

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0055-06

# 一种从 ERS-1 SAR 海洋图像中检测船舶航迹的算法

周红建, 周宗潭, 李相迎, 王正志, 刘雅浪

(国防科技大学 自动控制系遥感组 湖南长沙 410073)

**摘要:** 简单介绍了船舶航迹的几种模式, 分析了单纯运用 Radon 变换方法检测航迹的 4 个局限, 并针对这些局限提出了一种检测航迹的思想——先进行斑点噪声的抑制, 然后用生理视觉的静态边界轮廓系统对图像进行处理, 最后应用 Radon 变换的方法来突出航迹的线性特征。我们用 ERS-1 SAR 海洋图像进行了测试, 结果表明这一方法比单纯应用 Radon 变换的方法更为有效。

**关键词:** 航迹检测; SAR 海洋图像; Radon 变换; 生理视觉

**中图分类号:** TP79/P71 **文献标识码:** A

## 1 引言

在遥感技术中, 我们用来获取遥感信息的遥感传感器有很多, 合成孔径雷达(SAR)是其中之一。SAR 不仅具有全天时、全天候的独到优势, 而且由于其特殊的成像原理使得它能够提供更高分辨率的遥感图像, 因此, SAR 被广泛地应用于军事侦察和地面监测。自从人们从 Seasat 拍摄到的 SAR 海洋图像中观察到海上航行的船舶目标及其航迹以来, 国际遥感界的很多研究人员一直对航迹的模式分析和检测工作有着浓厚的兴趣。目前, SAR 图像中的舰船航迹检测已成为国际遥感界着手研究的一个重要主题, 这一方面的研究成果有着广泛的应用前景, 例如对特定海域、海湾港口进行监测, 对海洋水运交通、非法捕鱼、非法走私等进行监测和管理。

自动检测航迹特征是对海上船运交通监测的第一步。本文就卫星遥感 SAR 图像中舰船航迹检测问题作了一些探讨性的工作。文中先简单分析了 SAR 图像几种不同模式的舰船航迹的特征, 讨论了应用 Radon 变换方法检测 V 形航迹特征的局限, 并提出了结合噪声抑制、生理视觉静态边界算法和 Radon 变换方法来检测卫星 SAR 图像中的航迹特征。我们用 ERS-1 SAR 海洋图像进行了测试, 其效果比单纯应用 Radon 变换的方法要理想得多。

## 2 船舶航迹模式

在卫星 SAR 海洋图像中, 在条件合适的情况下, 经常可以看到海上航行的船目标及其航迹。船航迹在 SAR 图像中有多种不同的模式, 它受很多因素的影响, 如海风条件、海水的层化条件、船航行的速度、SAR 的辐射波波长和入射角以及极化方式等因素。Lyden<sup>[1]</sup>将不同条件下产生的各种航迹分为 3 类:

- (1) 船直接产生的表面波, 它主要是由于船体对水面的扰动引起的;
- (2) 湍流航迹和旋涡, 这主要是由于船的排水和螺旋桨喷射引起的;
- (3) 由船产生的内波, 它是在一定的层化条件下产生的。

这三者的相互关系、产生条件和在 SAR 图像中表现出来的形式如图 1。

## 3 Radon 变换的局限

### 3.1 Radon 变换

Radon 变换<sup>[2-4]</sup>可以定义在任意维变量空间域, 我们考虑二维欧氏空间的特殊情况, 并研究一条线段上的点集的特征函数的变换, 于是可得:

