

## 一种舰船 ISAR 图像中心线特征提取新方法

杜琳琳 安成锦 陈曾平

(国防科学技术大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

**摘要:** 舰船 ISAR 图像的中心线可作为舰船目标识别的显著特征,其精度影响着舰船目标识别的有效性。该文提出一种基于 ISAR 图像的舰船宽度-中心线联合提取方法,将船体宽度作为中心线提取的辅助信息,通过线段组来检测船体宽度和中心线方向,并以线段组内舰船面积对极半径和角度的敏感性作为参数搜索的依据。仿真试验结果表明:该方法具有较高的精度,对不同类型舰船在各种投影平面下的 ISAR 图像均具有较好的适应性。

**关键词:** 舰船特征提取; Hough 变换; 最小二乘拟合法; 投影; 中心线

中图分类号: TP75

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-1023-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01275

## A New Algorithm for Ship Center Line Extraction in ISAR Image

Du Lin-lin An Cheng-jin Chen Zeng-ping

(ATR Key Lab, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The centerline as a distinct feature in ship ISAR image, its precision affects the recognition result. In this paper, a new ship centerline extraction algorithm is presented. According to this algorithm, the ship width and centerline are together detected by line group, and the parameters are optimized according to the radius and angle sensitivity of ship area in the line group. The simulation results demonstrate that this algorithm has higher precision, can adapt to images with different projection plane.

**Key words:** Ship feature extraction; Hough transform; Method of least square; Projection; Centerline

### 1 引言

舰船目标的检测、监视和识别,是海上战场态势感知的重要内容。海战场面积广阔,各类目标分布广,以机载雷达为传感器的海战场目标探测系统,具有探测覆盖面广、时效性强、探测精度高、全天候探测等优点,因而是海战场态势感知的重要手段。在以雷达为传感器的舰船目标识别中,常用的特征类型主要有:(1)低分辨雷达的回波特征,如目标 RCS 特征、回波波形特征等,由于分辨率不高,且容易受箔条、角反射器等干扰的影响,难以较好地识别目标;(2)1维距离像特征,能够反映舰船目标强散射点在径向上的投影,但受观测角度的影响,存在方位敏感性;(3)基于 ISAR 2 维图像提取的特征量,包含了较丰富、直观的目标识别信息,在获取高质量舰船 ISAR 图像的基础上,可以从中提取舰船尺寸、形状、结构等特征作为舰船识别的有效特征量。

舰船 ISAR 图像中船体中心线(舰船纵轴),即连接船头与船尾中心的直线<sup>[1]</sup>,这一特征直接表征了船

体长度,通常是舰船目标识别(特别是大小型舰船目标识别)的有效特征。此外,中心线斜率也可用于转动矢量的估计<sup>[1,2]</sup>。

相比于其它目标的特征线(如飞机目标的纵轴),舰船中心线的提取存在其特殊性,例如,机载雷达对舰船目标探测、识别过程中,由于飞行航迹变化和不同海情下,舰船晃动都可导致图像投影平面不断变化,获得的图像可能是侧视图,可能是俯视图,或者介于二者之间。所以,中心线的提取算法要求在各种成像条件的图像下都具有较高的精度,这也是舰船中心线提取算法的难点和需要解决的主要问题。

目前,关于 ISAR 图像舰船中心线特征提取的相关文献较少,主要以投影法<sup>[1]</sup>、最小二乘拟合法<sup>[2]</sup>、Hough 变换法<sup>[3-7]</sup>为主,但在实际应用中,这些方法并不能适用于各种船型、海情、雷达视角情况下的舰船图像,且存在中心线提取精度低、实时性差等缺点。为此,本文提出将舰船宽度与中心线特征进行联合提取的新方法,该方法以直线组的检测代替 Hough 变换中的直线检测,在检测出舰船主体宽度和角度后,结合宽度信息进行中心线位置提取。通过分析该方法在参数选择问题上的特殊性,以面积对参数误差的敏感性作为参数选取的标准,取得

