ .计算得到以(i, j)为中心的窗口内像素的均值和方差分别为:

$$L_{i,j} = \frac{1}{W_{i,j}} \sum_{(k,l) \in W_{i,j}} y(k, l) \quad (10)$$

$$R_{i,j}^2 = \frac{1}{W_{i,j}} \sum_{(k,l) \in W_{i,j}} (y^2(i, j) - L_{i,j}^2) \quad (11)$$

在图像点(i, j)的变化系数为:

$$CV_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{L_{i,j}} \quad (12)$$

逐行对图像进行扫描检测窗口内的场景变化,窗口自动变化的方法为:

$$N_{i,j+1} = \begin{cases} \min[N_{i,j} + 1, N_{\max}], & CV_{i,j} \leq T_{i,j} \\ \max[N_{i,j} - 1, N_{\min}], & CV_{i,j} > T_{i,j} \end{cases} \quad (13)$$

$N_{\max}$ 和  $N_{\min}$ 决定最大和最小降斑处理窗口,  $T_{i,j}$ 为设定的阈值.由式(8)、(9),理论上可以将检测阈值设为  $R_n = 0.5227/\sqrt{L}$ .但是计算变化系数  $CV$  时用的是有限的样本数,根据统计规律可知,当统计样本比较少时,即使在均匀区域,  $CV$  还是有比较大的概率超过  $R_n$ ,为了计算方便假设变化系数  $CV$  服从高斯分布,可以得到<sup>[5]</sup>,  $CV$ 的均值和标准差为:

$$\overline{CV_{i,j}} = R_n \quad (14)$$

$$R_{CV_{i,j}} = \sqrt{\frac{1+2R_n^2}{2N}} \# R_n \quad (15)$$

$N$ 为统计样本数,即处理窗中参加统计计算的像素数,在这里  $N = W_{i,j} \times W_{i,j}$ ,可以将变化系数  $CV$ 的均值与其标准差之和作为阈值,  $T_{i,j} = R_n + R_{CV_{i,j}}$ ,或者将阈值取得更高一些,取为  $CV$ 的均值与其三倍标准差之和.如果取均值与标准差之和可得:

$$T_{i,j} = \left[ 1 + \sqrt{\frac{1+2R_n^2}{2W_{i,j}^2}} \right] \# R_n \quad (16)$$

一旦获得了 SAR 图像数据中每一位置  $(i, j)$  的重构处理窗口的大小,可以利用雷达散射截面 (RCS) 重构模型滤波降斑算法或者 Lee 滤波降斑算法进行重构处理.

Lee 滤波算法为,根据中心位置  $(i, j)$  的自适应窗口的大小,计算均值:

$$y(x, y) = \frac{1}{W_{i,j}^2} \sum_{(k,l) \in W_{i,j}} y(k, l) \quad (17)$$

此时,窗口内局域方差为:

$$R_y^2(i, j) = \frac{1}{W_{i,j}^2} \sum_{(k,l) \in W_{i,j}} y^2(k, l) - y^2(i, j) \quad (18)$$

根据乘性斑点模型  $y = x \# n = x$ ,可得窗口内的 RCS 的方差为<sup>[11]</sup>:

$$R_x^2(i, j) = \frac{R_y^2(i, j) + y^2(i, j)}{R_n^2 + 1} - y^2(i, j) \quad (19)$$

图像位置  $(i, j)$  的滤波输出像素值为:

