

模拟退火法在 SAR 单视图像斑点噪声抑制中的应用研究

燕 英,周荫清,陈 杰

(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘 要: 本文针对合成孔径雷达(SAR)单视图像的特点,对 R. G. White 采用模拟退火估计雷达散射截面积(RCS)的算法进行了分析和改进;构造了新的邻域结构模型,在该模型上定义了一种新的目标函数,提出了相应的新算法.理论分析和对仿真 SAR 图像、真实 SAR 单视图像的处理结果表明,新算法在不影响均匀区域降斑效果的同时可以更好地保持图像的结构特征,辐射失真小,以较少的计算时间达到了令人满意的效果.

关键词: 合成孔径雷达;斑点噪声抑制;模拟退火;边缘检测

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1903-04

Speckle Removal for SAR Single-look Images by Simulated Annealing

YAN Ying, ZHOU Yin-qing, CHEN Jie

(Dept of E E, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Simulated annealing presents an additional way to suppress speckle in Synthetic Aperture Radar (SAR) images. This was exemplified by the simulated annealing algorithm for SAR Radar Cross-Section (RCS) estimation developed by R. G. White. However, analysis shows White's algorithm can be refined when it is applied to a SAR single-look image. Taking account of the speciality of the single-look SAR image, this paper proposes another neighborhood model and a new objective function based on the model, and then suggests a novel simulated annealing algorithm. Theoretical analysis and experimental results using simulated and real SAR single-look images show that, the novel algorithm improves structure preservation without degrading the speckle reduction in homogeneous areas. Moreover, it causes less radiometric distortion and shortens time cost with satisfying results.

Key words: synthetic aperture radar; speckle reduction; simulated annealing; edge detection

1 引言

SAR 在军事和民用领域得到了广泛应用并具有巨大的开发潜力,但斑点噪声的存在严重影响了 SAR 图像的量化应用,因此斑点抑制问题受到了广泛关注.斑点抑制的难点在于既要平滑斑点、提高辐射分辨率,又要保留结构特征、保持空间分辨率.国内外采用了多视处理、空域和小波域的多种滤波器进行斑点滤除,并将人工神经网络、形态学等多种理论应用于斑点抑制,其效果各具优缺点.模拟退火算法也是斑点抑制的途径之一.1982 年 Kirkpatrick 首先将金属退火过程应用到组合优化问题,1984 年 Geman 将模拟退火迭代引入图像处理^[1],此后,White 于 1994 年找到了模拟退火与 SAR 图像 RCS 估计的切合点^[2].多视处理严重地降低了空间分辨率.直接对单视 SAR 图像进行斑点抑制,有利于保持空间分辨率,但单视图像中斑点效应最为严重,不利于提高辐射分辨率的.因此适用于 SAR 单视图像的降斑算法既具有优势又富有挑战性.本文试图在 White 模拟退火算法^[2](简称 WSA 算法)的基础上,进一步研究模拟退火在 SAR 图像斑点抑制方面的应用技术,以期得到综合性能优秀的单视斑点抑制算法.

2 WSA 的讨论和改进

WSA 不失为一种良好的 RCS 估计方法,该方法的介绍见文献[2].但该算法的边缘处理是值得商榷的,因为:

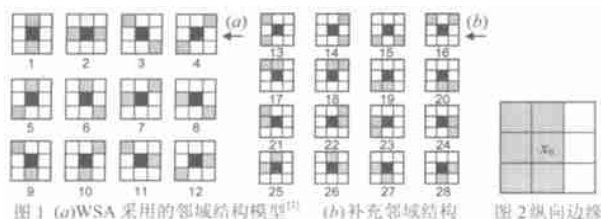
(1)对于单视 SAR 图像,由于斑点这样的乘性噪声的影响,简单地采用两个像素的比值运算结果作为边缘存在与否的判据,在迭代初期必然有较大的虚警和漏警,其置信程度比较低.即使在迭代后期已经较大程度抑制了斑点,但由于迭代前期不能很好保持边缘,迭代后期的处理也无济于事.

(2)选择判断边缘存在与否的门限需要人工参与,降低了斑点算法自动化的程度,同时也加入了人为的影响.

与之相对应的是 Touzi 的恒虚警率均值比边缘检测器^[3](简称 ROA).Touzi 根据 SAR 图像特性推导了虚警概率和检测门限的关系式,事先设定虚警概率从而计算检测门限,是斑点算法自动化允许的范畴.文献[4]提出在进行模拟退火之前,先利用 ROA 检测出图像中的边缘并按一定的比例因子增强边缘,以确保该边缘在模拟退火过程中能得到保持,迭代结束后再以相同的因子恢复边缘.

