

SAR 图像组合分割算法

刘振华,毛士艺,袁运能

(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘 要: 由于存在乘性斑点噪声的影响,给 SAR 图像分割造成很大困难,本文研究利用最大似然区域增长分割算法,提出区域增长前引入自适应边缘检测,图像分割性能获得较大提高.介绍了我们研究的分割性能优异的模拟退火分割算法,提出了分割性能接近模拟退火并且在 SAR 图像分割中比较实用的模拟退火和最大似然混合分割算法,并给出了这些分割算法的分割性能比较,以及在实际分割 SAR 图像时应当如何选择分割算法.

关键词: 合成孔径雷达; 分割; 自适应; 模拟退火; 最大似然

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0833-04

Compounding Segmentation for Synthetic Aperture Radar Images

LIU Zhen-hua, MAO Shi-yi, YUAN Yun-neng

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

Abstract: The multiplicative nature of the speckle noise in SAR images has been a big problem in SAR image segmentation. The maximum likelihood region merging segmentation algorithm is studied and employed. An adaptive edge detect procedure is introduced into the algorithm here and better segmentation performance of the improved algorithm with the adaptive edge detect is involved. A simulated annealing segmentation algorithm with excellent performance is studied and introduced here, and a hybrid algorithm which is practical in SAR image segmentation combines simulated annealing algorithm and maximum likelihood algorithm together to achieve a similar performance with the simulated annealing algorithm is also proposed. Segmentation comparison between these algorithms is given as well as instructions of how to select the segmentation algorithms in practice.

Key words: SAR; segmentation; adaptive; simulated annealing; maximum likelihood

1 引言

SAR 图像中存在较强的乘性干涉斑点噪声,特别是对于低视数的 SAR 图像,斑点噪声更强,例如当 SAR 图像视数 $L = 1$ 时,真实场景信号与斑点噪声比为 1,所以利用传统的图像处理技术分割 SAR 图像不可能获得好的结果.给对 SAR 图像分割造成很大困难,在图像分割的过程中尽量抑制斑点噪声而又能尽量保持图像的结构和分辨率是获得一个好的分割的关键.如果先采用滤波器对图像进行降斑(例如采用自适应窗口降斑滤波器^[2],模拟退火降斑滤波器^[3]等),再进行分割可以给分割以很大的方便,但是,现有的任何滤波器在降斑的过程中都不可避免会损失一些目标和结构信息,影响最终分割效果.所以一个好的分割应当是,根据从图像中获得的信息,利用适当的算法在图像分割的过程中抑制斑点,即该算法既要能尽量保持图像的结构和分辨率,又要能尽量抑制斑点,同时算法不受图像视数和分辨率的影响.本文给出了我们研究并提出的自适应边缘检测最大似然区域增长算法^[1],在分割初始阶段引入了自适应检测,对图像中的均匀区域和非均

匀区域进行不同的初始分割,在没有增加计算代价的前提下(计算代价还会减少),极大的提高了 SAR 图像的最终分割性能.然后给出了我们研究改进的分割性能优异的模拟退火分割算法.由于模拟退火分割算法计算代价很大,我们综合以上分割算法特性,提出将模拟退火算法与最大似然分割算法结合的组合算法,该算法极大的减少了分割计算代价(对于 300×300 像素大小的图像,与模拟退火分割算法相比,计算代价减少了二十多倍,图像增大时,减少得更多),并且图像的分割性能与模拟退火分割算法相近.最后我们将前面的各种分割算法对实际 SAR 图像分割获得的结果进行比较,给出对各种算法的评估,指出在实际应用中如何选择分割算法.

2 自适应边缘检测的最大似然区域增长算法

这里设计的分割算法就是根据 SAR 图像的灰度特性,自动将图像分割成一块块灰度值相同的区域.先将图像分割成相等大的矩形方块(例如 8×8 像素或 16×16 像素),通过自适应边缘检测的方法获得图像的边缘信息,根据图像的边缘信息,将图像再细分,当大的方块中存在边缘时,将大方块等

分成 4 个小一些的方块 (例如 16 × 16 分成 4 个 8 × 8), 再在 4 个小方块中检测是否存在边缘, 如果存在边缘则再细分, 一直细分到给定的一个最小值 (例如 2 × 2 或单个像素) 为止. 这样做的好处是, 对于不存在边缘的大块均匀区域, 我们可以将该区域的初始分割分得大一些以便于下一步的统计合并, 而对于存在边缘或图像纹理变化比较快的区域, 可以得到比较小的初始分割, 以便于保持图像边缘的分辩能力, 准确定位边缘. 所以, 这种分割方法最重要的是比较准确的检测到和定位边缘. 在此, 我们采用自适应边缘检测法先检测图像的边缘, 我们称利用这种方法获得的网格为自适应网格.

