

# 基于 MRF 的高分辨率 SAR 图像道路网自动提取

程江华, 高 贵, 库锡树, 孙即祥

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 各种干扰的存在使得高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像道路网的提取变得异常困难。马尔可夫随机场(Markov random field, MRF)模型能够充分利用道路图像的上下文特征以及先验知识,在道路网提取中得到广泛应用,但存在求解过程偏慢及参数设置偏多问题。首先根据道路空间几何特征关系对提取出的线基元进行预连接,以此减少虚假连接给 MRF 迭代求解带来的运算量;然后建立 MRF 道路网改进模型对道路网进行快速标记。使用 1m 机载高分辨率 SAR 图像进行实验,结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 高分辨率; 马尔可夫随机场; 道路网

**中图分类号:** TP 775

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.07.14

## Automatic road network extraction in high resolution SAR images based on MRF

CHENG Jiang-hua, GAO Gui, KU Xi-shu, SUN Ji-xiang

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

**Abstract:** It is extremely difficult to extract road networks from high resolution synthetic aperture radar (SAR) images due to the presence of various disturbances. Markov random field (MRF) model can make full use of the imagery contextual characters and priori knowledge, which have been widely used to extract road networks. However, there exist some problems such as slow solution and many parameters setting of these type methods. In order to reduce the computation of subsequent iterative solution of MRF, pre-linking is firstly introduced to remove numerous false line elements based on the spatial relationship among them. Then the improved road networks Markov function model is established to label road networks. SAR images with 1 meter resolution are tested in the experiment. The results show the effectivity of the method mentioned above in high resolution SAR imagery road network extraction.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR); high-resolution; Markov random field (MRF); road network

## 0 引言

由于道路网信息在交通管理、城市规划、自动车辆导航、应急事务处理、军事等方面具有重要的作用,如何自动、精确地提取道路网是个非常值得研究的课题。随着遥感技术的发展,对地成像观测中图像的空间分辨率得到提高,更多的地表细节可清晰的得到展现,使得高分辨率遥感图像道路网的提取成为可能。其中,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像不受光照和云层遮挡的影响,具有全天时、全天候工作的特点,从高分辨率 SAR 图像中提取道路网日益受到重视。

然而,SAR 成像由于受到乘性相干斑噪声的影响,适合于光学遥感图像的加性噪声模型边缘检测算子在 SAR

图像中不再适用;SAR 图像的信噪比非常低,大大影响了图像的可观细节;在高分辨率 SAR 图像中,道路呈现灰色的区域特征,路边建筑物、树木,路上的车辆以及铁护栏等都会产生较大噪声干扰,导致道路线特征提取的断裂。因此,SAR 图像道路网自动提取是一个复杂而艰巨的难题。

道路网提取大致可分为 3 个过程:道路线边缘检测、线特征提取和道路网连接。正确的道路线边缘检测和线特征提取是进行道路网合理连接的前提。线边缘检测方面,文献[1]提出了恒虚警率的均值比例边缘检测算子(ratio of averages, ROA),但 ROA 是基于单边缘模型假设前提下的。文献[2]提出了更为实际的多边缘检测算子(ratio of exponentially weighted averages, ROEWA),该算子不仅具有恒虚警率特性,且虚假边缘少、抗断裂性能强。Radon 变

收稿日期:2011-08-08; 修回日期:2012-03-24。

基金项目:国家自然科学基金(40801179)资助课题

作者简介:程江华(1979-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为 SAR 图像处理。E-mail:jianghua\_cheng@nudt.edu.cn

换常用于提取线特征,且具有一定的抗噪能力,但在复杂背景下效果欠佳,为此,文献[3]提出了局部 Radon 变换。值得一提的是,马尔可夫随机场(Markov random field, MRF)模型具有充分利用图像特征的上下文信息以及先验知识的优势,在 SAR 图像道路网连接中得到广泛的应用<sup>[4-9]</sup>。文献[4]开创性地提出基于线特征的 MRF 模型道路网连接方法;文献[5]引进“T”型交叉点的先验知识,并改进了 MRF 模型中的基团势能函数定义,在低分辨率 SAR 图像乡村道路提取中取得较好的效果;文献[6]创造性地使用 D-S 证据理论融合双线特征检测器信息,并用 MRF 模型连接生成了双极化高分辨率 SAR 图像城区道路网;文献[7]改进了基团势能函数的定义,并采用遗传算法搜索最优解。这类基于 MRF 模型道路网连接方法存在的主要问题是,在预连接阶段并没有充分应用线单元之间的平行、垂直等空间几何关系,输入给 MRF 模型标记的线单元数量偏多,造成 MRF 模型标记速度偏慢;另外, MRF 模型中参数设置偏多,适用性不广。

