

一种改进的 SAR 图像边缘检测方法

贾承丽 匡纲要

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 加权指数平均比率(ROEWA)边缘检测算子是一种较好的适用于 SAR 图像的边缘检测算子,但使用传统的计算梯度方向的方法却无法正确确定边缘点的方向。针对 ROEWA 算子存在的问题,该文根据 Gabor 滤波器具有的优秀方向选择性这一性质,提出利用 Gabor 滤波器确定边缘方向的方法,完善了 ROEWA 边缘检测方法。实验结果证明,改进的 ROEWA 算子检测边缘及边缘方向的性能很好。

关键词: SAR 图像; 边缘检测; 加权指数平滑滤波器; Gabor 滤波器

中图分类号: TN958, TP75

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0379-04

An Improved Edge Detection Algorithm for SAR Images

Jia Cheng-li Kuang Gang-yao

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: Ratio Of Exponentially Weighted Averages (ROEWA) operator is an edge detector suitable for SAR images. However, the detector can not compute the direction of edges accurately. Due to the excellent directional selectivity of Gabor filters, this paper puts forward a method of utilizing Gabor filter to computer edge direction. And by this way, the edge detector is improved. Experimental results prove that the performance of the improved method is satisfactory.

Key words: SAR image; Edge detection; Ratio of exponentially weighted averages; Gabor filter

1 引言

边缘是图像中图像强度或纹理发生突变的区域,一般情况下是图像结构最直接的描述成分,因此边缘特征检测是数字图像处理的一项基本工作,也是进一步图像分析的基础。对于加性噪声,边缘通常表现为梯度极大值,或者是二阶导数的零交叉点。但由于 SAR 图像的噪声是乘性的,经典的边缘检测方法(如 Canny 算子、零交叉算子等)对于 SAR 图像来说不是恒虚警的,而是随着像素点强度值的变化而变化,这样就在亮点处检测出虚假边缘,而暗区中则丢失很多真实边缘。

在文献[1]中, Fjortoft 等提出了一种适用于 SAR 图像的阶跃边缘检测算子。他首先针对单边缘模型的弊端提出了多边缘模型,然后在多边缘模型的基础上推导出一种 MMSE 最优滤波器;利用该滤波器估计均值, Fjortoft 提出了一个新的边缘检测算子:指数加权平均比率算子(Ratio Of Exponentially Weighted Averages, ROEWA)。该算子具有 CFAR 特性,并且边缘定位准,虚假边缘少,抗断裂,非常适用于检测大型人造目标的边缘。但是 ROEWA 算子只能得到边缘幅度,无法正确确定边缘方向。对于检测大型组合目标,以提取机场目标为例,一般提取步骤为:边缘检测 → 边

缘编组 → 直线拟合 → 直线连接 → 平行线检测 → 确定机场,其中边缘方向图是边缘编组、直线拟合的基础,如果没有正确的边缘方向,后续处理很难进行。

Gabor 滤波器是高斯和正弦信号的调制乘积, Marcelja^[2]首先用它来模拟视觉细胞的接收场,指出了视觉细胞对事物的空间频率的局部分析能力和方向选择性。Daugman^[3]进一步分析了信号在空间、空间频率和方向上的不确定联系,得出 Gabor 滤波器能达到不确定准则理论下界的结论。这些结论被广泛地用于进行纹理分析、边缘检测、数据压缩等。但是如果直接利用 Gabor 滤波器进行边缘检测,计算量是非常大的,而且 Gabor 滤波器的抗噪性能相对较差^[4]。但是, Gabor 滤波器优秀的方向选择性却可以成为一种计算边缘方向的方法。

本文考虑将 ROEWA 算子与 Gabor 滤波器结合起来,提出一种改进的边缘检测方法:用 ROEWA 算子计算边缘强度幅值,并通过非极值抑制和磁滞门限确定边缘点,然后用 Gabor 滤波器计算每个边缘点的方向。算法流程如图1所示:

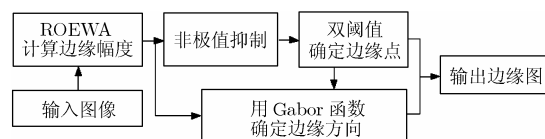


图1 本文算法流程图

2 利用 ROEWA 算子检测边缘点

2.1 ROEWA 算子基本原理

针对单边缘模型存在的弊端, Fjortoft^[1]等提出多边缘检测模型, 并在此模型的基础上, 设计了一种基于线性最小均方误差的指数平滑滤波器, 使用这种滤波器估计检测窗口内的局部均值, 这样计算出的均值不是算术均值, 而是根据一定权值计算出来的均值。一维情况下, 该滤波器的表达式为

$$f(x) = Ce^{-\alpha|x|} \quad (1)$$

其中 C 是一个归一化的常数, α 是滤波系数。该滤波器称为无限对称指数滤波器 (ISEF)。可将其扩展到二维空间为 $f_{2-D}(x, y) = f(x)f(y)$ 。