将图像分成一个个网格, 并且认为网格内图像为均匀区域, 接下来就是利用区域增长算法合并相邻的两个被判别为灰度均值相同的网格使区域增长. 利用 SAR 图像统计的最大似然 (ML) 方法^[1], 我们提出了基于自适应边缘检测的最大似然区域增长算法. 它是基于 SAR 图像统计分布的最大似然方法来判别. 其理论依据是, 在均匀区域, SAR 图像服从 分布^[1]. 为了推导最大似然方便, 我们在推导中假设 SAR 图像为单视, 图像为单视时, 强度 I 从服从负指数分布^[1], 并且假设像素不相关, 当相邻的两个被认为是均匀的区域中分别含有 N_A 和 N_B 个像素, 两区域的均值分别为 μ_A 和 μ_B , 它们的联合概率分布为^[4]:

$$p(\mu_A, \mu_B | I_j, N_A, N_B) = \prod_{j=1}^{N_A} \frac{1}{\mu_A} \exp(-I_j/\mu_A) \prod_{j=1}^{N_B} \frac{1}{\mu_B} \exp(-I_j/\mu_B) \quad (1)$$

等式两边取对数整理后得到两个区域分离的似然函数为:

$$\ln p = \ln p_{split} = -N_A \ln \mu_A - N_B \ln \mu_B - (N_A + N_B) \quad (2)$$

在此用到了假设区域 A 中像素的均值 $\bar{I}_A = \mu_A$, 区域 B 中像素的均值 $\bar{I}_B = \mu_B$, 如果相邻的两个区域为同一个均匀区域 $\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0$, 这时, 窗口中为均匀区域的似然对数为:

$$\ln p_{merge} = - (N_A + N_B) \ln \mu_0 - \frac{(N_A + N_B) \bar{I}_0}{\mu_0} \quad (3)$$

均匀区域的像素强度平均值 μ_0 的最大似然 (ML) 解为 $\mu_0 = \bar{I}_0$, 将其代入式 (3), 将式 (2) 与式 (3) 相减可得到相邻两区域分离与合并的似然对数差:

$$\ln p_{split} - \ln p_{merge} = -N_A \ln \bar{I}_A - N_B \ln \bar{I}_B + (N_A + N_B) \ln \bar{I}_0 \quad (4)$$

在进行相邻两区域合并检测时, 由上式判别两区域是否应当合并, 当 $\ln p_{split} - \ln p_{merge}$ 大于给定的一个阈值时判定相邻两区域不能合并, 当 $\ln p_{split} - \ln p_{merge}$ 小于阈值时判定相邻两区域应当合并. 阈值的确定由预先设定的相邻两区域像素的均值比 $r = \mu_A / \mu_B$ 和两区域的像素数 N_A, N_B 决定. 我们可以通过设定不同的 r 控制最终分割的区域数.

3 模拟退火分割算法实现

模拟退火算法是一种利用统计方法对图像进行分析处理时建立的一种统计模型算法, 它是建立在马尔可夫随机场模型 (MRF) 基础上, 马尔可夫随机场模型于 1965 年由 Abend Etal 开始研究, Hassber 和 Cross 等人于 70 年代利用该模型及其衍生出的各种模型用于图像处理, 随后 Haluk Derin, S. Geman 和

D. Geman^[5]等人利用吉布斯模型 (GRF) 同马尔可夫随机场联系在一起用于图像恢复、纹理分析、边缘检测等领域, 模拟退火算法^[6,7]就是该技术的应用之一, 该算法适合于求解大规模的优化问题, 特别是当优化问题有许多局部极值而全局极值又很难求出时, 该算法非常有效. 在此我们研究了模拟退火分割算法, 先通过 SAR 图像统计模型推导出图像的代价函数, 然后通过模拟退火方法将代价函数最小化以获得一个全局最优的结果.

我们的处理方法是, 在进行分割计算时, 先进行初始分割并对每个分割区域进行标号, 每个像素属于某个标号区域, 通过改变一个像素所处的状态 (即将该像素的区域标号从当前值改为与其相邻区域的标号), 然后计算两种状态的代价函数的似然差, 判定是否接受这种分割改变. 在这里, 我们利用的是单个像素向相邻区域的随机移动, 并且计算代价函数时并不单单考虑该像素及其邻域像素而是考虑相关的整个区域. 由于处理是逐个像素进行的, 所以这种分割获得的结果并不改变图像的分辩率.