## 1 算法描述

本文针对高分辨率 SAR 图像强干扰问题,采用了抗干扰强的 ROEWA 多边缘算子检测道路边缘;采用局部 Radon 变换提取复杂背景下的线单元;针对伪线单元过多问题,提出结合空间拓扑关系进行剔除的方法;改进了 MRF 模型势能定义。图 1 给出了从高分辨率 SAR 图像中提取道路网的流程,主要包括:线边缘检测、线单元提取、线单元预连接以及线单元标记这 4 个处理过程。

### 1.1 ROEWA 边缘检测

道路在高分辨率 SAR 图像中显示为较暗的灰色像素,且信噪比较低。为了能够减少乘性相干噪声的影响,在计算窗口内均值时,尽量选取较大的窗口。但又可能在窗口内包含几条边缘,这与 ROA 单边缘模型假设条件相左。针对这一弊端,文献[2, 10-12]提出了 ROEWA 多边缘检测算子,在 SAR 图像边缘检测中已得到广泛应用。该方法先按照最小均方误差的原则,设计了一个指数平滑滤波器  $f(x) = Ce^{-\alpha|x|}$ 。其中,  $C$  为归一化常量;  $\alpha$  为滤波系数<sup>[2]</sup>。然后计算指数加权均值比:

$$r_{\max} = \max \{ \hat{\mu}_1 / \hat{\mu}_2, \hat{\mu}_2 / \hat{\mu}_1 \} \quad (1)$$

为计算点  $(x, y)$  在水平方向指数加权均值比  $r_{X_{\max}}(x, y)$ ,首先在垂直方向用  $f$  与图像  $I(x, y)$  卷积滤波,然后在水平方向分别用因果滤波器( $f_1(x) = f(x), x > 0$ )和非因果滤波器( $f_2(x) = f(x), x < 0$ )进行卷积滤波:

$$\hat{\mu}_{X1}(x, y) = f_1(x) \otimes [f(y) \odot I(x, y)] \quad (2)$$

$$\hat{\mu}_{X2}(x, y) = f_2(x) \otimes [f(y) \odot I(x, y)] \quad (3)$$

式中,  $\otimes$  代表水平方向卷积;  $\odot$  代表垂直方向卷积。将  $\hat{\mu}_{X1}$  和  $\hat{\mu}_{X2}$  带入到式(1)中,得到  $r_{X_{\max}}(x, y)$ ,同理可求得  $r_{Y_{\max}}(x, y)$ 。则点  $(x, y)$  的边缘强度为

$$r_{2D-\max}(x, y) = \sqrt{r_{X_{\max}}^2(x, y) + r_{Y_{\max}}^2(x, y)} \quad (4)$$

采用 Otsu 算法<sup>[13]</sup>将获得的强度图进行分割,并细化,生成二值图像,用于提取直线。

### 1.2 局部 Radon 变换

由 1.1 节 ROEWA 多边缘检测算子检测出来的道路边缘有断裂情况,需要进行一定的处理,减少断裂的影响,为 MRF 模型道路标记提供线单元特征。Radon 变换<sup>[3, 14-15]</sup>是一种常用的提取直线方法,具有将图像上的一条直线对应为极坐标中一点的功能,且具有一定的抗断裂能力。然而,对全图进行 Radon 变换,在图像中存在较少数量线单元的情况下效果较好,对于场景错综复杂的高分辨率 SAR 图像道路,易造成较短线单元的遗漏。局部 Radon 变换<sup>[3]</sup>首先按照从上到下、从左到右的顺序搜索连通区域,在连通区域里面进行 Radon 变换,提取出最大值点对应的线单元后,再对该连通区域里面的次大值点对应线单元进行提取,直到该连通区域里面线单元全部提取完后,再转到下一个连通区域,这样就不会漏掉一个连通域里面相对较短的线单元。