利用该滤波器进行均值估计, Fjortoft 等提出了一个新的基于比率值的边缘检测算子: 加权指数平均比率算子 (ROEWA)。指数加权均值 $\hat{\mu}_1$ 和 $\hat{\mu}_2$ 为无偏估计, 并且它们的变化与原图像的标准差成正比, 因此 ROEWA 算子具有 CFAR 特性。定义比值为

$$R = \max(\hat{\mu}_1 / \hat{\mu}_2, \hat{\mu}_2 / \hat{\mu}_1) \quad (2)$$

为了计算水平边缘强度分量, 首先使用一维平滑滤波器 $f(y)$ 对图像 $I(x, y)$ 每列进行卷积滤波; 再利用因果滤波器 ($f_1(x) = f(x), x > 0$) 和非因果滤波器 ($f_2(x) = f(x), x < 0$) 对每行进行滤波, 以获得 $\hat{\mu}_1(x)$ 和 $\hat{\mu}_2(x)$:

$$\hat{\mu}_{X_1}(x, y) = f_1(x) * (f(y) \bullet I(x, y)) \quad (3)$$

$$\hat{\mu}_{X_2}(x, y) = f_2(x) * (f(y) \bullet I(x, y)) \quad (4)$$

其中 $*$ 表示水平方向的卷积, $\bullet$ 表示垂直方向的卷积。将 $\hat{\mu}_{X_1}(x, y)$ 和 $\hat{\mu}_{X_2}(x, y)$ 代入式(2)可得归一化比值 $R_X(x, y)$ 。同理可得垂直方向的边缘强度 $R_Y(x, y)$ 。最后, 与光学图像的基于梯度的边缘检测算法一样, 我们得到边缘的强度幅值:

$$m(x, y) = \sqrt{R_X^2(x, y) + R_Y^2(x, y)} \quad (5)$$

指数平滑滤波器是在 $(-\infty, +\infty)$ 上的无限冲击响应, 在离散实现时, 可采用窗口对其截断近似, 但为了避免截断效应, 通常需选用大的模板窗口, 因而这种方法的计算效率较低, 且窗口尺寸对精度有很大影响, 而采用递归滤波器结构却能有效克服上述缺点, 每个像素仅需 14 次乘法、17 次加法和一次开平方根操作, 且运算量不随平滑程度而变化。

2.2 非极值抑制及磁滞门限

对边缘的强度幅值进行“非极值抑制”^[5], 以得到细化的边缘。非极值抑制的基本原理是通过查找边缘的强度幅值图像的局部最大值的方法来得到边缘信息的。同时, 为消除噪声的干扰, 提高边缘检测的精确度, 本文采用磁滞门限法来提取边缘点, 用高阈值提取边缘强度较强的边缘像素点; 如果像素点不满足高阈值检测条件, 但是与已检测的强边缘点相连接, 并且满足低阈值条件时, 认为该点为弱边缘点。用 HTh 和 LTh 分别表示高低阈值, 其选取原则如下: 首先设定非边缘点数目在图像像素总数目 N 中所占的比例 Hratio, 然后在边缘的强度幅值图像的直方图中从低幅值等

级开始逐步累加图像点数目, 当累加数目达到 $N \cdot \text{Hratio}$ 时, 则把对应的边缘强度幅值设置为高阈值 HTh; 低阈值选择为高阈值 HTh 乘上一定比例因子 Lratio, 即低阈值 LTh 为 $LTh = Lratio \cdot HTh$ 。

