

## 基于 Hough 变换与目标主轴提取的 SAR 图像目标方位角估计方法

徐 牧 王雪松 肖顺平

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要:** 该文提出了一种基于 Hough 变换与目标主轴提取的 SAR 图像目标方位角估计方法。针对传统基于 Hough 变换估计方法的不足, 在估计过程中引入目标的主轴信息指导方位角的估计。利用基于马尔可夫随机场(MRF)的图像分割提取准确的目标成像轮廓。在此基础上, 基于 Hough 变换检测目标轮廓的直边, 基于轮廓特征点检测获得目标主轴的大致方向, 结合 Hough 变换检测结果与目标主轴信息获得最终的方位角估计。实验结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 方位角估计; Hough 变换; 主轴

**中图分类号:** TN953

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)02-0370-05

## Target Aspect Estimation in SAR Imagery Based on Hough Transform and Major Axis Extraction

Xu Mu Wang Xue-song Xiao Shun-ping

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

**Abstract:** A novel method of target aspect estimation in SAR imagery based on Hough transform and major axis extraction is proposed here, which fully exploits the information contained in the major axis of the target. Firstly, the accurate contour of the target in SAR imagery is extracted after the image segmentation based on Markov Random Field(MRF)model. Secondly, the straight lines on the contour are found by Hough transform and the major axis is extracted by the detection of feature points on the contour. Finally, a fine estimation can be acquired by the combination of estimation results from both Hough transform and major axis extraction. The validity of the method is indicated by experimental results with real SAR data sets.

**Key words:** Aspect estimation; Hough transform; Major axis

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天候、全天时和穿透能力强等特点, 是目前重要的对地观测和军事侦察手段。随着 SAR 数据收集能力的不断增强, 合成孔径雷达目标识别(SAR ATR)日益成为国内外研究的热点<sup>[1,2]</sup>。目标 SAR 成像结果对成像方位角变化非常敏感, 识别时需对每种目标不同方位角条件下的 SAR 图像分别建立模板, 模板数量非常庞大。目标方位角估计是 SAR ATR 的有力工具, 在识别之前预先估计待识别目标的大致方位角或方位角范围, 然后将待识别 SAR 图像(或提取的识别特征)与数据库中特定方位角或方位角范围的模板图像(或提取的识别特征)进行匹配, 可以提高识别效率, 增强 SAR ATR 处理的实时性<sup>[3]</sup>。

对 SAR 图像目标方位角估计的研究工作开展得较多。Principe 等根据信息论观点, 提出了基于“最大互信息”的估计方法<sup>[4]</sup>, 将估计归结为求取方位角参数最大似然估计的问题。算法需要通过学习训练构造估计器, 实现较为复杂。Meth

等利用“近距离边界”估计方位角<sup>[5]</sup>, 由于 SAR 目标近距离边界很难正确提取, 影响了该方法的估计精度。

研究表明基于 Hough 变换的方位角估计方法效果较好<sup>[6]</sup>。其基本思想是: 对 SAR 图像目标成像轮廓进行 Hough 变换以检测轮廓上的直边, 将 Hough 变换最大值对应直边的方向(或变换值最大的前几个值对应直边方向的平均)作为目标方位角的估计。该估计方法的前提是获得目标 SAR 成像轮廓, 特殊的成像机理决定了目标轮廓没有光学图像的明显, 因此需要提取准确的轮廓以提高估计性能。另外, 虽然一般情况下车辆等目标的成像轮廓具有较长的直边, 其方向与目标方位角基本一致, 通过 Hough 变换检测可以获得较好的估计效果。但在某些方位角条件下, 由于目标自身的对称性及顶部遮挡等效应, 通过 Hough 变换可能检测到很多轮廓上的直边, 仅仅基于 Hough 变换无法获得准确的方位角估计。

基于上述背景, 本文提出一种基于 Hough 变换与目标主轴提取的方位角估计方法。首先利用基于马尔可夫随机场(MRF)的图像分割提取准确的目标成像轮廓。在此基础上, 基于 Hough 变换检测目标轮廓的直边, 基于轮廓特征点检测

2005-05-18 收到, 2005-11-22 改回

全国优秀博士学位论文专项资金(08100101)和国家部级基金资助课题

获得目标主轴的大致方向,结合 Hough 变换检测结果与目标主轴信息获得最终的方位角估计。基于实测 MSTAR 数据验证了本文方法的有效性,与已有研究结果进行比较,证明了本文方法具有优良的估计性能。