2009-09-25 收到, 2010-02-10 改回

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0921), 国家部委级基金项目(514870101)资助课题

通信作者: 杜琳琳 kddulinlin@sina.com

了较高的精度和较小的运算量。

## 2 舰船线性特征提取方法

对舰船目标 ISAR 图像可以利用其线性特征提取中心线, 常用方法主要有如下几种:

**方法 1** Hough 变换或 Radon 变换法<sup>[8,9]</sup>, 采用最大峰度或峰值来确定中心线的斜率。

**方法 2** 最小二乘拟合法。它通过散射点的坐标来拟合船体中心线的位置, 即选择的中心线应使得距离-多普勒域图像上的各散射点到该直线的距离之和最小。

**方法 3** 投影法。投影法是将舰船图像向某一方向投影, 投影长度最小的投影方向作为中心线方向。

在实际应用中, 上述中心线提取方法都存在不足甚至失效的情况, 具体表现为:

(1)Hough 变换法的提取结果在一些情况下会出现模糊峰度(或模糊峰值), 即某一个错误角度位置的峰度可能超过实际应角度位置的峰度大小, 比如将船体对角线误认为是中心线;

(2)最小二乘拟合法与 Hough 变换方法得到的精度近似, 当图像中含有舰船侧面信息时, 舰船上层建筑散射点的影响会使斜率估计偏差较大;

(3)投影法对长宽比较大的舰船图像提取中心线的效果较好, 否则容易出现投影偏差, 而且也会受到舰船上层建筑的影响。

上述方法失效的主要原因, 在于所设置的中心线检测依据存在不合理的情况。例如, 以船体上最长线段表征舰船中心线, 这在舰船图像比较狭长的情况下精度较高, 但受舰船晃动、雷达视角等影响, ISAR 图像将呈现舰船不同侧面, 对于较短、较宽的舰船图像, 以这一依据检测中心线就会出现较大误差。

考虑到在实际情况中, 舰船图像的中心线方向与船体方向一致, 本文以此作为中心线方向检测的依据。

## 3 线段组检测原理

Hough 变换方法可以用来检测图像中的线段, 本文结合舰船图像的特点, 将 Hough 变换对线段的检测扩展至对线段组的检测, 得到与舰船主体相吻合的线段组的位置、宽度和方向, 该方向上长度最大位置即为中心线的位置。

线段组采用极坐标中的极半径  $\rho$ , 角度  $\theta$  进行描述, 其中  $\rho \in [\rho_1, \rho_2]$ , 边界极半径  $\rho_1 = w_0$ ,  $\rho_2 = w_0 + w$  为线段组的两条边界线对应的极半径;  $w$  为累积宽度, 表示用于检测的线段组的宽度, 其最佳值即为舰船宽度;  $w_0$  为起始半径, 表示线段组中较

近边界线段的极半径值。各变量间的关系如图 1 所示。

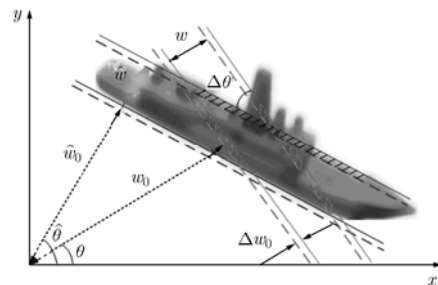


图 1 宽度方法示意图

对线段组所对应位置的图像像素进行累加, 即在积累宽度为  $w$  的情况下, 对同一角度  $\theta$ , 极半径范围  $[\rho_1, \rho_2]$  内的所有像素求和, 得到与该直线组相吻合部分的船体面积。该面积与线段组的角度、积累宽度  $w$ 、起始半径  $w_0$  有关, 以函数  $s(w, w_0, \theta)$  表示, 具体为

$$s(w, w_0, \theta) = \sum_{\rho \in [w_0, w_0 + w]} C(\rho, \theta) \quad (1)$$

其中  $C(\rho, \theta)$  表示极坐标半径  $\rho$ 、角度  $\theta$  对应的直线上所有像素的和。

依据  $s(w, w_0, \theta)$  的变化规律, 搜索与船体宽度、方向一致的线段组参数  $\hat{w}$ ,  $\hat{w}_0, \hat{\theta}$ , 便可得到舰船宽度和中心线方向。