### 1.3 线单元预连接

经过 1.2 节局部 Radon 变换后提取出来的线单元存在下列特征:

- (1) 存在少量短小的线单元;
- (2) 有部分提取出来的线单元在原图像中对应的位置不是道路;

图 1 SAR 图像道路网提取框架

(3) 有少数提取出来的线基元偏移了道路的位置；

(4) 有部分线基元没有被检测出来。

检测出来的线基元并没有形成完整的道路网络，因此需要将分散的线基元连接起来。

定义  $S_d$  为 1.2 节中所有检测出来的线基元集合， $M_i^k$  ( $k \in \{1, 2\}$ ) 表示线段的两个端点，则线基元  $i$  可表示为  $i = M_i^k M_i^m$ 。如果两个相邻的线基元没有相互连接，但彼此端点间的距离较短 (小于固定值  $T_d$ )，则它们之间可能的预连接线基元是  $S'_d = \{M_i^k M_j^m, i \in S_d, j \in S_d, i \neq j\}^{[4]}$ 。显然，这些约束条件不合理 (见图 2(a))，且会大大增加后续 MRF 模型的计算量和复杂度。更合理的约束应充分考虑现实道路上相邻线基元之间近似平行和垂直的空间几何关系 (见图 2(b))。

图 2 线基元预连接

定义  $p_i^m$ 、 $p_j^n$  分别为线基元  $i$  和  $j$  中的任意一点，由于观察视角原因，允许一定角度误差，则近似平行 ( $[-10^\circ, 10^\circ]$ ) 和近似垂直 ( $[80^\circ, 100^\circ]$ ) 情况下预连线约束分别为

$$S'_d = \{k = M_i^k M_j^m / i \in S_d, j \in S_d, i \neq j, \sin |\theta_k - \theta_l| < \sin 10^\circ, \min |M_i^k - M_j^m| < T_d\} \quad (5)$$

$$S'_d = \{k = M_i^k p_j^n / i \in S_d, j \in S_d, i \neq j, \cos |\theta_k - \theta_l| > \cos 10^\circ, \min |M_i^k - p_j^n| < T_d\}$$

$$\text{或 } S'_d = \{k = p_i^m M_j^m / i \in S_d, j \in S_d, i \neq j, \cos |\theta_k - \theta_l| > \cos 10^\circ, \min |p_i^m - M_j^m| < T_d\} \quad (6)$$

式中， $k$  为可能的线基元； $T_d$  为预连线的间距门限。 $T_d$  值小，则预连线数量少，否则相反。在满足近似平行或垂直的前提下，本文根据道路最大断裂长度选取  $T_d$ ，即： $T_d < \max |M_i^k - M_j^m|$ ，避免丢失重要线基元预连线。

### 1.4 改进 MRF 模型

#### 1.4.1 MRF 模型定义

将线基元定义为 MRF 模型中的节点，将共点 (无论是端点还是中间点) 的线基元  $i$  和  $j$  之间的夹角  $\theta_{ij}$  定义为 MRF 模型中节点  $i$  和  $j$  之间的弧长，建立 MRF 模型图  $G$  (graph)。根据 Bayes 准则：

$$p(\mathbf{L}|\mathbf{D}) = \frac{p(\mathbf{D}|\mathbf{L})p(\mathbf{L})}{p(\mathbf{D})} \propto p(\mathbf{D}|\mathbf{L})p(\mathbf{L}) \quad (7)$$

由于  $p(\mathbf{D})$  为定值。因此，道路网的提取相当于求  $\hat{\mathbf{L}} = \arg \max_{\mathbf{L}} p(\mathbf{D}|\mathbf{L})p(\mathbf{L})$ 。

#### 1.4.2 观测模型 $p(\mathbf{D}|\mathbf{L})$

假设观测数据  $\mathbf{D}_i$  相互独立，且只与  $\mathbf{L}_i$  相关，则

$$p(\mathbf{D}|\mathbf{L}) = \prod_{i=1}^N p(\mathbf{D}_i|\mathbf{L}_i) = \prod_{i=1}^N p(\mathbf{D}_i|\mathbf{L}_i) \propto \exp \left[ - \sum_{i=1}^N V(\mathbf{d}_i|\mathbf{l}_i) \right] \quad (8)$$