2.3 边缘方向计算存在的问题

Fjortoft 等的文章中未提到如何计算边缘方向的问题。在 Paillou^[6] 提出的类似于 ROEWA 的边缘检测方法中, 给出了一种边缘方向的计算方法:

$$D(x, y) = \arctan(R_Y(x, y) / R_X(x, y)) \quad (6)$$

由于 $R_Y(x, y) \geq 0$ 并且 $R_X(x, y) \geq 0$, 易见得到的角度值只在 $[0, \pi/2]$ 范围内, 显然丢失了方向角在 $(\pi/2, \pi)$ 内的方向, 得到的边缘方向肯定是不准确的。要解决这个问题, 直观的想法是根据光学图像求取梯度方向的方法, 改变比值的定义, 将比值定义为

$$R = \max \left\{ \frac{\hat{\mu}_1}{\hat{\mu}_2}, \frac{\hat{\mu}_2}{\hat{\mu}_1} \right\} \text{sgn}(\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2), \quad \text{sgn}(\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2) = \begin{cases} -1, & \hat{\mu}_1 > \hat{\mu}_2 \\ 1, & \hat{\mu}_1 < \hat{\mu}_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2$ 如式(3), 式(4)所示。则根据式(6), 式(7)可知, 角度的取值范围为 $[0, \pi)$ 。但是实验结果表明使用这种方法无法得到正确的边缘方向。原因可能是用比值代替了差分, 不再符合梯度的定义。

3 利用 Gabor 滤波器计算边缘方向

Daugman 给出了 Gabor 函数在二维情况下的一般形式:

$$g_\theta(x, y) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - \mu_x)^2}{\lambda \sigma_x^2} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\lambda \sigma_y^2} \right] \right\} \cdot \exp[j2\pi v(x \cos \theta + y \sin \theta)] \quad (8)$$

θ 表示 $g_\theta(x, y)$ 的波动方向, λ 表示尺度, μ_x, μ_y 表示高斯函数的均值 (描述了 Gabor 函数的中心位置), σ_x^2, σ_y^2 表示高斯函数的方差 (描述了函数主瓣在 x 和 y 方向上的大小), v 表示波动的频率。它是经有向复正弦函数调制的二维高斯函数, 由实部和虚部两部分组成。对 Gabor 滤波器而言, 其实数部分和虚数部分的响应是相同的, 除了二者之间的相位相差了 $\pi/2$ 。因此可以只利用 Gabor 滤波器的实数部分或者虚数部分构造滤波器。本文只利用实数部分, 定义为

$$g_\theta(x, y) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x - \mu_x)^2}{\lambda \sigma_x^2} + \frac{(y - \mu_y)^2}{\lambda \sigma_y^2} \right] \right\} \cdot \cos[2\pi v(x \cos \theta + y \sin \theta)] \quad (9)$$

当波动方向 θ 依次取圆周上 n 个等分点时可得到 n 个不同方向的 Gabor 函数。图 2 是 $\theta = 0^\circ$ 方向上的二维 Gabor 函数。

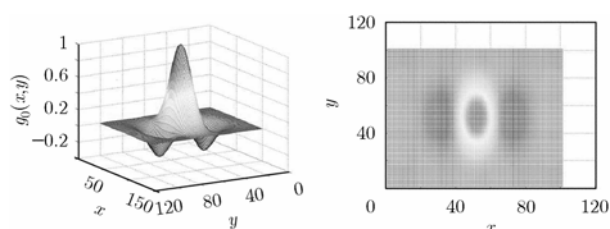


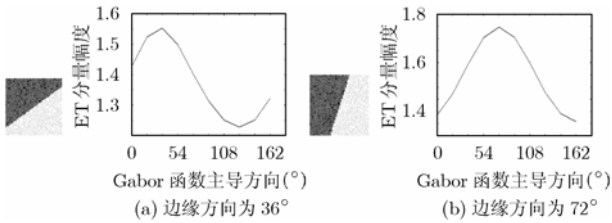
图2 $\theta=0^\circ$ 方向 Gabor 函数侧视及俯视图

可以用不同方向的 Gabor 函数描述方向选择性。如果用 $m(x, y)$ 表示 ROEWA 算子得到的边缘强度幅值, 那么第 i 个方向上的 Gabor 函数对 $m(x, y)$ 点的内积为

$$ET_i(x, y) = \langle g_{\theta_i}, f(x, y) \rangle, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中 $f(x, y)$ 表示边缘强度图 $m(x, y)$ 中一个以 (x, y) 点为中心的小区域的幅度值矩阵。定义一个矢量 $\mathbf{ET} = (ET_1, ET_2, \dots, ET_n)$ 。定义与二维 Gabor 函数 $g_{\theta_i}(x, y)$ 波动方向垂直的方向为 $g_{\theta_i}(x, y)$ 的主导方向, 若 Gabor 函数的中心位于边缘之上, 由于 Gabor 函数的旋转性, $\mathbf{ET}$ 矢量中最大值分量对应的主导方向必然与边缘的方向一致, 即最大值分量在矢量中的位置代表了边缘的方向。图3描述了不同方向边缘对应的 $\mathbf{ET}$ 矢量曲线, 从图中可以看出, $\mathbf{ET}$ 矢量中的最大值分量的主导方向所对应的角度代表了边缘方向。

