

# SAR 图像边缘检测方法综述

赵凌君 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** 边缘检测是 SAR 图像解译的基本问题之一。固有的乘性噪声特性使得经典的梯度边缘检测方法并不适用于 SAR 图像,因此研究针对 SAR 图像的边缘检测方法具有重要的意义。本文对 SAR 图像边缘检测问题进行了系统的研究,简单描述了 SAR 图像边缘检测问题,讨论了现有的 SAR 图像边缘检测方法,总结了 SAR 图像边缘检测中存在的两个问题——边缘细化和边缘定位,对检测结果的性能评估方法也进行了概括。最后在总结现有研究成果的基础上展望了 SAR 图像边缘检测的发展方向。

**关键词** SAR 图像 边缘检测 边缘定位

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)12-2042-08

## Overview of Edge Detection in SAR Images

ZHAO Ling-jun, JIA Cheng-li, KUANG Gang-yao

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** Edge detection is a fundamental issue in synthetic aperture radar(SAR) image interpretation. The multiplicative noise makes edge detection in SAR image extremely difficult, and the typical edge detectors based on gradients are inefficient when applied to SAR images. So developing edge detectors especially for SAR image is of great importance. This paper investigates the problem of edge detection for SAR images comprehensively and thoroughly. It first describes the problem of edge detection for SAR images, and then discusses several well-known edge detection methods and two key points in SAR image edge detection—edge thinning and localization. To evaluate edge detector quantitatively, some performance criteria are summarized. In the end of this paper, conclusions are made and the possible future work is explained.

**Keywords** SAR images, edge detection, edge localization

## 1 引言

图像的边缘是视觉感知的重要线索,边缘检测广泛应用于轮廓提取、特征匹配和纹理分析中。在 Marr 的计算机视觉系统中,图像边缘检测占据着重要位置,它位于系统的最底层,为其他模块所依赖,其性能在很大程度上影响着一系列处理的整体效果。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)具有高分辨率、全天候、全天时等优点,其图像的应用研究已成为该领域的研究热点。目前国内外正在广泛开展 SAR 图像目标的自动识别研究,例如识别桥梁、公路、机场等。而边缘检测是开展这方面研究

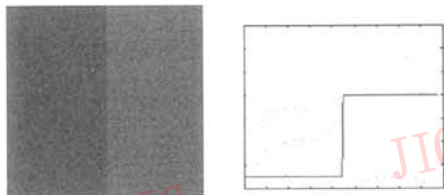
的基础,所以研究 SAR 图像的边缘检测具有非常重要的意义。

景物目标的边缘反映在图像上就是灰度的变化,灰度变化有多种形式,最基本的是图 1(a)所示的理想化模型,依据这个模型生成的理想边缘是一组相连像素的集合,每个像素都处在灰度级跃变的一个垂直的台阶上。然而实际上,成像系统、取样和其他图像采集的不完善性使得得到的边缘是模糊的;对于 SAR 图像来说,由成像机制导致的乘性相干斑噪声还会进一步造成边缘的恶化。图 1(b)是实测 SAR 图像边缘的一条水平灰度剖面线,乘性噪声模糊了相邻区域的对比度,使得相邻区域的跃变趋于平缓,边缘处出现了一个明显的过渡带,不再是

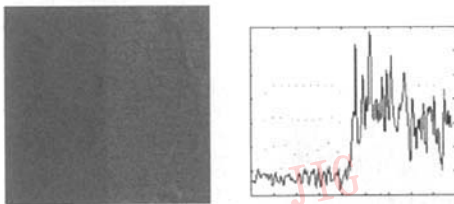
收稿日期:2006-03-13;改回日期:2006-07-24

第一作者简介:赵凌君(1981~),女,2004年于国防科技大学获电路与系统专业硕士学位,现为国防科技大学通信与信息工程专业在读博士研究生。目前主要从事 SAR 图像解译的研究。E-mail: nudtjzlj@163.com

理想情况下的单像素边缘,因此难以确定边缘的准确位置。同样是由于相干斑的影响,图像上原本具有常数后向散射系数的均匀同质区域的灰度并不均匀,而是围绕着某一均值随机起伏,导致均匀区域出现类似于边缘的灰度跃变,且区域灰度均值越大,跃变的幅度越大,这是造成经典边缘检测方法不适用于 SAR 图像的主要原因。因为经典的基于梯度的边缘检测算法通常依赖于这样一个假设:图像受加性噪声污染;但 SAR 图像的噪声是乘性的,梯度算子用于 SAR 图像得到的边缘检测结果不是恒虚警的,而是随着图像局部强度均值的变化而变化,这样就容易在亮区检测出虚假边缘,而在暗区则丢失很多真实边缘。为了解决这个问题,必须研究专门针对 SAR 图像乘性噪声的边缘检测算子。所以,从 20 世纪 80 年代开始,研究者们在这一领域展开了深入的研究,取得了很大的进展。



