

文章编号: 1007-4619 (2001) 02-0149-05

利用遥感技术监测船舶航速的方法研究

王红梅, 潘广东, 王 超, 郭子祺

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 主要讨论了两种利用遥感技术提取水面运动船舶的航速方法: 利用波高谱信息提取航速和利用船尾迹中的横波信息提取航速。作者介绍了这两种方法的原理, 描述了利用遥感技术提取船舶航速的工作流程, 并利用模拟的和实测的船尾迹波高数据对这两种方法进行了验证。从计算结果看, 两种方法精度都能满足仅要求航速量级的需求者, 利用波高谱信息的方法误差(10%左右)小于利用横波信息的方法误差(20%左右)。该项研究为实时或近实时探测运动船舶航速提供了新的方法。

关键词: 遥感技术; 船舶; 船尾迹; 航速

中图分类号: TP79/TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

船只活动是造船学和水运工程等领域中必须考虑的问题。观测船舶活动及其产生的船尾迹的遥感方法有很多, 例如摄影测量和合成孔径雷达成像技术等等。由于船舶产生的船尾迹的尺度比船舶本身要大得多, 而且其形状特征及传播速度与船只航速、船体轮廓密切相关, 故而人们经常通过研究船尾迹的特征来研究船体及其活动特征。由于合成孔径雷达监测的全天时全天候的优势, 利用合成孔径雷达数据监测船舶活动的研究已经成为当前海洋遥感研究的热点之一。

在雷达技术较为普遍之前, 人们多用摄影测量的方法观测船舶活动及其产生的尾迹, 其主要分为航空摄影测量和近景摄影测量应用。近景摄影测量主要用于大比例尺室内模型试验中, 航空摄影测量主要用于小比例尺区域性海域波能谱问题的研究^[1]。自从各种合成孔径雷达数据问世之后, 已经有大量公开发表的文献介绍了利用雷达数据监测船舶活动的研究^[2-4]。由于船尾迹特征与运动船体特征密切相关, 人们可以利用观测船尾迹或其波谱特征来间接地估测船舶特征参数, 航向和航速。船舶在雷达图像上后向散射系统比背景波浪大得多, 所

以可以从雷达图像上直接统计船体的长、宽像元数, 根据雷达数据的地面分辨率就可以计算出船舶大小。而对于航向, 则可以直接从航迹特征判断出来。由于船舶所在背景多为动荡水面, 背景噪声较大, 船舶航速在这里是一个相对较难提取的参数。国外已经开始了关于利用雷达数据提取船舶航速和航向的研究, 周红建等人就此总结了几种利用 SAR 技术估算运动船舶航速的方法: (1) 利用船舶的多普勒效应的方法; (2) 利用观测船尾迹窄的“V”字形张角的方法; (3) 利用船尾迹在航迹线上横波传播速度与航速相等的方法^[5]。

本文主要介绍了两种利用遥感技术监测运动船舶航速的方法, 即: 利用波高谱信息提取航速的方法和利用船尾迹中的横波信息提取航速的方法, 并利用模拟的船尾迹数据和实测的船尾迹数据对这两种方法进行了验证。

2 船尾迹与航速的关系

运动船舶产生的航迹一般可分为 3 类: (1) 由船舶直接产生的表面波航迹, 其又可分为窄的“V”字形航迹和典型的 Kelvin 航迹; (2) 湍流和旋涡航迹; (3) 内波。在一般情况下, 海上背景波浪和海风都不会很小, 利用遥感的方法观测到的船尾迹大部

收稿日期: 2000-05-08; 修订日期: 2000-06-15

基金项目: 国家高技术海洋领域研究项目(863-818-06-02)

作者简介: 王红梅(1972—), 女, 新疆奎屯市人, 研究实习员。1994年毕业于长春地质学院获矿产地质勘察专业学士学位; 1997年毕业于中国科学院遥感应用研究所获地图学与遥感专业硕士学位。主要从事于遥感信息处理和地理信息系统应用研究。已经发表论文近 20 篇。