## 4 舰船宽度-中心线特征提取算法

### 4.1 算法原理分析

$s(w, w_0, \theta)$  的参数选择并非简单的极值搜索问题。在参数  $w_0, \theta$  固定的情况下, 随着积累宽度  $w$  的增加, 从某个宽度值开始  $s(w, w_0, \theta)$  的值将不再改变, 即  $s(w, w_0, \theta)$  不存在峰值位置, 如果搜索使  $s(w, w_0, \theta)$  停止增长的临界宽度, 那么该宽度为舰船主体和舰船上层建筑部分的总宽度在图像上的投影, 而不是舰船主体的宽度, 这样就存在上层建筑的影响, 使舰船中心线方向的搜索结果容易出现偏差。

当角度  $\theta$  和起始半径  $w_0$  偏离最佳值时, 将导致线段组相对于舰船主体产生旋转和平移, 使  $s(w, w_0, \theta)$  取值减小。下面分别分析在  $w$  取得最佳值和偏离最佳值时, 角度  $\theta$  和起始半径  $w_0$  的估计误差对  $s(w, w_0, \theta)$  的影响。

设定 ISAR 图像中舰船宽度、起始半径、角度的最佳值分别为  $\hat{w}$ ,  $\hat{w}_0, \hat{\theta}$ , 如图 1 所示。此时, 线段组的两条边界线对应的极半径分别满足:  $\hat{\rho}_1 = \hat{w}_0$ ,  $\hat{\rho}_2 = \hat{w}_0 + \hat{w}$ 。

(1) 线段组宽度取得最佳值  $\hat{w}$  时,  $s(w, w_0, \theta)$  的最大值为

$$s(\hat{w}, \hat{w}_0, \hat{\theta}) = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2]} C(\rho, \hat{\theta}) \quad (2)$$

若角度偏移  $\Delta\theta$ , 即  $\theta = \hat{\theta} + \Delta\theta$ , 则

$$s(\hat{w}, \hat{w}_0, \hat{\theta} + \Delta\theta) = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2]} C(\rho, \hat{\theta} + \Delta\theta) \quad (3)$$

若起始半径偏移  $\Delta w_0$ , 即  $w_0 = \hat{w}_0 + \Delta w_0$ , 则

$$s(\hat{w}, \hat{w}_0 + \Delta w_0, \hat{\theta}) = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w_0, \hat{\rho}_2 + \Delta w_0]} C(\rho, \hat{\theta}) \quad (4)$$

在  $\Delta\theta \rightarrow 0$  情况下,  $s(w, w_0, \theta)$  对应的图像区域只在线段组的两端发生变化, 那么  $s(w, w_0, \theta)$  的改变可以近似为两条边界线对应的像素累加值变化。由于角度、极半径偏移导致的  $s(w, w_0, \theta)$  值减小量分别为

$$\begin{aligned} \Delta s_{\hat{w}, \Delta\theta} &= s(\hat{w}, \hat{w}_0, \hat{\theta}) - s(\hat{w}, \hat{w}_0, \hat{\theta} + \Delta\theta) \\ &= \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2]} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho, \hat{\theta} + \Delta\theta)) \\ &\approx \sum_{\rho = \hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho, \hat{\theta} + \Delta\theta)) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta s_{\hat{w}, \Delta w_0} = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_1 + \Delta w_0]} C(\rho, \hat{\theta}) \quad (6)$$

(2) 若积累宽度没有取到最佳值  $\hat{w}$ , 记  $w = \hat{w} + \Delta w$ 。当  $\Delta w > 0$ , 此时对应的起始半径、角度最优值也随之发生变化, 分别表示为  $\hat{w}'_0, \hat{\theta}'$ , 令  $\hat{w}'_0 = \hat{w}_0 + \Delta w'$ , 线段组的极半径范围  $\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w]$ 。在积累宽度取  $w$  时,  $s(w, w_0, \theta)$  的最大值为

$$s(w, \hat{w}'_0, \hat{\theta}') = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w]} C(\rho, \hat{\theta}') \quad (7)$$

