

一种基于广义 Hough 变换的遥感图像船舶横波 自动检测与速度估计方法

汤亚波,王希强,徐守时

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系,安徽 合肥 230027)

摘要 :从 Kelvin 横波航迹的形成原理出发,详细推导了 Kelvin 横波波峰模型,提出一种基于广义 Hough 变换的遥感图像船舶横波自动检测方法,取得了较好的检测效果,并依据检测结果对船舶速度进行了估计。所述方法对海上船舶运输和港口管理等具有重要意义。

关键词 :广义 Hough 变换, Kelvin 横波检测, 船舶速度估计

中图分类号 :TP79 文献标识码 :A

An Automatic Method for Transverse Wave Detection and Vessel Velocity Estimation Based on Generalized Hough Transform in Remote Sensing Images

TANG Ya-bo, WANG Xi-qiang, XU Shou-shi

(Department of Electronics Engineering and Information Science, Univ. of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract :According to the formation principle of the Kelvin Transverse Wave (KTW), the KTW crest model was elaborated and analyzed. An automatic method for KTW detection and vessel velocity estimation was put forward on the basis of generalized Hough transform. The KTW detection results in remote sensing images were satisfactory and the vessel velocities were thus estimated. The method presented here will be helpful in marine transportation and harbor management.

Key words :generalized Hough transform, Kelvin transverse wave detection, vessel velocity estimation

遥感图像上运动船舶的航迹特征与航速密切相关,近年来人们提出了多种方法^[1-2]来进行遥感图像船舶航迹检测和速度估计,主要有:根据窄 V 字形航迹估计船舶速度,根据航迹波高谱信息估计航速,根据运动船舶多普勒效应估计船舶速度,根据 Kelvin 横波检测估计船舶速度。其中前三种方法仅适用于 SAR 图像,而根据 Kelvin 横波检测的船舶速度估计方法对可见光和 SAR 图像均能适用。

1 Kelvin 横波与船舶速度

船舶运动时形成的 Kelvin 航迹(图 1^[3])主要分布在其后方约 39°的 V 形区域内。Kelvin 波为重力波,由纵波和横波组成。其中横波的波阵面与航迹垂直,在船舶航迹线上的移动速度(相速度)与船舶速度相同,可通过 Kelvin 横波波长 λ 估计船舶速度(g 为重力加速度)^[2]:

$$v = \sqrt{g\lambda/2\pi} = 1.24\sqrt{\lambda} \quad (1)$$

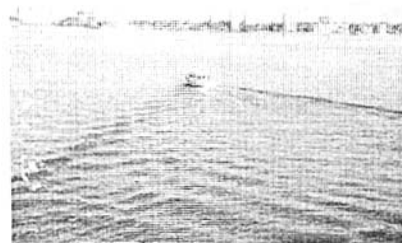


图 1 Kelvin 波^[3]
Fig.1 Kelvin wave

* 收稿日期 2005-09-05

基金项目:中科院支撑技术资助项目(42201020501);中科院知识创新方向性资助项目(kzcx0101)

作者简介:汤亚波(1968—)男,讲师,博士生。

2 Kelvin 横波波峰模型

文献[5]中未经说明,直接给出了一个参数形式表示的 Kelvin 横波波峰模型。本文从 Kelvin 波的形成原理出发,对此进行较详细的推导。

2.1 线性自由面水波

船舶引起的水波波动主要发生在水的表面附近,也称为水表面波。假定水是不可压缩的理想流体,重力场中处于静止状态液体的自由面为水平面。设自由面为 XOY 平面, Z 轴垂直向上,建立直角坐标系。设水底深度为 $-H$,扰动后自由面形状为 $z = \zeta(x, y, t)$,则速度势满足拉普拉斯方程和下列条件:

$$\nabla^2 \varphi(x, y, z, t) = 0 \quad (2)$$

(1) 底面条件:在底面 $z = -H$ 上,流体不可穿透。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad (z = -H) \quad (3)$$