对于满足斑点完全发育条件的边缘像素,既保持边缘又

抑制斑点的做法就是将边缘两边分属于两个区域,边缘像素的滤波只由它归属的区域内的像素决定.基于此,我们提出改进了边缘保持的 WSA 算法,称为 EPRWSA (Edge Preservation Refined WSA):记录通过 ROA 得到的边缘(和线条)位置和走向,在模拟退火的迭代过程中,对于边缘(或线条)上的像素则根据其走向选择它从属的区域,只选择图 1(a)中属于该区域的几种结构作为候选结构.例如图 2 所示的边缘格局,假设 ROA 检测到该边缘并判断为纵向边缘,包含中心像素 x_0 在内的左边六个像素和右边三个像素分属 s_L 、 s_R 两个区域.此时只计算图 1(a)中 1、5、9 号结构下的 MAP 估计,并根据吉布斯概率选择其一作为 x_0 的滤波值.本文认为,除了图 1(a)中所示的结构取向,还可以考虑图 1(b)中的结构.这样一般情况下有 28 个候选结构,而对于图 2,除前述 3 种结构外,还有图 1(b)中 13、17、21、25、19、23、27 号结构可以作为候选.



3 模拟退火单视斑点抑制算法

3.1 邻域结构模型和目标函数的另一种定义

模拟退火中的迭代运算对于平滑斑点非常有利,但不可避免地会模糊边缘等结构特征,并带来辐射失真.设置 ROA 检测窗口较大,能够检测平均强度对比不大的边缘.但在某些情况下,ROA 的边缘检测概率并不高.例如,即使对单视图像采用 9×9 窗口,在虚警概率为 10^{-5} 时,对于平均强度比为 $1/3$ 的边缘,其理论检测概率为 79.2%,实测值还要更低.另外,对于图 2,将 s_L 的像素均值作为 x_0 的估计值应该比文献[2]中的式(8)更恰当.根据几种常见的边缘、线条的走向,本文采用如图 3(a)所示更为合理、有效的邻域结构模型,结合该模型提出另一种目标函数的定义,对结构特征检测可以起到补充作用.本文第 4 节的实验还证明了其较强的平滑作用可以降低处理时间,其辐射失真也很小.

该模型包括 14 种常见结构特征.设 x_i 表示某次迭代后该邻域内 9 个像素的估计值,各像素分属于两个具有不同均匀 RCS 的区域 $\{x_i | s_1, i = 1, 2, \dots, i_s\}$ 和 $\{x_i | s_2, i = i_s + 1, i_s + 2, \dots, 9\}$, 其均值 \bar{x}_1, \bar{x}_2 分别是 s_1, s_2 内 RCS 的估计值, v_1, v_2 分别是 s_1, s_2 内均值平方与方差的比值.在该结构模型上定义目标函数:

$$-W = \ln \left\{ \prod_{i=1}^{i_s} \frac{1}{\binom{v_1}{i}} \cdot \frac{x_i^{v_1-1}}{\bar{x}_1^{v_1-1}} \exp \left(- \frac{x_i}{\bar{x}_1} \right) \right\} + \ln \left\{ \prod_{i=i_s+1}^9 \frac{v_2}{\binom{v_2}{i}} \cdot \frac{x_i^{v_2-1}}{\bar{x}_2^{v_2-1}} \exp \left(- \frac{x_i}{\bar{x}_2} \right) \right\} \quad (1)$$

实际上,令 \hat{x} 是某邻域内 $\{x_i | s_a, i = 1, 2, \dots, i_a\}$ RCS 的估计值,

$$f(y | \hat{x}) = \frac{1}{\binom{v_a}{i}} \cdot \frac{y^{v_a-1}}{\hat{x}^{v_a-1}} \exp \left(- \frac{y}{\hat{x}} \right) \quad (2)$$

是被广泛接受的条件概率密度.设 s_a 中各像素上的斑点互不相关,可以得到联合条件概率密度

$$f(y_i | i = 1, 2, \dots, i_a | \hat{x}) = \prod_{i=1}^{i_a} \frac{1}{\binom{v_a}{i}} \cdot \frac{y_i^{v_a-1}}{\hat{x}^{v_a-1}} \exp \left(- \frac{y_i}{\hat{x}} \right) \quad (3)$$

