

# 基于相位一致性的 SAR 图像边缘检测

田微晴,朱卫岗,杨顺隆,刘鑫

(装备学院,北京 101416)

**摘要:**由于相位一致性具有光照条件变化和对对比度变化的鲁棒性,能够为大多数图像确定 1 个通用的阈值,且其检测特征的原理与人类视觉系统对图像特征的认知一致,因此本文采用一致性对 SAR 边缘进行检测。通过将原图像与二维滤波器卷积求取图像相位的一致性,其中使相位一致性达到最大的点即为图像的边界点。试验结果表明:相较传统的基于梯度的检测算子,相位一致性能获得更加丰富和精确的 SAR 图像边缘信息。一致性图像边缘较为分散,存在较多的伪边缘,后续采用了非极大值抑制和自适应双阈值法细化边缘和去除伪边缘。

**关键词:**边缘检测;相位一致性;局部能量;边缘细化

**中图分类号:**TP751.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2012)09-0089-03

边缘检测技术对于处理合成孔径雷达(SAR)图像非常重要,因为边缘是所要提取目标和背景的边界线,提取出边缘才能将目标和背景区分开来。经典的边缘检测方法通过考察图像的每个像素在某个邻域内灰度的变化,利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律,用简单的方法检测边缘。常用的边缘检测算子有:罗伯特(roberts)边缘算子、索贝尔(sobel)边缘算子、prewitt边缘算子、拉普拉斯(laplacian)边缘算子、高斯-拉普拉斯(laplacian)边缘算子和坎尼(canny)边缘算子。然而 SAR 图像中所含的地物目标比较复杂,其成像原理会造成相干干扰严重,使这些边缘检测方法很难准确检测出边缘特征<sup>[1]</sup>。在此后的研究中,Morrone等<sup>[2]</sup>提出了 1 种基于相位一致性(phase congruency,PC)的边缘检测方法,它具有光照条件变化和对对比度变化的鲁棒性,并且能为大多数图像确定 1 个通用的阈值。此外,以相位一致性为基础设计的边缘检测算子可检测到马赫带和二维正弦网格中的特征。研究发现,相位一致性检测特征的原理与人类视觉系统对图像特征的认知一致<sup>[3]</sup>。

## 1 相位一致性检测特征原理

对方波和三角波进行傅立叶分解可发现边缘经常出现在傅立叶相位最一致的地方。相位一致性即将傅立叶分量相位最一致的点作为特征点。相位一致性的度量在 $[0,1]$ 中取值,无量纲,不受图像亮度和对比度影响。如图 1 和图 2 分别把方波和三角波变换到频率域,对相位一致性进行了说明。

如图 1 所示,方波的傅立叶分量均为正弦波,当方波分别处于上升沿和下降沿时,傅立叶分量在 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 处相位

一致程度最高,即在阶跃型边缘点各正弦分量相位一致;而在方波的其他点,各傅立叶分量的相位值都在变化,一致性程度较低。从图 2 中三角波的傅立叶分解可以看出,各傅立叶分量的相位在三角波顶点, $90^\circ$ 和 $270^\circ$ 处一致性达到最大。相位一致性可用于阶跃型边缘和屋脊型边缘的检测,并且可对大多数图像使用较为固定的阈值。

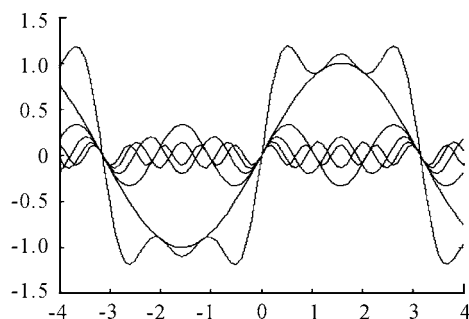


图 1 方波傅里叶分解

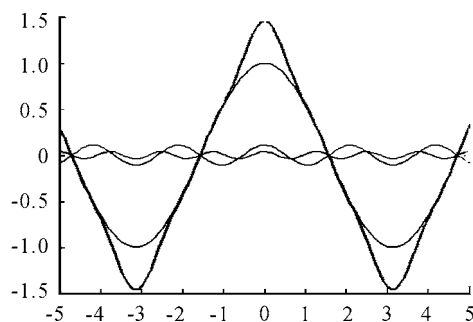


图 2 三角波傅立叶分解

### 1.1 相位一致性的定义

一维信号  $I(x)$  的傅立叶级数展开为

$$I(x) = \sum_n A_n \cos(n\omega x + \phi_n) = \sum_n A_n \cos(\phi_n(x)) \quad (1)$$

其中:  $A_n$  为第  $n$  次余弦分量的幅度;  $\omega$  是常数;  $\phi_n$  是  $n$  次余弦分量的初始相位;  $\phi_n(x) = n\omega x + \phi_n$  是在  $x$  处分量的局部相位。