分表现为 Kelvin 波。对于观测到的 Kelvin 波,可以利用以下两种方法进行航速的估测。

2.1 利用波高谱提取航速^[6]

在深水中运动的船只引起的稳定的表面重力波

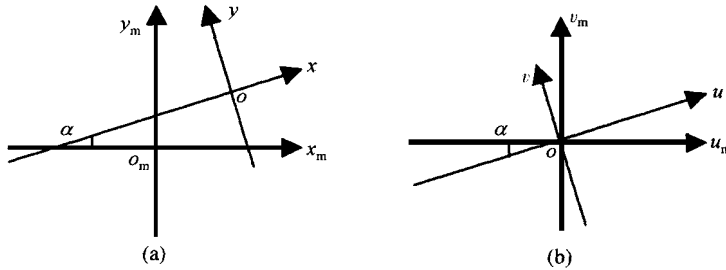


图 1 在空间域(a)和频率域(b)的船只参照系和图像坐标系

Fig. 1 Ship reference coordinate system and image coordinate system in (a) spatial and (b) frequency domains

$$\eta(x, y) = \text{Re} \left\{ \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} A(\theta) e^{-j[K_x(\theta)x + K_y(\theta)y]} d\theta \right\} \quad (1)$$

公式(1)中, Re 代表实部, θ 代表波的相位角, $A(\theta)$ 表示波的振幅函数, $K_x(\theta)$ 和 $K_y(\theta)$ 是波数 $K(\theta)$ 在 x 和 y 方向上的分部。波数 $K(\theta)$ 与船速 U 和波的相位角 θ 的关系可表示为:

$$K(\theta) = \frac{g}{U^2 \cos^2 \theta} \quad (2)$$

以船只运动方向为 x 轴正方向的坐标系 xoy 和以传感器运动方向为 x 正方向的图像坐标系 $x_m o_m y_m$ 之间的关系见图 1。在空间域这两个参照系之间的关系如下:

$$x = (x_m - x_{m0}) \cos \alpha + (y_m - y_{m0}) \sin \alpha \quad (3)$$

$$y = -(x_m - x_{m0}) \sin \alpha + (y_m - y_{m0}) \cos \alpha \quad (4)$$

这里, (x_{m0}, y_{m0}) 是船只参照系原点 o 在图像参照系中的坐标, α 是两个参照系坐标轴 ox 和 $o_m x_m$ 之间的夹角。在频率域这两个参照系之间的关系为:

$$u = u_m \cos \alpha + v_m \sin \alpha \quad (5)$$

$$v = -u_m \sin \alpha + v_m \cos \alpha \quad (6)$$

在船只坐标系中的波高 $\eta(x, y)$ 在图像坐标系中可以表示为:

$$\eta_m(x_m, y_m) = \eta[(x_m - x_{m0}) \cos \alpha + (y_m - y_{m0}) \sin \alpha - (x_m - x_{m0}) \sin \alpha + (y_m - y_{m0}) \cos \alpha] \quad (7)$$

船只坐标系中波高的傅立叶变换 $H(u, v)$ 在图像坐标系中可表示为:

$$H_m(u_m, v_m) = H(u_m \cos \alpha + v_m \sin \alpha - u_m \sin \alpha + v_m \cos \alpha) e^{-j2\pi(u_m x_{m0} + v_m y_{m0})} \quad (8)$$

从公式(2)中可知, $K \cos^2 \theta = \frac{g}{U^2}$; 因此, 对于任何

场可以描述为在 x 和 y 空间领域的问题。在线性自由表面边界条件下, 波高 $\eta(x, y)$ 随着船只在 x 方向上运动的参照系(图 1(a)中的 xoy 坐标系)中可以表达为公式(1):