在式(1)中用 \hat{x}_1, \hat{x}_2 分别取代 \bar{x}_1, \bar{x}_2 , 可见 $-W$ 就是根据式(3)求得的对数似然函数.对 $-W$ 分别求 \hat{x}_1, \hat{x}_2 的偏导数并令其为 0, 就可以解得最大似然(ML)估计 $\hat{x}_{1ML} = \bar{x}_1, \hat{x}_{2ML} = \bar{x}_2$. 当然,取更大窗口的邻域,可以得到更多结构,以及可能更优的估计.但考虑到算法执行时间和细小特征的保护,本文取 3×3 邻域.

3.2 算法描述

采用图 3(a)所示的领域结构模型及式(1)所示的目标函数,本文提出适用于单视 SAR 图像的模拟退火降噪新算法:

(1) 用 ROA 在原始图像中进行边缘(和线条)检测,记录边缘(和线条)像素的位置和走向;(2) 设定模拟退火的有关参数;(3) 在模拟退火的每一次迭代中:

(1) 当中心像素是边缘(和线条)像素时,根据其走向选择它所归属的区域的均值作为它在该次迭代的滤波值.例如图 2 所示的边缘结构, s_L 的均值即 x_0 的滤波值;

(2) 当中心像素非边缘(或线条)像素时,计算图 3(a)中各结构的吉布斯概率,按照吉布斯概率最大的结构,将它所归属的区域的均值作为它在该次迭代的滤波值.例如当图 3(a)中 3 号结构的吉布斯概率最大时(与图 2 相吻合), s_L 的均值即滤波值.其中,采用 Metropolis 准则^[5]来决定是否接受新一次迭代所得到的滤波值,即当某像素的当前解 x^p 与新一次迭代得到的解 x^{p+1} 满足 $W^{p+1} \leq W^p$ 时,认为 x^{p+1} 是比 x^p 更优秀的解,则接收 x^{p+1} 作为新解;当 $W^{p+1} > W^p$ 时,按照概率 $\exp \{ (W^p - W^{p+1}) / T \}$ 接收恶化解 x^{p+1} 作为新解.

(3) 迭代结束,输出图像.

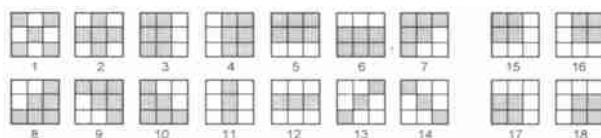


图 3 (a) 本文提出的邻域结构模型 (b) 补充邻域结构

3.3 计算机仿真和分析

考虑边缘两边 RCS 对比度较低的情况,仿真如图 4(a)所示的星载 SAR 单视强度图像(128×128),其 RCS 的设置如图 4(b)所示.应用本文提出的新算法,设 ROA 虚警率为 10^{-5} 、窗口尺寸为 9×9 、迭代次数为 10,计算吉布斯概率所需的初始

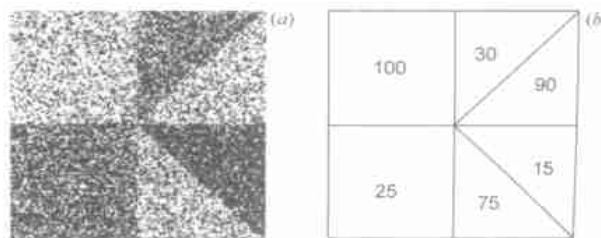


图 4 (a) 星载 SAR 仿真图像 (b) (a) 的 RCS 设置

温度 $T^0 = 2.5$, 第 q 次迭代的温度 $T^q = T^0 (1 + 4.0q)$. 记录边缘像素 $\{x_{i,j} \in E_{L_i} \mid i = 128, j = 64\}$ 在 10 次迭代中根据 ROA 边缘走向所等效的结构号出现的频数 (即在 3.2 节步骤 3(1) 后统计), 如图 5 中曲线 (a) 所示. 由图 4 (b) 的先验知识可知, 理想边缘检测结果是 3 号结构出现的频数为 1280 次. 但图 5 中曲线 (a) 的实际结果是 630 次, 加上误判成其它结构的频数有 130 次, 也就是说实际检测到的边缘像素只有 76 个, 漏警为 52 个, 正确检测及判断边缘走向的概率为 0.49. 记录 E_{L_i} 中像素根据吉布斯概率选择的结构出现的频数 (即在步骤 3(2) 后统计), 如图 5 中曲线 (b) 所示, 3 号结构的频数增为 847 次, 正确检测及判断边缘走向的概率增至 0.66. 边缘像素 $\{x_{i,j} \in E_{R_i} \mid i = 128, j = 65\}$ 得到类似的统计结果. 可见, 本文提出的新算法在 ROA 的基础上提高了正确检测边缘及判断走向概率, 使对比度不高的边缘在模拟退火法中得到了更有效的保持.