收稿日期: 1998-07-03; 修改日期: 1999-01-04

**作者简介:** 周红建, 1972 年生于湖南, 国防科技大学自动控制系飞行器控制与试验统计专业 1996 年开始攻读博士学位, 目前主要从事遥感图像处理、遥感信息处理、卫星遥感 SAR 海洋图像中的船舶航迹检测等方面的工作。

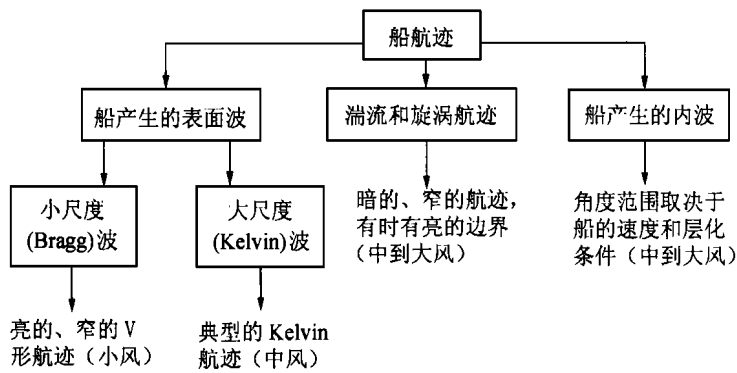


图 1 船的航迹产生机制

Fig. 1 Overview of ship wake generation mechanisms

$$f(\theta, p) = R\{F\} \\ = \iint_D F(x, y) \delta(p - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (1)$$

其中,

$D$  为整个  $x-y$  平面;  $F(x, y)$  为图像上点  $(x, y)$  的灰度值;  $\delta$  为 Dirac 函数;  $p$  为原点到直线的距离;  $\theta$  为直线的法线与  $x$  轴的夹角。如果  $\theta$  或  $p$  为定值, 则可以得到一变换的样本。当  $\theta$  和  $p$  均变化时, 可得到定义在域  $D$  上的图像  $F$  的 Radon 变换的结果  $f$ , 同时对任意的  $\theta$  和  $p$ ,  $f$  是确定的。注意 Dirac 函数的出现使得  $F(x, y)$  的积分是在直线  $p = x \cos \theta + y \sin \theta$  上进行的。

### 3.2 Radon 变换的局限

我们在上面描述的 Radon 变换的实质是: 在平面图像域中, 将任何可能存在的直线上的像素点的灰度值进行累加, 而这些可能存在的直线用两个参数  $\theta$  和  $p$  来唯一确定。这样, 原来的图像经过变换后, 在  $\theta-p$  平面上刻画图像特征。对于原图像中的亮线, 在新的图像域中以峰值的形式表现出来。用这种方式可以检测 SAR 海洋图像中的航迹特征, 但存在一些局限, 在此我们分析了 Radon 变换方法检测航迹特征时存在的 4 个主要的局限:

(1) SAR 海洋图像中航迹有时以暗线特征出现, 对于这种类型的航迹的检测就有困难;

(2) 对于高噪声的 SAR 图像中比较短的航迹, 在检测过程中很容易被噪声掩盖;

(3) 船舶航行的航迹在 SAR 图像中近似以直线的形式出现, 但在海况条件比较恶劣的情况下, 航迹特征会有小的变形, 此时, 若噪声比较强, 检测这类航迹也有困难;

(4) Radon 变换检测航迹不能标记航迹的起点和终点。

## 4 算法改进

在海况条件比较好(风速比较小、海面相对比较平静)的情况下, 船在海面上航行时留下的航迹很明显, 在卫星 SAR 图像中, 背景暗而航迹亮。如果我们定义航迹像素点的灰度值与 SAR 图像的平均灰度值为信噪比的话, 此类图像的这一信噪比是很高的。此时, 运用改进了的局部 Radon 变换方法来检测船舶的航迹特征, 效果是很好的。实际上, 海况的变化是很复杂的, 而我们要对海运交通进行监测、对海上非法走私进行监测、对海上灾情进行监测时, 要求监测是连续进行的, 特别是在天气比较恶劣的情况下, 正是这种监测发挥重要作用的时候。在海况条件恶劣时, 我们得到的海洋 SAR 图像的信噪比低, 有时航迹还稍有弯曲(图 2)。