3.1 SAR 图像似然函数

强度 SAR 图像在均匀区域服从 分布, 假设图像共分成 M 个均匀区域, 每个均匀区域有 N_j 个像素, j 为第 j 个区域标号, 整个图像的联合概率分布为:

$$P = \prod_{j=1}^M \prod_{i=1}^{N_j} \frac{1}{\mu_j} \exp(-z_i/\mu_j) \quad (5)$$

其中 j 为阶参数, 表示标号为 j 的区域及附近的场景变化快慢, z_i 表示图像中像素 i 的强度值, μ_j 表示区域 j 的真实均值, I_j 为 j 区域均值的估计值. 给式 (5) 取对数可以得到联合概率分布的对数似然函数:

$$L = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} (-\ln \mu_j - z_i/\mu_j) + \sum_{j=1}^M (N_j - 1) \ln z_i - z_i/\mu_j \quad (6)$$

由于区域 j 真实的均值 μ_j 不知道, 只能估计, 即计算获得的区域 j 像素的平均值, 用下式来估计 μ_j , 并且用式 (8) 估计区域 j 的对数均值:

$$\bar{\mu}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} z_i \quad (7)$$

$$\bar{I}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \log z_i \quad (8)$$

式 (6) 可化为:

$$L_{\text{似然估计}} = - \sum_{j=1}^M N_j (\ln \mu_j + \sum_{i=1}^{N_j} z_i/\mu_j) + \sum_{j=1}^M (N_j - 1) \ln \bar{I}_j + \sum_{j=1}^M N_j \ln \bar{\mu}_j - \sum_{j=1}^M (N_j - 1) \bar{I}_j \quad (9)$$

由于在计算时, 每次只从当前区域移动一个像素到另一个区域, 所以每次计算只涉及到两个区域, 并且由于两个区域是相邻的, 它们的阶参数 j 可以近似假设相同. 所以在实际计算时似然函数可近似为:

$$L_2 = N_k (\ln \bar{\mu}_k - \bar{I}_k) + N_l (\ln \bar{\mu}_l - \bar{I}_l) \quad (10)$$

$$C_2 = -L_2 \quad (11)$$

C_2 为代价函数。

3.2 模拟退火分割

利用模拟退火算法进行分割时,首先对图像进行初始分割,初始分割有两种方法,一种是将图像分成 3×3 (或 4×4 、 5×5) 的均匀网格,另一种是利用前面的自适应边缘检测方法指导初始分割,初始分割的大小对最终获得的结果影响不太大。但是利用后一种初始分割方法可以加快模拟退火计算的收敛,计算时间可减少很多。初始分割后,利用模拟退火调整每个区域,方法是,随机改变一个像素的状态(即将一个像素随机的从一个区域移到与其相邻的区域),利用式(10)计算改变前和改变后的对数似然值,当改变后代价函数减少时,接受这种改变,当改变后代价函数增加时,以一定的概率接受这种改变,所以分割的改变和状态改变后的代价函数 C_b 与当前代价函数 C_a 之差 C_{ba} 以及退火温度参数 T 这三个量有关,当代价函数差大于 0 时,参数 T 越大,接受这种改变的概率越高。计算时先设定一个比较大的参数 T (初始温度),然后以一个函数形式逐渐减小 T 。

在计算中需要说明的是,如果某一像素有两个或两个以上的不同区域与其相邻,我们采取的方法是按相等概率随机选取一个进行处理。另外,在消除图像边缘毛刺,使图像边缘更加平滑,边缘根清晰的操作时,我们的处理方法是在计算代价数 C 时加入一边缘平滑项,对代价函数进行加权处理,定义为:

$$C = C_0 + \lambda \sum_j (1 - \delta_{ij}) \quad (12)$$

i, j 为像素的区域标号, δ_{ij} 为标号为 i 像素的八邻域。改变常数 λ 可用于控制最终分割的边缘平滑性, λ 的取值可在 $0 \sim 0.1$ 之间, λ 越大生成的分割图像边缘越平滑。