(a) 理想边缘模型及其水平灰度剖面线



(b) 实测 SAR 图像边缘及其灰度剖面线

图 1 理想边缘与实测边缘的灰度剖面线

Fig. 1 Gray-level profile of an ideal edge and a real edge in SAR image

早期的适用于雷达图像的边缘检测器是方差系数检测器和 Frost 等人提出的一种似然比检测器<sup>[1]</sup>,这两种检测器都是各向同性的恒虚警检测器。1988 年, Touzi 等人<sup>[1]</sup>和 Bovik 等人<sup>[2]</sup>分别提出了两种均值比(ratio of averages, ROA)检测器,这类检测器克服了经典梯度边缘检测器对乘性噪声非常敏感的缺点,同时考虑到了边缘的方向性,获得较好的检测效果。此后的几年中,研究者们陆续提出了 MROA (modified ratio of averages)、RGOA (ratio and gradient

of averages)<sup>[3]</sup>和 MSP-ROA (maximum strength edge pruned ratio of averages)<sup>[4]</sup>等以 ROA 为基础的检测器。1996 年, Oliver 等人提出了一种考虑边缘方向性的似然比检测算法<sup>[5]</sup>,他们特别强调了 SAR 图像边缘定位精确度的问题,此后这一问题也受到越来越多的研究人员的关注。1997 年, Lopès 和 Fjørtoft 等人组成的研究小组提出了指数加权均值比(ratio of exponentially weighted averages, ROEWA)检测器<sup>[6]</sup>和多分辨率边缘检测方法<sup>[7]</sup>,他们系统研究了多种 SAR 图像边缘检测方法,最终总结出一个完整的 SAR 图像边缘检测与分割算法的框架<sup>[8]</sup>。

Touzi, Oliver, Lopès 和 Fjørtoft 等人的研究工作代表了自 20 世纪 80 年代中后期至 20 世纪 90 年代末 SAR 图像边缘检测研究领域的主流方向,他们提出的 3 种主要边缘检测器在应用中取得了很大的成功。同时期也有其他一些边缘检测方法被提出,如基于分形的方法<sup>[9]</sup>、无参数检测方法<sup>[10]</sup>等,但是这些方法的后继研究很少,在实际应用中也较少采用。20 世纪 90 年代末以后,一方面,多分辨率的思想逐渐受到人们的关注,多种基于小波分析的 SAR 图像边缘检测方法相继被提出<sup>[11-16]</sup>,这类方法在 SAR 图像海岸线提取等应用中取得不错的效果;另一方面,基于进化计算<sup>[17]</sup>等智能方法的边缘检测器也丰富了 SAR 图像边缘检测的内容。此外,边缘定位仍然是研究热点之一, Germain 等人通过建模分析了边缘定位不准的原因,并提出基于统计主观轮廓的定位方法<sup>[18,19]</sup>。本文对 SAR 图像边缘检测的问题进行了系统的研究,对近年来边缘检测的研究状况进行了分析和总结,对边缘检测、边缘定位、边缘检测性能定量评估的基本思想和方法进行了探讨,并对边缘检测的进一步发展提出了展望。

## 2 SAR 边缘检测问题的描述

边缘像素实际上是局部图像范围内灰度的急剧变化点(奇异点),图像边缘就是 2 维图像中奇异点的集合。类似于文献[20]中建立的边缘模型,对于 SAR 图像,1 维有噪边缘  $S(x)$  可以表示为

$$S(x) = Cu(x) * n(x) \quad (1)$$

其中,  $C$  是常数,  $u(x)$  表示单位阶跃函数,  $n(x)$  是乘性噪声。本质上说,边缘检测是在有噪边缘上卷积一个滤波器  $f(x)$ ,卷积结果  $O(x_0)$  的局部极大值就是边缘所在的位置,其中

$$O(x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x)f(x_0 - x) dx \quad (2)$$

不同的边缘检测器的区别在于其滤波器形式的不同。对于 SAR 图像边缘检测研究来说,需要解决的问题就是设计能检测出局部极大值的滤波器,同时由于乘性噪声的影响,检测方法应该有区分分别对应真实边缘点和虚警的局部极大值的能力。

### 3 SAR 图像边缘检测方法

经过 20 多年的研究,人们已提出多种针对 SAR 图像的边缘检测方法,主要的方法分为 4 类:基于单边缘模型的方法、基于多边缘模型的方法、多分辨率

的方法以及其他方法。前两类方法一般采用一个固定尺寸的局部窗口进行检测,对分析窗口内的边缘模型作了不同的假定;后两类方法通常没有这种限制。对于每一类方法,则按检测方法的相似性进一步归纳为不同的子类方法:基于单边缘模型的检测方法分为以 ROA 检测器为代表的基于局部均值差异的检测方法和以广义似然比 (generalized likelihood ratio, GLR) 检测器为代表的假设检验方法;基于多边缘模型的检测方法主要是以 ROEWA 检测器为代表的线性滤波器;多分辨率方法分为多分辨率 GLR 检测方法和基于小波分析的方法;最后一类是近年来出现的一些新方法。图 2 详细描述了这种分类层次。