两个点, 都有

$$\sqrt{K_1} \cos \theta_1 = \sqrt{K_2} \cos \theta_2 \quad (9)$$

下标 1 和 2 表示波高谱上点 1 和 2。因为 $\cos \theta = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} = \frac{2\pi u}{k}$ 和坐标系之间的关系, (9)式可以改写为:

$$\begin{aligned} & \sqrt{K_2} (u_{m1} \cos \alpha + v_{m1} \sin \alpha) \\ & = \sqrt{K_1} (u_{m2} \cos \alpha + v_{m2} \sin \alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

α 可以从下式中估计出来:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sqrt{K_1} u_{m2} - \sqrt{K_2} u_{m1}}{\sqrt{K_1} v_{m2} - \sqrt{K_2} v_{m1}} \quad (11)$$

K 表示波数, 下标 1 和 2 表示波高谱上点 1 和 2。

船速也可以从下式中估计出来,

$$U = \frac{\sqrt{gK_j}}{2\pi |u_{mj} \cos \alpha + v_{mj} \sin \alpha|} \quad (12)$$

其中, $j=1$ 或 2 (即点 1 或 2); g 为重力加速度。

2.2 从横波波长计算航速^[5]

Kelvin 波为重力波, 从形态上由纵波和横波组成。横波波阵面与航迹垂直, 其在航迹线上的移动速度与船舶航速相同, 则航速 V 与横波在航迹线上的波长 λ 之间的关系(即波传播的理论公式)为:

$$V = \sqrt{\lambda g / 2\pi} \quad (13)$$

3 遥感数据处理流程

从以上论述的原理可知, 只要得到船尾迹的波高谱信息或可以观测到船尾迹的横波在航迹线上的

波长,我们就可以利用该信息提取船只航速信息。由于遥感技术的特点,尤其是合成孔径雷达数据的全天时全天候监测的优点,我们可以在合适的条件下,例如风速适中和图像分辨率较高条件下,得到较为完整的船尾迹图像数据,按照以下过程提取运动船舶航速信息。

3.1 数据预处理

由于遥感数据本身的质量问题及船尾迹背景一般有噪声,因此还要进行噪声去除。为了突出船尾迹的线性特征,还可以利用 Radon 变换、形态学以及小波变换等方法处理原始遥感数据,从而得到遥感数据的强度图像。

3.2 波高谱提取

我们可以从遥感数据强度图像提取图像强度谱(如果该遥感数据是高程数据,则可以直接经过快速傅立叶变换得到波高谱)。从 SAR 图像谱中提取波高谱,已经有很多国外学者进行了研究,有较为成熟的方法。Frank M. Monaldo 介绍了一种从 SAR 图像谱中提取波高谱的方法,即图像谱除以系数 R_{SAR}^2 就可以得到波高谱^[7]。其中 R_{SAR}^2 的计算见以下公式:

$$R_{SAR}^2 = \mu^2 k_a^2 + m^2 k_r^2 \quad (14)$$

$$\mu = \frac{R}{V_p} \sqrt{gk \cos \theta_i} \quad (15)$$

$$m = \frac{4 \cot \theta_i}{1 \pm \sin^2 \theta_i} \quad (16)$$

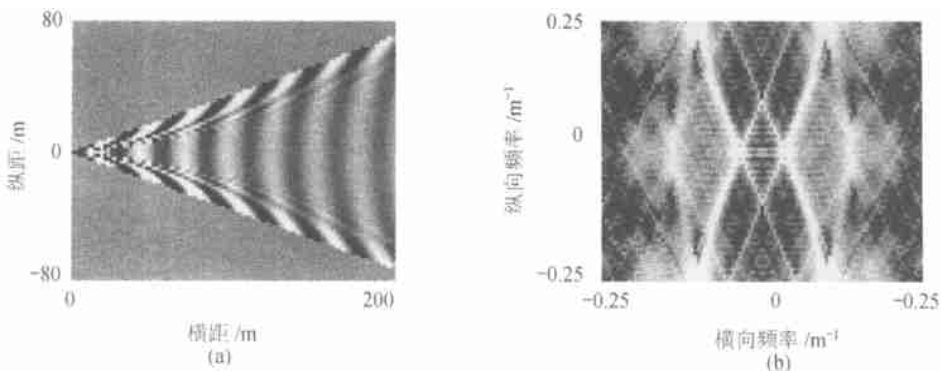


图2 模拟船尾迹在空间域(a)的高度图像和在频率域(b)的波高谱图像

Fig. 2 Simulated ship wake height image in (a) spatial domain and height spectra image in (b) frequency domain

根据第2节论述的原理,对模拟的船尾迹高程图像进行快速傅立叶变换,得到该船尾迹的频率谱强度图像(图2(b))。为了避免采集到假频率谱点,这里我们设了一个域值。这个域值设为频率谱强度图像的平均值和标准方差之和。只有大于本域值的频率谱

其中, k_a 是方位波数, k_r 是距离波数, R 是 SAR 平台到海洋表面的距离, V_p 是 SAR 平台的速度, θ_i 是入射角。

3.3 航速特征提取

从经过预处理的遥感图像上,如果可以观测到船尾迹的横波波长信息,我们可以直接利用公式(13)计算航速。我们得到船尾迹的波高谱信息,就可以利用第2节介绍的原理和方法,从中提取运动船舶的航速信息。

4 方法验证

4.1 模拟验证

利用 Kelvin 船尾迹模型,我们来模拟船尾迹波高数据。考虑到实际船尾迹会随着时间衰减,这里利用经验计算公式(17)表示它的衰减规律^[1]:

$$H_s = H \exp \left[-0.11 \frac{S}{L} \right] \quad (17)$$

式中: H_s 是向岸传播 S 距离的衰减波高; H 是船侧船尾迹波高; S 是船舷到计算点的距离; L 是船尾迹波长,单位为 m。

根据公式(17),这里模拟一个在无限水深处沿 x 轴负方向匀速前进(速度为 6.5m/s,单位面积上的压力为 1838Pa)的船只所引起的船尾迹^[1],其高程灰度图像见图2(a)(采样间隔 2m)。图2(a)中灰度值越低的波高越小,灰度值越高的波高越大。

点才被采集计算。即,我们可以利用满足以上条件的任何两点,根据公式(11)和(12),计算出船只的航速。这里计算出的船只的航速平均为 6.459 m/s,航速的相对误差为 0.646%。利用公式(13),我们计算出航速平均为 6.489 m/s,航速的相对误差为 0.163%。

4.2 实测船尾迹波高数据验证

这里用摄影测量方法获取的船行波高程数据对以上介绍的两种方法进行验证。根据上述原理,我们首先将摄影测量技术在香港维多利亚港获取的相对高程数据(图 3(a1)和(a2))转换成高程图像,然后对其进行快速傅立叶变换得到波高谱图像(图 3(b1)和(b2))。这里,我们选择船尾迹波高频率谱点的方法与 4.1 节中描述的方法相同,即,选择大于域

值(频率谱强度图像的平均值和标准方差之和)的频率谱点计算。图 3 中(a1)和(b1)所示的船只实测平均船速为 6.45 m/s。利用波高谱估计的该船航速平均为 5.78 m/s,相对误差为 10.4%。利用公式(13)计算的该船航速为 7.70 m/s,相对误差为 19.3%。图 3 中(a2)和(b2)所示的船只实测平均船速为 5.75 m/s。利用波高谱估计的该船航速平均为 6.34 m/s,相对误差为 10.2%。利用公式(13)计算的该船航速为 6.95 m/s,相对误差为 20.9%。