Morrone 等定义了一维信号  $I(x)$  的相位一致性函数  $PC$

$$PC(x) = \frac{\max_{\bar{\phi}(x) \in (0, 2\pi)} \sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))}{\sum_n A_n} \quad (2)$$

其中:  $\bar{\phi}(x)$  是在  $x$  处所有傅立叶分量局部相位的加权平均, 其值使上式最大。考虑到当  $\phi_n(x) - \bar{\phi}(x)$  很小时,  $\phi_n(x) - \bar{\phi}(x) \approx \xi$ , 根据 Taylor 展开式可得到

$$\cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x)) \approx \cos(\xi) \approx 1 - \xi^2/2 \quad (3)$$

因此, 寻找相位一致性最大的点相当于局部相位相对于局部相位的加权平均  $\bar{\phi}(x)$  变化最小的点。但实际上, 相位一致性是 1 个很难直接定量计算的量, 因此, Venkatesh 和 Owens<sup>[4]</sup> 提出了局部能量函数 (local energy), 用寻找局部能量函数的峰值来代替寻找相位一致性最大的过程。

Venkatesh 和 Owens 证明了局部能量等于相位一致性与傅立叶分量幅度之和的乘积, 即

$$E(x) = PC(x) \sum_n A_n \quad (4)$$

因此, 局部能量直接正比于相位一致性函数。局部能量的峰值对应于相位一致性的最大值。

对于一维信号  $I(x)$ , 其局部能量函数定义如下

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)} = \sqrt{[M_e \otimes I(x)]^2 + [M_o \otimes I(x)]^2} \quad (5)$$

其中,  $F(x)$  是  $I(x)$  去掉直流分量后的信号;  $H(x)$  是  $F(x)$  的 Hilbert 变换 (也就是  $F(x)$  进行  $90^\circ$  相移)。因此,  $F(x)$ 、 $H(x)$  分量相当于用 1 组正交滤波器组  $M_e$ 、 $M_o$  对信号  $I(x)$  进行卷积而得。因 Log Gabor 具有能够在亮度跨越很大的条件下处理图像, 可覆盖很大的频率范围, 减少计算量, 与人类视觉系统度量一致等优点, 故采用 Log Gabor 作为滤波器组对一致性进行分析计算

$$g(\omega) = \exp\left\{\frac{-(\log(\omega/\omega_0))^2}{2(\log(\beta/\omega_0))^2}\right\} \quad (6)$$

### 1.2 二维滤波器组

由 1D 信号扩展到 2D 图像, 用极性可分离的滤波器在垂直方向与扩展函数进行卷积, 然后在水平方向上与滤波器组进行卷积, 总体的极性可分离的滤波器函数为

$$F(\omega, B) = G(B) \cdot H(\omega) \quad (7)$$

式中:  $G(B)$  是扩展函数, 构成角向滤波器;  $H(\omega)$  是滤波器组, 构成径向滤波器;  $B$  为方向角;  $\omega$  为角频率。

由于 Fourier 变换得到的是整幅图像的频率信息, 为了获取影像局部的相位信息, 需要使用没有直流分量的复指数小波, 径向滤波采用 Log Gabor 小波。角向滤波选择高斯函

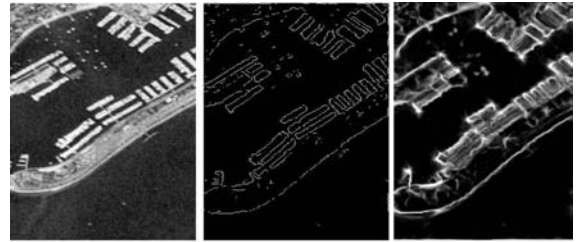
数作为扩展函数构成 1 个与阶跃边缘特征 (该特征和滤波器的方向不一致) 作卷积的滤波器, 角向滤波函数的剖面为

$$G(\theta) = \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \quad (8)$$

式中:  $\theta_0$  为滤波器的方向角;  $\sigma_\theta = m\Delta\theta_n$ , 其中  $m$  为比例因子;  $\Delta\theta_n$  为滤波器之间的方向间隔, 其值与角向滤波方向  $q$  有关。设置比例因子  $m$  以让高斯函数在角度方向上有重叠而全覆盖  $2D$  全覆盖频平面。

## 2 实验验证

试验数据选择 1 幅  $560 \times 892$  的 SAR 图像, 试验影像和结果见图 3。在 Matlab 平台上对一致性方法进行了验证。验证中, 径向滤波尺度设为 4。为了覆盖整个频带且减少计算量, 角向滤波方向设为 6, 即在  $(0, \pi/6, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3, 5\pi/6)$  6 个方向进行了滤波, 最小尺度 (中心频率最高) 滤波器的带宽为 3 个像素, 频率扩散阈值设为 0.55, 噪声能量阈值  $K$  设为 2.0, 低于该阈值的相位一致被抑制。另外, 在此之上选择了基于梯度的 Canny 算子提取图像边缘, 进行对比实验。



