

SAR 图像保留边缘多窗口相干斑滤除方法*

庞晓红

王贞松

(哈尔滨工程大学 哈尔滨 150001)

(中国科学院电子研究所 北京 100080)

摘 要 在处理合成孔径雷达(SAR)图像中,精确地估计图像的局部统计特性和尽可能多地滤除相干斑都需要较大的窗口尺寸,而这与图像边缘和纹理结构的检测需要较小的窗口尺寸相矛盾。一般滤波器都是二者窗口尺寸的均衡,这必然导致二者都不能取得很好的效果。本文提出的新方法有效的解决了这一矛盾。此方法使处理后的 SAR 图像既保存了边缘和纹理结构,避免了以往滤波器中使边缘变模糊的问题,又有效地滤除了相干斑噪声。

关键词 SAR,局部统计特性,相干斑,边缘和纹理结构,窗口尺寸

1 引 言

空载合成孔径雷达(SAR)是应用合成孔径原理的主动式微波成像雷达,由于它是工作在微波波段的相干成像雷达,因此不可避免地产生相干斑噪声。相干斑的去除技术总体上可以分成两大类:一类是在成像时进行多视处理;一类是在成像后进行滤波。在图像后处理技术中,常用的有 Lee 滤波器^[1-3]、Kuan 滤波器^[4,5]和 Frost 滤波器^[6]等。这些滤波器都是对 SAR 图像的局部统计特性自适应的,也就是说它们是局部统计值的函数。因此它们去相干斑的效果较好。但是这些滤波器对图像边缘保存不够,边缘在一定程度上被模糊了。针对这一问题,后人又提出了一些结合边缘检测技术的几何自适应滤波器,如 RGMAP 滤波器^[7],改进的 Lee 滤波器^[8]等。但是这些滤波器由于考虑到边缘检测问题,图像处理窗口就不能取得太大,这对精确估计图像局部统计特性和滤除相干斑噪声是不利的。虽然也有人提出变窗口尺寸的滤波方法^[9],这比固定窗口尺寸的滤波器好一些,但是这种方法是采用循环迭代的方法先确定一个窗口尺寸,再一点一点地增加或减少,直到检测到边缘纹理,此种方法有一个显著的缺点,就是计算量大,这对于纹理结构复杂的图像尤其显著,而且经过变化的窗口尺寸也很难很好地符合需要。针对以上问题,本文提出了一种新的处理方法,把边

缘检测和滤除相干斑噪声分开来处理。就是用较小的、符合图像纹理结构检测的窗口尺寸,检测图像纹理结构,然后把检测到的图像纹理结构从原始图像上去掉,得到一幅均匀纹理图像,对这幅图像进行大窗口尺寸的滤波,滤波后的图像再加上原来检测到的纹理结构,最后就得到了一幅既保存了很好边缘纹理结构又取得很好去噪效果的图像,而且较之于变窗口的滤波方法节省了大量计算量。从原理上看,这种方法可以适用于任何种类的图像处理,本文仅用此方法对 SAR 图像进行处理。

2 被相干斑污染的 SAR 图像边缘检测器

由于相干斑本身的性质,使检测被相干斑污染的图像中的边缘问题变得困难起来。因为,相干斑在图像中表现平均宽度 w_s 为随机亮点和暗点。当 w_s 相对于边缘检测器的空间支持是大的时,边缘检测器就会把由相干斑造成的虚假边缘和物体的真实边缘一样检测出来。而且,由于相干斑的灰度和基本图像的灰度是相乘的,图像相干斑的局部方差是随着图像局部灰度的变化而变化的,而图像梯度的统计特性也是随着图像灰度的变化而变化的。我们知道,梯度法边缘检测器就是确定一个门限值,当某一像素梯度值超过这一门限值时,就被确定为边缘。因此,在图像越亮的区域,相干斑梯度的方差越大的