观测数据势能  $V(\mathbf{d}_i|\mathbf{l}_i)$  表示在道路标记为  $\mathbf{L}_i$  的前提下的惩罚度，表 1 为其定义。选取道路和非道路两块区域，分别统计其图像归一化灰度均值分布，确定  $t_1, t_2^{[4]}$ 。在  $\mathbf{L}_i = 0$ ，线基元假设为非道路前提下，非道路区域归一化灰度均值一般在  $t_1$  范围内，因此惩罚度为 0；当归一化灰度均值为  $t_1 < \mathbf{d}_i < t_2$  时，该范围为过渡区，线基元  $i$  的灰度均值  $\mathbf{d}_i$  越大，惩罚度越高；当归一化灰度均值  $\mathbf{d}_i > t_2$  时，超过非道路区域归一化灰度均值范围，惩罚度最高。在  $\mathbf{L}_i = 1$ ，线基元假设为道路前提下，传统算法<sup>[4]</sup>定义： $V(\mathbf{d}_i|\mathbf{l}_i) = 0$ ，惩罚度与伪线基元情况不吻合，本文将其改为与  $\mathbf{d}_i$  成正比。根据 SAR 图像道路低灰度值特征， $\mathbf{d}_i$  值越大，说明该线基元为道路的置信度越低，惩罚度也就越高。

表 1 观测数据势能  $V(\mathbf{d}_i|\mathbf{l}_i)$  定义

道路标记	条件	势能
$\mathbf{L}_i = 0$	$\mathbf{d}_i < t_1$	$V(\mathbf{d}_i \mathbf{l}_i) = 0$
	$t_1 < \mathbf{d}_i < t_2$	$V(\mathbf{d}_i \mathbf{l}_i) = \frac{\mathbf{d}_i - t_1}{t_2 - t_1}$
$\mathbf{L}_i = 1$	$\mathbf{d}_i > t_2$	$V(\mathbf{d}_i \mathbf{l}_i) = 1$
	$\forall \mathbf{d}_i$	$V(\mathbf{d}_i \mathbf{l}_i) = \mathbf{d}_i$

#### 1.4.3 先验模型 $p(\mathbf{L})$

利用 MRF 与 Gibbs 随机场的等价定理， $\mathbf{L}$  的联合概率  $p(\mathbf{L})$  服从 Gibbs 分布：

$$p(\mathbf{L} = \mathbf{l}) = \frac{1}{Z} \exp \left( - \sum_{c \in C} V_c(\mathbf{l}) \right) \quad (9)$$

式中， $Z$  是归一化因子； $c$  为基团； $C$  为所有基团的集合； $V_c(\mathbf{l})$  为定义在基团  $c$  上的势函数； $\mathbf{l}$  为线基元。图 3 给出了空间相连常见道路基团形式。

图 3 常见基团类型

将不同基团类型对应的势函数展开，式(9)进一步表示为

$$p(\mathbf{L} = \mathbf{I}) = \frac{1}{Z} \exp \left( - \left( \sum_{i \in \mathbf{C}1} \mathbf{V}_i(\mathbf{I}_i) + \sum_{i,j \in \mathbf{C}2} \mathbf{V}_{ij}(\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_j) + \sum_{i,j,m \in \mathbf{C}3} \mathbf{V}_{ijm}(\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_j, \mathbf{I}_m) + \sum_{i,j,m,n \in \mathbf{C}4} \mathbf{V}_{ijmn}(\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_j, \mathbf{I}_m, \mathbf{I}_n) + \dots \right) \right) \quad (10)$$

实际道路图像存在下列上下文特征：

- (1) 道路一般较长；
- (2) 道路的方向变化不大；
- (3) 存在“T”型和“+”型道路交叉点，但数量不会很多。

通常在先验模型势函数中加入道路的先验知识，且设置长度、方向等惩罚因子<sup>[4-7]</sup>，这些因子的设置因图像数据类型不同而改变，影响了算法的适用性。本文修改其定义，如表 2 所示。表 2 中，C1 对应道路上下文特征(1)；C2 对应道路上下文特征(2)；C3、C4 对应道路上下文特征(3)； $\xi$  为归一化的长度；“ $\parallel$ ”代表近似平行( $[-10^\circ, 10^\circ]$ )；“ $\perp$ ”代表近似垂直( $[80^\circ, 100^\circ]$ )。当线基元符合道路上下文特征的，势函数  $\mathbf{V}_c(\mathbf{I}_i)$  较小，否则相反。