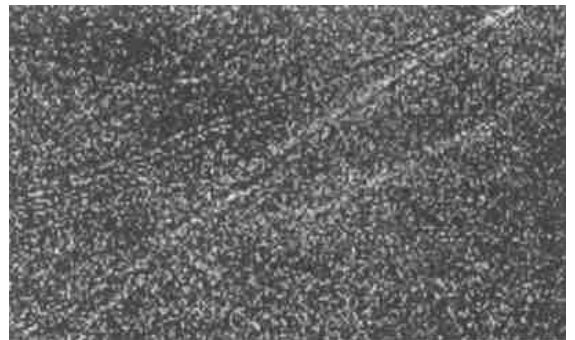


图 2 船的航迹的 ERS-1 SAR 图像

Fig. 2 ERS-1 SAR Image with ship wake

图 2 所示这类海洋 SAR 图像背景噪声强, 正如上面我们分析的那样, 这类高噪声的图像是经常碰到的, 为此我们提出一种思路来解决这一问题。对于分辨率为  $25\text{m}$ 、尺寸为  $4000 \times 4000$  像素的 ERS-1

SAR 标准图像,先将其分割成若干块,为避免航迹在交接处被切断,分割的图像相互要有重叠。对于分割出来的图像,可先进行预处理,这一步完成噪声的抑制和突出边界,然后应用生理视觉静态边界算法提取静态边界,最后再用 Radon 变换方法来检测航迹特征。

### 4.1 图像的预处理

针对卫星遥感 SAR 图像的预处理方法很多。为了抑制斑点噪声,可用空域的低通滤波器作用于 SAR 图像,中值滤波器和均值滤波器都是这一类型的,操作起来简单易行,运算速度快。我们在此用 Prewitt 算子进行滤波来抑制噪声并突出边界。

### 4.2 基于生理视觉静态边界轮廓提取算法

针对静态图像处理过程的 SBCS(Static Boundary Contour System)模型<sup>[5]①</sup>,是分两个步骤来完成的,最终的结果是突发分割边界的完成。其中第 1 步,是由称为 SOC (Static Oriented Contrast)的滤波器完成,它决定在输入中对比度差别的局部偏好方位。第 2 步被称为 CC 回路 (Cooperative-Competitive Loop),它锐化、组群、选取边缘,最后完成边界(图 3)。

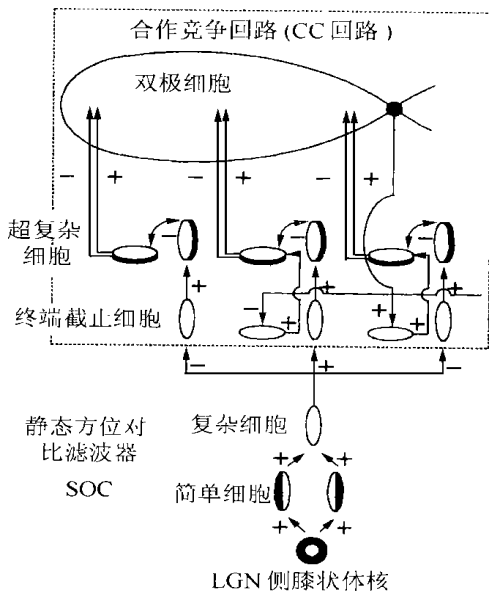


图 3 静态边界轮廓系统(SBCS)模型

Fig. 3 Static boundary contour system model

在静态 BCS 中,从侧膝状体核出来的信号,经过敏感于方位对比的简单细胞,再由复杂细胞把相同的对比方位但方向相反(黑→白、白→黑)的简单细胞的输出信号组合后传递给 CC 回路,组合后的

信号不再敏感于对比度的方向。CC 回路中,先由终端截止细胞以 ON-OFF(中心 ON 周边 OFF)加权方式在空间上竞争为第 1 竞争过程,再由超复杂细胞在方位上进行竞争为第 2 竞争过程。经过两个竞争过程后,信号送入双极细胞进行长距合作。双极细胞在大尺度上作用,通过反馈对竞争过程中在远空间距离有相似对比方位的细胞进行加强,而抑制对比方位差异较大的细胞,使得具有相似对比方位的细胞合作一致的在竞争中取得胜利,直到边界基本完成。