若角度偏移  $\Delta\theta$ , 即  $\theta = \hat{\theta}' + \Delta\theta$ , 则

$$s(w, \hat{w}'_0, \hat{\theta}' + \Delta\theta) = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w]} C(\rho, \hat{\theta}' + \Delta\theta) \quad (8)$$

若起始半径偏移  $\Delta w_0$ , 即  $w_0 = \hat{w}_0 + \Delta w' + \Delta w_0$ , 则

$$s(w, \hat{w}'_0 + \Delta w_0, \hat{\theta}') = \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w' + \Delta w_0, \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w_0 + \Delta w]} C(\rho, \hat{\theta}') \quad (9)$$

由于极半径、角度偏移导致的  $s(w, w_0, \theta)$  值减小量分别为

$$\begin{aligned} \Delta s_{w, \Delta\theta} &= s(w, \hat{w}'_0, \hat{\theta}') - s(w, \hat{w}'_0, \hat{\theta}' + \Delta\theta) \\ &= \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w]} (C(\rho, \hat{\theta}') - C(\rho, \hat{\theta}' + \Delta\theta)) \\ &\approx \sum_{\rho = \hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w} (C(\rho, \hat{\theta}') - C(\rho, \hat{\theta}' + \Delta\theta)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta s_{w, \Delta w_0} &= s(w, \hat{w}'_0, \hat{\theta}') - s(w, \hat{w}'_0 + \Delta w, \hat{\theta}') \\ &= \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_1 + \Delta w' + \Delta w]} C(\rho, \hat{\theta}') \\ &\quad - \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_2 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w_0 + \Delta w]} C(\rho, \hat{\theta}') \end{aligned} \quad (11)$$

由式(5)和式(10)可得

$$\begin{aligned} \Delta s_{\hat{w}, \Delta\theta} - \Delta s_{w, \Delta\theta} &= \sum_{\rho = \hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho, \hat{\theta} + \Delta\theta)) \\ &\quad - \sum_{\rho = \hat{\rho}_1 + \Delta w', \hat{\rho}_2 + \Delta w' + \Delta w} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho, \hat{\theta} + \Delta\theta)) \end{aligned}$$

由式(6)和式(11)可得

$$\begin{aligned} \Delta s_{\hat{w}, \Delta w_0} - \Delta s_{w, \Delta w_0} &= \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_1 + \Delta w]} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho + \Delta w', \hat{\theta}')) \\ &\quad - \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_2, \hat{\rho}_2 + \Delta w]} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho + \Delta w', \hat{\theta}')) \\ &\approx \sum_{\rho \in [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_1 + \Delta w]} (C(\rho, \hat{\theta}) - C(\rho + \Delta w', \hat{\theta}')) \end{aligned}$$

在预处理后的 ISAR 图像中, 一般来说, 舰船两侧存在明显的上下边线, 边线位置灰度变化剧烈, 因此两条边线对极半径、角度的变化较其它位置的线段更为敏感, 设极半径、角度的改变量为  $\Delta\rho, \Delta\theta$ , 有

$$\begin{aligned} &|C(\hat{\rho}, \hat{\theta}) - C(\hat{\rho} + \Delta\rho, \hat{\theta} + \Delta\theta)| \\ &> |C(\rho, \theta) - C(\rho + \Delta\rho, \theta + \Delta\theta)|, \\ &\hat{\rho} = \hat{\rho}_1 \text{ 或 } \hat{\rho}_2, \rho \neq \hat{\rho}, \theta \neq \hat{\theta}, \Delta\rho \rightarrow 0, \Delta\theta \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可知,  $\Delta s_{\hat{w}, \Delta\theta} - \Delta s_{w, \Delta\theta} > 0$ ,  $\Delta s_{\hat{w}, \Delta w_0} - \Delta s_{w, \Delta w_0} > 0$ , 即: 当积累宽度取得最优值时,  $s(w, w_0, \theta)$  对角度和极半径的变化最敏感, 若积累宽度偏离最优值,  $s(w, w_0, \theta)$  受角度和极半径的影响相对较小。对  $\Delta w > 0$  的情况, 可以得到类似的结论, 这里不再赘述。