(2) 线性自由面运动学和动力学条件:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (4)$$

2.2 平面进行波

平面进行波是自由面上最基本的一种波形。任意一个质点的垂直位置定义为 $z = \zeta(x, y, t)$,当在 (x, y) 坐标平面产生一系列平行波时,只需要分析 $X-Z$ 平面的波形运动方程。设 A 为波幅, k 为波数,代表 X 轴上单位长度的波的个数, ω 为频率。此时自由面波形的通式为

$$\zeta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

$$k = 2\pi/\lambda = \omega/c_p \quad (6)$$

式(6)中, λ 为波长, c_p 为相速度。则根据式(5)可以构造函数式

$$\varphi(x, z, t) = \text{Re}\{Z(z)e^{-ikx + i\omega t}\} \quad (7)$$

将式(7)代入式(2)结合深度无限的底面条件(式(3))和线性自由面条件(式(4))可得^[4]

$$\varphi = \text{Re}\{C e^{kz - ikx + i\omega t}\} \quad (8)$$

$$c_p = \omega/k = g/\omega = \sqrt{g/k} = \sqrt{g\lambda/2\pi} \quad (9)$$

2.3 Kelvin 波与横波波峰参数模型

将二维坐标下的波动方程式(5)推广到三维坐标空间,进行叠加并写成积分形式。同时参考坐标系的原点设为船舶位置(图2),以速度 v 沿 x 方向行驶,则有^[4]

$$\zeta(x, y, t) = \text{Re} \int_0^\infty d\omega \int_0^{2\pi} d\theta A(\omega, \theta) \exp[-ik(x \cos\theta + y \sin\theta) + (\omega - kv \cos\theta)t] \quad (10)$$

从位于参考坐标系的观察者来看,平面进行波是静止的,也就是说各个位置的幅度不随时间改变,所以式(10)独立于时间变量,有

$$kv \cos\theta - \omega = 0 \quad (11)$$

$$c_p = \omega/k = v \cos\theta \quad (12)$$

从而将式(10)改写为

$$\zeta(x, y, t) = \text{Re} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta A(\theta) \exp[-ik(\theta)(x \cos\theta + y \sin\theta)] \quad (13)$$

$$k(\theta) = g/v^2 \cos^2\theta \quad (14)$$

根据式(13),Kelvin 横波波峰处的坐标由式(15)决定。将式(14)代入式(15)计算后有式(16),

$$\frac{d}{d\theta} [k(\theta)(x \cos\theta + y \sin\theta)] = 0 \quad (15)$$

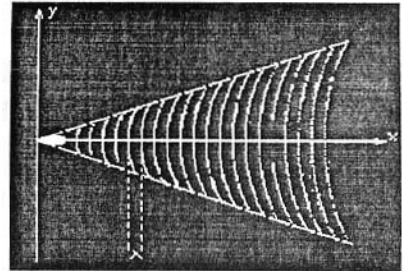


图2 船舶 Kelvin 横波波峰坐标系
Fig.2 Ship KTW crest coordinate system

$$\frac{y}{x} = -\frac{\cos\theta\sin\theta}{1 + \sin^2\theta} \quad (16)$$

不难看出, y 与 x 的最大比值约为 $\tan(19^\circ 28')$, 所以横波只分布在船尾 $\pm 19^\circ 28'$ 内。令

$$W = (x\cos\theta + y\sin\theta) / \cos^2\theta \quad (17)$$

联立式(16)和式(17),得到以参数 W 、 θ 表示的横波波峰参数模型^[5]:

$$\begin{cases} x = W(2\cos\theta - \cos^2\theta) \\ y = W\sin\theta\cos^2\theta \end{cases} \quad (18)$$