静态边界轮廓系统的模型,包括 SOC、第 1 竞争、第 2 竞争、长距合作几个过程。这里我们只是对它们作简要的描述,若要作更详细的了解,具体可以参见文献[5]、[6]。

#### 方位感受器(SOC 输出)

定义一个椭圆域的掩模(或称为方位感受野),中心位于  $(i, j)$ ,方位为  $k$ 。以  $L_{ijk}$ 和  $R_{ijk}$ 表示以椭圆域长轴为界的左右两部分(黑白部分)。以  $I_{pq}$ 表示  $(p, q)$ 处前处理的输入,则位置  $(i, j)$ 方位  $k$  的掩模输出  $J_{ijk}$ 为:

$$J_{ijk} = \frac{\max(U_{ijk} - \alpha V_{ijk}, 0) + \max(V_{ijk} - \alpha U_{ijk}, 0)}{1 + \beta(U_{ijk} + V_{ijk})} \tag{2}$$

其中:

$$U_{ijk} = \sum_{(p, q) \in L_{ijk}} I_{pq} \quad V_{ijk} = \sum_{(p, q) \in R_{ijk}} I_{pq}$$

方程(2)分子中两部分之和表示  $J_{ijk}$ 是敏感于左右两部分接收输入总量的对比,而不是方向的对比。也就是说,它对于黑→白、白→黑是不敏感的,以此来得到对于静态边界最大的响应,  $\alpha, \beta$ 为加权系数。

#### 第 1 竞争阶段

第 1 竞争阶段是在方位相同空间位置不同的方位感受器之间,以中心 ON-周边 OFF 的形式进行相互作用的过程。在固定的方向  $k$  上,若位置  $(i, j)$  的活动强度表示为  $w_{ijk}$ ,则输入  $J_{ijk}$ 激活  $w_{ijk}$ 而抑制满足  $(p - i)^2 + (q - j)^2 \leq R^2$  的周边邻域  $w_{pqk}$ 。设  $J_{ijk}$ 对此层的作用为  $f(J_{ijk})$ ,则方程如下:

$$\dot{w}_{ijk} = -w_{ijk} + I + f(J_{ijk}) + v_{ijk} - \sum_{(p, q)} f(J_{pqk}) A_{pqij} \tag{3}$$

其中  $I$  是常数,为下一竞争阶段对所有的  $w_{ijk}$  同等地提供非抑制性的激活。  $A_{pqij}$ 表示  $(p, q), (i, j)$

① 王正志,沈实. GKD-1 生理视觉计算机图像处理系统技术报告,1995.

$j$ ) 两点间相互作用的强度, 在  $(p-i)^2 + (q-j)^2 \leq R^2$  圆域内取正常数  $A$ , 其他区域取 0。  $f(J_{ijk})$  可以选择为与  $J_{ijk}$  成比例。  $v_{ijk}$  是来自长距合作的反馈信号, 初始时设为 0。

## 第 2 竞争阶段

第 2 竞争阶段是对同一位置的各个方位起反应的 第 1 竞争输出细胞之间归一化的相互推拉处理过程。这个过程用如下公式来描述。

$$y_{ijk} = \frac{\sum_m w_{ijm} (BC_{nk} - DE_{nk})}{1 + \sum_m w_{ijm} (C_{nk} + E_{nk})} \quad (4)$$