## 4.2 参数优化方法

由上述分析可知: 当积累宽度  $w$  与舰船主体宽度一致时, 改变积累宽度或角度, 则积累值  $s(w, w_0, \theta)$  会有明显的改变; 否则, 当  $w$  没有取得最佳积累宽度  $\hat{w}$  时, 改变积累宽度或角度, 积累值  $s(w, w_0, \theta)$  的变化相对较小。本文利用这一特性检测最佳积累宽度  $\hat{w}$ 。

参数  $\hat{w}$  的选取可具体描述为: (1) 针对每一组  $(w, w_0)$  的值, 将  $s(w, w_0, \theta)$  对参数  $(\rho, \theta)$  进行搜索, 取前  $N_w$  个最大值组成序列  $H(w, w_0) = \{h_{w, w_0}(1), h_{w, w_0}(2), \dots, h_{w, w_0}(N_w)\}$ ; (2) 对序列  $H(w, w_0)$  求其方差, 表示为  $d(w, w_0)$ , 由此得到积累宽度和起始宽度最佳值。

$$(\hat{w}, \hat{w}_0) = \arg \max(d) \quad (13)$$

在得到积累宽度和起始宽度的最佳值 $(\hat{w}, \hat{w}_0)$ 后, 提取 $(\hat{w}, \hat{w}_0)$ 对应的序列 $H_{\hat{m}, \hat{n}}$ 中的最大值 $h'_{\hat{m}, \hat{n}}$  (1) 对应的 $\rho$ 、 $\theta$  值为中心线的极半径、角度取值, 即

$$(\hat{\rho}, \hat{\theta}) = \arg \max(H(\hat{w}, \hat{w}_0)) \quad (14)$$

### 4.3 算法流程

综上所述, 本文的中心线提取算法基本步骤可归纳如下:

(1)图像预处理。过程如下: 选择合适的门限消除背景噪声和杂波(本文采用 KSW 方法); 对图像进行平滑; 利用形态算子对图像进行区域连接; 消除非目标区域; 将灰度图像转化为二值图像;

(2)对图像进行 Hough 变换, 得到矩阵  $Z_{\text{Hough}}$ ;

(3)设定检测宽度  $w$ , 以宽度  $w$  对  $Z_{\text{Hough}}$  临近线段组进行累积, 得到矩阵  $Z_w$ ;

(4)提取矩阵  $Z_w$  前  $N_w$  个最大值组成序列, 求取该序列的方差;

(5)改变积累宽度  $w$  的取值, 重复步骤(3)~步骤(4), 得到方差序列, 该序列最大值位置对应的积累宽度即为最优积累宽度  $\hat{w}$ ;

(6)以最优积累宽度  $\hat{w}$  对 Hough 变换矩阵  $Z_{\text{Hough}}$  进行临近线段组积累, 求取峰值位置对应的角度  $\hat{\theta}$ , 搜索 Hough 变换在该角度下峰值位置对应的极半径  $\hat{\rho}$ 。

## 5 仿真结果与分析

对本文提出的方法进行仿真验证, 用 3DMax 建立舰船目标的三维几何模型, 并进行三角面元剖分, 采用物理光学法和增量长度绕射理论计算舰船目标的雷达回波, 由回波计算得到一维距离像和 ISAR 图像。仿真中雷达工作在 X 波段, 脉宽 20  $\mu\text{s}$ , 工作带宽分别为 20 MHz, 40 MHz, 60 MHz, 80 MHz。

舰船运动参数参考海军船体的设计数据<sup>[10]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 五级海情下的舰船周期晃动参数

