

应用 Radon 变换方法检测窄 V 形船舶航迹

周红建 陈 越

(空军第八研究所, 北京 100076)

王正志 彭雄宏

(国防科技大学自动控制系遥感组, 长沙 410073)

摘 要 SAR 航天遥感图象中的舰船航迹影象包含有舰船的行进速度、行进方向、船体长度等重要信息, 而充分利用与运动舰船航迹相关的信息资源, 能够加强对海上舰船航行的监测能力. 通过对舰船航迹在卫星遥感 SAR 图象中不同模式及 Radon 变换原理和特性的分析, 提出了应用 Radon 变换对 SAR 图象中的窄 V 形舰船航迹进行了检测的方法, 通过实例测试, 效果比较理想.

关键词 合成孔径雷达 舰船航迹检测 Radon 变换

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)11-0901-05

Apply Radon Transform to Detect Narrow-V Ship Wake in SAR Images

ZHOU Hong-jian, CHEN Yue

(No. 8. Research Institute PLAAF, Beijing 100076)

WANG Zheng-zhi, PENG Xiong-hong

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

Abstract We can get much useful information by remote sensing sensor. Wake disturbances contain information about the generating vessels speed, course, length. Space-based sensor system could provide naval force with an enhanced capability for surveillance of ship traffic in open ocean areas if the information content of signatures associated with the hydrodynamic wake of a moving ship can be exploited. In this paper, the detection of wakes obtained from satellite images using synthetic aperture radar techniques is discussed. First we analyze the patterns of ship wake in SAR images. Then it is concluded that the problem can be considered a detecting line problem, and we describe the theory and the characteristics of Radon Transform briefly. Finally, we apply Radon Transform to detect narrow-V ship wake from some ERS-1 SAR images. The results show that the algorithm is effective.

Keywords Synthetic aperture radar, Detection of ship wake, Radon transform

0 引言

合成孔径雷达(SAR)是获取遥感信息的主要遥感传感器之一. 由于 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象, 因此 SAR 被广泛地应用于军事侦察和地面检测^[1]. 目前, SAR 图象中的舰船航迹检测已成为国际遥感界着手研究的一个

重要课题, 因为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等. 本文就卫星遥感 SAR 图象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 图象上几种不同模式的舰船航迹的特征, 然后讨论了从 SAR 图象上窄 V 形航迹和 Kelvin 航迹中能够获取到的潜在信息, 并针对窄 V 形航迹特征, 应用 Radon 变换方法进行了检测测试. 从测试的结果来

看,在局部范围内,应用 Radon 变换方法检测窄 V 形舰船航迹不失为一种有效的方法.

1 SAR 图象中舰船航迹的模式特征

在不同的海况条件下,运动船的不同航迹现象在合成孔径雷达图象上呈现出不同的特征模式.这些特征大致可分为如下 3 类^[2]:(1)由舰船产生的表面波;(2)包含相对比较持久而不传播水流的湍流或漩涡;(3)由舰船产生的内波.一般湍流航迹可以通过与周围的波相互作用,而被 SAR 拍摄到,而舰船产生的内波航迹也可通过与小尺度表面波的相互作用而被 SAR 拍摄到.

SAR 观测到的舰船所产生的的表面波航迹由两个子类组成,其中一个包含短波(厘米波)的窄 V 形航迹,它可通过 Bragg 散射机制被 SAR 观测到,在 SAR 图象上是以亮的、窄 V 形航迹的形式出现的;另一类则包含长波(分米波),它可形成典型的 Kelvin 波.尽管对前一种子类有很多不同的看法,但有证据表明,如今有很多观测到的航迹均属于这一类,并能够用一个简单的启发式模型来解释它.尽

管还有一些关于形成 Kelvin 波的长重力波的 SAR 成像问题还没有解决,但相对来说,对第二个子类大家有了比较统一的认识,也比较好理解.

