

文章编号:1001-9081(2010)04-0935-04

高分辨率合成孔径雷达图像的直线特征多尺度提取方法

陈天泽, 王建, 粟毅

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

(tzchen77@126.com)

摘要:针对传统的合成孔径雷达(SAR)多尺度边缘提取方法中直线提取连续性和完整性不好的特点,提出了一个由粗到精的多分辨率SAR图像直线特征多级提取框架,利用多尺度策略在降低SAR图像噪声影响的同时增强相邻共线点之间的连续性和完整性,并在不同的尺度图像中根据边缘特征的特点选择不同处理方法,来实现低分辨率条件下完整直线特征的粗略提取和高分辨率的精确定位。最后用高分辨率SAR图像跑道检测实验进行了验证,并将实验结果与相位编组法和Hough变换法进行了比较。

关键词:多分辨率分析;边缘检测;直线特征提取;塔式分解;中心直线支持区

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Multi-scale extraction approach of linear feature in high resolution SAR images

CHEN Tian-ze, WANG Jian, SU Yi

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: In this paper, a multi-level frame was designed to extract linear feature in multi-resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) images, to improve the extracted line's continuity and integrity by traditional methods. The speckle filtering and the linear feature extracting were executed synchronously and parallel, the different edge detection and edge points grouping method were used to extract linear feature coarse-to-fine according to the characteristics of collinear points in different scale images, and the linear features were extracted continuously, completely, accurately and efficiently. At last, the approach was tested by the runway extraction and road extraction; the results were analyzed with phase group and Hough transform.

Key words: multi-resolution analysis; edge detection; linear feature extraction; pyramid decomposition; center line support region

由于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像斑点噪声的存在, SAR图像直线提取受噪声的干扰严重,使得SAR图像直线提取较为复杂。高分辨率图像比低分辨率图像具有更好的细节分辨能力,但高分辨率图像中目标及其背景的特征也更加复杂,使得高分辨率条件下特征提取比中低分辨率影像的特征提取更加困难。

1 多尺度直线提取方法分析

直线提取的实质是利用直线方程对边缘检测后的边缘点进行编组,并计算直线方程参数的过程。由于SAR图像的直线特征提取受图像噪声、边缘检测效果等因素的影响,使得单一的边缘检测和直线提取方法或多或少存在问题,还需进行后续的处理,来提高边缘编组的精度、连接断裂的直线或断开过度连接线等^[1-2]。

SAR图像直线提取中的问题(如:连续性、完整性、精度)大都受图像尺度因素的影响,所以目前有很多方法采用多尺度策略来进行分析^[3-7]。

现阶段多尺度分析的常用策略为:在粗分辨率上提取直线特征(位置有些偏差,但能消除障碍物的影响),在精细的分辨率上对提取结果进行优化。在这一策略的基础上,根据多尺度分析理论,本文提出了用高分辨率SAR图像的多级线状

特征提取方法来克服直线特征提取中遇到的问题,提高了传统多尺度方法中提取直线的连续性和完整性。

2 线特征提取的多分辨率分析

线状目标诸如跑道、公路、街道等在低分辨率图像中呈现为一条连续的直线(即中心线),而在高分辨率图像中呈现为具有规则轮廓的条带区域。目标轮廓是线状目标的主要特征,所以线状目标的特征描述一般通过提取轮廓的边缘直线来完成。在图像的塔式分解过程中,小尺度图像中边缘细节信息丰富、相邻共线点之间连续性弱、边缘定位精度高,而大尺度图像中边缘稳定、相邻共线点之间连续性强、抗噪性好。所以直线特征提取的整个过程都受到尺度因子的影响。

SAR图像斑点噪声的抑制可以与多尺度分解结合起来。多尺度分解首先将图像分解为低频图像和高频图像,然后再递归地对上一尺度的低频图像进行相同分解,得到多尺度低频和高频图像。其中低频区域集中了图像的主要能量,高频区域中既包含了边缘和纹理信息,又包含了噪声。对各层高频图像进行相应的滤波处理即可实现SAR图像的去噪处理。

