

# 自适应 SAR 图像边缘检测算法<sup>1</sup>

刘振华 毛士艺

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

**摘 要** 边缘检测是图像分析的基础,在对 SAR 图像进行边缘检测时,由于 SAR 图像存在很强的相干乘性斑点噪声,几乎没有一种方法既能有效地检测边缘又能排除斑点噪声的影响而不产生较多的虚假边缘,特别是在低视数 SAR 的情况下,该文指出了在低视数情况下应当如何对 Touzi ratio 边缘检测方法和最大似然 (ML) 边缘方法的检测窗口进行改进,在对 SAR 图像进行边缘检测时,引入了自适应窗口的方法,并将其应用到 Touzi ratio 边缘检测和最大似然 (ML) 两个恒虚警边缘检测算法中,取得了很好的改进效果.引入自适应窗口的方法也适用于其它的 SAR 图像边缘检测算法.

**关键词** 合成孔径雷达,边缘检测,斑点,自适应

**中图分类号** TN951

## 1 引 言

由于 SAR 图像中每一个分辨单元 (像素) 的灰度值是由照射场景中的许多回波叠加得到,回波存在很强的干涉效果,所以在 SAR 图像中存在较强的乘性干涉斑点噪声 (与通常的加性高斯噪声不同),特别是视数较低的 SAR 图像,斑点噪声更强,例如,当 SAR 图像视数  $L = 1$  时,信噪比为 1.图像的信噪比随视数的增加而增加.但图像视数的增加是以牺牲图像的分辨率为代价的,在要求较高分辨率条件下 (例如军事侦察等),图像的分辨率不能太低.这时只能依赖低视数的 SAR 图像.为了有效检测 SAR 图像边缘,人们提出了许多边缘检测算法<sup>[1]</sup>,例如基于最小平方误差的最佳多边缘检测算法<sup>[1-4]</sup>. Touzi ratio 边缘检测算法和最大似然 (ML) 边缘检测算法分别基于处理窗口两边像素的均值比和最大似然比<sup>[3,4]</sup>,从理论上可以证明<sup>[3,4]</sup>,当处理窗口的大小和形状确定时,给定一定的虚警概率,边缘判决阈值就可在理论上确定,与图像中区域的灰度级无关,在处理图像过程中,不用调整阈值的值.所以这些算法具有较好的鲁棒性.但是这些方法也存在缺陷,这就是对于图像不同的场景区域都是用一系列大小的处理窗口去检测边缘,检测时并不知道哪一个处理窗口更适合当前场景.然而,对于存在斑点噪声的图像,为了能够很好地检测边缘,检测处理窗口的大小应当根据图像的具体场景来决定.对于图像场景变化较快的区域,为了提高检测分辨能力应当应用较小的检测窗口将图像的细微变化或小目标检测出来;而对于图像场景变化缓慢的区域,应当应用大的窗口去抑制斑点,以检测相对较弱的或较大的目标边缘.为此我们提出在边缘检测中引入自适应窗口的方法,它能根据图像的场景变化自动调整边缘检测窗口的大小.既能较好地检测到小目标又能有效抑制由于斑点产生的虚假边缘并检测到变化缓慢场景的弱边缘.本文还指出了对低视数 SAR 图像进行边缘检测时,应当如何对 Touzi ratio 边缘检测算法和最大似然边缘检测算法的图像处理窗口进行改进,以适应在低视数时 SAR 图像的边缘检测.

在以下两节,我们分别简单介绍,对于低视数的 SAR 图像应当如何对 Touzi ratio 边缘检测和最大似然边缘检测进行改进.然后在第 4 节将自适应窗口引入边缘检测.在第 5 节给出实验结果.

## 2 Touzi ratio 边缘检测算法在低视数 SAR 图像中的应用

Touzi ratio 边缘检测是一种均值比边缘检测算法,它基于 Frost 等人<sup>[5]</sup>提出的将一个窗口

<sup>1</sup> 2001-11-30 收到, 2002-06-13 改回  
国家自然科学基金重点项目 (No.69831040)