上面提到窄 V 形航迹可通过 Bragg 散射机制被 SAR 观测到,所谓 Bragg 散射是指 SAR 发射的雷达波与海洋表面波相互作用所产生的雷达波的散射现象. Lyden 在基于 Bragg 散射理论的基础上,提出了窄 V 形航迹的模型^[2],他在提出窄 V 形航迹的模型时,假设在船的航道两侧所观测到的亮回波是由船行进时产生的表面波引起的,由于表面波是从产生点向各个方向传播的,因此根据模型,在 SAR 图象上观测到的窄 V 形航迹张角的一半 α (见图 1)由下式确定

$$\alpha = \tan^{-1} \left| \frac{C_g}{V_s} \cos \varphi \right| \tag{1}$$

其中, C_g 是 Bragg 波的族速度(Group velocity), V_s 是船的速度, φ 是雷达相对于船的航迹方位的方向角.

由于窄 V 字形航迹张角很小(α 一般为 $2^\circ \sim 3^\circ$),故式(1)可改写为

$$\alpha = (C_g / V_s) \cos \varphi \tag{2}$$

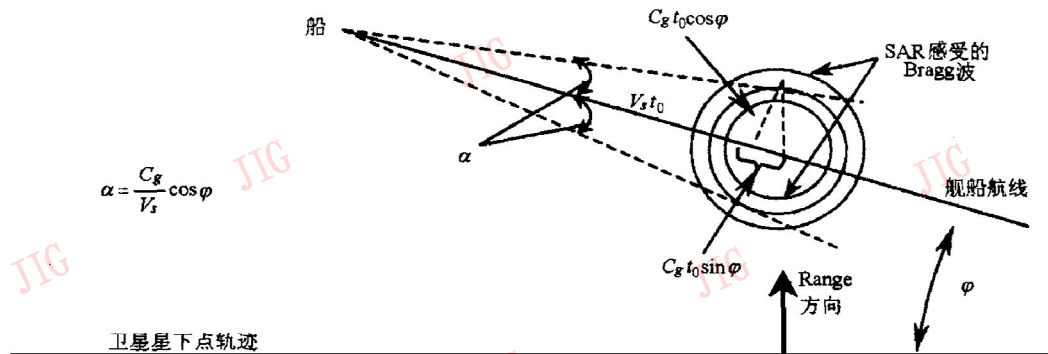


图 1 舰船航行产生 Bragg 波的定位关系图

α —舰船航迹张开的半角; C_g —Bragg 波的族速度; V_s —舰船的航行速度;
 t_0 —时间; φ —舰船航行相对于卫星星下点轨迹的夹角

事实上, SAR 图象中反映出舰船航迹的这一张角受很多成像条件的影响,其中第一个影响是如果运动目标或模式(如舰船航迹)的速度相对于 SAR 平台的速度来说,是不可忽略的,则这些目标在 SAR 图象中将会旋转,当舰船航行的方向与 SAR 平台的飞行方向相同的时候,扫描变形将引起 SAR 图象中航迹张角变小,相反,当舰船航向与 SAR 平台的飞行方向相背离的时候,扫描变形将会引起 SAR 图象中航迹张角增大,而且这一影响的幅度直接与舰船和平台的相对速度有关,但对天基平台这一影响是可以忽略

的;第二个影响是由于舰船在距离方向上的速度分量引起的方位偏移;而影响航迹张角预测的第三个因素是 Bragg 波长随入射角的不同而有变化.另外,随着窄 V 形航迹的扩散,拍摄图象的入射角将改变,因此满足 Bragg 准则的表面波波长也将相应地发生变化.由于表面波的族速度直接与其波长有关,因此,随着表面波在舰船后面距离的变化, SAR 图象上窄 V 形波的张角是增大还是减小,将取决于舰船的航向相对于雷达波方位方向的夹角.