* 国家自然科学基金资助项目,国家高技术863-308资助项目。

收稿日期:1997-12-12;收到修改稿日期:1998-05-12

情况下,门限值却固定不变,则大量的虚假边缘就被检测出来。即使门限值是变化的,由于这一变化所依据的参数不好估计,所以在边缘附近检测效果也不好。因此检测被相干斑污染的 SAR 图像的边缘不能用一般的梯度检测法,我们在这里用 BOVIK 提出的 LoG(Laplacian-of-a-Gaussian) 边缘检测器和 RoA(Ratio-of-Averages) 边缘检测器相结合的专门用于被相干斑污染的图像的边缘检测器^[10]。

2.1 LoG 边缘检测器

用 LoG 边缘检测器检测边缘分两步完成。第 1 步,图像灰度 $Z(x, y)$ 和带通空间滤波器 $\nabla^2 g_o(x, y)$ 相卷积,即:

$$J(x, y) = Z(x, y) * \nabla^2 g_o(x, y) \quad (1)$$

其中:

$g_o(x, y) = (1/2\pi\sigma^2)\exp\{-(x^2 + y^2)/2\sigma^2\}$ 为二维旋转对称高斯函数; $\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2)$, 是通常的 Laplacian 算子; σ 是空间常数,决定了算子的中心频率和带宽。

Marr 和 Hildreth^[11]已经证明有意义的可见边缘可以由卷积图像 $J(x, y)$ 的零交叉(Zero Crossings, ZC's)确定。因此边缘检测的第 2 步是确定 $J(x, y)$ 中的过零点。

在低噪声图像中,零交叉点的位置可以被证明是和图像灰度中的持续临界点精确对应的。然而在有相干斑的图像中,LoG 边缘检测器在很大程度上对相干斑有响应,虽然相干斑是带限的(band-limited),它在 LoG 的通带(passband)中含有大量能量。这种敏感性产生了许多不对应于任何真实物体的假的零交叉(ZC),影响了检测有意义的边缘。BOVIK 证明零交叉率可以表示成 (σ/w_s) 的函数,即 LoG 的空间范围和平均相干斑的宽度之比的函数^[10]。很明显,如果相干斑不是强相关的,也就是说相干斑的平均宽度 w_s 和 LoG 滤波器的带宽(Span) σ 相比很小,虚假的零交叉发生的频率就会较高(相对于 LoG 的带宽 Span)。而且这些零交叉很难和由真实物体边缘引起的零交叉区别开。BOVIK 还证明,虽然 LoG 边缘检测器检测出许多虚假边缘,但是并没有减少对真实边缘的检测,即很少有真实边缘被丢掉,而且在真实边缘所对应的零交叉和虚假边缘所对应的零交叉之间有一段死区,即在真实边缘附近的一段距离内不会有虚假边缘被检测出来,这就使提取真实边缘的问题变简单了。典型的解决假的零交叉问题的方法是对 LoG 滤波图像的估

计梯度幅值设定一个门限值,来衡量每一个零交叉,但是 SNR 的变化表明梯度的统计特性也是变化的,因此这一想法不现实。BOVIK 提出了一个更好的想法,就是对没被滤波的图像 $Z(x, y)$ 计算附加规范来产生一个统计特性,它在整个图像灰度中不随乘性干扰而变化。因此提出了平均比例(Ratio-of-Averages, RoA)边缘检测器。