3 基于广义 Hough 变换的 Kelvin 横波检测和船舶速度估计算法

Hough 变换是图像处理中检测直线的常用方法,其基本思想是利用点与线的对偶性,将有噪声的平面图像上的点从 $X - Y$ 坐标空间变换到参数空间,并在参数空间来检测图像上的直线。Hough 变换推广到高维或者其他参数空间,则成为广义 Hough 变换(generalized Hough transform)^[6],可以检测任意形状的曲线。运用广义 Hough 变换可以有效地进行 Kelvin 横波检测,从而估计船舶速度。

3.1 基于广义 Hough 变换的 Kelvin 横波检测和波长提取

对于式(18)表示的横波波峰(图2)坐标表达式,易知参数 $W = s\lambda$, 其中 λ 为横波波长, s 为任意正整数。 s 不同,则式(18)表示不同的横波波峰曲线; s 较小时,则对应的横波波峰靠近船舶位置,而 s 相同 θ 不同,则对应同一条波峰上的不同点。

对含有海上目标横波航迹的遥感图像进行预处理,可形成横波峰值二值图像,图中绝大部分横波峰值像素将二值化为亮点,其余像素点的灰度值为0。在船舶检测和识别的基础上确定出横波坐标系后,对二值图像依据式(18)进行广义 Hough 变换,可得到亮点像素基于参数(W, θ)的分布图,对 θ 求和得到以 W 为变量的量点像素统计结果曲线 $T(W)$ 如图3所示(坐标纵轴与横轴单位均为像素个数)。

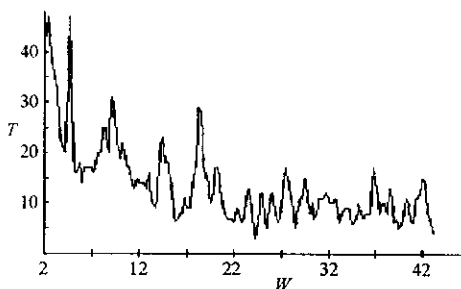


图3 横波波峰像素统计结果曲线 $T(W)$

Fig.3 Transverse crest points statistic curve

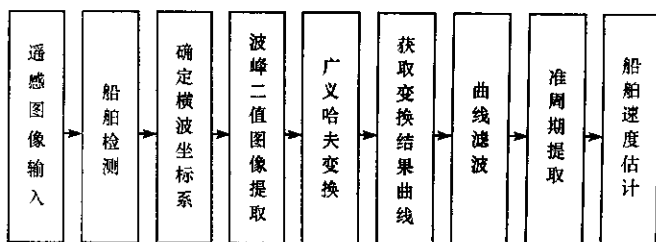


图4 Kelvin 横波检测和船舶速度估计算法流程

Fig.4 Flow for KTW detection and vessel velocity estimation

二值图像中亮点包含绝大部分横波峰值像素,当 $W = s\lambda$ 时,由于式(18)对应实际的横波波峰,检测曲线上亮点较多,从而 $T(W)$ 比较大,而 $W \neq s\lambda$ 时对应的亮点较少, $T(W)$ 也比较小。因此 $T(W)$ 为一准周期信号(quasi-periodic signal),周期为横波波长 λ 。通过对准周期信号 $T(W)$ 的周期提取,就可以检测出横波波长。

3.2 基于广义 Hough 变换的 Kelvin 横波检测和船舶速度估计算法流程

根据上述分析,本文提出基于广义 Hough 变换的 Kelvin 横波检测和船舶速度估计算法(图4)。

在遥感图像中首先进行船舶检测、提取船舶坐标和船舶长轴方向,确定横波坐标系。然后对原始图像进行预处理,得到含有横波波峰点的二值图像。根据式(18)进行广义 Hough 变换,将直角坐标系的横波波峰亮点像素(图2)变换到横波变换参数坐标系(W, θ)中。对 θ 求和后得到相对于参数 W 的像素分布准周期曲线 $T(W)$,对 $T(W)$ 进行滤波平滑后,再进行周期提取,可计算出横波波长 λ ,最后根据式(1)估计船舶运行速度。