## 2 图像分割及轮廓提取

SAR 图像分割是估计目标方位角的前提,图像分割质量将直接影响目标方位角的估计精度。已有方位角估计方法大多基于单点像素强度进行 SAR 图像分割(如基于 CFAR 检测的方法<sup>[5]</sup>,基于目标与背景之间对比度的方法<sup>[6]</sup>),SAR 图像固有的相干斑噪声使得此类方法无法获得满意的分割结果,影响最终方位角估计的精度。本文选择基于 MRF 模型的图像分割方法,通过引入图像局部结构信息抑制相干斑噪声对分割结果的影响,可以获得比基于单点像素强度分割更好的分割结果。基于 MRF 的图像分割将分割问题视为像素点标记问题<sup>[7]</sup>。以 MSTAR 数据为例,将 SAR 图像分为目标、阴影和背景三部分。令像素点集为  $y$ ,分割标记集为  $x$ ,对于图像中的第  $i$  个像素点  $y_i$  ( $y_i \in y$ ),分割后标记为  $x_i$  ( $x_i \in x$ ),则分割问题表述为

$$y_i \rightarrow x_i = \begin{cases} 1, & i \in \text{目标} \\ 2, & i \in \text{阴影} \\ 3, & i \in \text{背景} \end{cases} \quad (1)$$

由 MAP 准则,最终分割结果为

$$\hat{x} = \arg \max_x p(y | x)p(x) \quad (2)$$

其中条件概率密度函数  $p(y | x)$  为 SAR 图像像素强度的分布,可由瑞利分布等描述。 $p(x)$  反映像素之间的局部结构关系,可由与 MRF 模型等效的 Gibbs 能量函数描述

$$p(x) = \prod_i \frac{\exp(\beta u(x_i))}{\sum_{x_i=1}^3 \exp(\beta u(x_i))} \quad (3)$$

其中  $u(x_i) = 2 \sum_{j \in \eta_i} [\delta(x_i - x_j) - 1]$ ,  $\eta_i$  是像素  $x_i$  的八邻域,  $\delta(\cdot)$  是离散冲击函数,  $\beta$  是 MRF 的场强参数,影响分割的最终结果。实验表明,一般  $\beta$  取值在 5~10 范围内可以保证图像分割具有较好的质量。 $p(x)$  的定义体现了 MRF 模型所引入的图像局部结构信息,式(3)清楚表明当前像素点所属区域类型只与其邻域像素点有关,其分割标记更有可能与邻域中占优的分割标记相同。基于 MRF 的图像分割通过若干次迭代运算获得满足式(2)的最终分割结果,对于 MSTAR 实测 SAR 数据,一般迭代 10 次左右即可。

在模型参数设置合理的条件下,基于 MRF 模型的 SAR 图像分割能够有效抑制相干斑对图像分割的影响,取得令人满意的分割质量。由于考虑了局部像素点之间的相互关系,分割结果中目标区域像素点聚类效果较好,保证了目标区域内部的连通性及区域边界的连续性,可以获得目标成像的准确区域。在图像分割获得目标成像区域的基础上,根据目标

区域内、外像素点之间的差别,采用成熟的轮廓曲线跟踪技术<sup>[8]</sup>可以获得较为完整和准确的目标轮廓。在保证分割质量基础上提取的目标轮廓是连续闭合曲线,轮廓直边更加突出,细节特征明显,有效地保持了目标的结构特征,可以为基于 Hough 变换与目标主轴提取的方位角估计提供准确依据。

## 3 基于 Hough 变换与目标主轴提取的方位角估计

SAR 图像目标方位角定义为目标实体的主轴与 SAR 成像的距离向或方位向的夹角。对于 MSTAR 等地面军事目标,方位角是实体主轴与距离向的夹角,如图 1 中  $\theta$  所示。需要说明的是,由于地面目标近似矩形的对称特性,方位角估计存在  $180^\circ$  模糊<sup>[6]</sup>,这种模糊对于绝大多数方位角估计方法都存在。利用单幅 SAR 图像难以消除这种模糊,但这并不影响方位角估计在目标识别系统中的应用。实际 SAR ATR 系统在获得目标方位角估计之后,一般同时考虑模板库中该估计值及与该估计值相差  $180^\circ$  方位角所对应的模板,将二者与待识别目标分别进行匹配来完成识别任务。因此,本文在估计方位角时将获得的估计值定义在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间。