(a) SAR 图像 (b) Canny 算子 (c) 相位一致性

图 3 边缘提取

Canny 算子在灰度反差较低部分的边缘特征都没有检测出来, 而相位一致性方法检测出了丰富、精确的图像边缘特征。

可以看出, 运用相位一致性可以很好地提取图像边缘, 但边缘线宽一般都大于 1 个像素, 且包含一些伪边缘和孤立的点。本文采用双线性内插法的非极大值抑制<sup>[5]</sup> 和自适应双阈值法<sup>[6-7]</sup> 来对边缘进行细化和对伪边缘进行去除。

采用双线性内插法对相位一致性图像进行非极大值抑制以细化边缘。对非极大值抑制后的结果运用高、低阈值得到 2 幅图像。对这 2 幅图像进行边缘连接, 对连接的结果进行短边及伪边的去除。此处采用自适应方法获得高、低阈值 (TH、TL) 对非极大值抑制后的边缘能量图像进行边缘提取, 得到 2 幅图像 (高阈值图像  $t1$  和低阈值图像  $t2$ ), 以高阈值图像  $t1$  作为向导, 在低阈值图像  $t2$  的 8 邻域中找出与高阈值图像中边缘点有确定联系的点进行边缘的提取, 结果如图 4 和图 5 所示, 可以看出, 和相位一致图像相比, 细化处理后的图像边缘更准确和精细。

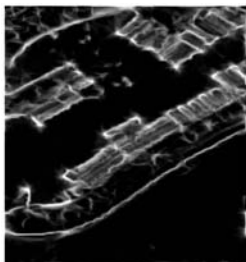


图4 一致性图像

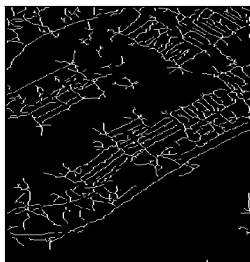


图5 边缘细化的一致性图像

### 3 结束语

针对 SAR 图像受相干斑影响严重,地物目标比较复杂的问题,本文采用相位一致对边缘进行检测,具有检测特征时不受光照影响,且对大多数图像阈值比较固定等优点。通过试验验证了一致性能更加准确地检测到丰富的边缘信息。但一致性图像存在边缘扩散和较多的伪边缘,最后通过非极大值抑制和自适应双阈值法来对边缘进行细化和对伪边缘进行去除,得到更加准确和精细的边缘。二维滤波器的设计中如何更有效地消除伪边缘并减少计算量将是以后研究的 1 个方向。

(上接第 86 页)

### 5 结束语

实践证明,由主机 IPC 和从机运动控制卡为硬件平台构成的数控系统,完全满足旋转锉数控刃磨软件的开发需要。目前,在该硬件平台下的软件已经研制成功,旋转锉数控刃磨系统已经和五轴联动工具磨床成功配套,并已投入到工厂使用。

### 参考文献:

[1] 张世昌,李国勤. 旋转锉四坐标数控刃磨技术的研究

### 参考文献:

- [1] TONG Wei guo, LI Bao shu, YUAN Jimsha, et al. Transmission line extraction and recognition from natural complex background [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Banding, China; IEEE, 2009.
- [2] MORRONE M C, OWENS R A. Feature detection from local energy[J]. Pattern Recognition Letters, 1987, 6(5): 303 - 313.
- [3] 吴昌柱, 王庆, 周兴社. 基于相位一致性的兴趣点检测方法[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(2): 199 - 204.
- [4] OWENS R A, VENKATESH S, ROSS J. Edge detection is a projection[J]. Pattern Recognition Letters, 1989 (9): 223 - 244.
- [5] 张勇, 马铁军, 米小兵, 等. 焊接接头超声检测 CT 成像的双线性内插算法[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(6): 850 - 854.
- [6] 孙少卿, 卓力, 赵士伟, 等. 基于因果的自适应双闭值镜头边界检测算法[J]. 测控技术, 2009, 28(5): 19 - 23.
- [7] 陆佳政, 张红先, 方针, 等. 自适应分割闭值在覆冰厚度识别中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 563 - 567.
- [8] 宋召青, 郑苏, 李志成. 基于边缘检测与最小二乘支持向量机的人脸图像识别[J]. 海军航空工程学院学报, 2011(4): 42 - 46.
- [9] 关晓菊, 周激流, 何坤. 基于方向能量的灰度图像边缘检测[J]. 激光杂志, 2010(2): 16 - 18.

(责任编辑 鲁进)

[J]. 工具技术, 2001, 35(3): 16 - 18.

- [2] 张得礼, 周来水. 旋转锉四轴联动磨削运动模型和成型理论研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3): 324 - 327.
- [3] 刘杰华. 刀具精确设计理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 赵军, 张冠伟. 基于 IPC 的旋转锉数控刃磨系统的开发[J]. 现代制造工程, 2004(6): 27 - 29.

(责任编辑 杨继森)