舰船产生的表面波的第二子类是由长的重力波

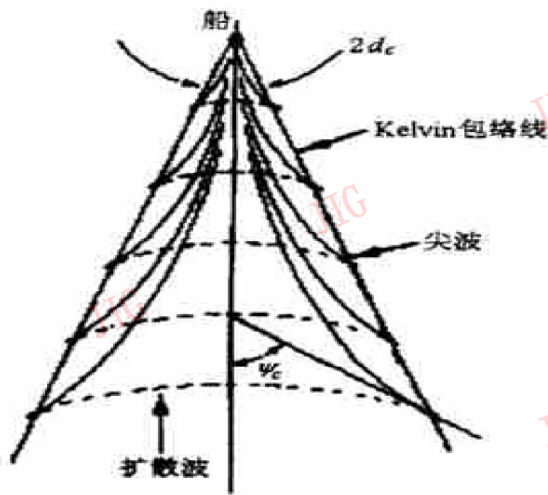


图 2 典型 Kelvin 航迹成分几何关系图

组成的, 而这一重力波则可形成典型的 Kelvin 航迹. 图 2 给出了 Kelvin 航迹系统的示意图. 由沿舰船的航道方向产生的波前相干, 形成两个波阵面集, 它们构成 Kelvin 航迹体系. 其中, 波长小于 λ 的波前相干所形成波阵面称为尖波(图 2 中弧形实线), λ 为

$$\lambda = \frac{4\pi V_s^2}{3g} \quad (3)$$

其中, V_s 为船的速度, g 为重力加速度, 这些波阵面与船航道方向的夹角小于 ψ_c :

$$\psi_c = \tan^{-1} \sqrt{2} = 54.7^\circ \quad (4)$$

而波长大于 λ 的波前相干则形成与船航道方向的夹角大于 ψ_c 的波阵面, 即扩散波(图 2 上虚线), 这些波中波长最长的是那些船尾波(stern wave), 该船尾波的波阵面与船的航道垂直, 并以与船航行速度相同的传播速度进行传播. 它的波长为

$$\lambda_s = 2\pi V^2/g \quad (5)$$

作为最长的波, 在 SAR 图象中, 它经常是最容易分辨的. 在测量到它的波长之后, 就可根据式(5)计算出船的速度.

2 Radon 变换

2.1 Radon 变换定义

Radon 变换可以定义在任意维变量空间域^[3,4], 若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

$$f(\theta, \rho) = R\{F\} = \iint_D F(x, y) \delta(\rho - x \cos\theta - y \sin\theta) dx dy \quad (6)$$

其中, D 为整个 $x-y$ 平面; $F(x, y)$ 为图象上点 (x, y)

的灰度值; δ 为 Dirac 函数; ρ 为原点到直线的距离; θ 为直线的法线与 x 轴的夹角. 如果 θ 和(或) ρ 为定值, 则可以得到一变换的样本. 要获得 Radon 变换的全变换, 即为 θ 和 ρ 在定义域内任意变化所得到的相应 f 值, 且对特定的 θ 和 ρ , 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 $\rho = x \cos\theta + y \sin\theta$ 上进行的.

2.2 特性分析

在进行详细的计算之前, 根据定义直接分析 Radon 变换的简单特性是很有用的. 对于数字图象处理来说, 考虑 $f(\theta, \rho)$ 是定义在 $\theta-\rho$ 平面上的函数, $F(x, y)$ 是定义在 $x-y$ 平面上一矩形域的函数. 它们的几何关系如图 3 所示, 其对应定义域和值域如图 4 所示.