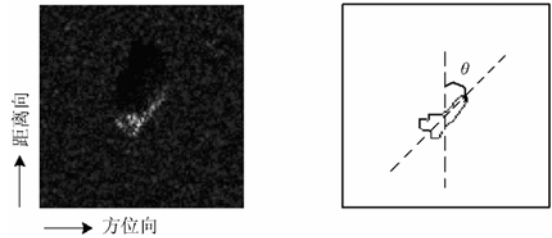


图 1 SAR 地面目标方位角示意图

对于传统的基于 Hough 变换的方位角估计方法,某些方位角下由于目标自身的对称性及顶部遮挡等效应,Hough 变换可能检测到很多目标轮廓上的直线,它们代表了目标轮廓的不同侧边,仅仅基于 Hough 变换无法获得方位角的准确估计。本质上,目标方位角取决于目标主轴,如果能够获得主轴的大致方向,可以提高方位角估计的精度。基于上述分析,本文提出了基于 Hough 变换与目标主轴提取的方位角估计方法。在轮廓提取基础上,引入目标主轴信息,结合 Hough 变换检测结果与目标主轴信息获得最终的方位角估计。

### 3.1 目标主轴的提取

轮廓特征点一般是指目标轮廓曲线上的高曲率点和曲线变化的关键点,它包含着目标形状的重要信息<sup>[9]</sup>。基于 MRF 的图像分割及形态学处理提取的目标轮廓具有较多的特征点,这些特征点反映了轮廓的形状及散射中心的拓扑分布。在大多数方位角条件下,对于近似矩形的车辆目标,其成像区域具有一定的长宽比,区域长轴的方向即是目标主轴的方向,目标轮廓上距离最远的两个特征点之间的直线段可以近似代表目标的主轴,根据主轴方向即可大致估计出目标的方位角。

轮廓特征点的检测方法较多,为了保证方位角估计的实

时性, 本文选择计算简单、定位准确的 SUSAN 算子检测轮廓特征点<sup>[10]</sup>。SUSAN 算子按照最小吸收核同值区准则, 通过比较当前位置处像素的灰度与其邻域内像素灰度的相似性, 判断当前位置处的像素是否属于轮廓特征点。在检测目标轮廓特征点的基础上, 将相距最远的两个特征点之间直线做为轮廓主轴, 计算直线斜率获得主轴方向, 进一步估计目标方位角。

### 3.2 算法描述

基于 Hough 变换与目标主轴提取估计方法的处理流程可以概述为:

- (1) 基于 MRF 的图像分割获得目标成像的准确区域, 通过轮廓曲线跟踪提取完整的目标轮廓;
- (2) 使用 Hough 变换检测目标轮廓上长度最长的  $N$  条候选直线段, 计算每一候选直线段的斜率, 进而获得目标方位角的  $N$  个估计值;
- (3) 判断  $N$  个估计值之间的相近程度。若  $N$  个估计值足够接近(判断准则为  $N$  个估计值之间任意二者估计角度差在  $5^\circ$  之内), 说明目标轮廓具有一条较长的直边,  $N$  条候选直线段都基本与此直边对应。此时基于 Hough 变换估计方位角, 计算  $N$  个方位角估计的均值做为最终估计, 即

$$\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \theta_m \quad (4)$$

- (4) 若  $N$  个估计值之间差别较大, 说明目标轮廓存在多个直边, 仅仅基于 Hough 变换进行估计将会存在较大误差, 此时引入目标主轴信息。通过 SUSAN 算子检测轮廓特征点, 获得主轴方向角  $\theta_{MA}$ 。选择  $N$  个估计值中与  $\theta_{MA}$  足够接近的  $m$  个候选估计值(判断准则为候选估计值与  $\theta_{MA}$  的绝对误差在  $5^\circ$  之内,  $m \leq N$ ), 记为  $\theta_h = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$ 。取  $m$  个候选估计值和  $\theta_{MA}$  的均值做为最终方位角的估计, 即

$$\hat{\theta} = \frac{1}{m+1} \left( \sum_{m} \theta_m + \theta_{MA} \right) \quad (5)$$