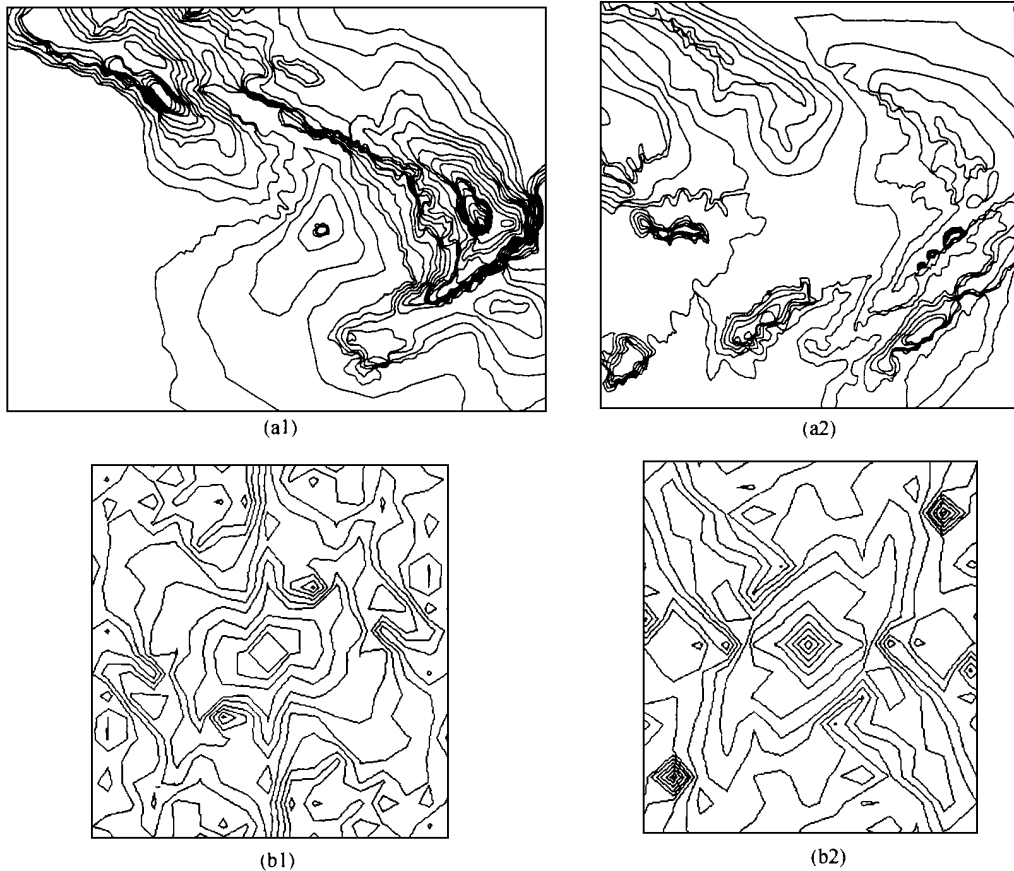


图 3 模拟船尾迹在空间域(a1)和(a2)的等值线图和在频率域(b1)和(b2)中心部分的波高谱等值线图
Fig. 3 Ship wake height contour maps in (a1) and (a2) spatial domain and in (b1) and (b2) frequency domain center

4.3 误差分析

从以上计算结果看,模拟的船行波数据计算结果误差最小,是因为其没有背景噪声影响。尽管是模拟的数据仍然有一定的误差,采样间隔较大(2m)是一个主要影响因素。由于在香港维多利亚港来往船只频繁,实测的船行波数据具有较大的背景噪声影响,所以计算结果误差较大。两种方法计算船舶航速的结果相比较而言,利用波高谱信息计算的结果误差较小。这是因为利用波高谱信息计算航速的