对于图像边缘检测,需要根据多尺度分析构造多尺度边缘检测算子,通过多尺度边缘融合,提高定位精度,减少噪声干扰,有效检测SAR图像的边缘。

收稿日期:2009-10-20;修回日期:2009-12-30。

基金项目:国防预研基金资助项目(9140A01060108KG01);航天支撑基金资助项目(900412A)。

作者简介:陈天泽(1977-),男,湖南益阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向:遥感信息处理与3S集成;王建(1985-),男,湖南湘潭人,博士研究生,主要研究方向:微波成像、雷达信号处理;粟毅(1961-),男,湖南株洲人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:雷达成像、信号处理。

在边缘编组中,直线提取的结果不但受单个边缘点准确性的影响,还与同一直线中相邻边缘点之间的连续性密切相关。所以采用多尺度塔式分解后的图像来进行直线提取,选择合适的尺度因子,即可获取连续性较好的完整直线,为高分辨率尺度图像精确定位提供初始信息。

正是因为图像尺度对直线提取的重要影响,所以,在直线提取中需要综合考虑尺度因子在各阶段的影响来设计多尺度策略,将 SAR 图像去斑与边缘检测在各尺度图像中综合考量,在粗糙尺度上对线状目标中心线支持区进行初步提取,进而在精细尺度上对提取结果进行优化,避免过多的无关信息影响提取效果和效率,保证提取结果的定位精度。

3 线特征多级提取框架

本文提出的高分辨率 SAR 图像的多级线状特征提取方法框架如图 1 所示。

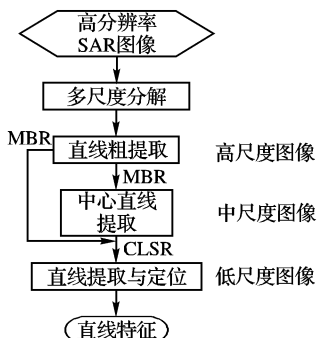


图1 直线特征多级提取框架

从内容来说该方法概括起来包括四个方面:相干斑滤波、多尺度分解、多尺度边缘检测与多级直线提取。多级提取方法具体步骤如下:

- 1) 利用多尺度塔式分解获取多分辨率图像;
- 2) 在高尺度图像中利用相位编组法^[8]来粗略提取直线并计算其最小外接矩形(Minimum Bounding Rectangle, MBR);
- 3) 在中尺度图像中利用边缘跟踪方法来获得直线的中心线及其支持区(Center Line Support Region, CLSR);
- 4) 在高分辨率 SAR 图像中根据 CLSR 利用中心线扩展方法来对直线进行精确定位。

3.1 相干斑滤波

相干斑是 SAR 图像固有的一种干涉现象,主要由成像体散射回波信号中均值为零的随机相位的相干作用造成的,对于单通道 SAR 图像模型,相干斑通常被描述为一种随机乘性噪声^[9]:

$$f = i \cdot n$$

其中: f 为 SAR 图像的强度测量值, i 表示理想的图像亮度值, n 是均值为1、方差为2,且相对独立于 i 的斑点噪声随机变量。因此通过对 SAR 图像作对数同态变换,将乘性噪声转换成为加性高斯噪声来处理:

$$\tilde{f} = \log(f), \tilde{f} = \tilde{i} + \tilde{n}$$

3.2 多尺度塔式分解

塔式分解将原图像分解成多尺度、多分辨率的子图像,低分辨率、尺寸较小的子图像在上层,高分辨率、尺寸较大的子图像在下层,从而构成图像金字塔。由于每一层分解后都采用了下2采样,所以每进行一层的分解,得到的分解信号的维数都要小于上一层信号的维数,从而达到维数压缩的目的。