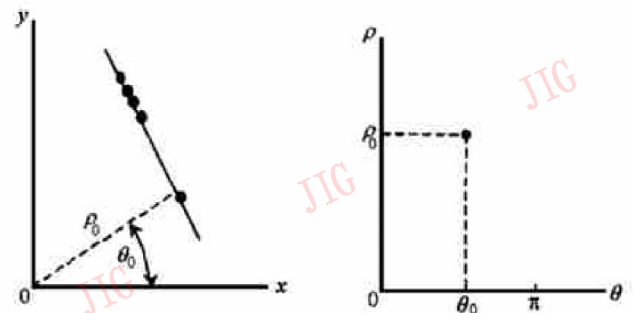


图 3 $x-y$ 坐标系和 $\theta-\rho$ 坐标系的几何关系

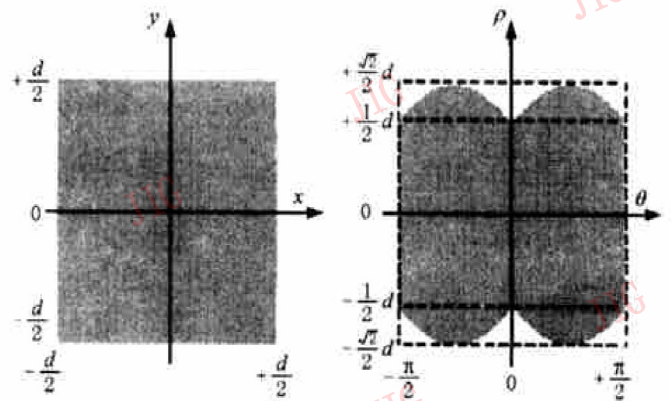


图 4 $d \times d$ 图象进行 Radon 变换

通过分析可知:

(1) 如果 F 集为一点 (x_0, y_0) , 即 F 为单点集, 则 f 是非零的正弦曲线 $\rho = x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta$, 将 $F = \delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$ 直接代入式(6)即可得到.

(2) 若在 $\theta-\rho$ 平面上, 一个给定点 (θ_0, ρ_0) 对应于 $x-y$ 平面上的直线 $\rho_0 = x \cos\theta_0 + y \sin\theta_0$, 其可由式(6)中令 $\theta = \theta_0$ 以及 $\rho = \rho_0$ 而得.

(3) 将 $x-y$ 平面上共线于 $\rho_0 = x \cos\theta_0 + y \sin\theta_0$ 的点映射到 $\theta-\rho$ 平面上, 若是一个正弦曲线集, 则这些正弦曲线均通过点 (θ_0, ρ_0) .

(4) 在 $\theta-\rho$ 平面曲线 $\rho = x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta$ 上的点均对应于 $x-y$ 平面上所有通过点 (x_0, y_0) 的曲线。

3 仿真测试与结论

舰船航迹 SAR 图象中包含有很多有关产生航迹的舰船本身的有用信息,充分提取和利用这些信息尤为重要。事实上,这些信息首先是可以从航迹确定舰船航行的大致方向;其次,由于舰船目标在 SAR 图象中是以亮斑的形式出现,因此可以从检测到亮斑的大小和图象的分辨率来估计目标的大小;另外,还可以通过多种途径来对舰船的航行速度进行估计,即首先,可以从窄 V 形航迹的张角以及 Bragg 波的族速度来估计;其次,可以根据舰船目标在距离方向上的漂移以及卫星的有关参数来估计;第三,还可以由尾波的波长,直接进行估计,但以上这些工作的前提是要检测到舰船航迹。

在仿真实验中应用 Radon 变换对舰船航迹

SAR 图象进行测试。根据上面所分析的 Radon 变换特性(2)可知, SAR 图象中的任意一条线都可以用极坐标中的 θ 和 ρ 来唯一确定,这样, SAR 图象经变换后航迹则对应于变换域中点 (ρ, θ) 。图 5 为合成 SAR 图象的检测情况。其中(a)为窄 V 形舰船航迹的 SAR 图象;(b)为 Radon 变换图象;(c)为应用 Radon 变换检测的结果;(d)为各个角度方向上作 Radon 变换的峰值曲线。从图 5(b)中可看到两个明显的亮点,它们分别对应于航迹的两条臂,从图 5(d)中也可以看到这两个峰值点。图 6 和图 7 分别为两幅真实 SAR 图象中船舶航迹检测的例子。

从上面的处理结果来看,将 Radon 变换用来检测局部范围内的 SAR 图象中的舰船航迹是可行的。笔者也曾尝试应用常规的边界检测算法来进行检测(如应用常规的 Sobel 算子和 Roberts 算子来检测舰船航迹特征),但效果不理想,这主要是由于 SAR 图象的斑点噪声比较强,因而使得常规的边界检测算法失效,可见 Radon 变换能够克服这方面的不足。