放在图像的某一位置,为了确定窗口中是否存在边缘及边缘的位置,Forst作了两种假设,一是窗口内图像是均匀区域,二是窗口中图像存在边缘。Touzi等人提出分别将 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ 的窗口对图像进行扫描,分别在水平、垂直和两对角线方向,由方形窗口两边像素的平均值之比,判定窗口中心像素是否为图像的边缘点,当比值小于给定阈值时,即判定窗口中心像素为边缘点,如果均值大于给定阈值,则判定窗口中心像素不是图像边缘点。Touzi ratio边缘检测算法是恒虚警边缘检测算法,因为对于 $L$ 视功率SAR图像,SAR功率图在均匀区域服从Gamma分布<sup>[5]</sup>如下式所示:

$$p(I/\mu) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{\mu}\right)^L I^{L-1} \exp\left(-\frac{LI}{\mu}\right) \quad (1)$$

$L$ 为图像等效视数(ENL), $I$ 为图像像素值(功率图), $\mu$ 为图像均匀区域的平均值。可以证明<sup>[3]</sup>,如果窗口分开的两个相等的区域都是含有 $N$ 个独立像素的均匀区域,则两个均匀区域均值之比服从如下分布:

$$p(r|(\mu_1/\mu_2)) = \frac{n\Gamma(2NL)}{\Gamma(NL)^2} \left( \frac{(\mu_1/\mu_2)^{NL}}{(r^n + \mu_1/\mu_2)^{2NL}} + \frac{(\mu_1/\mu_2)^{NL}}{(r^n + \mu_1/\mu_2)^{2NL}} \right) r^{nNL-1}, \quad r \in [0, 1] \quad (2)$$

$\mu_1, \mu_2$ 分别为窗口中两边像素的平均值,NL为窗口中每一边的等效像素数,等效像素数的定义为,对于 $M \times M$ 的窗口, $NL = LM(M-1)/2$ , $n=1$ 为功率图, $n=2$ 为幅度图。整个窗口为均匀区域时 $\mu = \mu_1 = \mu_2$ ,当窗口中存在边缘时 $\mu_1 \neq \mu_2$ ,从(2)式可知均值比 $r$ 的分布并不依赖于某一均匀区域的强度,而是依赖于窗口中两区域的实际均值比,也就是虚警概率 $P_{fa}$ 仅仅依赖于两均匀区域的均值比和窗口中的等效像素数。由于 $\mu_1/\mu_2$ 可能大于1也可能小于1,所以在选取边缘检测阈值时必须取两个边缘判决阈值 $T_1$ 和 $T_2(T_1 < 1, T_2 > 1)$ ,为了便于判决,在实际应用中只取一个阈值 $T$ 。当比值 $\mu_1/\mu_2 < 1$ 时,取 $T = \mu_1/\mu_2$ ;当 $\mu_1/\mu_2 > 1$ 时取 $T = \mu_2/\mu_1$ 。

对于低视数的SAR图像,我们已经在理论和实验上证明<sup>[6]</sup>不能选用 $3 \times 3$ 的窗口,只能利用大于等于 $5 \times 5$ 的窗口。可以分别用 $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ 的窗口,对图像进行扫描,分别提取图像4个方向的边缘信息。当窗口两边的平均强度比小于给定阈值时,认为该点为图像边缘,当平均强度比大于给定阈值时,该点不是边缘点。

利用Touzi ratio检测会增加边缘的宽度,通过小的邻域宽度基于形态学的灰度调和函数细化边缘。

### 3 最大似然边缘检测算法在低视数SAR图像中的应用

最大似然边缘检测算法也是一种基于统计和几何边缘检测的恒虚警率边缘检测方法。其基本原理是用一个长条形窗口扫描图像<sup>[4]</sup>,该算法只用了垂直和水平两个方向检测边缘的存在和位置。检测方法与Touzi ratio不同,它不是通过窗口两边像素强度平均值之比,而是通过求边缘存在的最大似然比来确定边缘是否存在,如果窗口中存在边缘,求出边缘在窗口中概率最大的位置。

对于 $L$ 视功率SAR图像,其概率密度函数服从由(1)式给出的Gamma分布,假设条形窗口中有从像素1到像素 $k$ 属于一个均匀区域,像素 $K+1$ 到像素 $M$ 属于另一区域。假设均匀区域1的实际均值为 $\mu_1$ ,从条形窗口计算获得的均值为 $\bar{I}_1$ ,均匀区域2的实际均值为 $\mu_2$ ,计算得到的均值为 $\bar{I}_2$ 。为了推导简单起见,在推导中假设SAR图像为单视,这时强度 $I$ 服从负指数分布<sup>[7]</sup>并且假设像素不相关。可以得到<sup>[6]</sup>,窗口中两区域分离与合并的似然对数差为

$$\eta_D \equiv \eta_k - \eta_0 = -k \ln \bar{I}_1 - (M-k) \ln \bar{I}_2 + M \ln \bar{I}_0 \quad (3)$$