轮船种类	双幅度( $^{\circ}$ )	平均周期(s)
驱逐舰	俯仰 3.4	6.7
	偏航 3.8	14.2
	滚动 38.4	12.2
大型商船	俯仰 0.9	11.2
	偏航 1.33	33.0
	滚动 5.0	26.4

按照以下方法获取仿真图像: 取一段 30 s 的飞机仿真航迹, 在飞机飞行的同时, 舰船进行三维正弦晃动<sup>[11]</sup>, 在这 30 s 内, 以四、五级海情为例, 对

长度分别为 250 m、100 m 的大小型舰船各进行 50 次 ISAR 成像(采用距离-多普勒成像方法<sup>[12]</sup>), 其中五级海情下的晃动参数按照表 1。雷达带宽设置为 20 MHz, 信杂比为 5 dB 情况下, 对这 100 幅图像进行中心线特征提取, 将本文方法与直接 Hough 变换法、最小二乘法、投影法的效果进行对比。图 2 为 4 种方法的中心线斜率估计值与真实值的比较结果, 斜率真实值通过图像投影平面计算得到。图中的中心线斜率变化曲线主要是由舰船晃动引起的, 小型舰船晃动幅度较大, 因此中心线斜率变化更为剧烈。由图对比可知, 直接 Hough 变换法的提取结果与实际值差异最大; 最小二乘法的估计精度也明显低于投影法和本文的方法, 而本文的方法估计精度高于投影法。

在上述 100 幅图像中, 选取五级海情下大型舰船的 3 幅图像, 处理结果对比如图 3 所示。

为了进一步检验本文方法的有效性和稳健性, 在不同信杂比、带宽条件下, 用直接 Hough 变换法、最小二乘法、投影法与本文方法对 100 幅图像进行中心线特征提取, 4 种方法的平均估计误差随信杂比和带宽的变化分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同信杂比情况下 100 幅图像平均估计误差(rad)

信杂比 (dB)	直接 Hough 变换法	最小二乘法	投影法	本文方法
10	0.4868	0.2122	0.1267	0.0713
5	0.5481	0.2142	0.1328	0.0741
0	0.5568	0.2149	0.1370	0.0747
-5	0.6034	0.2152	0.1423	0.0787
-10	0.6058	0.2514	0.1427	0.1008

表 3 不同带宽情况下 100 幅图像平均估计误差(rad)

带宽(MHz)	直接 Hough 变换法	最小二乘法	投影法	本文方法
80	0.4443	0.2142	0.1256	0.0771
60	0.5308	0.2307	0.1315	0.0825
40	0.5831	0.2977	0.1427	0.1081
20	0.7771	0.4915	0.2721	0.2420

从表中数据可知: (1)在不同的分辨率和信杂比条件下, 本文的方法比直接 Hough 变换法、最小二乘法和投影法精度更高。(2)随着信杂比和分辨率的降低, 4 种方法估计精度都会下降, 但是受分辨率的影响更大, 受信杂比的影响相对较小。这是因为: 4 种中心线提取方法都是在图像预处理后进行的, 这在一定程度上降低了噪声的影响, 而直线特征的提取是以像素为单位进行的, 其提取精度本身就受