4 模拟退火分割与最大似然区域增长算法结合

模拟退火分割算法具有非常优异的分割性能,但是,计算开销大是它的最大缺点,并且该算法的计算量与图像大小成平方关系,该分割算法的计算时间 T 与图像大小 S 的关系为: $T \sim S^2$, 同样为 300×300 大小的图像,计算时间比前面的合并算法多八、九十倍。

由于前面的最大似然区域增长算法具有计算代价小,合并时利用了 SAR 图像特性的最大似然分离合并判断,具有很好的分割性能,但该方法对图像的初始网格分割依赖较大,因为,初始分割网格小,不利于最大似然统计判别;初始分割网格大,网格中就可能含有边缘结构,所以当我们引入自适应边缘检测引入该方法时,图像的分割性能获得较大的提高,但边缘检测并不能将图像中所有的边缘检测出来,同时抑制所有斑点噪声产生的虚假边缘。所以其分割效果比模拟退火分割算法差。由于模拟退火分割算法不受图像初始分割的影响,我们可以利用该算法这一好的特性,即先用模拟退火进行很少的几次迭代循环处理对图像进行初始分割,利用获得的初始分割引导接下来的最大似然合并算法。从下面的处理结果来看,该算法分割性能接近于模拟退火分割算法,比自适应边缘检

测最大似然分割算法好,计算代价比模拟退火分割算法减少了二十多倍,只比自适应边缘检测最大似然分割算法计算代价多 3~4 倍。

5 结果与讨论

图 1 为大小 300×300 像素,9.6 米分辨率的 1.3 视 SAR 图像,图 2、图 3、图 4 和图 5 分别为利用最大似然分割算法、自适应边缘检测最大似然区域增长算法、模拟退火分割算法、模拟退火分割与最大似然分割算法结合获得的分割结果。为了能够正确判别各种分割算法的性能,我们通过阈值设置,使各种分割获得的区域数差不多,分别将图 1 分割成 2387、2331、2075 和 2031 个均匀区域。比较图 2 和图 3 可以看到,自适应边缘检测区域增长分割由于在进行最大似然合并处理前我们引入了自适应边缘检测获得边缘图指导初始网格分割,比未利用自适应边缘检测,直接利用最大似然分割方法获得的结果分割性能有很大提高。不但提高了最终分割的边缘定位精度,而且提高了均匀区域抑制斑点的能力。根据其原理分析,其边缘定位精度仅误差 1、2 个像素。它的另一优点为相比其它的 SAR 图像分割算法计算代价较小,与前一种方法相同,计算时间 T 与图像大小 S 的关系为: $T \sim S \log S$ 。该算法的缺点是对于复杂的场景,分割获得的结果存在马赛克现象并且最终分割的结果依赖于初始网格分割的好坏,即初始的边缘检测性能。

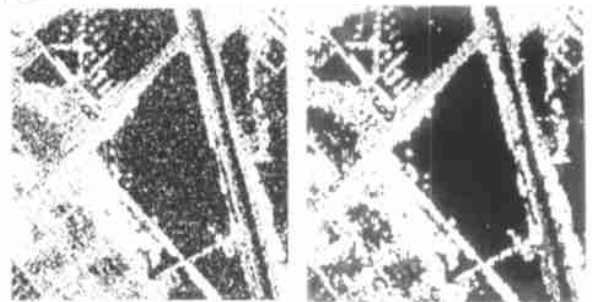


图 1 1.3 视 SAR 图像

图 2 最大似然分割

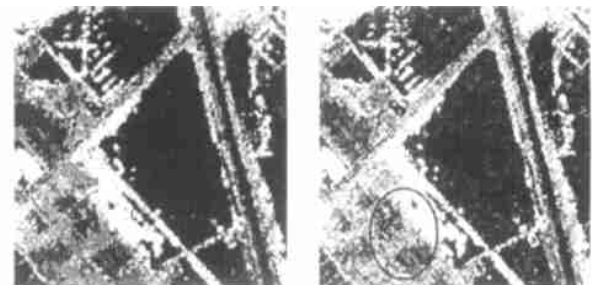


图 3 自适应边缘检测最大似然分割 图 4 模拟退火分割算法

图 4 为模拟退火分割获得的结果,与图 2 和图 3 比较可以看到,模拟退火分割算法获得的分割性能明显优于前面两种分割算法。该算法在极大抑制斑点噪声的同时,图像场景中的边缘、纹理、小目标获得很好的保持,在 SAR 图像分割中,图像的纹理的保持比较困难,但我们从图 4 中的左下部椭圆标出的区域可以看到,该区域中林区纹理的保持比较好,它是

在分割区域数小于前两种方法的前提下获得的. 该算法不受图像视数的影响, 并且能保持图像的分辩率, 所以说, 模拟退火分割算法具有非常优异的分割性能. 但是, 该分割算法的计算时间 T 与图像大小 S 的关系为: $T \sim S^2$, 计算开销很大. 在应用该方法时应当充分考虑这一因素.