通过对每一个边缘点计算其 $\mathbf{ET}$ 矢量的最大值分量所对应的主导方向, 可以得到每个边缘点的方向。

图3 $\mathbf{ET}$ 矢量与边缘方向的关系

4 实验结果及分析

实验采用中国电子科技集团公司第38研究所合肥地区机载 SAR 图像的切片图。图4(a)所示场景中主要包含道路和田野, 实验中的所有参数根据使实验结果最优的原则进行选择: ROEWA 的滤波器参数 $\alpha = 0.3$; 双门限阈值法的参数 $H_{ratio} = 0.7$, $L_{ratio} = 0.4$; Gabor 函数的波动方向 θ 等分为 $n = 4$ 个方向, $\lambda = 0.1$, $\sigma_x = 5$, $\sigma_y = 5$, $\mu_x = 0$, $\mu_y = 0$, $v = 0.2$, Gabor 函数的窗口选择为 11×11 ; ROA 算子的阈值为 0.7, 处理窗口为 7×7 。

从图4可以看出, 将 ROEWA 算子与 Gabor 函数结合起来做边缘检测(包括确定位置和方向)效果很好, 图4(b)为用 ROEWA 算子检测的边缘点, 图4(d)为用 Gabor 函数计算的边缘方向。与 SAR 图像经典边缘检测算子 ROA 算子相比(见图4(c)), ROEWA 算子对噪声不敏感, 检测出的虚假边缘少, 并且对边缘的定位更准确。图4(d)和图4(g)中用不同灰度值表示方向, 灰度值为 0 表示非边缘点, 63 表示方向 $[157.5^\circ, 180^\circ) \cup [0, 22.5^\circ)$, 126 表示方向 $[22.5^\circ, 67.5^\circ)$, 189 表示方向 $[67.5^\circ, 112.5^\circ)$, 255 表示方向 $[112.5^\circ, 157.5^\circ)$, 即图4(d)和图4(g)中灰度由浅到深分别表示不同的角度范围。与使用式(6)和式(7)求得的边缘方向图4(g)相比, 图4(d)能够准确地确定边缘方向, 而图4(g)不能。为了更清楚地看到两者的差别, 分别取图4(d)和图4(g)中的两块区域, 即区域1

和区域2, 将两个区域的边缘方向用箭头表示, 分别示于图4(e)、图4(f)和图4(h)、图4(i), 其中水平箭头表示 $[157.5^\circ, 180^\circ) \cup [0, 22.5^\circ)$, 右上斜箭头表示 $[22.5^\circ, 67.5^\circ)$, 垂直箭头表示 $[67.5^\circ, 112.5^\circ)$, 右下斜箭头表示 $[112.5^\circ, 157.5^\circ)$ 。图4(d)区域1中的边缘应该为水平方向, 在图4(e)中的检测结果是正确的, 而在图4(h)中检测的有些像素点的方向却为右上斜方向和右下斜方向, 这显然不正确; 图4(e)区域2中的边缘应该为垂直方向, 在图4(f)中的检测结果是正确的, 而在图4(i)中检测的方向全部变成了右上斜方向和右下斜方向, 这也显然不正确。