2.2 RoA 边缘检测器

图像的梯度可以通过计算两个垂直方向上不同邻域差分的均方根得到。因此,在水平方向上差分的绝对值为: $|R(x, y) - L(x, y)|$, 这里 $R(x, y)$ 、 $L(x, y)$ 代表 $Z(x, y)$ 在图像坐标 (x, y) 的左边和右边邻域的平均灰度值。但是当噪声是乘性时,这种算法将随基本图像灰度的变化而变化。如果用对数统计特性

$$|\log R - \log L| = \max\{\log(R/L), \log(L/R)\}$$

或等价地用平均比例估计:

$$H(x, y) = \max\{R(x, y)/L(x, y), L(x, y)/R(x, y)\} \quad (2)$$

来估计边缘幅值的水平分量,这样,幅度估计的统计特性就不依赖于基本图像的灰度变化^[12]。

在所有方向上的边缘幅度估计可由均方根值给出:

$$\text{RoA}(x, y) = [H^2(x, y) + V^2(x, y)]^{1/2} \quad (3)$$

这里 $V(x, y)$ 对应于垂直方向的边缘幅值估计:

$$V(x, y) = \max\{U(x, y)/D(x, y), D(x, y)/U(x, y)\} \quad (4)$$

其中 $U(x, y)$ 、 $D(x, y)$ 分别代表像素 (x, y) 的上、下邻域中的平均灰度值。最后用 RoA 和先确定的门限 T 相比较,如果

$$\text{RoA}(x, y) > T \quad (5)$$

则 (x, y) 处就被确定为边缘。

如果噪声过程是弱相关的,相干斑的一阶统计特性是 Gaussian 分布或 gamma 分布的,则平均比例(2)式对于边缘幅值的估计是最优的。因为样本均值 $R(x, y)$ 、 $L(x, y)$ 等是对于这类统计分布的基本图像灰度的最大相似性估计^[12, 13]。

2.3 用 RoA 和 LoG 方法相结合的边缘检测方法

RoA 和 LoG 边缘检测器相结合的方法可以用两种相互独立但却基本等价的方法来实现。第 1 种,两种边缘检测器分别对图像进行边缘检测,再把得到的两幅边缘图像取逻辑与,则得到了两检测技术相结合的边缘图像;第 2 种, RoA 边缘检测器只在 LoG 的零交叉处使用,则得到的边缘可认为是经过零交叉校验后得到的。无论用上述哪种方法得到的

结果基本上是一样的。

3 相干斑的滤波

在这里我们采用 Lee 滤波器滤除相干斑噪声, 先简要介绍一下此滤波算法。

我们知道 SAR 图像可用乘性噪声模型来表示^[2]:

$$z_{i,j} = x_{i,j} \cdot v_{i,j} \quad (6)$$

其中, $x_{i,j}$ 是未受相干斑污染的图像信号, $v_{i,j}$ 是相干斑噪声, 其均值是 1, 方差为 σ_v^2 , “ i, j ”表示第 (i, j) 个像素。为了表示简便我们暂时省略不写。

在许多滤波算法中, x 的均值和方差是由一个假定的自相关模型得来的。而 Lee 滤波器假定先验均值和方差可由固定窗口 (通常用 7×7 的窗口) 中的局部均值和方差代替。

x 的局部均值为:

$$\bar{x} = \frac{\bar{z}}{\bar{v}} \quad (7)$$

x 的局部方差为:

$$Var(x) = \frac{Var(z) + \bar{z}^2}{\sigma_v^2 + \bar{v}^2} - \bar{x}^2 \quad (8)$$

把式 (6) 用线性关系来近似^[2]:

$$z' = Ax + Bv + C \quad (9)$$

其中 A, B, C 是非随机变量。它们的选择应该使 z' 与 z 之间的均方误差为最小, 并且也使 z' 是 z 的无偏估计, 所以应有:

$$A\bar{x} + B\bar{v} + C = \bar{z}$$

或

$$C = \bar{z} - A\bar{x} - B\bar{v} \quad (10)$$

把 (10) 代入 (9) 式, 求 z' 和 z 的最小均方误差, 即

$$J = E[A(x - \bar{x}) + B(v - \bar{v}) - (xv - \bar{x}\bar{v})]^2$$

经过推导我们得到下列关系式:

$$z = \bar{v}x + \bar{x}(v - \bar{v}) \quad (11)$$

可以看出 (11) 式也就是像素灰度值 z 在 (\bar{x}, \bar{v}) 处的一阶台劳展开, 它是 (6) 式的最优线性近似。

由式 (7) 和 (8) 可得出先验均值和方差, 根据最小均方误差准则, 结合式 (11), 可以得出 Lee 的滤波算法:

$$\hat{x} = \bar{x} + k(z - \bar{v}\bar{x}) \quad (12)$$

其中

$$k = \frac{\bar{v} \cdot Var(x)}{\bar{x}^2 \sigma_v^2 + \bar{v}^2 Var(x)} \quad (13)$$

由于 $\bar{v} = 1$, 则 (12) 和 (13) 式可简化为:

$$\hat{x} = \bar{x} + k(z - \bar{x}) \quad (14)$$

$$k = \frac{Var(x)}{\bar{x}^2 \sigma_v^2 + Var(x)} \quad (15)$$

4 对 SAR 图像进行保存边缘滤除相干斑处理

对于原始图像 $z(i, j)$, 用较小的窗口尺寸进行边缘检测 (使其纹理细节不丢失), 不是边缘的像素令其值为零, 边缘像素保留原值, 得到边缘图像 $z_e(i, j)$ 。把此边缘图像从原始图像中减掉, 而被减掉的边缘处用邻近非边缘像素值代替, 这样就得到一幅无边缘的均匀图像 $z_m(i, j)$ 。用 Lee 滤波器在大窗口尺寸对此图像进行滤波, 滤除相干斑噪声, 得到无噪声图像 $z_n(i, j)$ 。最后恢复边缘, 即 $z_n(i, j)$ 中有边缘的位置的像素值用边缘图像 $z_e(i, j)$ 的像素值代替, 得到保存边缘的无相干斑图像 $z_{em}(i, j)$ 。

5 实验结果及结论

我们用 SEASAT SAR 图像对上述方法进行实验验证。图 1 为原始图像 $z(i, j)$, 图 2 为用 Lee 滤波器直接对原始图像滤波得到的图像。由此可见虽然