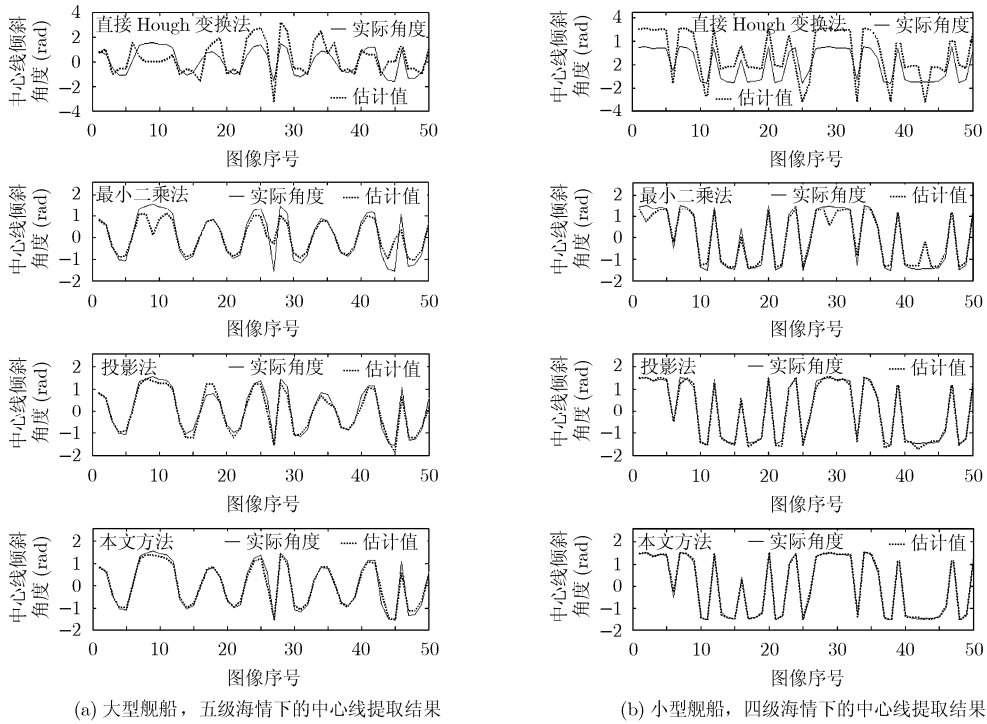


图 2 四种方法中心线斜率估计值与真实值的比较

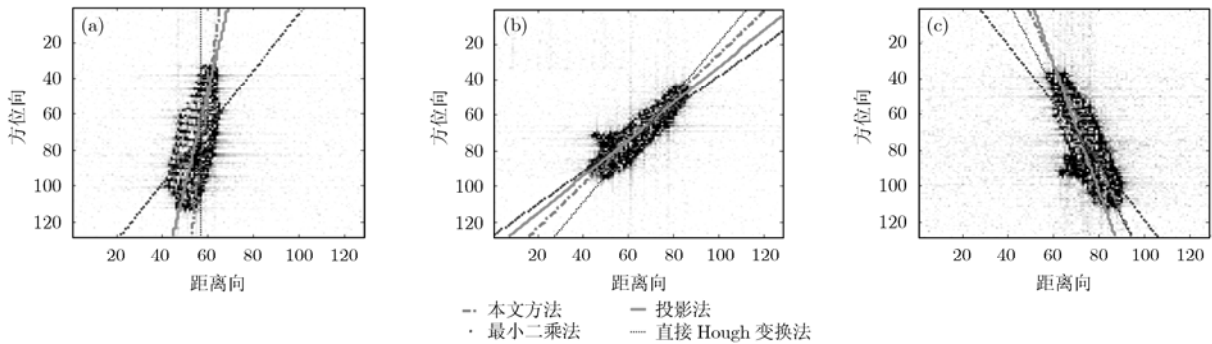


图 3 直接 Hough 变换法、最小二乘法、投影法与本文方法结果对比

到图像分辨率的限制, 例如, 同样偏离一个像素的情况下, 分辨率越低误差越大, 因此以上几种算法的精度受图像分辨率影响较大。

在仿真验证中, 这 100 幅图像的平均运算时间分别为: 直接 Hough 变换法 0.76 s, 最小二乘法 0.44 s, 投影法 2.39 s, 本文方法 1.62 s, 其中投影法采用了黄金分割的快速搜索算法。由此可知, 直接 Hough 变换法和最小二乘法的由于其算法简单, 运算量较小; 而相比于投影法, 本文的方法在提高精度的同时, 降低了运算量。

### 6 结论

本文针对不同船型、海情、雷达视角情况下的舰船 ISAR 图像, 提出一种以舰船宽度作为辅助信息的中心线提取方法, 提高了中心线提取的精度和

稳定性。该方法相对于以往的中心线提取方法主要有以下几点改进:

(1)算法以舰船的船体方向作为中心线方向, 这一检测标准更能适用于不同类型舰船在各种视角下的图像。

(2)以直线组代替直线检测进行中心线方向检测, 可以避免独立直线检测存在的偶然性和峰值易偏移问题, 能够以较高的精度检测舰船中心线的方向, 减小了角度偏差, 算法更为稳定。

(3)将中心线与舰船宽度结合起来同步检测, 舰船宽度不仅可以作为中心线提取的辅助信息, 也可作为舰船特征用于后续识别。

### 参考文献

[1] 汪玲. 逆合成孔径雷达成像关键技术研究[D]. [博士学位], 南

- 京航空航天大学, 2006, 08.
- Wang Ling. Research on key technology of ISAR imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 8.
- [2] 汤洁. 机载 ISAR 对舰船成像研究[D]. [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 2005, 12.
- Tang Jie. Research of ship target ISAR imaging based on airborne radar[D]. [MA dissertation], Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 12.
- [3] 胡希驰. SAR 图像线性目标提取[D]. [硕士学位论文], 南京电子技术研究所, 2005, 12.
- Hu Xi-chi. Linear target extraction for SAR image[D]. [MA dissertation], Nanjing Electronic Technology Research Institute, 2005, 12.
- [4] 于风芹. 多分量 Chirp 信号的时频表示与参数估计的研究及其应用[D]. [博士学位论文], 上海大学, 2004, 12.
- Yu Feng-qin. Research and implementation on multi-component chirp signal time-frequency indication and parameter estimation[D]. [Ph.D. dissertation], Shanghai University, 2004, 12.
- [5] 徐牧, 王雪松, 肖顺平. 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[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 370-374.
- Xu Mu, Wang Xue-song, and Xiao Shun-ping. Target aspect estimation in SAR imagery based on Hough transform and major axis extraction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 370-374.
- [6] 金术玲, 梁彦, 潘泉, 程咏梅. 一种天波超视距雷达分级 Hough 变换航迹起始方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1968-1972.
- Jin Shu-ling, Liang Yan, Pan Quan, and Cheng Yong-mei. A two-hierarchy Hough transform based track initiation method for sky-wave over-the-horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1968-1972.
- [7] 陈军, 徐友春, 赵明, 彭永胜. 基于随机 Hough 变换的道路边界识别算法研究[J]. 中国图象学报, 2009, 14(5): 905-911.
- Chen Jun, Xu You-chun, Zhao Ming, and Peng Yong-sheng. A randomized Hough transform based on road edge identification algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(5): 905-911.
- [8] 安成锦, 杜琳琳, 王卫华, 陈曾平. 基于融合边缘检测的 SAR 图像线性特征提取算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1279-1282.
- An Cheng-jin, Du Lin-lin, Wang Wei-hua, and Chen Zeng-ping. Linear feature extraction for SAR image based on fused edge detector[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1279-1282.
- [9] L M Murphey. Linear feature detection and enhancement in noisy image via radon transform[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1986, 4(4): 279-284.
- [10] 秦玉亮. 弹载 SAR 制导技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2008, 10.
- Qin Yu-liang. Precision guidance using missile-borne SAR[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2008, 10.
- [11] 杜琳琳, 任艳, 陈曾平. 舰船目标 ISAR 成像多普勒特性分析[J]. 信号处理, 2009, 25(8A): 549-553.
- Du Lin-lin, Ren Yan, and Chen Zeng-ping. Analysis of Doppler characteristics in ship target ISAR imaging[J]. *Signal Processing*, 2009, 25(8A): 549-553.
- [12] 许人灿. 基于实测数据的高分辨雷达空间目标识别理论及应用研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2006, 6.
- Xu Ren-can. Theory research and implementation on high resolution space object recognition based on real measured data[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006, 6.
- 杜琳琳: 女, 1981 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、图像处理.
- 安成锦: 女, 1982 年生, 博士生, 感兴趣领域是 SAR 图像解译、景象匹配.
- 陈曾平: 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 从事目标识别、雷达信号处理等方向研究.