本文算法取候选直线段数目  $N = 3$ , 算法的具体流程如图 2 所示。

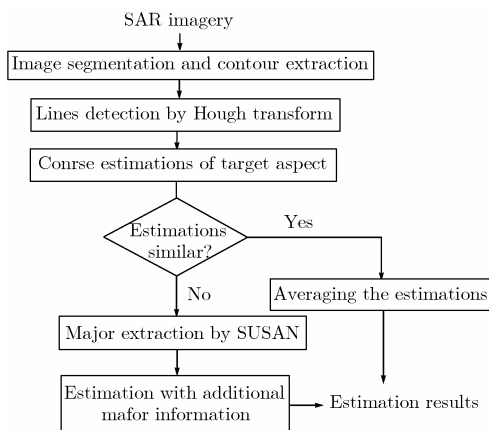


图 2 基于 Hough 变换与目标主轴提取的方位角估计算法流程图

图 3 为采用本文方法进行方位角估计的实例。图 3(a)为 BMP2-9563 目标在俯仰角  $15^\circ$ 、方位角  $47.492^\circ$  条件下的成像结果。图 3(b)为对图 3(a)进行轮廓提取, 并使用 Hough 变换检测轮廓上 3 条候选直线段的结果。3 条直线段对应的方位角估计值分别为  $90^\circ$ ,  $47.075^\circ$ ,  $46.406^\circ$ 。目标轮廓具有多个较短的直边, 其中水平直边更为突出, 按照基于 Hough 变换的估计方法, 计算 3 个估计值的均值获得最终方位角估计为  $61.16^\circ$ , 估计误差为  $13.67^\circ$ 。图 3(c)为使用 SUSAN 算子检测轮廓特征点获得目标主轴的结果。A, B 两点为距离最远的轮廓特征点, 直线 AB 代表目标主轴, 计算得到主轴方向为  $44.874^\circ$ 。根据本文方法的处理流程引入主轴信息, 使用式(5)计算获得最终方位角估计为  $46.118^\circ$ , 估计误差为  $1.37^\circ$ 。可见, 与传统基于 Hough 变换的方法相比, 本文方法具有更好的估计精度。

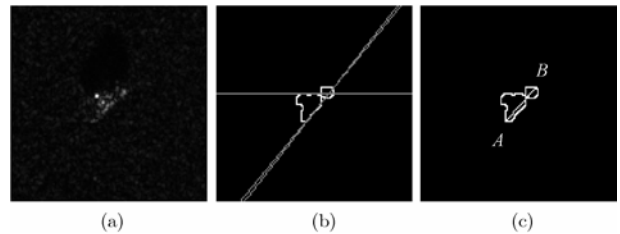


图 3 基于 Hough 变换与目标主轴提取的方位角估计方法实例

## 4 实验结果及分析

### 4.1 图像分割质量评价及分割质量对方位角估计精度影响

影响图像分割质量的因素较多, 如图像自身的成像质量、分割方法的选择等。为分析 SAR 图像分割质量对方位角估计精度的影响, 需对分割质量进行客观评价<sup>[11-13]</sup>。本文参考文献[13]中的相关结论, 选择使用较多的目标区域强度匹配度、目标区域形状匹配度两个指标对分割质量进行评价。两者从不同方面对图像分割质量做出客观评价, 实际中常选择二者的均值作为平均匹配度, 全面评价分割质量的优劣。本文选择平均匹配度做为评价指标, 指标值越接近 1 说明分割质量越好。图 4 为评价图像分割质量的实例。图 4(a)为输入图像, 选择 MSTAR 数据中 BMP2-9563 目标在俯仰角  $15^\circ$ 、方位角  $321.492^\circ$  时的成像结果。图 4(b)为根据 BMP2-9563 目标散射特性及 MSTAR 成像条件等先验知识对图 4(a)进行人工分割的结果。人工分割将目标与背景、阴影很好地分离开来, 并有效地保持了目标区域的结构特征。图 4(c)~图 4(f)是对图 4(a)进行基于 MRF 图像分割的结果, 模型参数的取值不同。从视觉效果上看, 图 4(c)的分割质量较差, 图 4(f)的分割质量较好。表 1 通过本文引入的质量指标对 4 种分割结果的质量进行评价。由表 1 可知, 图 4(f)分割质量最好, 图 4(c)分割质量最差, 这与主观视觉效果上的评价是一致的, 本文引入的分割质量指标能够正确、客观地描述图像分割质量。