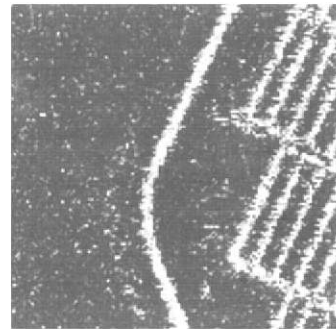


图1 原始SAR图像

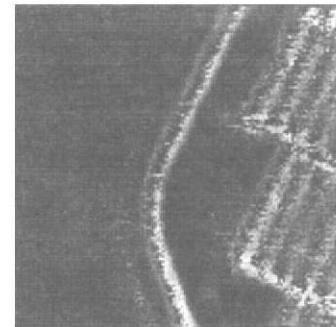


图2 Lee滤波器直接处理原始图像

Fig.2 Direct output of the Lee filter

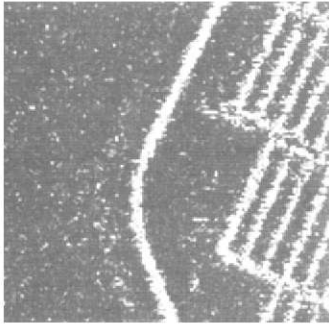


图3 边缘图像
Fig.3 The edges image

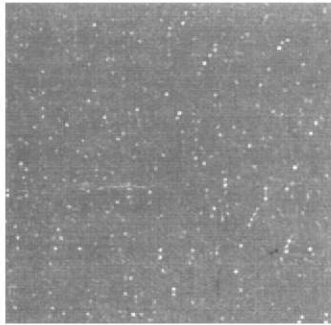


图4 无边界的均匀图像
Fig.4 Non-edged uniform image

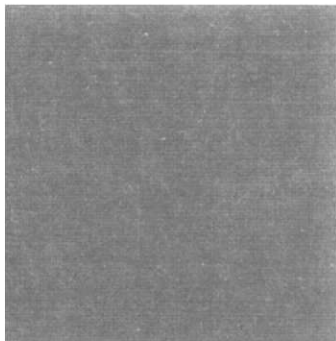


图5 无噪声均匀图像
Fig.5 Non-noised uniform image

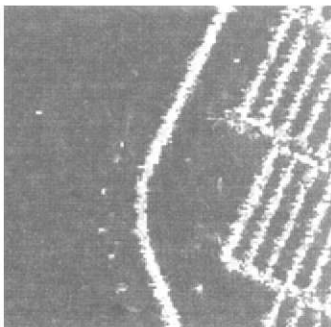


图6 保存边缘的无相干斑图像
Fig.6 Non-speckled image with preserved edges

对相干斑的滤除效果较好,但是边缘被模糊了。图3为边缘图像 $z_{ne}(i, j)$, 图4为无边界的均匀图像 $z_{nc}(i, j)$, 对此图像用 Lee 滤波器滤波, 得到无噪声图像 $z_{ns}(i, j)$, 如图5。最后恢复边缘, 得到保存边缘的无相干斑图像 $z_{ens}(i, j)$, 如图6。从实验结果可见此方法既保存了边缘且滤除相干斑较好, 还保留了可能与相干斑相混淆的点目标信息。

参 考 文 献

- 1 Lee Jongsen. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(2):165—168.
- 2 Lee Jongsen. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. *Computer Graphics and Image Processing* 1981, 17, 24—32.
- 3 Lee Jongsen. A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images. *IEEE. Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1983, 13(1).
- 4 Darwin T. Kuan. Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-Dependent Noise. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1985, 7(2):165—177.
- 5 Darwin T. Kuan. Adaptive Restoration of Images with Speckle. *IEEE. Trans. On Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1987, 35(3).
- 6 Victor Frost. A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(2):157—165.
- 7 Andren Baraldi, Flavic Parmiggiani. A Refined Gamma MAP SAR Speckle Filter with Improved Geometrical Adaptivity. *IEEE. Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5):1245—1257.
- 8 Lee Jongsen. Refined filtering of Image Noise Using Local Statistics. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 15:380—389.
- 9 Thomas R. Crimmins. Geometric filter for speckle reduction. *Applied Optics*. 1985, 24(10).
- 10 Bovik, A. C. On detecting edges in Speckle imagery. *Trans. on Acoustics, Speech and signal processing*, 1988, 36(10):1619—1627.
- 11 D. Marr. Theory of edge detection. *Proc. Roy. Soc. London B*, 1980, 207:187—217.
- 12 A. C. Bovik, D.C. Munson. Boundary detection in Speckle images. *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1985, Mar. 26—29.
- 13 E. L. Lehmann. *Testing Statistical Hypotheses*. New York: Wiley, 1959.

作者简介

庞晓红,女,1972年6月生。1995年毕业于哈尔滨工程

大学,1995年为哈尔滨工程大学研究生,1996年至今在中国科学院电子学研究所作硕士论文,专业为计算机控制,现在主要研究合成孔径雷达数字信号与图像处理等。

Multiple-window Processing of SAR Image with Speckle-smoothing and Edge-preserving

Pang Xiaohong

(Harbin Engineering University Harbin 150001)

Wang Zhensong

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

Abstract In the processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) Images, a large window size, which is often used in estimating the local statistics of the image and filtering the speckle is needed. On the other hand, contrary, detection of edges and textural features often need small sized windows. Normal filters, which are intermediary of the two above, don't give better results. This paper presents a new effective algorithm to solve the problem. In this method, the edges and the textural features of the SAR images are presented so that the problem of edge smearing in the normal filtering algorithm is avoid and the speckles are filtered effectively.

Key words SAR, Local statistics, Speckle, Edge and texture feature, Window size