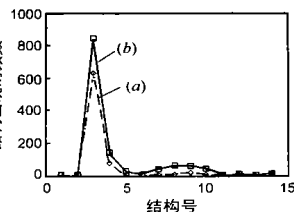


图 5 中像素结构出现的频数 (a) 为只有 ROA 的统计结果; (b) 为加入吉布斯概率选择后的统计结果

3.4 进一步完善

在 3.2 节所述算法的基础上, 可以增加图 3 (b) 所示的补充邻域结构. 如果要强调单视图像中孤立散射体的保护, 还可以参照文献 [6] 首先检测点目标, 再进行常规滤波, 最后恢复点目标的方法. 另一方面, 式 (1) 或式 (3) 只考虑了场景中 RCS 均匀的情况, 如果加上被广泛接受的 Gamma 分布 (均值为 μ 、阶次为 ν) 场景先验模型 [7], 则式 (1) 变为

$$-W = \ln \left\{ \prod_{i=1}^{i_s} \frac{1}{(1)} \cdot \frac{x_{i1}^{-1}}{x_{i1}} \exp \left\{ -\frac{1}{\mu_1} \frac{x_{i1}}{x_{i1}} \right\} \right\} + \ln \left\{ \prod_{i=1}^{i_s} \frac{\nu^{\nu}}{(\nu)} \cdot \frac{\nu_1^{\nu-1}}{\mu_1^{\nu}} \exp \left\{ -\frac{\nu \cdot x_{i1}}{\mu_1} \right\} \right\} + \ln \left\{ \prod_{i=i_s+1}^9 \frac{2^2}{(2)} \cdot \frac{x_{i2}^{-1}}{x_{i2}} \exp \left\{ -\frac{2}{\mu_2} \frac{x_{i2}}{x_{i2}} \right\} \right\} + \ln \left\{ \prod_{i=1}^{i_s} \frac{\nu^{\nu}}{(\nu)} \cdot \frac{\nu_2^{\nu-1}}{\mu_2^{\nu}} \exp \left\{ -\frac{\nu \cdot x_{i2}}{\mu_2} \right\} \right\} \quad (4)$$

就可以解得 MAP 估计值 (但是, 如何合理计算 s_1 内的 μ_1 和 ν_1 , 还需要进一步研究. 同理可得 \hat{x}_{2MAP} .)

$$\hat{x}_{1MAP} = \frac{(\nu_1 - 1 - i_{s-1}) + \sqrt{(\nu_1 - 1 - i_{s-1})^2 + 4\nu_1 i_{s-1} \bar{x}_1 / \mu_1}}{2\nu_1 / \mu_1} \quad (5)$$

4 算法性能测试和分析

据文献 [6], 在算法中加入该文对孤立散射体的处理, 就可以很好地保持点目标空间分辨率, 因此本节不再评价此项性能. 文献 [7] 已对 WSA 与 Lee 等非迭代空域滤波做了比较, 本节也不再赘述. 本节着重于两类场景的单视图像来评价 WSA 与本文提出的新算法. 一类是均匀场景, 用以衡量算法对斑点的平滑和所带来的辐射失真. 另一类是带有边缘等结

构的场景, 以评价算法对结构特征的保持能力. 实验中, WSA 算法初次迭代的边缘判决门限 (见文献 [2] 式 (6)) 取 3.0, 其在各次迭代的取值服从前述温度的对数律; 未提及的参数同 3.3 节. 新算法中迭代次数较少, 且目标函数定义与传统模拟退火法 [1] 有区别, 因此其滤波值仅相当于全局最优 MAP 估计的近似值, 但实验证明其滤波效果已经令人满意.