其中:

$$C_{nk} = C \exp[-\mu(m-k)^2] \quad (5)$$

$$E_{nk} = E \exp[-\nu(m-k)^2] \quad (6)$$

输入  $w_{ijm}$  对于  $y_{ijk}$  的激活与抑制均随  $m$  与  $k$  的差值指数下降, 当  $m$  等于  $k$  或接近于  $k$  时最大。当  $\mu, \nu$  选择合适时 ( $\mu > \nu$ ), 使得  $C_{nk}, E_{nk}$  及它们差值与  $(m-k)$  的关系满足, 当  $m=k$  (或接近  $k$ ),  $w_{ijm}$  对  $y_{ijk}$  产生最大激活; 当  $(m-k) = K/2$  (或接近  $K/2$ , 表示  $m$  与  $k$  垂直或接近垂直),  $w_{ijm}$  对  $y_{ijk}$  产生最大抑制。

## 长距合作(双极细胞)

经过超复杂细胞的方向竞争出来的信号, 进入长距合作阶段, 对双极细胞产生激发。合作的思想是, 当双极细胞两端对某一方位都产生足够的正刺激时, 合作信号才发生。因此, 对方位  $k$ , 当  $y_{ijk}$  产生激活信号  $f(y_{ijk})$  的同时, 与它垂直的方位细胞输出  $y_{ijk}$  产生抑制信号  $-f(y_{ijk})$ 。这样, 当双极细胞一端激活一端抑制时, 它们的合作就不能发生。方程如下:

$$z_{ijk} = g \left\{ \sum_{(p,q,r)} [f(y_{pqr}) - f(y_{pqR})] F_{pqij}^{(r,k)} \right\} + g \left\{ \sum_{(p,q,r)} [f(y_{pqr}) - f(y_{pqR})] G_{pqij}^{(r,k)} \right\}; \quad (7)$$

$$R = r \pm 90^\circ$$

这里,  $r$  是与  $k$  方位大致相同的临近方位。例如值可以取到从  $k-1$  到  $k+1$ 。  $g(s)$  为符号函数, 当  $s$  为有限正数时  $g(s)$  取正。如下:

$$g(s) = \frac{H[s]^+}{K + [s]^+} \quad (8)$$

感受野方程:

$$F_{pqij}^{(r,k)} = \begin{cases} \exp[-2(N_{pqij}/P_0 - 1)^2] \\ \times [|\cos(Q_{pqij} - r)|]^M \end{cases}$$

$$\times [\cos(Q_{pqij} - k)]^N]^+ \quad (9)$$

$$G_{pqij}^{(r,k)} = \begin{cases} -\exp[-2(N_{pqij}/P_0 - 1)^2] \\ \times [|\cos(Q_{pqij} - r)|]^M \\ \times [\cos(Q_{pqij} - k)]^N]^+ \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$N_{pqij} = \sqrt{(p-i)^2 + (q-j)^2} \quad (11)$$

$$Q_{pqij} = \arctan\left(\frac{q-j}{p-i}\right) \quad (12)$$

参数  $P_0$  决定双极细胞顶点中心位置,  $M, N$  (取奇数) 决定双极细胞的尖度。

## 输入(完全的静态边界)

从双极细胞出来的信号, 经过一个门限的作用, 各方位值之和就是静态边界的输出。如下式:

$$h(z) = L[z - Z_0]^+ \quad (13)$$

$$O_{ij} = \sum_k h(z_{ijk}) \quad (14)$$

同时, 从双极细胞出来的信号, 激活一个中心 ON 一周边 OFF 细胞后, 反馈回前面的竞争阶段。这个反馈信号表示为:

$$v_{ijk} = \frac{h(z_{ijk})}{1 + \sum_{(p,q)} h(z_{pqk}) W_{pqij}} \quad (15)$$

其中  $W_{ijpq}$  如同  $A_{ijpq}$ , 表示  $(p, q)$  ( $i, j$ ) 两点间的作用强度, 在  $(p-i)^2 + (q-j)^2 \leq R^2$  圆域内取正常数  $W$ , 其他区域取 0。

这一处理过程应用到我们的航迹检测问题中, 很好地解决了 Radon 变换的几个缺陷。生理视觉的静态边界提取算法, 同时提取亮边界和暗边界, 因此暗的航迹同样可以被检测出来。由于 SBCS 模型中的 CC 回路中存在长距合作过程, 即使在有噪声引起航迹有断续或者是因为风的作用引起航迹有小的严曲时, 均不影响航迹的检测。