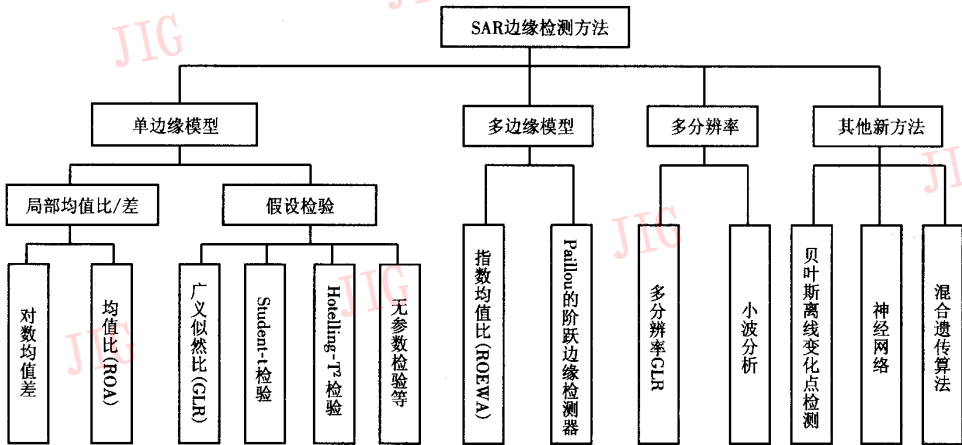


图 2 SAR 图像边缘检测方法分类

Fig. 2 Classification of edge detectors for SAR image

#### 3.1 基于单边缘模型的检测方法

基于单边缘模型的检测方法通常采用局部加窗检测的方式,并且假定分析窗内为单边缘,图 3(a) 是其 1 维模型。根据检测方法的不同,基于单边缘模型的边缘检测方法主要有以 ROA 检测器为代表的基于局部均值差异的方法和以 GLR 检测器为代表的假设检验的方法。

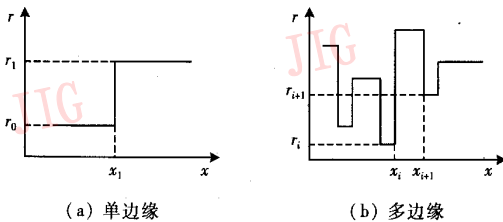


图 3 1 维边缘模型

Fig. 3 One-dimensional edge model

##### 3.1.1 基于局部均值差异的边缘检测方法

ROA 检测器是适用于 SAR 图像边缘检测的一类重要方法,它主要是基于局部均值对比度的差异:在目标像素点两侧设置两个窗口,计算两个窗口内像素均值  $\hat{R}_1$  和  $\hat{R}_2$  之比。Bovik 将检测算子定义为  $R = \max\left(\frac{\hat{R}_1}{\hat{R}_2}, \frac{\hat{R}_2}{\hat{R}_1}\right)$ ,当目标像素点的  $R$  值大于预设的门限时,确定该点为边缘点。Touzi 等人对均值比进行了归一化,定义检测算子为  $R = \min\left(\frac{\hat{R}_1}{\hat{R}_2}, \frac{\hat{R}_2}{\hat{R}_1}\right)$ ,当目标像素点的  $R$  值小于预设的门限时,确定该点为边缘点。这两种检测器可以视为最基本的 ROA 边缘检测器。

ROA 检测器的检测性能不随图像强度的变化而变化;在强度图像服从 Gamma 分布且斑纹不相关

的假设下,ROA 边缘检测的虚警率与目标像素点两侧区域的均值无关,而与均值比有关,因此是一种恒虚警边缘检测器,这一点对 SAR 图像边缘检测来说是至关重要的。此外,虚警率与均值比门限以及检测率与均值比门限之间的解析关系是可以推导的,因此,在实际应用时,可以根据设定的虚警率计算均值比的检测门限。

在基本 ROA 检测器的基础上,人们根据不同的应用需要发展出一些新的边缘检测器,如适用于桥梁检测的结合梯度信息的 MRGOA 边缘检测器<sup>[21]</sup>等;ROA 边缘检测思想还为多种 SAR 图像线特征检测器<sup>[22,23]</sup>奠定了基础,尤其是 Geling 等人提出的线特征检测器<sup>[22]</sup>能有效检测出 SAR 图像上的细线,这是一般的边缘检测器难以实现的。

和均值比一样,均值差也是区域差异的一种度量方式,从而可用于边缘检测。但为了保证 SAR 图像边缘检测的恒虚警率,要对均值差进行归一化处理或者使用对数图像的均值之差,这是与经典梯度算子的不同之处。Oliver 等人提出的归一化均值差检测器与 ROA 检测器有极为相似的检测性能<sup>[5]</sup>;Oller 等人提出了一种带符号的均值差与最小均值比率算子,其符号可用于估计边缘的方向<sup>[24]</sup>。