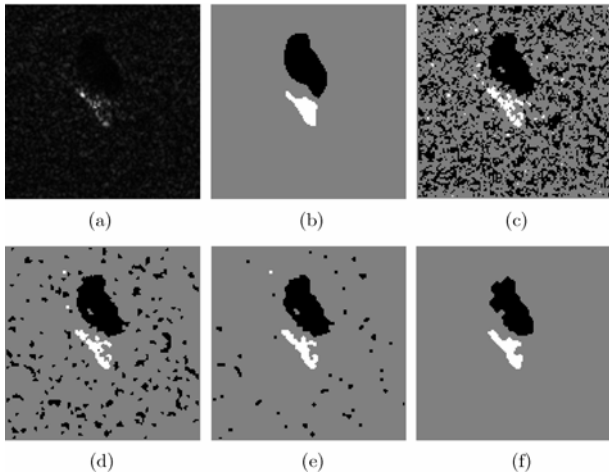


图4 BMP2-9563 目标图像分割结果

表1 BMP2-9563 目标图像分割质量指标

质量指标	图 4(c)	图 4(d)	图 4(e)	图 4(f)
目标强度匹配度	0.5686	0.7413	0.7843	0.8272
目标形状匹配度	0.4952	0.5884	0.6480	0.6995
平均匹配度	0.5319	0.6648	0.7162	0.7633

为分析图像分割质量对估计精度的影响,选择有代表性的4类MSTAR目标(BMP2-9563, BMP2-C21, BTR70-C71, T72-132)在俯仰角 15°, 17°两种条件下共 1714 幅 SAR 图像做为输入图像,成像方位角范围覆盖 0°~360°。首先基于 MRF 模型分割图像,对不同输入图像、不同 MRF 模型参数对应的分割结果进行质量评价,给出分割质量指标。在此基础上,分别采用本文估计方法、基于 Hough 变换的方法、Meth 等人方法<sup>[5]</sup>对不同质量的分割结果进行方位角估计。图5为方位角估计精度与图像分割质量之间的关系曲线,其中图5(a)为估计误差均值随分割质量变化的曲线,图5(b)为估计误差方差随分割质量变化的曲线。图5(a),图5(b)的横坐标为平均匹配度指标。图5(a)纵坐标为估计绝对误差的均值,图5(b)纵坐标为估计绝对误差的方差。4类目标分割结果统计表明质量指标值分布在0.4~0.9的范围。在此范围内等间隔选取20个离散指标值,统计当分割质量落在某一指标值及其附近邻域时,使用不同估计方法所获得的估计误差均值和方差,将这些估计误差均值和方差分别连接成均值变化曲线和方差变化曲线。变化曲线描述了使用3种方法进行方位角估计时,估计精度随图像分割质量变化的规律——随着图像分割质量的提高,估计精度整体上也呈现提高的趋势。图像分割质量较差时,估计误差的均值和方差都比较大,估计精度较低;随着图像分割质量逐渐变好,估计精度也相应提高;当分割质量接近理想分割时,估计值已十分接近真值。

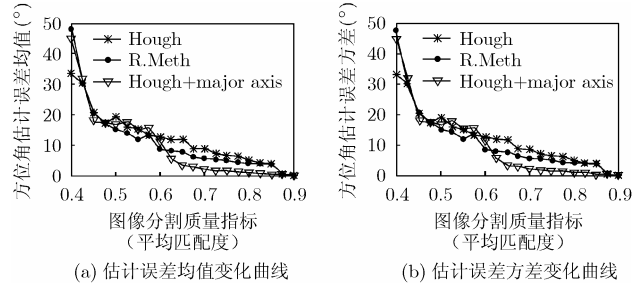


图5 方位角估计精度与图像分割质量关系曲线

4.2 本文估计方法与已有估计方法估计性能比较

分析图5(a),图5(b)可以实现对不同方位角估计方法整体估计性能的比较。需要说明的是,对于本文实验,当分割质量指标处于0.4~0.65范围时分割质量很差,分割结果不能为后续的方位角估计提供准确依据,采用的3种估计方法都无法完成有效估计的任务;而当质量指标超过0.85时,此时输入图像自身成像质量很好,每种估计方法均可获得较高的估计精度。统计表明,实验中绝大多数分割结果的质量指标集中在0.65~0.85的范围内,此时方位角估计的结果将主要由所采取的估计方法所决定,在这个区间内比较不同估计方法的估计性能将更有意义。分析图5(a),图5(b)曲线在质量指标为0.65~0.85范围内的变化规律可知:虽然估计精度受分割质量的影响而发生变化,但使用本文方法获得的估计误差均值、方差在3种方法中始终是最小的,估计精度始终最高。误差均值始终小于5°,方差小于20°,都要优于其他两种方法的结果。而且随着分割质量的提高,估计误差的均值和方差进一步减小。这些都说明本文方法具有优良的估计性能。