## 5 结果分析

对于图 2 所示的 ERS-1 SAR 海洋图像, 噪声很强, 航迹也是以略弯的暗线的形式出现, 我们在只用 Radon 变换技术的情况下只能检测到下面一条航迹。图 4 是运用我们在上面定义的模板对图 2 所示的 ERS-1 SAR 海洋图像进行滤波得到的结果, 从结果我们不难看出噪声抑制的效果比较好, 航迹边界特征也更为明显了, 为下一步的静态边界的提取作好了准备。图 5 是用基于生理视觉的静态边界轮廓系统处理滤波后的图像得到的结果, 由于 SAR 图像

不像一般的实物图像那样边界分析,所以处理后的图像中有很多杂细的边界,但这并不影响航迹位置特征的检测。应用 Radon 变换技术检测到的航迹在图 8 中给出,从图中我们可以知道航迹的方向和航迹的夹角(此航迹夹角为  $13^\circ$ )。图 6 为不同角度方向上 Radon 变换的峰值曲线,其中,横轴表示不同的方向,纵轴表示 Radon 变换域中对应方向上的峰值,从中可以看出  $110^\circ$  和  $123^\circ$  的方向上有航迹。为了与单纯运用 Radon 变换方法进行比较,我们在图 7 和图 9 中给出了与图 6 和图 8 相对应的结果,从中我们不难发现噪声抑制和静态边界轮廓系统处理的改进效果。我们运用这种检测航迹的思路对其它的卫星 SAR 海洋图像进行了处理,结果也很理想。

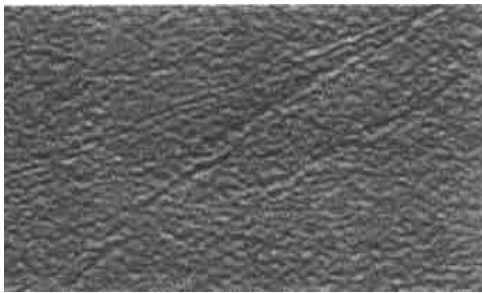


图 4 模板滤波结果

Fig. 4 The result after model filtering

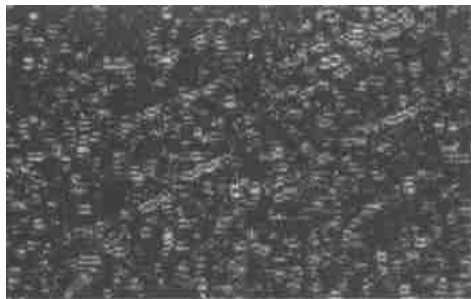


图 5 SBCS 提取的静态边界

Fig. 5 Static boundary resulted from SBCS

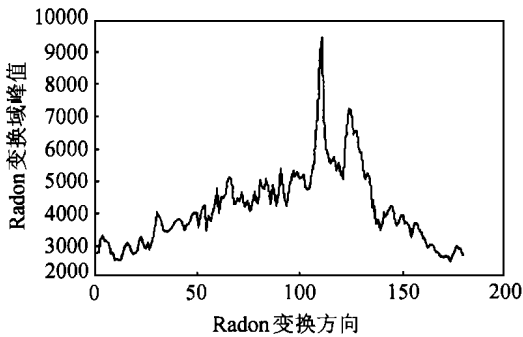


图 6 滤波图像不同方向 Radon 变换

Fig. 6 Peak value curve of filtered image's radon transform in different direction

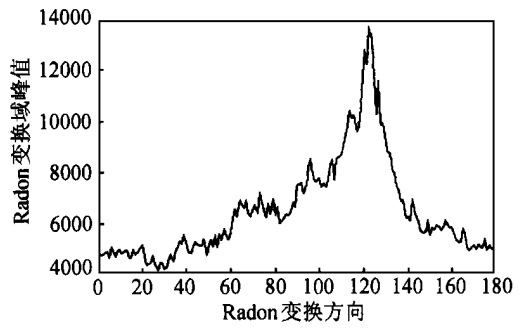


图 7 原始图像不同方向 Radon 变换

Fig. 7 Peak value curve of original image's radon Transform in different direction