### 3.1.2 基于假设检验的边缘检测方法

基于假设检验的边缘检测是 SAR 图像边缘检测的另一类重要方法,其中以似然比检验方法最有代表性,其基本思想是将边缘检测问题视为假设检验问题,即在以目标像素为中心的窗口内作“存在边缘”和“同质区域”的假设,当这两个假设的似然比大于预设的门限时,“同质区域”的假设被拒绝,认为窗口内存在边缘,目标像素为边缘像素。由于似然比检测器只能用于窗口内统计参数(主要是假设为同一均匀区域的散射系数)已知的情况,因此通常它只具有理论上的意义。实际中使用的是 Oliver 等人在假设强度图像服从单视 Gamma 分布且斑纹不相关的前提下推导出来的 GLR 检测器<sup>[5]</sup>,它用统计参数的最大似然估计(这里是均值)代替了真实值,得到如下广义似然比表达式:

$$\hat{\lambda} = N_0 \ln \hat{R}_0 - N_1 \ln \hat{R}_1 - N_2 \ln \hat{R}_2 \quad (3)$$

其中, $N_1$ 、 $N_2$  和  $\hat{R}_1$ 、 $\hat{R}_2$  分别表示目标像素两侧区域的像素个数与均值估计, $N_0$  和  $\hat{R}_0$  表示两侧区域总的像素个数与总体均值估计。当目标像素点两侧区域大小相同时,该检测器能获得最高的检测率。这种 GLR 检测器也是恒虚警检测器;与 ROA 检测器

类似,可以根据给定虚警率求得相应的似然比门限。

然而,无论是 Oliver 等人的 GLR 边缘检测器还是 ROA 边缘检测器,都是在假定像素间无相关性的条件下提出的,当像素间相关性较强时,这两种检测器都无法获得理论上的最优检测结果。Fjørtoft 等人基于这种考虑,将 GLR 检测器用于复数据<sup>[25]</sup>,他们首先用白化滤波器估计分析窗中每个区域的散射系数,然后将估计值代入似然比检验过程,使用白化滤波器主要是为了去除像素间的相关性,因此这种检测方法是考虑斑纹相关情况下的最优检测器。

除了 GLR 检测器,Student-t 检验也可用于边缘检测,但是这种方法主要是用来推断窗口内不同区域的像素是否服从同一高斯分布,因此可能更适用于 SAR 幅度数据而不是强度数据,因为强度数据服从 Gamma 分布,而幅度数据服从 Rayleigh 分布,后者能更快地收敛到高斯分布<sup>[5]</sup>。Borghys 等人将 Hotelling- $T^2$  检验引入单视、全极化 SAR 图像的边缘检测。这种方法的优点在于它将不同通道的信息作为一个输入,利用 Hotelling- $T^2$  这种多变量检验衡量均值差,而不是简单地融合各个极化通道的边缘检测结果,同时检验还利用了数据集的协方差矩阵,即考虑到不同通道的相关性,因此检测结果优于单极化图像边缘检测结果以及多个极化通道边缘检测融合的结果<sup>[26]</sup>。Beauchemin 等人提出了基于 Wilcoxon-Mann-Whitney 统计量的无参数边缘检测器,其特点是不需要 SAR 图像视数等参数<sup>[10]</sup>。Bors 等人<sup>[27]</sup>从幅度图像统计分布模型的角度出发,提出基于 Rayleigh-Bessel 分布的边缘检测方法,其本质上仍然是一种最大似然估计的方法,该方法的缺点是需要进行多个参数估计,参数估计的准确度会影响边缘检测的性能。

### 3.2 基于多边缘模型的检测方法

ROA 和 GLR 等基于单边缘模型的检测器在检测时对分析窗作了存在单边缘的限制性假设,而为了保证得到可靠的检测结果,在计算时往往又采用较大的窗口。对于大多数场景类型来说,大窗口很有可能同时包含多条边缘,这与单边缘的假设是矛盾的。Fjørtoft 等人针对单边缘检测器的这一缺陷,建立了一个多边缘模型(如图 3(b)所示),根据这个模型,他们设计了一种基于线性最小均方误差的指数平滑滤波器,由这种滤波器估计检测窗口内的局部均值不是和 ROA 检测器一样的算术均值,而是根据一定权值计算出来的均值,因此该检测器称为

指数加权均值比 (ROEWA) 检测器。1 维情况下, 指数平滑滤波器的表达式为<sup>[6]</sup>

$$f(x) = C \exp(-\alpha |x|) \quad (4)$$

其中,  $C$  是一个归一化的常数,  $\alpha$  是滤波系数。对于斑纹不相关的强度数据, ROEWA 检测器是最小均方意义下的最优检测器, 它也是恒虚警的。