$$\hat{x}(i, j) = y(x, y) + k(y(i, j) - y(i, j)) \quad (20)$$

其中  $k = \frac{R_x^2(i, j)}{x^2(i, j) R_n^2 + R_x^2(i, j)}$

### 4 组合算法实现

模拟退火降斑重构算法具有非常优异 SAR 图像重构性能,但是,计算量大是它的最大缺点,当图像较大时,计算量非常大,影响了该算法的实际应用.而前面介绍的自适应窗口重构算法不用叠代处理,计算量很小,但通过前面自适应窗口降斑重构算法的推导可以看到,幅度 SAR 图像数据斑点特性并不服从高斯分布,单视幅度 SAR 服从 Rayleigh 分布,只有在视数大于 4 视时,幅度 SAR 图像数据才近似服从高斯分布<sup>[10]</sup>.所以对于低视数的 SAR 图像,该假设是有问题的.本文解决这一问题的方法是,先用模拟退火算法对图像进行有限的几次叠代,对 SAR 图像进行初始降斑重构处理,由于模拟退火降斑重构算法不会改变图像的分辨率,并且我们利用的模拟退火重构算法完全是建立在 SAR 图像数据的统计特性的基础上,经过几次叠代处理之后,在保持图像数据分辨率的基础上增加了 SAR 图像数据的等效视数;接下来再利用自适应窗口重构算法对其进行降斑重构处理,此时可以用高斯分布很好地近似幅度 SAR 图像斑点数据.这在理论上克服了自适应窗口重构算法中的高斯假设产生的影响,该算法在运算速度上比模拟退火重构算法快了将近三十倍.从对实际 SAR 图像数据处理的结果可以看出,该重构处理方法在图像结构保持方面明显优于自适应窗重构算法,具有很好的斑点抑制和图像场景结构的保持性能.

### 5 重构结果与讨论

图 2 为大小 256@256 像素,9.6 米分辨率,由美国航天飞机获得的我国渤海某地的成像数据生成的,等效视数为 1.3 视 SAR 图像,图 3~6 分别为利用该成像数据用组合重构算法、模拟退火重构算法、自适应窗口重构算法和增强 Lee<sup>[12]</sup>滤波重构算法获得的重构图像.比较这几种重构算法获得的结果可以看到,这几种重构算法在均匀区域(例如图像中的黑色水体部分)都具有较好的斑点抑制效果.在图像场景非均匀区域,组合重构算法获得的结果与模拟退火重构算法获得的结



图 2 原始 SAR



图 3 组合重构算法

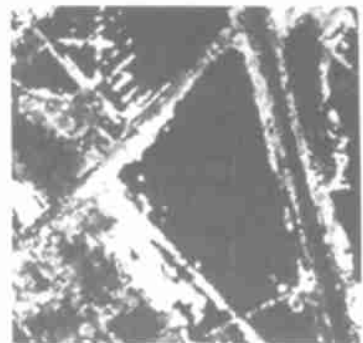


图 4 模拟退火算法

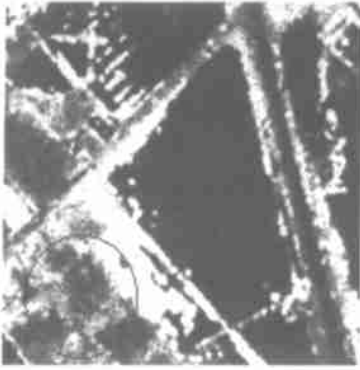


图5 自适应窗算法



图6 增强Lee算法



图7 图2数据除以图3数据结果

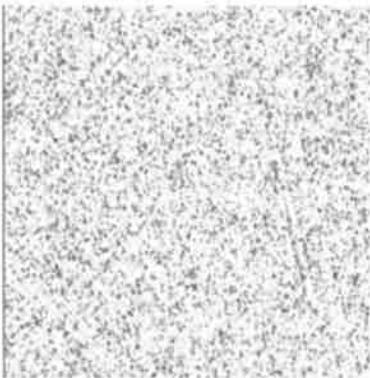


图8 图2数据除以图4数据结果



图9 图2数据除以图5数据结果



图10 图2数据除以图6数据结果

果差不多,它们都能很好地保持图像的结构信息和小目标;自适应窗口重构算法模糊了图像的纹理信息(例如图像中的椭圆部分);在非均匀区域增强 Lee 滤波器不能有效的去除斑点.这是因为该算法对图像非均匀区域为了保持图像的分辨率没有对该区域进行降斑处理.

为了更好的判别以上算法的图像结构保持性能,我们将原始图像数据分别除以 3~6 的图像数据,分别获得图 7~10 的比值图.通过观察比值图可以判别某一重构算法的结构保持性能<sup>[6]</sup>,其基本原理是,由于可以将 SAR 图像的建模为乘性斑点模型  $y(i, j) = x(i, j) \# n(i, j)$ , 其中  $y$  为幅度图像的像素值,  $x$  为真实图像值,  $n$  为均值为 1 的斑点,假设我们通过重构处理获得的图像估计值为  $\hat{x}(i, j)$ , 将原始图像数据除以重构获得的图像可得  $\frac{y(i, j)}{\hat{x}(i, j)} = \frac{x(i, j)}{\hat{x}(i, j)} \# n(i, j)$ , 如果获得的比值图像中表现的全部为斑点,而重构获得的结果图像中斑点获得很好的滤除,我们可以认为该算法具有很好的原图像场重构功能;如果比值图像中含有较多原图像结构,我们认为该算法虽然具有较强的滤波降斑效果但对图像结构破坏较大.通过观察图 7~10 可以看到,组合重构算法与模拟退火重构算法都具有很好的图像结构保持性能,对原图像结构的破坏都非常小.能够在有效滤除斑点的同时很好的保持图像结构信息.自适应窗口重构算法对原图像的结构有一定的破坏;增强 Lee 滤波降斑算法由于对图像中非均匀区域不作降斑处理,所以在比值图中有许多空白.