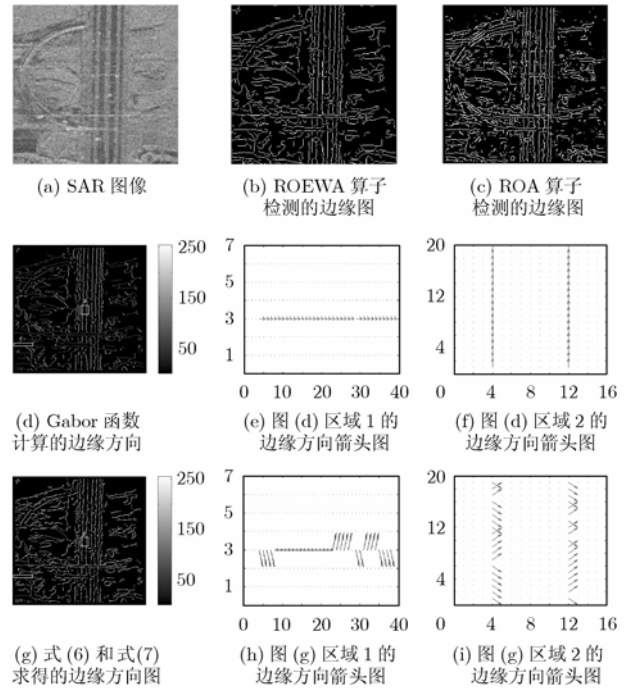


图4 实验结果对比

图5给出了另一组实验的结果, 图5(a)中的场景主要是城市建筑物。实验结果同样证明了本文方法的优越性。

本文方法的优越性还体现在算法的计算效率上。对于 ROEWA 算子, 每个像素需 14 次乘法、17 次加法和一次开平方根操作, 且运算量不随平滑程度而变化; 利用 Gabor 函数计算边缘方向的计算量较大, 如果取 D ($D \geq 4$) 个方向, $w \times w$ 的窗口, 则每个边缘点的计算量为 $w^3 D$ 次乘法, $(w^3 - 1)D$ 次加法和一次取最大操作, 但由于计算边缘方向仅对图像上已经确定是边缘的点进行, 且通常图像上的边缘点仅占全图像像素点的十分之一, 甚至更小, 所以影响较小; 而对于 ROA 算子, 同样取处理窗口为 $w \times w$, 角度方向个数为 D ($D \geq 4$) 为例, 每个像素需 $4D$ 次乘法, $(w^2 - w - 2)D$ 次加法和 $D + 1$ 次取最小操作。因此, 总的来说, 改进的 ROEWA 边缘检测方法计算效率更高。实验中实际所用的时间也证明了这一点, 见表1。实验所用的计算机为 Pentium (R) 4 CPU 2.40GHZ, 内存 1.00GB, 运行环境为 Matlab6.5。

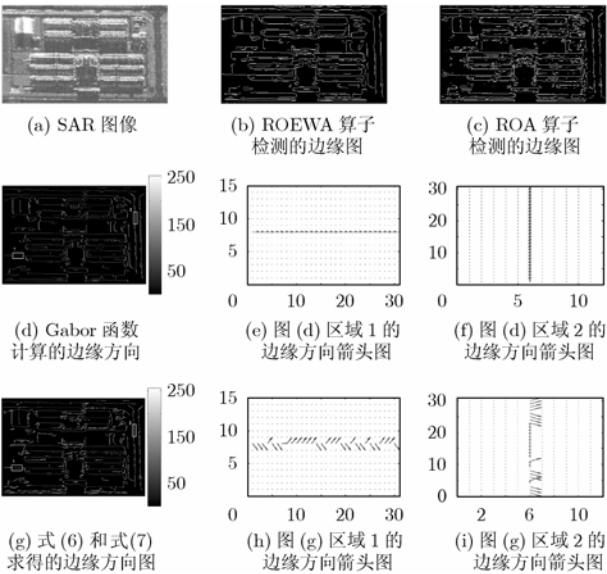


图 5 实验结果对比

表 1 改进的算法与 ROA 算子计算时间对比表

	计算时间(s)	
	本文改进的算法	ROA
图 4 (244 × 405)	2.1250	29.4060
图 5 (257 × 265)	2.8440	42.8590

5 结束语

本文利用 Gabor 算子的优秀的方向选择性,提出了一种用 Gabor 滤波器计算边缘方向的方法。将这种方法与 ROEWA 算子结合起来,解决了 ROEWA 算子无法正确确定边缘方向的缺陷。与 SAR 图像经典边缘检测算子相比,

ROEWA 算子的检测结果性能有一定的优越性。改进后的 ROEWA 算子非常适合用于检测线状结构的边缘,因此可用于机场跑道、道路网等大型组合目标的提取任务中。

参考文献

[1] Fjortoft R, Lopes A, and Marthon P. An optimal multiedge detector for SAR image segmentation[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 793–802.

[2] Marcelja S. Mathematical description of there sponse of simple cortical cells[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1980, 70(11): 1297–1300.

[3] Daugman J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1985, 2(7): 1160–1169.

[4] 傅一平, 李志能, 袁丁. 用于多类型边缘提取的最佳 Gabor 滤波器设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(7): 839–881.

[5] 余洪山, 王耀南. 一种改进型 Canny 边缘检测算法[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(20): 27–29.

[6] Paillou P. Detecting step edges in noisy SAR images: A new linear operator[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 191–196.

贾承丽: 女, 1980 年生, 博士生, 研究 SAR 图像解译。

匡纲要: 男, 1966 年生, 教授, 博士, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等领域的研究工作。