$\eta_k$  表示  $k$  点为边缘点的似然对数;  $\eta_0$  表示  $k$  点不是边缘点, 窗口内为均匀区域的似然对数。在窗口中进行边缘检测时, 由 (3) 式判别窗口中是否存在边缘, 当  $\eta_D$  大于给定的一个阈值时判定窗口中存在边缘, 当  $\eta_D$  小于阈值时判定窗口中不存在边缘。

利用最大似然检测边缘分两步进行<sup>[4]</sup>, 第一步是确定边缘的存在。用水平和垂直两个方向的条形窗口分别滑过图像, 利用窗口中心像素检测边缘的最可靠性, 在图像中的每一点用 (3) 式判别窗口中心点是否存在边缘并标注出边缘点在图像中的位置。完成这一步后, 可以得到图像的边缘图。第二步是确定图像中边缘点的准确位置, 利用第一步完成的边缘图, 将窗口中心放在原图像边缘点的位置上, 变化  $k$  并利用 (3) 式确定  $k$  为多少时  $\eta_D$  最大, 以确定边缘点的准确位置。在进行这一步时为了保证检测的准确度,  $k$  只是在窗口中心的邻域变化 (例如在窗口中心  $\pm 2$  之间)。Oliver 提出这两步都可用一个  $16 \times 1$  的条形窗口对图像进行检测, 但对于低视数的 SAR 图像, 由于斑点噪声比较强, 希望能够有尽量多的均匀区域的像素参加统计运算, 以抑制斑点噪声, 但是如果加长窗口, 则在窗口中存在多个边缘的概率增大, 造成检测失败。这时利用加宽条形窗口的办法可以得到比较好的检测效果, 例如利用  $16 \times 3$  的窗口。理论分析和实验结果可以得到<sup>[6]</sup> 对于低视数的 SAR 图像, 利用  $16 \times 1$  的窗口会产生较高的虚警概率。

#### 4 自适应窗口的基本思想

由 SAR 图像的分布特性我们知道<sup>[7]</sup>, 单视幅度 SAR 图像服从 Rayleigh 分布

$$P_A(y) = (2y/\sigma^2) \exp(-y^2/\sigma^2) \quad (4)$$

均值为  $\sqrt{\pi}\sigma/2$ , 标准差为  $\sqrt{(1-\pi/4)}\sigma$ , 参数 CV(变化系数) 定义为标准差比均值, 对于多视幅度 SAR, 变化系数 CV 为<sup>[8]</sup>:

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

当图像视数大于 4 时, 可以用高斯分布很好地近似 Rayleigh 分布<sup>[9]</sup>, 我们可以将斑点噪声建模为乘性斑点模型<sup>[7]</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, 斑点噪声的标准差为  $\sigma_n = 0.5227/\sqrt{L}$ 。

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, 假设图像场景与斑点噪声不存在相关, 可得

$$\bar{y} = \bar{x} \cdot \bar{n} = \bar{x} \quad (6)$$

SAR 图像方差为

$$\sigma_y^2 = E[(y - \bar{y})^2] = E[(xn - \bar{x}\bar{n})^2] = E[x^2]E[n^2] - \bar{x}^2\bar{n}^2 \quad (7)$$

在图像均匀区域, 由 (7) 式可得图像变化系数为

$$CV = \sigma_y/\bar{y} = \sigma_n \quad (8)$$

在图像非均匀区域, 由于  $E[x^2] > \bar{x}^2$ , 由 (14) 式可得, 此时图像变化系数:

$$CV = (\sigma_y/\bar{y}) > \sigma_n \quad (9)$$

自适应调整窗口大小的思想主要是<sup>[8]</sup>, 将场景分成均匀区域和非均匀区域, 用 CV 参数表示场景, 当由图像计算得到的变化系数 CV 小于某一阈值时, 表示场景为均匀区域, 这时自动