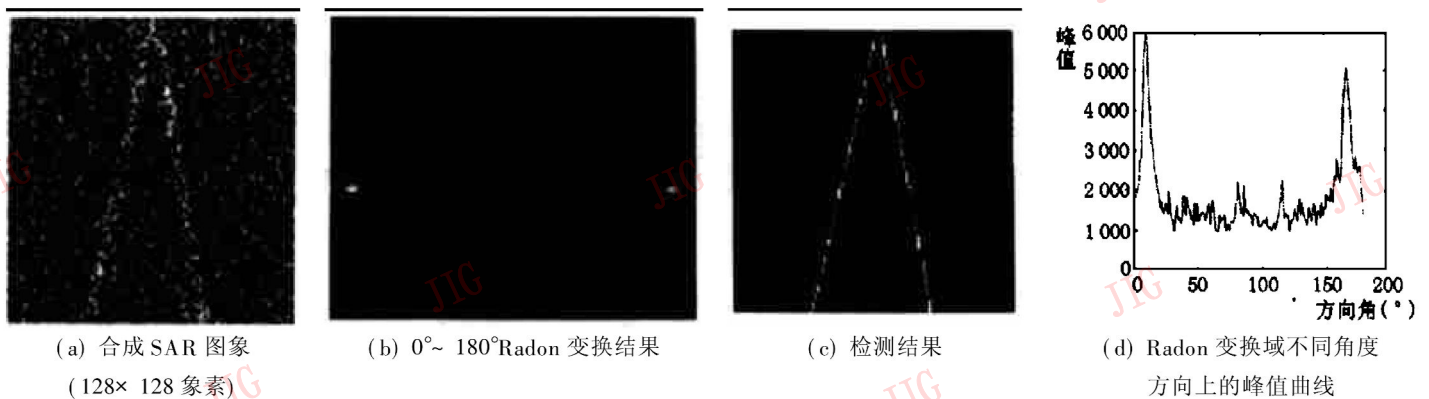


图 5 合成高噪声 SAR 图象窄的 V 字形船舶航迹检测结果

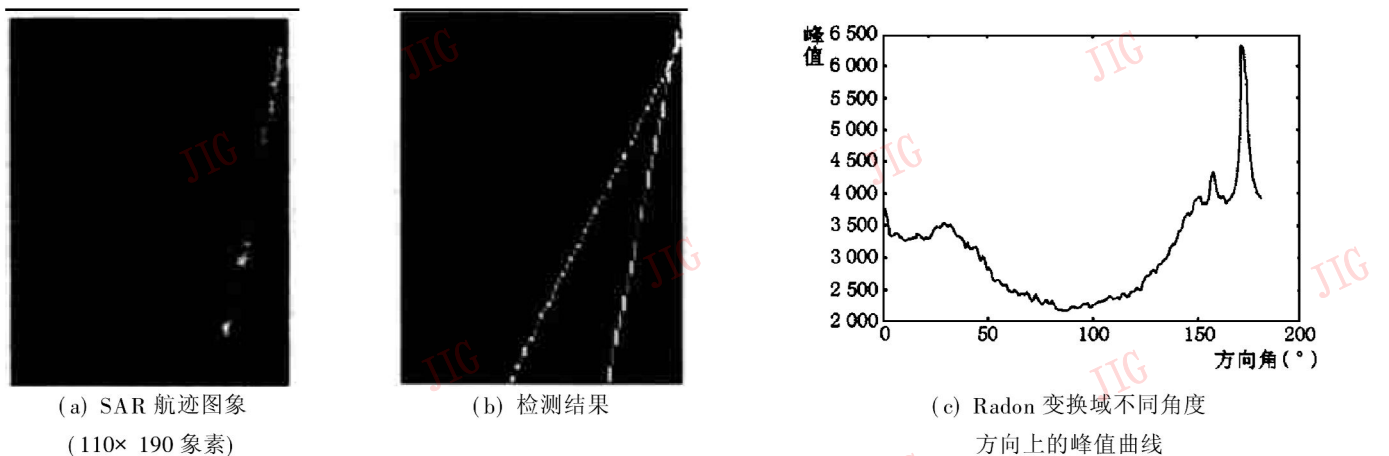
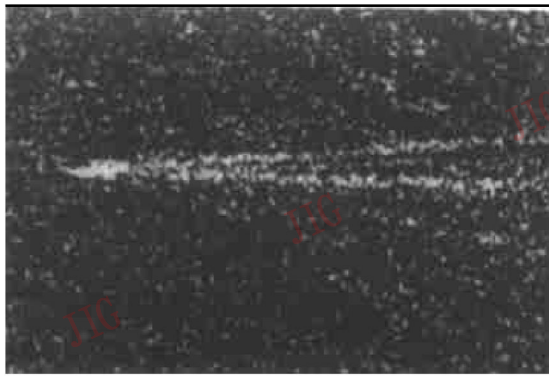
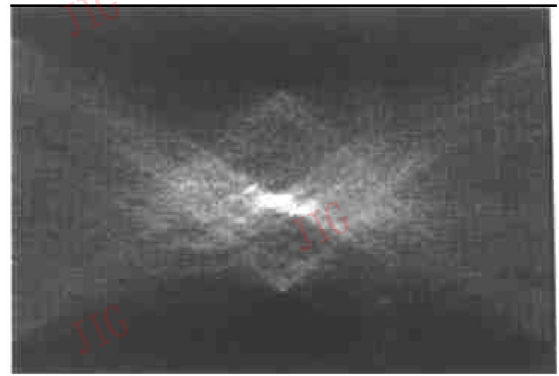