Paillou 提出了在形式上与 ROEWA 非常相似的线性滤波器<sup>[20]</sup>:

$$f_p(x) = -C \exp(-\alpha |x|) \sinh(\omega x) \quad (5)$$

$$C > 0, \alpha > 0, \omega > 0$$

其中,  $C$  是一个归一化的常数,  $\alpha$  和  $\omega$  是滤波系数。与 ROEWA 检测器相比, 其特点是对斑纹噪声不敏感, 而 ROEWA 的定位性能较好。

### 3.3 多分辨率边缘检测方法

SAR 图像多分辨率边缘检测方法的提出最初也是为了克服单边模型的限制, 这类方法通常对边缘模型没有作具体的假定或者通过采用不同尺寸的窗口来弱化边缘假设的限制。

Fjortoft 等人提出的多分辨率 GLR 边缘检测方法<sup>[8]</sup>, 根据给定的虚警率, 采用不同尺寸的窗口和相应的门限检测边缘, 用大窗口检测出大区域的弱边缘, 用小窗口检测出小区域的强边缘, 融合不同尺度的检测结果实现多边缘检测。这种思想同样可以推广到 ROA 等其他局部检测器。

小波分析也是一种多分辨率分析的方法, 近年来常被用于 SAR 图像处理, 往往能兼顾去斑与增强边缘信息的双重效果。这类方法一般是对原始 SAR 图像作多层小波分解, 得到多个尺度的近似图像和细节图像, 从而可以提取出不同尺度的有用边缘信息。

### 3.4 其他方法

近年来, 研究人员不断尝试将一些新方法引入 SAR 图像边缘检测。Tournet 等人<sup>[28]</sup>设计了基于 MAP 和 MMSE 准则的贝叶斯离线变化点检测器, 用于 SAR 图像的边缘检测和分割, 其中基于 MMSE 准则的检测器在边缘强度图方面的结果略优于经典的 ROEWA 检测器, 但是如何提高这类方法的计算效率仍在进一步研究中。Belfiore 等人提出基于 Mumford-Shah 函数的方法, 能够兼顾边缘检测与去斑<sup>[29]</sup>。Dimou 等人把边缘检测作为分类问题, 利用神经网络判别图像每个像素属于某个边缘类还是非边缘类<sup>[30]</sup>。杨等人提出一种基于混合遗传算法的边缘检测方法, 利用遗传算法的全局寻优能力, 能够

得到定位准确且更加连续的边缘<sup>[17]</sup>。从这些新方法的出现也可以看出将边缘检测问题看作优化问题进行研究是近年来边缘检测发展的一个热点, 通过将边缘检测问题表示成代价函数最小化的问题, 可以借助各种优化方法来确定图像的真实边缘。

### 3.5 SAR 图像边缘检测器的比较

在现有的 SAR 图像边缘检测方法中, 基于单边模型和基于多边缘模型的检测方法大多是依据 SAR 图像的固有特性 (如乘性相干斑噪声、统计分布模型) 而设计的, 具有很强的针对性, 以其计算简单、检测性能好的优点仍然占据主流地位; 以小波分析为代表的多分辨率检测方法虽然也是近年来一个研究热点, 但是小波本质上是一种梯度算子, 并不是一种专门针对 SAR 图像的边缘检测方法, 在使用这类方法的时候, 往往要考虑信号局部特性, 引入如自适应维纳滤波<sup>[14]</sup>、模糊加权中值滤波<sup>[15]</sup>等滤波方法, 或者采用自适应的阈值。从实际应用效果来看, 这类方法比较适用于提取 SAR 图像弱反射地物边缘 (如水体、机场); 近年来出现的结合其他方法的检测器尽管在检测效果上能够媲美甚至略优于经典检测器, 但是其计算方法相对比较复杂, 往往存在提高计算效率的问题<sup>[28]</sup>。

在基于单边模型和多边缘模型的检测方法中, 又以 ROA、GLR 和 ROEWA 最具代表性, 三者都具有恒虚警特性, 且计算简单, 实用性强。根据这 3 种检测器的推导依据, 它们在特定条件下能分别达到其最佳检测性能, 表 1 对这些条件进行了总结。特别地, 当强度数据服从单视 Gamma 分布且采用对称窗口时, ROA 和 GLR 具有相同的检测性能<sup>[5]</sup>。

表 1 3 种代表性 SAR 图像边缘检测器的最优条件

Tab. 1 The optimal conditions of three typical edge detectors for SAR

检测器	最优条件			
	数据类型	分布假设	斑纹相关性	边缘模型
ROA	强度	Gamma	不相关	单
GLR	强度	单视 Gamma	不相关	单
	复数据	复高斯	相关	单
ROEWA	强度	Gamma	不相关	多

然而, 由于真实 SAR 图像并不满足以上所列的最优条件, 尤其是相关性和单边模型的假设, 因此这些最优条件只是具有理论上的指导意义, 实际应用中会有多种因素影响这些经典检测器的性能及其