增大边缘检测窗口；CV 大于某一阈值时，图像为非均匀区域，此时自动减小边缘检测窗口。增大或减小处理窗口的策略可以按以下方法进行。

定义边缘检测的最大和最小窗口，如  $W_{\max} \times W_{\max}$  和  $W_{\min} \times W_{\min}$ 。用于检测边缘的窗口  $W_{i,j}$  大小为  $W_{\min} \leq W_{i,j} \leq W_{\max}$ 。取  $W_{\min}$ ， $W_{i,j}$ ， $W_{\max}$  为奇数。对于当前像素  $(i, j)$  窗口内像素为  $\{(k, l) | i - N_{i,j} \leq k \leq i + N_{i,j}, j - N_{i,j} \leq l \leq j + N_{i,j}\}$ ， $W_{i,j} = 2N_{i,j} + 1$ 。计算得到图像在  $(i, j)$  点的变化系数为

$$CV_{i,j} = \sigma_{i,j} / \mu_{i,j} \quad (10)$$

其中  $\mu_{i,j}$  和  $\sigma_{i,j}^2$  分别为以  $(i, j)$  为中心的窗口内像素的均值和方差。

对于逐行对图像进行扫描检测边缘的方式，窗口自动变化的方法为

$$N_{i,j+1} = \begin{cases} \min[N_{i,j} + 1, N_{\max}], & CV_{i,j} \leq T_{i,j} \\ \max[N_{i,j} - 1, N_{\min}], & CV_{i,j} > T_{i,j} \end{cases} \quad (11)$$

$N_{\max}$  和  $N_{\min}$  决定最大和最小边缘检测窗口， $T_{i,j}$  为设定的阈值。由 (8)、(9) 式，理论上可以将检测阈值设为  $\sigma_n = 0.5227/\sqrt{L}$ 。但是我们计算变化系数 CV 时用的是有限的样本数，这时如果将检测域值取为  $\sigma_n$  会产生较大的误差。为了计算方便假设变化系数 CV 服从高斯分布，可以得到<sup>[8]</sup>，CV 的均值和标准差为

$$\overline{CV}_{i,j} = \sigma_n \quad (12)$$

$$\sigma_{CV_{i,j}} = \sqrt{\frac{1 + 2\sigma_n^2}{2N}} \cdot \sigma_n \quad (13)$$

$N$  为统计样本数，即处理窗口中参加统计计算的像素数，在这里  $N = W_{i,j} \times W_{i,j}$ ，我们可以将变化系数 CV 的均值与其标准差之和作为阈值， $T_{i,j} = \sigma_n + \sigma_{CV_{i,j}}$ ，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。

$$T_{i,j} = \left[ 1 + \sqrt{(1 + 2\sigma_n^2)/(2W_{i,j}^2)} \right] \cdot \sigma_n \quad (14)$$

前面介绍了自适应方形窗口的方法，对于自适应条形窗口也可以用同样的方法得出。

## 6 实验结果

前面介绍了常用两种基于统计和几何特性的 Touzi ratio 边缘检测算法和最大似然边缘检测算法，两种边缘检测算法都是恒虚警率边缘检测算法。图 1 为某地视数为 1.3，9.6m 分辨率的 SAR 图像，图 2- 图 5 分别为利用 Touzi ratio 边缘检测算法和最大似然边缘检测算法用不同的检测窗口进行边缘检测时获得的结果。通过比较图 2 与图 3 发现，如果用  $3 \times 3$ ， $5 \times 5$  和  $7 \times 7$  的窗口进行边缘检测，会产生许多虚假的边缘，如果只用  $5 \times 5$  和  $7 \times 7$  的窗口进行边缘检测，原图中的大部分边缘都能检测到，由斑点产生的虚假边缘获得较大抑制。与前面的结论相吻合。

通过观测利用最大似然边缘检测得到的图 4 和图 5 可以发现, 虽然图 4 利用  $16 \times 1$  窗口可以检测到大部分的原图像边缘, 但是对一些细节纹理, 其检测效果不如用  $16 \times 3$  窗口进行边缘检测得到的图 5。从图 2- 图 5 中可以看到, 在同样或更高的边缘检测灵敏度下, 最大似然边缘检测对斑点形成虚假边缘抑制效果比 Touzi ratio 好, 但其检测得到的边缘有加粗现象, 这主要是由于边缘检测采用的是条形窗口的原因。