取 MRF 模型参数  $\beta$  为经验值 5,此时绝大多数目标图像的分割质量都比较好。在此基础上使用3种估计方法对4类目标进行方位角估计,估计绝对误差在一定范围内的目标相对数目(绝对误差在某范围内的目标数与目标总数之比)如表2所示。通过表2的比较可知:在保证一定分割质量的条件下,采用本文方法获得准确估计(如估计误差在1°范围内)的目标数目多于采用其他两种方法的目标数目;对于实验中95%左右的目标,本文方法都能在误差10°范围内正确估计出它们的方位角。对比结果进一步验证了本文方法的有效性。

5 结束语

本文提出了一种基于 Hough 变换与目标主轴提取的 SAR 图像目标方位角估计方法,该方法在估计过程中引入目标主轴信息,基于 Hough 变换检测结果与目标主轴信息获得最终的方位角估计。使用 MSTAR 实测数据的实验结果验证了方法的有效性。对于坦克、装甲运输车等地面军事目标,其自身形状的对称性使得方位角估计能够获得较为理想的结果。如果想进一步实现对非对称形状的军事目标的识别,

表 2 估计绝对误差小于给定值的相对目标数目 (%)

误差范围	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Hough 变换	41.6	56.2	64.9	70.8	76.6	80.2	82.2	84.3	86.6	87.9
Meth 方法	33	55	69	78	83	87	89	91	92	93
Hough + 主轴	63.4	75.9	84.5	88.4	90.3	90.9	92.0	93.4	94.0	95.0

需要考虑更为先进的方法估计目标成像的方位角, 这方面的研究可以在后续工作中深入开展。

### 参 考 文 献

- [1] Ross Timothy D, Bradley Jeffrey J, and Hudson Lanson J, *et al.*. SAR ATR-So What's the problem?-An MSTAR perspective[A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery VI[C], Orlando, FL, SPIE, 1999, 3721: 662-672.
  - [2] Grinnell J, and Bhanu B. Recognition of articulated and occluded objects. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(7): 603-613.
  - [3] Principe J, Zhao Q, and Xu X. A novel ATR classifier exploiting pose information. In: Proceedings of Image Understanding Workshop, Monterey, CA, 1998: 833-836.
  - [4] Principe J, Xu D, and Fisher III. Pose estimation in SAR using an information theoretic criterion. *SPIE*, 1998, 3370: 218-229.
  - [5] Meth R. Target/ Shadow segmentation and aspect estimation in synthetic aperture radar imagery [A]. *SPIE*, 1998, 3370: 188-196.
  - [6] Voicu L, Patton R, and Harley R M. Multi-criterion vehicle pose estimation for SAR ATR. *SPIE*, 1999, 3321: 497-506.
  - [7] Geman S and Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, 6: 721-741.
  - [8] 孙即祥. 数字图像处理. 石家庄: 河北教育出版社, 1993, 260-263.
  - [9] Rosenfeld A and Johnston E. Angle detection on digital curves. *IEEE Trans. on Computers*, 1973, 22(9): 875-878.
  - [10] Williams D J and Shah M. A fast algorithm for active contour and curvature estimation. *CVGIP Image Understanding*, 1992, 55(1): 14-26.
  - [11] Weisenseel R A, Karl W, and David A, *et al.*. Markov random field segmentation methods for SAR target chips. In: Algorithms for synthetic aperture radar imagery V. *SPIE*, 1999, 3721: 462-473.
  - [12] Power G J and Weisenseel R A. ATR subsystem performance measures using manual segmentation of SAR target chips. In: Algorithms for synthetic aperture radar imagery VI, *SPIE*, 1999, 3721: 685-692.
  - [13] Frery A C. Segmentation algorithms: a quantitative assessment. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburgo, Alemanha, 1999: 1265-1267.
- 徐 牧: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理与目标识别、SAR 图像处理。
- 王雪松: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, “三遥”分会委员, 主要从事雷达极化信息处理、信号处理与目标检测及识别, 弹道导弹攻防对抗电子战等领域的研究。
- 肖顺平: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理、雷达目标识别、模糊信息处理、电子战等领域的研究。