实际应用中,只要选择合适的分解函数形式,即可确定相

应的分解滤波器,再确定进行分解的层数,把原始图像分解为低频图像和高频图像,对低频图像经相同方法再分解为一个低频图像和高频图像,如此经过多次分解后得到多尺度的低频和高频影像金字塔。

3.2.1 多尺度模型选择及构造

为了避免在低分辨率下产生高分辨率中不存在的新特征,本文参照 Contourlet 变换的多尺度构造方法,在直线提取过程中采用高斯核函数的拉普拉斯塔式分解进行多尺度分析,把原始图像分解为低频子带和高频子带,来捕捉奇异点;并基于边缘点的相位跟踪方法代替方向滤波器来将相关的奇异点汇集成边缘线段,获取直线方向,来实现多尺度图像中边缘直线的提取和描述。

3.2.2 理想尺度选择

在图像的多尺度分解过程中,多尺度变换的尺度对应着图像平滑的程度,亦是边缘细节的模糊程度,所以多尺度边缘检测和直线提取应用中的尺度选择面临一个关键问题:细节边缘的检测精度、相邻边缘点之间的连续性与噪声平滑效果三者之间的矛盾。对于边缘提取精度,需要选择较小的尺度;对噪声去除和相邻边缘点之间的连续性而言,则是尺度越大越好,此外,再考虑到直线提取的计算效率则是尺度越大,效率越高。综合以上因素,再考虑到 SAR 图像的低信噪比特性,为此在用多尺度变换进行边缘检测时,要选择较大的尺度才能得到较好的效果,边缘提取的精度则在后续的低尺度图像中实现。

3.2.3 高斯—拉普拉斯塔式分解

1) 建立高斯金字塔。当采用高斯平滑滤波器时,高斯金字塔的建立过程即高斯平滑亚采样的过程,其实质是采用高斯模板对上一层图像进行加权平均并降采样得到,其过程可用式(1)表示:

$$G^{k+1} = \text{Reduce}(G_k) = C_{(\downarrow 2)} G^k \quad (1)$$

其中: $C_{(\downarrow 2)}$ 为压缩平滑算子,下标中“ \downarrow ”后的数字表示亚采样率(本文为2); C 表示用于压缩平滑的卷积模板,即由高斯核函数生成的高斯模板。式(1)表明可用第 k 层的高斯图像来计算第 $k+1$ 层的高斯图像,金字塔的第0层即为原始图像。

2) 构造拉普拉斯金字塔。拉普拉斯金字塔是一组带通滤波序列图像,可由高斯金字塔相继两层之差得到,其数学描述式如下式:

$$L^{(k)} = G^{(k)} - \text{Exp}(G^{(k)}) = G^{(k)} - E_{(\uparrow 2)} G^{(k+1)} \quad (2)$$

其中: Exp 为 Reduce 的逆运算,是将图像在较粗的尺度上扩展,即利用插值法在给定的数值间插补新的样本值。

高斯—拉普拉斯金字塔的构架过程如图2所示。

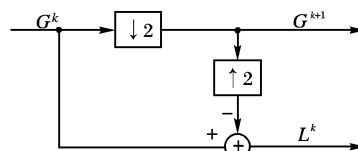


图2 高斯—拉普拉斯金字塔构建

3.3 多尺度边缘检测与直线提取

多级直线提取方法的实质,即:在多尺度影像空间的低分辨率影像中进行中心直线支持区检测,在高分辨率影像中进行直线提取和精确定位。其特点是:多尺度空间的中、高尺度影像中,通过降低 SAR 图像分辨率,增强直线的连续性,以提高特征提取检测的准确率和确定初始参数;在低尺度影像(一般为原始分辨率图像)中,在缩小的影像处理范围内,提

高特征提取的精度和算法的计算效率。

3.3.1 高尺度图像中心直线初始参数获取

经过塔式分解后的高尺度图像分辨率低,具有图像边缘稳定、共线点(包括弱边缘)连续性好、抗噪性强的特点。高尺度图像中,直线目标表现为一条连续的直线(一般为直线目标的中心直线),高尺度图像中特征提取的目的是利用相邻点之间连续性较好的特点来提取直线目标的中心直线初始参数,可以避免出现直线断裂的情况。