表 2 势函数  $\mathbf{V}_c(\mathbf{I}_i)$  定义

基元类型	势函数
单基元 C1	$\mathbf{V}_i(\mathbf{I}_i) = 1 - \mathbf{L}_i \xi_i$
双基元 C2	$\mathbf{V}_{ij}(\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_j) = 1 - (\mathbf{L}_i \xi_i + \mathbf{L}_j \xi_j) + \sin \theta_{ij}$ if $(m \perp i, m \perp j)$
三基元 C3	$\mathbf{V}_{ijm}(\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_j, \mathbf{I}_m) = 1 - (\mathbf{L}_i \xi_i + \mathbf{L}_j \xi_j + \mathbf{L}_m \xi_m) + \sin \theta_{ij} + \frac{1}{2}(\cos \theta_{im} + \cos \theta_{jm})$ if $(i \parallel j, m \parallel n, i \perp m, j \perp n)$
四基元 C4	$\mathbf{V}_{ijmn}(\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_j, \mathbf{I}_m, \mathbf{I}_n) = 1 - (\mathbf{L}_i \xi_i + \mathbf{L}_j \xi_j + \mathbf{L}_m \xi_m + \mathbf{L}_n \xi_n) + \frac{1}{4}(\sin \theta_{ij} + \sin \theta_{mn} + \cos \theta_{im} + \cos \theta_{jn})$

### 1.4.4 最大后验概率 $p(\mathbf{L}/\mathbf{D})$ 及求解

由上文知：

$$\arg \max p(\mathbf{L}/\mathbf{D}) \propto \arg \max p(\mathbf{D}/\mathbf{L}) p(\mathbf{L}) \propto \arg \min \left( \sum_{i=1}^N \mathbf{V}(\mathbf{d}_i/\mathbf{I}_i) + \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{V}_c(\mathbf{I}) \right) \quad (11)$$

令总势能为

$$\mathbf{U}(\mathbf{I}/\mathbf{d}) = \sum_{i=1}^N \mathbf{V}(\mathbf{d}_i/\mathbf{I}_i) + \sum_{c \in \mathbf{C}} \mathbf{V}_c(\mathbf{I}) \quad (12)$$

各线基元势能为

$$\mathbf{U}(\mathbf{I}_i/\mathbf{d}_i) = \mathbf{V}(\mathbf{d}_i/\mathbf{I}_i) + \mathbf{V}_c(\mathbf{I}_i) \quad (13)$$

求解使用速度较快的迭代条件模型(iterated conditional mode, ICM)算法<sup>[4]</sup>。

## 2 实验结果及分析

选用中电集团 38 所提供的合肥地区城乡结合部 2 幅机载高分辨率 SAR 图像切片见图 4(a)和图 5(a)进行实验。图 4(a)大小为  $1\ 114 \times 900$ ，道路较直，且宽度较一致；图 5(a)大小为  $1\ 416 \times 870$ ，道路有弯曲，且存在不同宽度的情况。两幅图像的分辨率都为 1 m。线基元预连接中  $T_d$  根据图像中道路的最大断裂长度取为 90。实验硬件平台为 P(R) 双核、主频为 2.5 GHz CPU，内存大小为 DDR2 2GB SDRAM，运行软件为 VC6。

由图 4(b)和图 5(b)实验结果来看，预连接是按照近似平行和垂直的关系进行的；图 4(c)和图 5(c)中的 MRF 迭代求解综合考虑了道路线基元的拓扑关系及灰度值，通过迭代，去除了伪连接的线基元。