适用情况,主要表现为:

(1) 当图像场景比较简单时,ROA、GLR 与 ROEWA 的检测效果相当。但是随着场景复杂度的增加,单边缘模型的局限性会逐渐表现得突出。一方面,由于服从 Gamma 分布的平稳过程的最大无偏似然估计是算数均值,ROA 等检测器都使用算数均值作为其估计值,但这个估计在单边缘情况下是最优估计,为保证这一条件,应使用小的检测窗口;另一方面,SAR 图像的信噪比很低,为充分去除相干斑的影响,计算均值时窗口不能太小,窗口内很可能包含多条边缘。在选择检测窗口尺寸时必须考虑这两个方面的折衷。相比之下,ROEWA 检测器在平滑程度越高时性能越好,因此更适合采用较大的分析窗口。可见在复杂场景下,当图像中有大量彼此之间很接近的边缘时,这种基于多边缘模型的检测尤其有意义。

(2) ROA、GLR 等基于单边缘模型的检测器都采用滑窗计算的方式,且在每个像素点要采用 4 个(或 8 个)方向的检测窗口,计算效率较低。而 ROEWA 检测器在实现时可以采用快速的递归计算方法,计算效率很高。因此,在对大场景进行边缘检测时,ROEWA 检测器在计算速度上体现出很大的优势。

(3) 为减小斑纹相关性,可以采用 GLR 检测器对复数数据进行处理,而 ROA 和 ROEWA 检测器无此特点。

(4) 在某些应用中(如检测机场、道路等大型组合目标),除了需要检测出边缘点,还需要确定边缘的方向,由于单边缘模型对边缘方向作了假定,因此这类检测器在检测出边缘点的同时也就确定了边缘的方向。而 ROEWA 检测器只能得到边缘强度,难以准确确定边缘方向<sup>[31]</sup>,必须采用其他的方向估计器(如 Gabor 滤波器)。

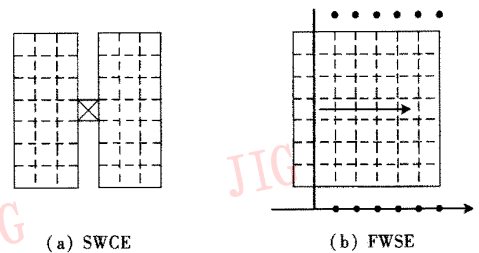
## 4 边缘细化与边缘定位

和所有的边缘检测方法一样,在低级检测后总是要进行一些后处理,以便改进并完善边缘。尤其是对于 SAR 图像,由于相干斑和分析窗口尺寸的影响,检测到的边缘往往较粗,且窗口越大边缘越粗,因此有必要进行边缘细化并尽可能准确地确定边缘位置。

常用的细化方法有:在边缘垂直方向上进行非局部极值抑制<sup>[4]</sup>;在阈值结果上进行数学形态学闭

运算<sup>[1]</sup>。一般的细化方法通常不会得到闭合的边缘,如果要得到闭合的边缘以便于图像分割,则可以采用分水岭方法<sup>[8]</sup>,但是这种方法存在比较严重的过分割现象,也就是得到的虚假边缘很多,需要用区域融合等后处理去除虚假的边缘。

由于 SAR 图像固有的斑纹噪声、检测器自身的检测偏差以及细化等后处理引入的误差等因素的影响,检测到的边缘像素会偏离正确的位置,因此在对边缘定位精度要求较高的应用中,有必要在边缘检测的基础上进一步优化,即进行边缘定位。所谓边缘定位是指,假设在一个分析窗口内已确定存在边缘,要确定最可能的边缘位置。从本质上说,边缘定位是一个估计问题而不是检测问题。边缘检测一般以目标像素点为中心加窗,分析该像素点是否为边缘像素点,这种方式能保证多种检测器的检测概率最优<sup>[5]</sup>,这样的分析窗口称为扫描窗中心边缘(scanning-window central-edge, SWCE)配置,如图 4(a)所示;而边缘定位以检测到的边缘像素点为中心固定一个窗口,在窗口内扫描可能的边缘位置,这样的分析窗口称为固定窗扫描边缘(fixed-window scanning-edge, FWSE)配置,如图 4(b)所示。



(a) SWCE

(b) FWSE

图 4 两种窗口配置方式

Fig. 4 Two kinds of window configuration

对每一种边缘位置计算式(3)中的广义似然比 $\hat{\lambda}$ ,使 $\hat{\lambda}$ 最大的边缘位置就是定位最好的边缘位置。Fjørtoft 等人基于同样的思路,提出了边缘位置的近似最大似然估计方法,即寻找使式(3)中 $N_1 \ln \hat{R}_1 + N_2 \ln \hat{R}_2$ 最小的边缘位置,在具体实现时,他们还引入了边缘的其他规律性约束,如使用 Gibbs 随机场的纹理约束<sup>[8]</sup>,该方法在 SAR 图像分割中取得了很好的效果。Germain 等人<sup>[18,19]</sup>通过建模从理论上分析了 GLR 检测器边缘定位不准的原因,推导出边缘的位置随着边缘两侧对比度变化的波动规律;针对这个问题,他们提出了通过在原始 SAR 图像上使用基于区域的主观轮廓来提高边缘定位的精确度,这