高尺度图像中的直线提取方法采用相位跟踪方法和非极大值抑制方法进行。首先,利用相位编组中边缘提取方法对多尺度图像进行边缘检测,然后对边缘图像进行非极大值抑制,去掉边缘图中那些不是局部极大值的点,最后再根据边缘点相位信息跟踪来进行直线编组,获取大于直线长度阈值的初始直线,并计算初始直线方程、起始点以及 MBR 等初始参数。

高尺度图像中心直线初始提取中,共线点之间较好的连续性可以解决相位跟踪中直线断裂的问题,能较好地适应高尺度图像中的弱边缘和建筑物干扰等现象,所以高尺度图像中心直线初始提取的特点是可以提取弱边缘,连续性较好,但同时也存在虚警和过连接现象,需要在后续的中尺度处理中消除。

3.3.2 中尺度图像的 CLSR 确定

中尺度图像的共线点连续性比高尺度图像差,但比低尺度图像好,弱边缘能基本保持连续,但断裂直线已不能保持连续,边缘和细节相对保持较好。中尺度图像中,直线目标表现为狭长的条带,目标轮廓边缘由连续的直线组成。中尺度图像中特征提取的目的是在直线目标中心直线初始参数的基础上,提取线状目标轮廓的 CLSR,并消除在高尺度提取中产生的过连接现象。

中尺度图像的边缘检测采用 ROA 方法^[10]获取相对正确的边缘点,为了减少在初始中心直线 MBR 中不相关边缘点的干扰,利用直线目标的宽度沿中心直线生成直线目标边缘的平行直线扩展区,排除那些到中心直线距离大于目标宽度的边缘点,然后利用边缘跟踪方法和直线长度阈值来获取直线目标轮廓边缘的 CLSR。

中尺度图像直线提取是在中心直线的 MBR 中进行直线跟踪,可以剔除高尺度提取中带来的虚警,又由于点与点之间的连续性不如高尺度好,可以消除过连接现象,保留正确的连续性。

3.3.3 低尺度图像中直线特征精确定位

低尺度 SAR 图像分辨率最高,边缘和细节最丰富,边缘定位精度最高,经过滤波后去除了图像的噪声干扰。低尺度图像中,直线目标表现为带状区域,目标轮廓表现为沿中心线平行扩展的两条边缘线,由于遮挡等导致的弱边缘存在,使得目标轮廓边缘一般由不连续的线段组成。低尺度图像中特征提取的目的是在直线目标轮廓边缘 CLSR 的基础上,利用中尺度直线提取的连续性,对直线目标轮廓边缘直线进行高精度定位。

低尺度中的边缘检测方法采用 ROAWA 方法^[11]实现,并在前面获取的目标轮廓 CLSR 的对应区域中,根据等距原理利用目标宽度参数扩展中心线,来确定目标轮廓直线的边缘点,并利用稳健的直线拟合方法,计算精确直线参数来实现直线的精确定位。

低尺度图像边缘检测是在高分辨率图像中采用精确的边缘提取方法进行,所以边缘点定位较高,利用等距原理来提取

共线点,便于控制直线提取的精度以获取高精度的直线参数。

4 实验与结果

本文对机场跑道提取应用进行了实验,取得了较好的结果。实验数据为一幅大小为 3000×1000 的航空单视 SAR 图像(为了显示方便,将图像进行了压缩),分辨率为 1 m,图像覆盖场景为一个机场,包括一条主跑道和滑行道,如图 3 所示。