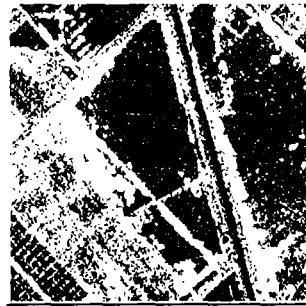


图 1 原始 SAR 图像



图 2 Touzi ratio 算法含  $3 \times 3$  窗口

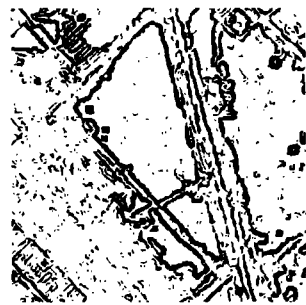


图 3 Touzi ratio 算法含  $5 \times 5$ 、 $7 \times 7$  窗口

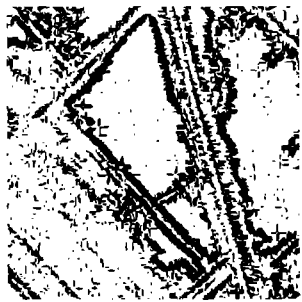


图 4 最大似然比算法  $16 \times 1$  窗口



图 5 最大似然比算法  $16 \times 3$  窗口



图 6 Touzi ratio 检测引入自适应窗口



图 7 最大似然检测引入自适应窗口

图 6 和图 7 分别为将自适应窗口引入 Touzi ratio 边缘检测和最大似然边缘检测获得的结果。图 6 的边缘检测阈值取边缘两边的均值比为 0.4, 图 7 的阈值也取边缘两边均值比为 0.4, 最小和最大自适应窗口分别取从  $5 \times 5$  到  $15 \times 15$ , 从图 6 和图 7 可以看出, 引入自适应窗口后, 由斑点产生的虚假边缘基本上已经被抑制掉了, 并且图像左下角的纹理边缘都能被检测到, 图像中椭圆指示区域由树林产生的纹理边缘得到较好的保持。

### 参 考 文 献

- [1] P. Marthon, E. Cubero-Castan, An optimal multiedge detector for SAR image segmentation, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1998, 36(3), 793-802.
- [2] R. Fjortoft, A. Lopes, J. Bruniquel, P. Marthon, Optimal edge detection and edge localization in complex SAR images with correlated speckle, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1999, 37(5), 2272-2281.
- [3] R. Touzi, A. Lopes, P. Bousquet, A statistical and geometrical edge detector for SAR images, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1988, 26(6), 764-773.
- [4] C. J. Oliver, D. Blacknell, R. G. White Optimum edge detection in SAR, *IEE Proc., Radar Sonar Navigation*, 1996, 143(1), 31-40.
- [5] F. Bush, F. T. Ulaby, Fading characteristics of panchromatic radar backscatter from selected agricultural targets, *IEEE Trans. on Geosci. Electron.*, 1975, GE-13(4), 149-157.
- [6] 刘振华, 毛士艺, 低视数 SAR 图像边缘检测算法研究, *信号处理*, 2001, 17(增刊), 287-290.
- [7] C. Oliver, *Understanding Synthetic Aperture Radar Image*, Boston, London, Arrech House, 1998, 88-131.
- [8] J. M. Park, W. J. Song, Speckle filtering of SAR images based on adaptive windowing, *IEE Proc.-Vision. Image, Signal Process*, 1999, 146(4), 191-197.
- [9] F. J. Martin, R. W. Turner, SAR speckle reduction by weighting filter, *Int. J. Remote Sens*, 1993, 14(9), 1759-1774.

## ADAPTIVE EDGE DETECTION ALGORITHM OF SAR IMAGE

Liu Zhenhua      Mao Shiyi

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

**Abstract** Due to the multiplicative nature of the speckle noise in SAR images, for edge detecting of SAR images, few method can be found to detect edges efficiently while depress the speckle noise effects without too much false edges, especially in the low look number SAR image case. In this paper, discussions are presented on the improvement of Touzi ratio edge detect method and maximum likelihood method in the low look number SAR image case, and then an adaptive window technique is introduced into SAR image edge detection. The adaptive windows are applied to the two Constant False Alarm Ratio (CFAR) edge detection algorithms mentioned above and fine improvement has been achieved. The technique is also proper for other SAR image edge detection algorithms.

**Key words** SAR, Edge detection, Speckle, Adaptive

刘振华: 男, 1964 年生, 博士生, 主要研究遥感图像理解、识别。

毛士艺: 男, 1935 年生, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理。