组合重构算法在有效降斑的同时很好的保持了图像的结构

信息,其计算代价仅为模拟退火重构算法的几分之一,而其重构效果与模拟退火重构算法相当,具有较好的实用性.其计算代价略高于自适应窗口降斑,但其重构效果获得很大的提高,这主要是因为它在很大程度上克服了自适应窗口重构算法中的用高斯分布模型对 Rayleigh 分布模型的假设带来的影响.由于我们在处理中是利用航天飞机获得的实际 SAR 成像数据,并且对其它成像数据也进行了验证,并且根据 SAR 图像数据的统计模型进行处理,所以该算法具有较强的鲁棒性.

#### 参考文献:

- [1] White R G. Simulated annealing algorithm for SAR and MITI image cross-section estimation[A]. SPIE Proc on SAR Data Processing for Remote Sensing[C]. Rome: SPIE, 1994. 137- 147.
- [2] Lee Jong-sen. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images[J]. IEEE Trans, 1983, SMC213(1): 85- 89.
- [3] Frost V S, Stiles J A. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise[J]. IEEE Trans, 1982, PAM24(2): 167- 165.
- [4] Kuan D T, Sawchuk A A. Adaptive restoration of images with speckle[J]. IEEE Trans, 1987, ASSP235(3): 373- 383.
- [5] R J M Park, W J Song. Speckle filtering of SAR images based on adaptive windowing[J]. IEE Proc2vis, 1999, Image Signal Process2146(4): 191- 197.
- [6] Chris Oliver. Understanding Synthetic Aperture Radar Image[M]. Boston London: Artech House, 1998.

- [ 7 ] Stringa E, Smits P C. Soft morphology and Bayesian reconstruction for SAR image filtering [ A ]. IEEE 2001 IGARSS 01, Geoscience and Remote Sensing Symposium [ C ]. Sydney: IEEE, 3. 1158- 1160.
- [ 8 ] Geman S, D Geman. Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions and the Bayesian Restoration of images [ J ]. IEEE Trans, 1984, Pattern Anal Mach Intell 6: 721- 741.
- [ 9 ] Roger Fjortoft, Armand Lopes. Optimal Edge Detection and Edge Localization in Complex SAR Images with Correlated Speckle [ J ]. IEEE Trans, 1999, Geosci Remote Sensing 37( 5 ): 2272- 2281.
- [ 10 ] MARTIN F J, TURNER R W. SAR speckle reduction by weighting filter [ J ]. 1993, Int J. Remote Sens. 214, ( 9 ): 1759- 1774.
- [ 11 ] LEE J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images [ J ]. Computer Graph, 1981, Image Process 217: 24- 32.
- [ 12 ] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [ J ]. IEEE Trans on Geosci, and Remote Sensing, 1990, 28( 6 ): 992- 1000.

### 作者简介:



**刘振华** 男, 1964 年生于广西桂林, 2003 年在北京航空航天大学获博士学位, 现为南京电子技术研究所博士后科研工作站博士后, 广西师范大学物理与电子科学系副教授, 主要研究方向为: 遥感图像处理, 模式识别等.



**于文震** 男, 1965 年生于江苏省无锡, 1987 年毕业于南京大学数学专业, 长期从事雷达信号和数据处理研究工作; 现为南京电子研究所副总工程师, 主要研究方向为雷达图像处理、目标识别、雷达信号与数据处理等.

**毛士艺** 男, 1935 年生于江苏南京, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 博导, 中国电子学会信号处理专业副主任委员, 中国电子学会会士, 主要研究领域为: 高分辨雷达成像、信号建模与谱分析、信号检测与分类、多目标跟踪、数据融合和实时处理等.