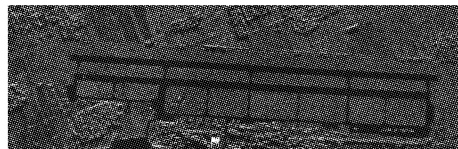


图3 原始图像

本文采用上述的直线特征提取方法来进行实验:飞机跑道宽约 30~100 m,所以尺度因子 $\sigma = \max(\lfloor \ln(100/4) \rfloor, 3)$ 或 $\sigma = \min(\lfloor \ln(100/4) \rfloor, 5)$, σ 最大值取 4。为了加强边缘点之间的连续性,本文选择了 5×5 的邻域范围来实现连续性和计算量的折中。图 4(a)所示为高尺度图像中边缘提取结果,然后在其基础上采用相位跟踪方法来提取连续的跑道中心线,结果如图 4(b)所示。图 4(c)所示为 $\sigma = 3$ 的直线跟踪结果,最终的高分辨率图像跑道精确提取结果如图 4(e)所示,其中跑道平行边缘提取结果展示在图 4(d)中。

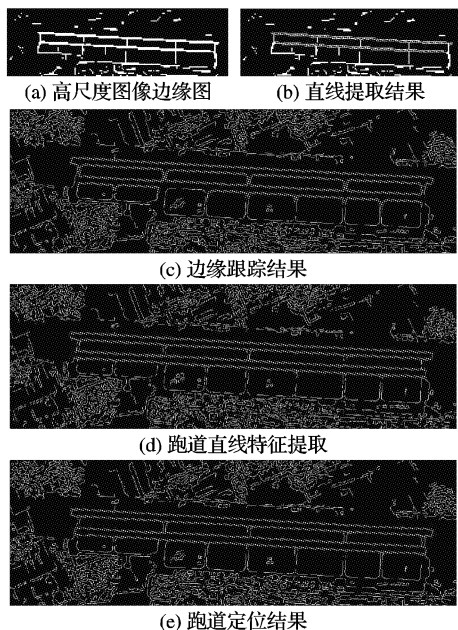


图4 图3的多级跑道提取结果

从图 4 中可以看出本文方法能较好地得到各阶段的理想结果。图 4(b)的中心线跟踪提取了完整的连续的边缘,其结果证明图 4(a)低分辨率图像中提取的共线边缘点具有较好的连续性,此外,图 4(b)提取的结果包括跑道和滑行道的中心线而没有其他的连接线(跑道下方),证明本文的方法能准确地提取感兴趣直线。

图 4(c)所示的结果表明边缘跟踪方法能准确连接目标的边缘线,图 4(d)中跑道和滑行道的连续的下边缘是由图 4(c)中多条断裂的边缘线组成,该结果表明中心线扩展方法能较好的“缝合”直线中的断裂或缺口。图 4(e)中提取的直线与图像中的跑道边缘完整严密的吻合,表明本文的多级提取方法能够完整准确地提取直线特征,而且具有非常高的定位精度。

针对本文的实验图像,将本文方法与相位编组法(Phase Grouping, PG)和 Hough 变换法(Hough Transform, HT)进行了比较实验。经过多次实验,独立的 PG 方法不能提取完整的实际直线,该结果表明独立的 PG 方法不能准确地从高分辨率图像中提取直线特征。利用 HT 方法的直线提取结果如图 5 所示,计算时间耗费的定量结果见表 1(所有算法都在 Matlab 的开发环境中执行)。



图5 Hough 变换方法的直线提取结果

表1 方法性能的量化比较

方法	运行时间/s
PG	16.432
HT	18.859
Multilevel	7.922

图 5 和表 1 的结果表明,本文的多级提取方法比 HT 方法能够提取更完整、更准确的直线,也具有更低的虚警率,此外还具有更高的效率。

5 结语

本文分析了图像尺度对 SAR 直线特征提取的影响,提出了一种高分辨率 SAR 图像的直线特征多级提取方法。首先,利用多尺度分解的低通滤波性,减弱了 SAR 图像斑点噪声的干扰,提高了边缘检测结果的可靠性;其次,多级提取方法着眼于共线点之间的相互关系(相邻共线点之间连续性)而非单个边缘点,减少了传统方法中直线提取对边缘检测的依赖性;然后,由粗到精的提取思路 and 不同尺度图像中采用对应的方法来进行边缘检测和直线提取的策略,逐步解决了直线提取中连续性、完整性和精确性的问题。由于该方法中没有复杂的参数设置,只需要根据检测对象的信息和定位精度要求等来客观地确定几个相关参数,没有需根据图像特征等来主