方法利用了整幅图像数据的综合信息,而另一种方法仅利用了船尾迹的横波信息。在量测横波波长时有人为的误差(肉眼判断)加入,也会造成这种方法的计算结果误差偏大。

5 结论和展望

本文主要讨论了利用波高谱信息和利用船尾迹中的横波信息间接估计船只航速的方法,并且利用模拟的和实测的船尾迹数据进行了验证。从实测船

尾迹数据计算的航速结果看, 利用波高谱信息计算的结果误差较小。而对于仅要求得到船舶航速量级需求者, 两种方法都可以满足要求, 在一定程度上说明了这两种方法的可靠性。由于 SAR 全天时全天候监测的优势, 如果能结合 SAR 技术, 本项研究为中国实时或近实时估测运动船舶信息提供了新的、比较可靠的方法。

利用遥感技术对在感兴趣的海域内的船舶活动进行监测, 提取船舶目标的相关参数, 可以大大提高航运管理能力。因此, 本项研究有较好的应用前景。

致谢 本项研究得到了中国科学院遥感应用研究所与香港大学之间的合作项目“香港维多利亚港船行波的摄影测量应用”提供的船尾迹波高数据, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

[1] Wang Hongmei, Qian Yuhua, Zhu Zhenhai, Guan Yanling. Close-up Photogrammetry Application and Simulation of Ship-wave [J]. *Acta Geographica Et Cartographica Sinica*, 1999, **28**(4): 360—364. [王红梅, 钱育华, 朱振海, 关艳玲. 船尾迹的近景摄影测量应用

与模拟[J]. 测绘学报, 1999, **28**(4): 360—364.]

[2] Lyden J D, Lyzenga D R, Shuchman R A. Analysis of synthetic aperture radar imagery of surface ship wakes [A]. Guyenne TD Hunt JJ. Proceedings of IGARSS '86 Symposium [C]. Zurich, 8—11 September 1986, Vol. 1: 801—805.

[3] Knut Eldhuset. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 1010—1019.

[4] Henningd I, Romeiser R, Alpers W, Viola A. Radar imaging of Kelvin ams and ship wakes [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(13): 2519—2543.

[5] Zhou Hongjian, Zhou Zongtan, Zhou Rongrong, Wang Zhengtan. Discussion of Monitoring Ship on the Sea Using Satellite SAR [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, **14**(4): 10—16. [周建, 周宗潭, 周蓉蓉, 王正志. 利用卫星 SAR 监测海上航行船舶[J]. 遥感技术与应用, 1999, **14**(4): 10—16.]

[6] Wu, Zhijian, Guy A Meadows. A Remote Sensing Technique for the Estimation of A Moving Ship 's Velocity and Length from its Wave Spectra[A]. *IEEE Oceans '91* [C]. 1991, Vol. 1: 810—817.

[7] Frank M, Monaldo, David R Lyzenga. On the Estimation of Wave Slope and Height variance Spectra from SAR Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, **24**(4): 543—551.

Study on the Detection of a Moving Ship 's Speed Using Remote Sensing Techniques

WANG Hong-mei, PAN Guang-dong, WANG Chao, GUO Zi-qi

(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Information about ship movement on water surface is one of the important detected objects in many fields such as water carriage engineering and military. In this paper, two indirect methods for the estimation of a moving ship 's speed by using remote sensing techniques are discussed because there is a close relation between static characteristics of ship wake and ship speed. To extract ship speed, one method is about using wave height spectra information of ship wake, and other method about using transverse wave information of ship wake. After the theory of these two methods is introduced, a scheme about extraction of a ship 's speed by using remote sensing techniques is described and these two methods are validated by using simulated and observed ship wake wave height data. It can be seen from the calculated results that both the two methods meet the requirement of people who need to know only magnitude of ship speed and error of the method on using wave height spectra to extract ship speed. The study shows a new method to real-time or nearly real-time detect the speed of a moving ship and has good perspective on its applications in the fields of enhancing ship management ability, military monitoring ability, and attacking military objects ability.

Key words: remote sensing techniques; ship; ship wake; ship speed