图 6 SAR 图象 V 字形船舶航迹检测实例 1



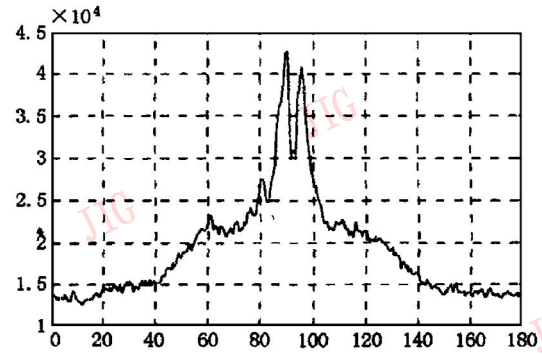
(a) SAR 航迹图象(300× 200 像素)



(b) 0°~ 180°Radon 变换结果



(c) 检测结果



(d) Radon 变换域不同角度方向上的峰值曲线

图 7 SAR 图象 V 字形船舶航迹检测实例 2

参 考 文 献

- 1 Gasparovic R F. Observation of ship wakes from space. AIAA-92-1354.
- 2 Lyden James D, Hammond Robert R, Lyzenga David R *et al.* Synthetic aperture radar imaging of surface ship wakes. J. Geo. Res. 1988, 93: 12293~ 12303.
- 3 Jinfei Wang, Howarth Philip J. Use of the hough transform in automated lineament detection , IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 561~ 566.
- 4 Deans Stanley R. Hough transform from radon transform. IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence, 1981, PAMI-3(2): 185~ 188.



周红建 1972 年生, 1994 年毕业于国防科学技术大学自动控制系飞行器控制与试验统计专业, 1999 年获该校博士学位. 目前研究方向为遥感图象处理、遥感信息处理、海洋卫星遥感 SAR 图象中的舰船航迹检测.



陈 越 1968 年生, 工程师, 1994 年获国防科学技术大学自动控制系硕士学位. 目前感兴趣的方向为计算机图象处理、三维地形数据库建模与仿真.



王正志 1945 年生, 1984 年获美国莱斯大学博士学位, 现为国防科学技术大学自动控制系教授, 博士生导师. 目前研究领域包括遥感信息处理、海洋卫星遥感 SAR 图象中的舰船航迹检测、图象处理、智能控制、 H_{∞} 控制、自适应控制、神经网络、模式识别及机器学习.



彭雄宏 1973 年生, 博士生, 1995 年获国防科学技术大学自动控制系学士学位. 目前感兴趣的方向为计算机视觉、生物视觉计算机图象处理.