种方法有效地改善了边缘检测的最后结果。

## 5 SAR 图像边缘检测性能的评估指标

对于边缘检测方法来说, Canny 原则是一般性的评估准则<sup>[20]</sup>:

(1) 对噪声的敏感性

$$\Sigma = \int_{-\infty}^0 f(x) dx \left/ \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx} \right. \quad (6)$$

(2) 边缘定位效果

$$\lambda = |f'(0)| \left/ \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f'^2(x) dx} \right. \quad (7)$$

(3) 对一条边缘的单像素响应性

$$k = |f'(0)| \left/ \left( \sum \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^{n2}(x) dx} \right) \right. \quad (8)$$

其中,  $f(x)$  表示边缘检测算子的表达式。

但是, 对于 SAR 边缘检测方法来说, 很多检测算子并不具有明确的数学表达式, 所以实际上更多的是使用下面两种方法。

(1) ROC (receiver operating characteristics) 曲线<sup>[26]</sup> 研究实际计算出的检测概率  $P_{det}$  与虚警率  $P_{fa}$  之间的关系, 用来比较虚警率相同时, 不同检测器的检测概率。其中, 检测概率  $P_{det}$  指已知真实边缘的位置, 在正确的位置上检测出边缘像素的检测概率。在实际评估时可定义为沿着真实边缘检测到的、与真实边缘距离小于一定范围的边缘点的数目与真实边缘点数目之比。虚警率  $P_{fa}$  在实际评估时可定义为检测到的、与真实边缘距离大于一定范围的边缘点数目与图像上所有不在真实边缘附近(距离大于一定范围)的像素点数目之比。

(2) Pratt 价值图<sup>[6]</sup>:

$$P = \frac{1}{\max\{N_{DE}, N_{ID}\}} \sum_{i=1}^{N_{DE}} \frac{1}{1 + \beta d_i^2} \quad (9)$$

其中,  $N_{ID}$  是理想的边缘像素数目,  $N_{DE}$  是检测到的边缘像素数目,  $d_i$  是第  $i$  个检测到的边缘像素到离它最近的真实边缘像素的距离,  $\beta$  是常量, 一般设为 1。

由于真实 SAR 图像中的实际边缘位置是未知的, 对边缘检测器进行评估一般只能在仿真图像上进行, 有时也可以在实测图像上手工提取边缘作为图像上的真实边缘。

## 6 结 语

经过 20 多年的研究, SAR 图像边缘检测的研究已经取得了很大的进展, 但现有的边缘检测还存在诸如定位不准、对边缘模型限制较多等问题, 仍有进一步研究的潜力, 主要表现在以下几个方面:

(1) 研究其他数据类型的边缘检测方法, 比如复数据。SAR 图像最原始的数据形式是复数据, 能够提供更多可用的信息。以 GLR 检测器为例, 利用复数据可以更精确地估计局部散射系数的均值从而提高检测性能。但目前已有的针对复数据的边缘检测器几乎仅限于 GLR 检测器, 必然会受到其边缘模型的局限。

(2) 研究相关性对边缘检测的影响及如何消除这种影响。多种经典的 SAR 图像边缘检测器都作了斑纹不相关的假设, 这与实际情况是不相符的, 尤其是单视情况下, 像素间存在很强的相关性, 可以考虑从去相关的角度提高检测性能。

(3) 研究基于小波的多分辨率边缘检测仍然是一个重要方向, 小波理论的发展和相关新方法、新技术的应用也会为 SAR 图像边缘检测提供新的思路。

(4) 研究极化 SAR 图像的边缘检测也是一个新的方向。融合多通道的边缘检测结果有望获得比单极化数据更好的效果。

(5) 研究基于信息测度和神经网络、遗传算法等智能方法的边缘检测器会给 SAR 图像边缘检测带来新的发展动力。

## 参考文献 (References)

- 1 Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(6): 764 ~ 773.
- 2 Bovik A C. On detecting edges in speckle imagery [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988, 36(10): 1618 ~ 1627.
- 3 Zaman M R, Moloney C R. A comparison of adaptive filters for edge-preserving smoothing of speckle noise [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing [C], Minneapolis, Minnesota, USA, 1993: 77 ~ 80.
- 4 Gannugapati S S, Moloney C R. A ratio edge detector for speckled images based on maximum strength edge pruning [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Washington DC, USA, 1995: 165 ~ 168.
- 5 Oliver C J, Blacknell D, White R G. Optimum edge detection in