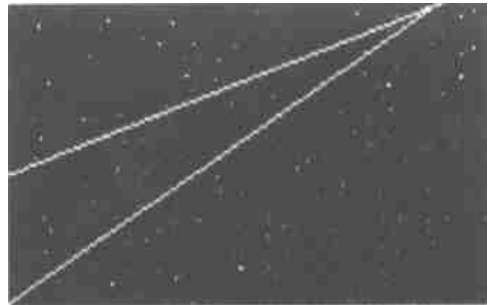


图 8 新方法检测到的航迹

Fig. 8 Detected ship wake by new method

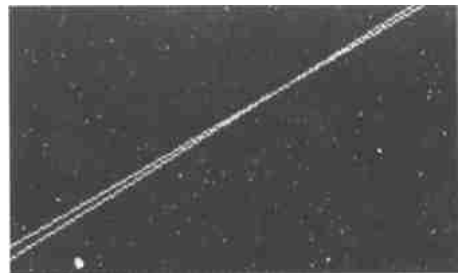


图 9 应用 Radon 变换检测到的航迹

Fig. 9 Detected ship wake by radon transform

### 参考文献 (References)

- [1] James D·Lyden, Robert R·Hammond, David R·Lyzenga, R·Shuchman· Synthetic Aperture Radar imaging of surface ship wakes [J]· *J· Geo· Res*· **93**·
- [2] Anthony C· Copeland, Gopeland Ravichandran, Mohan M· Trivedi· Localized Radon Transform-Based Detection of Ship Wakes in SAR Images [J]· *IEEE Trans· on Geosci· Remote Sensing*, 1995, **33** (1)·
- [3] Jinfei Wang, Philip J· Howarth· Use of the Hough Transform in Automated Lineament Detection [J]· *IEEE Trans· on Geosci· Remote Sensing*, 1990, **28**·
- [4] Stanley R· Deans· Hough Transform from Radon Transform [J]· *IEEE Trans· on pattern analysis and machine intelligence*·
- [5] Shen Shi, Wang Zhengzhi, Hu Dewen· *Computer Image Process System Based on Biological Vision* [M]· High Technology Letters, 1996. [沈实,王正志,胡德文· 基于生理视觉的计算机图像处理系统 [M]· 高技术通讯, 1996.]

## Algorithm to Detect the Ship Wake from ERS-1 SAR Ocean Imagery

Zhou Hong-jian ZHOU Zong-tan LI Xiang-ying WANG Zheng-zhi LIU Ya-lang

(Remote Sensing Group, Department of Automatic Control, NUDT Changsha, 410073, China)

**Abstract:** Detection of the ship wake from SAR imagery is very significant. Most of the methods detecting ship wakes from SAR imagery are based on Radon transform appending condition test using prior knowledge. In the paper we introduce the patterns of three main kinds of ship wakes. Then we analyse four limitations of the method that applies Radon transform to detect ship wake in SAR ocean images. In order to improve the limitations we describe another method to detect V-shape ship wake. At first, we filter the SAR images to suppress the speckle noise, then, use Static Boundary Contour System based on biological vision to process the filtered images. Finally Radon transform is applied to enhance the ship wake. We describe two parts of the Static Boundary Contour System in the paper. The first part is Static Oriented Contrast which is used to determine the local good orient of the contrast difference in the input, and the second part is Cooperative-Competitive Loop which is used to sharpen, group and select the edge. We test the algorithm by using ERS-1 SAR ocean images. The result deriving from the new algorithm is better than that from simple Radon transform.

**Key words:** detection of ship wake; SAR ocean image; radon transform; biological vision