观设定的参数,提高了方法的实用性。这种由粗到精的提取策略解决了传统的直线特征提取方法的许多问题,有效提高了直线特征提取的性能。

参考文献:

- [1] 王程,王润生. SAR 图像直线提取[J]. 电子学报, 2003, 31(6): 816-820.
- [2] 文贡坚,王润生. 一种稳健的直线提取算法[J]. 软件学报, 2001, 12(11): 1660-1667.
- [3] LINDBERG T. Edge detection and ridge detection with automatic scale selection, computer vision and pattern recognition [C]// CVPR'96: Proceedings of the 1996 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, IEEE Computer Society: 1996: 465.
- [4] de MEDEIROS F N S, COSTA R C S, MARQUES R C P. Multi-scale detection of linear features in speckled imagery [C]// SIBGRAPI'03: XVI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. [S. l.]: IEEE, 2003: 2032-2035.
- [5] TUPIN F, MAITRE H, MANGIN J-F, *et al.* Detection of linear features in SAR images: Application to road network extraction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2): 434-453.
- [6] 陈卫荣,王超,张红. 基于特征融合的高分辨率 SAR 图像道路提取[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 147-140.
- [7] LISINI G, TISON C, TUPIN F, *et al.* Feature fusion to improve road network extraction in high-resolution SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(2): 217-221.
- [8] BURNS B. Extracting straight lines[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(4): 425-455.
- [9] OLIVER C, QUEGAN S. Understanding synthetic aperture radar images[M]. [S. l.]: SciTech Publishing, 1998.
- [10] BOVIK A C, MUNSON D C. Boundary detection in speckle images [C]// Proceedings of 1985 IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing. [S. l.]: IEEE, 1985: 26-29.
- [11] FJORTOFT R, LOPES A, MARTON P, *et al.* An optimal multiedge detector for SAR image segmentation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 793-802.

(上接第 934 页)

经过单阈值分割以及去噪细化后得到的边缘图像,对照原图像可以发现,检测出的边缘存在许多断裂点。图 5(c)是使用文中方法处理后的结果,与图 5(b)边缘比较可以发现,许多断裂的边缘已在一定程度上得到了补偿;图 5(d)和图 5(e)分别采用的是文献[4]和文献[2]中的方法,虽然也实现了部分断裂边缘的连接,但是相对于图 5(c),它们的补偿效果相对差些。可见,文中方法能够在一定程度上实现断裂晶界图像的连接,实现晶界的准确提取。

5 结语

本文提出了一种基于蚁群算法的边缘连接算法。实验结果表明,与其他边缘连接算法相比,对于边缘细节较少的图像,得到的补偿边缘能够很好地反映原始图像信息;同时,对于一般图像,得到的补偿边缘正确率也较高。该算法对于不同的图像算法的参数要进行调整,没有实现很好的自适应性,在后续的工作中将对算法的自适应性作进一步研究。

参考文献:

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮

宇智,译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 420-482.

- [2] LU DE-SIAN, CHEN CHEIEN-CHANG. Edge detection improvement by ant colony optimization[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(4): 416-425.
- [3] 韩颜芳,施鹏飞. 基于蚁群算法的图像分割方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(18): 5-7.
- [4] WONG YA-PING, SOH V C-M, BAN K-W, *et al.* Improved Canny edges using ant colony optimization[C]// Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation. Penang: [s. n.], 2008: 197-122.
- [5] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernet, 1996, 26(1): 1-13.
- [6] 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业出版社, 2004: 29-38.
- [7] 董梁. 基于哈夫变换的图像边缘连接[J]. 现代电子技术, 2008, 31(18): 149-150.