图 4 高分辨率 SAR 图像切片 1 道路网提取

图 5 高分辨率 SAR 图像切片 2 道路网提取

为说明本文方法的有效性,将本文方法与文献[7]方法进行比较,如表3所示。

表3 两种方法对比

项目	图4		图5	
	本文	文献[7]	本文	文献[7]
正确提取道路/条	13	13	16	16
虚假道路/条	0	56	0	71
漏检道路/条	0	0	0	0
计算时间/s	59	113	47	159
参数设置数	1	5	1	5
实际主干道路/条	6		6	

由于在线基元预连接阶段,将不满足道路拓扑结构的线基元和孤立的线基元剔除,减少给MRF模型标记的线基元数量,因此本文计算时间较短,无虚假道路,且需要设置的参数较少,只需确定最小连接线长度 $T_d$ 。而文献[7]方法团势函数定义不合理,造成道路的过连接,花费时间较长,且需设置线边缘检测门限 $r_{TH}$ 、团势函数加权值等5个参数。

### 3 结论

高分辨率SAR图像细节丰富,加上其固有的相干斑噪声的影响和建筑物的遮挡,使得目标背景异常复杂,很难直接从图像中提取道路。本文根据高分辨率SAR图像道路网的特征,结合MRF模型,提出了一种新的道路网提取方法。该方法首先利用ROEWA边缘检测算子进行道路线边缘检测,然后使用局部Radon变换提取线基元,接着根据线基元的空间几何关系对线基元进行预连接,最后使用改进MRF模型对预连接的道路线基元进行标记,最终形成道路网。实验结果验证了该方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] Touzi R, Lopes A, Bousquet P, et al. A statistical and geometrical edge detection for SAR images[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(6):764-773.
- [2] Fjortoft R, Lopes A, Marthon P. An optimal multiedge detector for SAR image segmentation [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 793-802.
- [3] Cardoso L A. Computer aided recognition of man-made structures in aerial photographs [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1999.
- [4] Tupin F, Maitre H, Mangin J F, et al. Detection of linear features in SAR images; application to road network extraction[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 434-453.
- [5] Xu G, Sun H, Yang W, et al. An improved road extraction method based on MRFs in rural areas for SAR images [C]// *Proc. of the 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2007:489-492.
- [6] Li S Y, Yang W, Yang H, et al. Road extraction from high resolution dual-polarization SAR images over urban areas[C]// *Proc. of the SPIE International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis*, 2008:1-10.
- [7] 赵青,孔繁兴. 基于MAP-MRF模型的SAR图像道路提取[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(10): 2028-2030. (Zhao Q, Kong F X. Road extraction in SAR image based on MAP-MRF frame [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(10): 2028-2030. )
- [8] Negri M, Gamba P, Lisini G, et al. Junction-aware extraction and regularization of urban road networks in high-resolution SAR images[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10):217-221.
- [9] Tupin F. Markov random fields for SAR image analysis and 3D reconstruction [C]// *Proc. of the SPIE Image and Signal Processing for Remote Sensing*, 2006:1-8.
- [10] Ranjani J J, Gokila M, Thiruvengadam S J. Edge detection in speckled SAR images with improved ROEWA [C]// *Proc. of the 6th Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing*, 2008:644-649.
- [11] 安成锦,辛玉林,陈曾平. 基于改进ROEWA算子的SAR图像边缘检测方法[J]. *中国图象图形学报*, 2011, 16(8): 1483-1488. (An C J, Xin Y L, Chen Z P. Edge detection algorithm for SAR image based on improved ROEWA[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(8):1483-1488. )
- [12] 吴禹昊,陈天泽,粟毅. 基于方向ROEWA算子的高分辨率SAR图像道路提取[J]. *计算机工程与科学*, 2010, 32(8): 71-74. (Wu Y H, Chen T Z, Su Y. Road extraction from high resolution SAR images based on the directional ROEWA detector[J]. *Computer Engineering & Science*, 2010, 32(8):71-74. )
- [13] Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [14] Zhang Q P, Couloigner I. Accurate centerline detection and line width estimation of thick lines using the radon transform[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 16(2): 310-316.
- [15] 贾承丽,赵凌君,吴其昌,等. 基于遗传算法的SAR图像道路网检测方法[J]. *计算机学报*, 2007, 30(7): 1186-1194. (Jia C L, Zhao L J, Wu Q C, et al. Automatic extraction of road network from SAR imagery based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(7):1186-1194. )