3.3 基于 $K - L$ 变换确定横波坐标系

为了准确地检测横波并提取横波波长,必须在船舶检测的基础上准确定位横波坐标系。在低分辨

率遥感图像上,一般可通过 Hough 变换提取船舶长轴方向并确定横波坐标系。但在中高分辨率遥感图像上,船体呈现一定的多边形形状,用 Hough 变换并不能高精度地确定船体长轴方向。

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\sum_{x,y} = E \left\{ \begin{bmatrix} x - \bar{x} \\ y - \bar{y} \end{bmatrix} [(x - \bar{x})(y - \bar{y})] \right\} \quad (20)$$

在图像处理领域, $K-L$ 变换利用图像的统计性质,用自协方差矩阵表示图像特征。自协方差矩阵是实对称方阵,可找到一组正交的特征向量,构成一组完备正交向量。对于二值图像实施 $K-L$ 变换时,需先求出船舶目标像素点 (x,y) 的均值矢量(式(19))和协方差矩阵(式(20))。再计算协方差矩阵的特征值和特征矢量,特征矢量的方向分别对应船舶长轴和短轴,即横波坐标系中的 X 和 Y 轴方向。实验表明对于中高分辨率图像,基于 $K-L$ 变换确定的横波坐标系更准确。

3.4 广义 Hough 变换结果 $\pi(W)$ 曲线滤波

由图3可以看出,实际的 $\pi(W)$ 曲线上叠加了许多类似于毛刺噪声的干扰信号,其周期性不太明显,需要对其进行滤波。考虑到中值滤波器可以较好地去除信号中的毛刺噪声,均值滤波器对信号的平滑作用较好,本文将两种滤波方法相结合,先采用中值滤波器对毛刺进行滤除,再采用均值滤波进行平滑,取得了较好的滤波效果。对图3的 $\pi(W)$ 曲线的滤波效果如图5所示。图5中,坐标纵轴和横轴单位均为像素个数。可以看出滤波后, $\pi(W)$ 曲线中的毛刺基本去除,曲线也更加平滑。

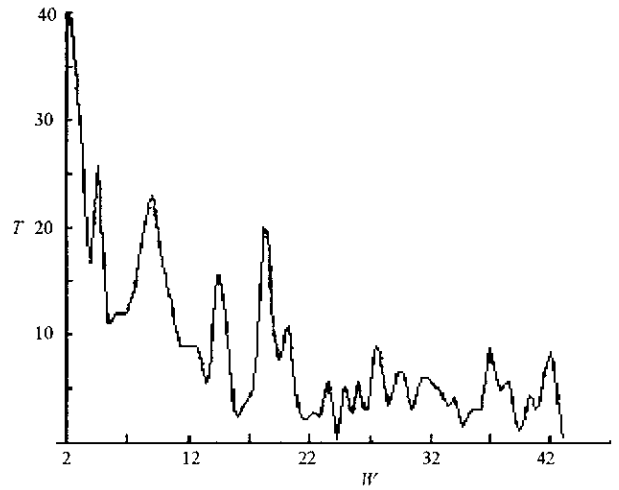


图5 $\pi(W)$ 曲线滤波效果
Fig.5 Curve $\pi(W)$ filter results

3.5 横波波长检测

对横波波长的检测即对图5准周期信号 $\pi(W)$ 周期的提取,常用的方法包括:极大值法、过零点法和互相关法等。其中互相关法将信号与不同频率的测试信号进行互相关,对用不同频率测试信号得到的相关量进行比较,与最大值对应的测试信号频率即为被测信号的主频率,其周期为准周期信号周期。研究表明,互相关法运算量小,信号周期检测稳定可靠,因此本文采用互相关法对横波波长进行提取。