选取一幅均匀海面的 SEASAT 单视图像, 降斑效果见表 1. 其中, μ 、 $M_{ENL} = \mu^2 / \sigma^2$ 和 $\sigma = 10 \log \left(\frac{1}{\sqrt{M_{ENL} + 1}} \right)$ 分别代表 SAR 功率图像的均值、标准差、等效视数和辐射分辨率, 均值偏差 μ 反映了滤波所带来辐射偏差. 从表 1 可以看到, 虽然同是 200 次迭代, WSA 比 EPRWSA 获得的等效视数低得多. 其原因是 WSA 的边缘检测在单视图像均匀区域中有较大的检测虚警, 某些像素被当成边缘像素或孤立散射体保护起来了; 而 EPRWSA 采用 ROA, 降低了检测虚警. 新算法 20 次迭代所取得的等效视数与 EPRWSA 150 次迭代的结果相当, 但前者所带来的辐射偏差要小得多, 并且执行时间仅为后者的 1/3. 此外, 迭代次数相同时 EPRWSA 比 WSA 的运行时间略短.

表 1 SEASAT 单视图像均匀场景斑点噪声平滑效果

方法	迭代 次数	μ ($\times 10^6$)	σ ($\times 10^6$)	(dB)	M_{ENL}	μ (dB)
原图像	-	7.12	7.12	3.01	1.00	-
WSA 算法	200	7.93	2.19	1.06	13.20	0.47
EPRWSA 算法	200	9.98	1.75	0.70	32.42	1.47
	150	10.00	1.83	0.73	29.99	1.48
本文提出模拟退火降斑新算法	20	6.79	1.23	0.72	30.60	-0.21

选取图 6 (a) 所示的 RADARSAT 单视图像 (210×210), WSA 算法 200 次迭代得到图 6 (b), 本文提出的新算法 20 次迭代得到图 6 (c). 可见本文提出的新算法比 WSA 算法在均匀区域斑点平滑和边缘等结构特征的保持方面都有提高.

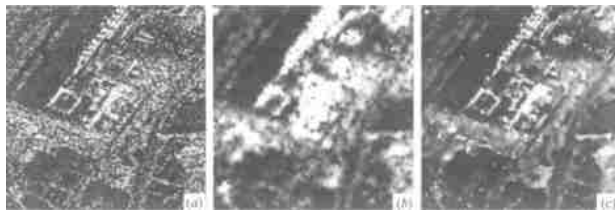


图 6 (a) RADARSAT 单视图像 (b) WSA 算法的降斑结果 (c) 新算法的降斑结果

5 结论

根据 SAR 图像的马尔可夫特性和吉布斯分布, 模拟退火法可以应用于 SAR 图像斑点抑制. White 的 RCS 估计模拟退火算法可以在边缘结构特征保持方面得到改进. 基于新构造的邻域结构模型和和目标函数, 本文提出了适用于 SAR 单视图像的模拟退火降斑新算法. 该算法不仅更好地平滑了单视 SAR 图像中的斑点噪声、保持了图像中的边缘等结构特征, 而且辐射偏差小, 有利于滤波后图像的定量化应用, 算法处理时

间也大大降低.应用新算法对 SAR 单视图像进行斑点噪声抑制,可以获得高空间分辨率和高辐射分辨率的图像.

参考文献:

- [1] Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 721 - 741.
- [2] White R G. A simulated annealing algorithm for radar cross-section estimation and segmentation[A]. SPIE Int. Conf. on Applications of Artificial Neural Networks V[C]. Orlando, FL, 1994, 2243: 231 - 241.
- [3] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1988, 26(6): 764 - 773.
- [4] Ma Z, Mao S, Liu X. SAR image reconstruction by a thin and weak feature preserving simulated annealing approach[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(3): 155 - 159.
- [5] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] 李春升, 燕英, 等. 高分辨率星载 SAR 单视图像斑点噪声抑制实现方法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 13 - 17.
- [7] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Image [M]. Norwood, MA: ARTECH HOUSE, INC., 1998.

作者简介:



燕 英 女, 1974 年生于四川宜宾, 1997 年在北京航空航天大学电子工程系获得学士学位, 同年入北京航空航天大学电子工程系攻读硕士学位, 并于 1999 年转入博士研究生学习阶段, 主要从事高分辨率雷达成像及雷达图像后处理等方面的研究工作.



周荫清 男, 1936 年生于湖南湘潭, 1959 年毕业于北京航空学院, 现任北京航空航天大学电子工程系教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究方向包括: 信息获取与处理、高分辨率雷达成像、阵列信号处理与空间谱估计、信息处理与对抗.