- SAR[J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(1): 31~40.
- 6 Fjørtoft R, Marthon P, Lopès A, *et al.* An optimum multiedge detector for SAR image segmentation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 793~802.
- 7 Fjørtoft R, Lopès A, Marthon P, *et al.* Different approaches to multiedge detection in SAR images [A]. In: Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Singapore, 1997: 1~3.
- 8 Lopès A, Fjørtoft R, Ducrot D, *et al.* Edge detection and segmentation of SAR images in homogeneous region [A]. In: Information Processing for Remote Sensing [C], Chen C H, Ed. Singapore: World Scientific, 1999: 1~28.
- 9 Migliaccio M, Riccio D. Fractal brownian model for SAR image analysis; edge detection and classification issues [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Tokyo, Japan, 1993: 1605~1607.
- 10 Beauchemin M, Thomson K P B, Edwards G. On nonparametric edge detection in multilook SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1826~1829.
- 11 Chabert M, Tourneret J Y, Mesnager G. Edge detection in speckled SAR images using the continuous wavelet transform [A]. In: Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Lincoln, Nebraska, USA, 1996: 1842~1844.
- 12 Manian V, Vásquez R. Multiresolution edge detection algorithm applied to SAR images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Hamburg, Germany, 1999: 1291~1293.
- 13 Dai M, Peng C, Chan A K, *et al.* Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642~1648.
- 14 Wan Peng, Wang Jian-guo, Zhao Zhi-qin, *et al.* Method of edge extraction of small reflection object in SAR image [J]. Signal Processing, 2000, 16(4): 317~323. [万朋, 王建国, 赵志钦等. SAR 图像弱反射地物边缘提取方法 [J]. 信号处理, 2000, 16(4): 317~323.]
- 15 Liu Jia-min, Zhou Yin-qing. A SAR image edge extraction method based on the wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1780~1783. [刘佳敏, 周荫清. 一种基于小波变换的雷达图像边缘提取方法 [J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1780~1783.]
- 16 Zhu Jun-jie, Guo Hua-dong, Fan Xiang-tao. Automatic and fast detection of edges between land and water in high-resolution SAR images [J]. Remote Sensing Information, 2005, (5): 29~31. [朱俊杰, 郭华东, 范湘涛. 高分辨率 SAR 图像的水体边缘快速自动与精确检测 [J]. 遥感信息, 2005, (5): 29~31.]
- 17 Yang Shu-yuan, Wang Min, Jiao Li-cheng. A genetic algorithm-based edge detection method for SAR image [J]. Infrared Technology, 2005, 27(1): 53~56. [杨淑媛, 王敏, 焦李成. 基于混合遗传算法的 SAR 图像边缘检测 [J]. 红外技术, 2005, 27(1): 53~56.]
- 18 Germain O, Réfrégier P. On the bias of the likelihood ratio edge detector for SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1455~1457.
- 19 Germain O, Réfrégier P. Edge location in SAR images: performance of the likelihood ratio filter and accuracy improvement with an active contour approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(1): 72~78.
- 20 Paillou P. Detecting step edges in noisy SAR images: a new linear operator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35(1): 191~196.
- 21 Bai Z, He P. An improved ratio edge detector for target detection in SAR images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing [C], Nanjing, China, 2003: 982~985.
- 22 Geling G, Jonescu D. An edge detection operator for SAR images [A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering [C], Vancouver, British Columbia, Canada, 1993: 707~709.
- 23 Tupin F, Maïte 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.
- 24 Oller G, Marthon P, Rognant L. Edge detection and extraction for SAR images [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Toulouse, France, 2003: 4004~4006.
- 25 Fjørtoft R, Cabada J C, Lopès A, *et al.* Optimal edge detection and segmentation of SLC SAR images with spatially correlated speckle [A]. In: Proceedings of SAR Image Analysis, Modelling, and Techniques III, SPIE 3497 [C], Barcelona, Spain, 1998: 99~110.
- 26 Borghys D. Interpretation and Registration of High-resolution Polarimetric SAR Images [D]. Paris: Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Dept. TSI, 2001.
- 27 Bors A G, Hancock E R, Wilson R C. Terrain analysis using Radar shape-from-shading [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(9): 1~17.
- 28 Tourneret J Y, Doisy M, Lavielle M. Bayesian off-line detection of multiple change-points corrupted by multiplicative noise: application to SAR image edge detection [J]. Signal Processing, 2003, 83(9): 1871~1887.
- 29 Belfiore S, Scopigno R, Grangetto R, *et al.* Joint despeckling and edge detection of SAR images based on the Mumford-Shah functional [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Anchorage, Alaska, USA, 2004: 3915~3918.
- 30 Dimou A, Jäger G, Frangos P. Adaptive edge enhancement in SAR images training on the data vs. training on simulated data [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Thessaloniki, Greece, 2001: 493~496.
- 31 Jia C L. The Research on Extraction of Roads and Airport from SAR Imagery [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. [贾承丽. SAR 图像道路和机场提取方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.]