观察图 5 的模拟退火与最大似然合并算法组合获得的结果可以看到, 该算法获得的结果和利用模拟退火分割算法获得的结果差不多, 但是, 对于 300×300 像素大小的图像, 该算法的计算代价只有模拟退火分割算法的二十分之一, 图像越大与模拟退火算法相比, 该算法计算代价越小. 其分割性能优于自适应边缘检测最大似然合并算法. 这主要是因为该算法利用模拟退火算法进行初始分割. 只需要利用模拟退火进行很少的几次迭代运算(一般 4~7 次), 对图像进行初始的较精确的分割, 然后利用最大似然合并算法对图像进行合并运算就可以获得很好的分割结果.

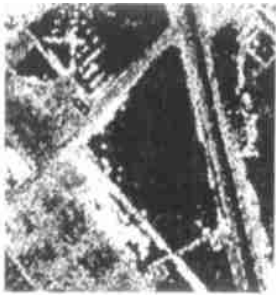


图 5 模拟退火最大似然混合算法



图 6 图 1 数据除以图 3 数据

为了更好的判别以上各种分割算法的性能, 我们将原始图像的图像数据分别除以图 3、4、5 的数据, 分别获得图 6、7、8. 如果在两图像数据相除获得的图像中不包含原图像的结构信息, 只存在斑点, 并且该分割算法能极大的抑制斑点噪声, 说明该分割算法既能够抑制斑点噪声的影响又能使图像的结构信息不失真、不变形. 分割后图像消除的只是斑点, 结构没有损失. 观察比较图 6、图 7 和图 8 可以看到, 三种算法中, 边缘检测最大似然分割算法结构损失最大, 模拟退火分割算法和模拟退火与最大似然混合分割算法两种分割算法的结构损失差不多, 结构改变都非常小, 在结构保持方面明显优于自适应边缘检测最大似然分割算法.



图 7 图 1 数据除以图 4 数据



图 8 图 1 数据除以图 5 数据

在实际选择 SAR 分割算法时, 应当根据处理图像的实际情况, 当对图像中边缘纹理结构要求不太高时(例如对大片森林、农田等的监测), 可以选用边缘检测最大似然分割算法以提高分割处理的速度; 当对图像场景中的边缘纹理以及小目标的检测要求较高时(例如对城区、军事目标等的分割), 可以选用模拟退火分割算法或者模拟退火和最大似然混合算法, 如果需要分割的图像较大应选用模拟退火和最大似然混合算法以达到既保持较高的图像分割精度又能较快的获得分割结果, 所以我们提出的模拟退火和最大似然混合分割是一种较实用的 SAR 图像分割算法.

参考文献:

- [1] Chris Oliver. Understanding Synthetic Aperture Radar Image [M]. Boston London: Arrech House, 1998. 88 - 204.
- [2] R J M Park, W J Song. Speckle filtering of SAR images based on adaptive windowing [J]. IEE Image Signal Process, 1999, 146 (4) : 191 - 197.
- [3] White R G. Simulated Annealing Algorithm for SAR and MITI Image Cross Section Estimation [C]. Rome: SPIE Proc, 1994. 2316: 137 - 147.
- [4] Oliver C J, D Blacknell, R G White. Optimum edge detection in SAR [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 1996, 143 (1) : 31 - 40.
- [5] Geman S, D Geman. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images [J]. IEEE trans Pattern Anal. Mach Intel, 1984 PAMI6 (6) : 721 - 741.
- [6] Cook R I, et al. Segmentation and Simulated Annealing [C]. Italy: SPIE Proc. Taormina, 1996, 2958: 30 - 37.
- [7] White R G. A simulated Annealing Algorithm for Radar Cross Section Estimation and Segmentation [A]. SPIE Int. Conf [C]. FL: Orlando, 1994, 2243: 231 - 241.

作者简介:



刘振华 男, 1964 年生于广西桂林, 北京航空航天大学电子工程系信息与信号处理专业在读博士生, 主要研究遥感图像处理, 模式识别.



毛士芝 男, 1935 年生于江苏南京, 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: 高分辨率雷达成像、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.