4 基于广义 Hough 变换的 Kelvin 横波检测和船舶速度估计算法实验结果

用本文提出的基于广义 Hough 变换的 Kelvin 横波检测和船舶速度估计方法,分别对 2.5m 和 15m 分辨率的卫星遥感图像上的海上运动目标横波航迹进行了检测,取得了较好的效果。

图6为 2.5m 分辨率的 Spot-5 海上目标遥感图像,图7为横波检测结果图,检测横波波长为 19 个像素(47.5m),估计船舶速度为 8m/s(16.73 节)。图8和图9分别为 15m 分辨率遥感图像和船舶横波检测结果图,检测横波波长为 5 个像素(75m),估计船舶速度为 10.7m/s(20.84 节)。

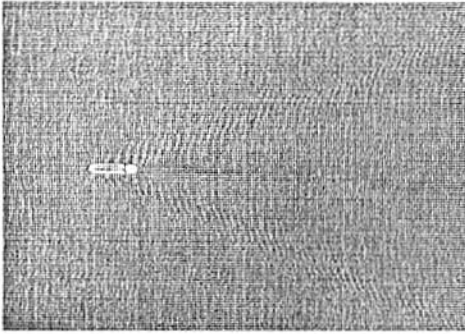


图 6 Spot-5 图像上的船舶和横波

Fig.6 Ship and transverse wave in Spot-5 image



图 7 Spot-5 图像上船舶横波检测结果

Fig.7 Transverse wave detection result in Spot-5 image

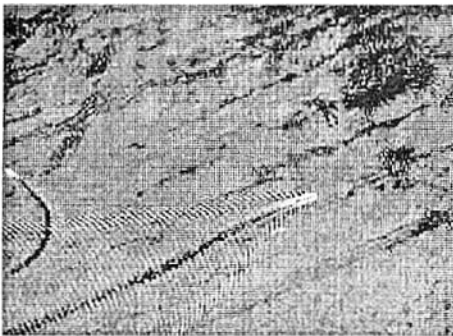


图 8 15m 分辨率遥感图像上的船舶和横波航迹

Fig.8 Ship and transverse wave in 15m resolution image

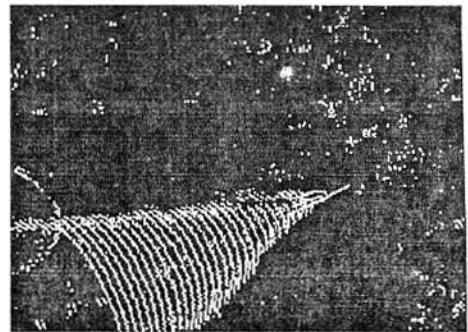


图 9 15m 分辨率图像上船舶横波检测结果

Fig.9 Transverse wave detection result

5 结束语

本文从横波航迹的形成原理出发,推导了 Kelvin 横波波峰模型,提出了一种基于广义 Hough 变换的遥感图像船舶横波自动检测和速度估计方法,在海面相对平静的遥感图像上取得了较好的检测效果,有助于基于遥感图像的海上船舶运输和港口管理。当海风等各种条件引起的海面波纹对船舶横波航迹造成较大干扰时,现有算法还不够稳定,存在一定的虚警和漏警现象,尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 周红建,李相迎,等.从卫星 SAR 海洋图像中检测船目标[J].国防科技大学学报,1999,21(1).
- [2] 王红梅,潘广东,等.利用遥感技术检测船舶航速的方法研究[J].遥感学报,2001,5(2).
- [3] Http://www.eng.vt.edu/fluids/msc/my_pages/ocean/c_water.htm [EB].
- [4] Newman J N, Marine Hydrodynamics[M]. The MIT Press Cambridge, 1977.
- [5] Chih Y P, Liu A K, Chang S, Detection and Analysis of Ship Waves in ERS-1 SAR Imagery[J]. IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium, 1996 380-382.
- [6] Ballard D H. Generalizing Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes[J]. Pattern Recognition, 1981, 13(2):111-122.

