

基于水面特征波纹的水下运动目标 Radon 变换探测方法

徐曼, 裘溯*, 金伟其, 杨洁, 郭宏

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 针对在光电偏振成像模式下缺乏行之有效的水下运动目标探测方法的问题, 提出了一种基于水面特征波纹的水下运动目标检测算法。通过海面风生重力波模型和水下运动目标的水面特征波纹模型, 仿真得到不同状态下的海面混合波纹图像, 用于算法研究及证明; 采用 Radon 变换提取波纹的线性特征, 并通过均值滤波和标准归一化处理消除 Radon 变换对检测的影响; 采用双邻域自适应门限法提取 Radon 变换域中的局部峰值点, 利用连续小波变换进行特征提取, 并用支持向量机(SVM)判断峰值点真伪, 提高检测的准确率。实验结果证明了本文算法对特征波纹检测的可行性。该算法为探测水下运动目标提供了一种新的有效途径。

关键词 海洋光学; Radon 变换; 特征波纹; 尾迹检测; 水下运动目标

中图分类号 TP391.9; TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1001003

Radon Transform Detection Method for Underwater Moving Target Based on Water Surface Characteristic Wave

Xu Man, Qiu Su*, Jin Weiqi, Yang Jie, Guo Hong

*Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System(Beijing Institute of Technology),
Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology,
Beijing 100081, China*

Abstract An underwater moving target detection algorithm based on water surface characteristic wave is proposed to overcome the shortage of effective detection methods for photoelectric polarization imaging modes. Based on the wind-induced gravity wave model and the water surface characteristic wave model of an underwater moving target, the mixed wave images under different states are simulated and used for the research of the algorithm. The algorithm uses the Radon transform to extract the linear wave characteristic, and average filter and standardization are employed to preprocess images, thereby eliminating the adverse effect of Radon transform on detection. The double-neighborhood adaptive threshold method is employed to extract partial peak points in Radon transform domain. The algorithm employs continuous wavelet transform to extract features and support vector machine to judge the peak points, thereby improving the detection accuracy. The experimental result shows that the algorithm is feasible for characteristic wave detection, which also provides a new way for underwater moving target detection.

Key words oceanic optics; Radon transform; characteristic wave; wake detection; underwater moving target

OCIS codes 010.4450; 110.5405; 100.1160; 100.3008

1 引 言

潜艇被誉为“水中杀手”,以其高度的隐蔽性和机动性在海洋中具有强大的威慑力和打击力,因此,潜艇探测研究一直受到高度重视。随着潜艇降噪技术的进步,声呐等传统探潜技术已不能满足应用的

需要,人们逐渐将目光转向了潜艇的非声学探测技术。潜艇在水下航行时会在身后水域形成一片持续时间较长、长度有时可达数十千米的水动力学尾迹(主要包括伯努利水丘、开尔文尾迹、湍流尾迹、内波尾迹、热尾迹等)。与其他非声物理场特征信息相比,水动力学尾迹具有频率特征明显、极难被“隐身”

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-05-24; 录用日期: 2019-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(6157031371)

* E-mail: edmondqiu@bit.edu.cn

等特点,这为水下探潜提供了信息基础。而且,水动力学尾迹影响的水域范围很广,因而十分适用于基于遥感手段的探测。据文献报道,即便潜艇在水下 1000 ft(1 ft \approx 0.3048 m)的深度航行,在海面依然可以探测到伯努利水丘和开尔文尾迹。美国海军于 2009 年开始研究全新的液体隐身衣,通过超材料改变潜艇的表面特性和水流分布,以减小水下潜艇运行中的水面波纹。近年来,随着成像探测及图像信息处理技术的发展,基于潜艇水动力学尾迹的目标探测技术迅速发展^[1],机载、星载可见光遥感和成像雷达均成为有效的水面舰艇探测手段,其中,机载光电成像模式以其空间分辨率高、成像细节清晰等特点,近年来在海洋监测和海洋科学研究领域备受青睐^[2]。但当潜艇在水下航行深度加大或速度减小时,水面特征波纹的表现会逐渐减弱,再加上海面风生重力波等复杂波纹的影响,这些都加大了水面特征的探测难度。

近年来,研究人员全方位地开展基于光电偏振成像探测水面特征波纹实现水下运动目标探测的方法研究,在大视场偏振成像理论^[3]、高斯粗糙表面的偏振特性^[4]、透明介质曲面的光电偏振成像检测方法^[5]等领域取得积极进展,证明光电偏振成像是水面特征波纹成像检测的有效方法之一。

从海面混合波纹中有效提取水下运动目标的特征波纹是非常复杂的问题。由于尾迹在探测图像中大多呈现线性特征,而图像处理方法中提取直线族的 Radon 变换具有出色的抗噪性能^[6],因此,基于 Radon 变换的线性检测算法常被用于遥感图像水面尾迹的检测。如 Mata-Moya 等^[7]在滤波预处理阶段采取滑动均值滤波,用窗口 Radon 变换提高处理效率;Graziano^[8]对图像作 Radon 变换后将变换点的物理特征与实际尾迹峰值点的物理特征相比较,通过恒虚警率的方法过滤出非尾迹峰值点。国内有关尾迹检测的研究也逐步展开,如杨国铮等^[9]采取基于形态字典学习的 Radon 变换方法对复杂背景下的图像舰船尾迹进行检测;Xing 等^[10]引入长度归一化 Radon 变换,并通过滤波预处理的方法增强暗尾迹。然而,目前尚没有针对水面特征波纹光学图像提取方法的研究报道。

本文基于水下运动目标的水面特征波纹模型和 风生重力波模型基础,研究适合从水面混合波纹光学图像中提取水下运动波纹的 Radon 变换算法,以期为基于光学偏振成像的水下运动目标探测提供可行方法。

2 水下运动目标的水面波纹模型与模拟

2.1 水下运动目标的水面尾迹线性特征

潜艇等水下运动目标的水面特征波纹主要包括伯努利水丘和开尔文尾迹(图 1)。除水面舰艇的伯努利水丘不明显外,水下运动目标与水面舰艇的尾迹在形成机理、表现特征等方面都具有诸多相同或相似之处。图 2 给出常见的水面舰艇水面尾迹及其组成分量的关系图。尾迹一般可分为三类:1)表面波,主要包括开尔文尾迹、窄 V 字型尾迹和伯努利水丘等;2)湍流尾迹;3)内波。这些尾迹主要与海水的分层现象有关。

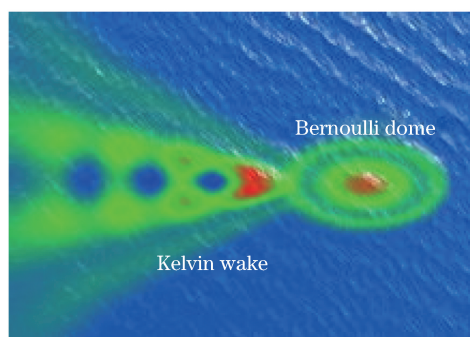


图 1 水下运动目标的水面特征波纹

Fig. 1 Water surface characteristic wave of underwater

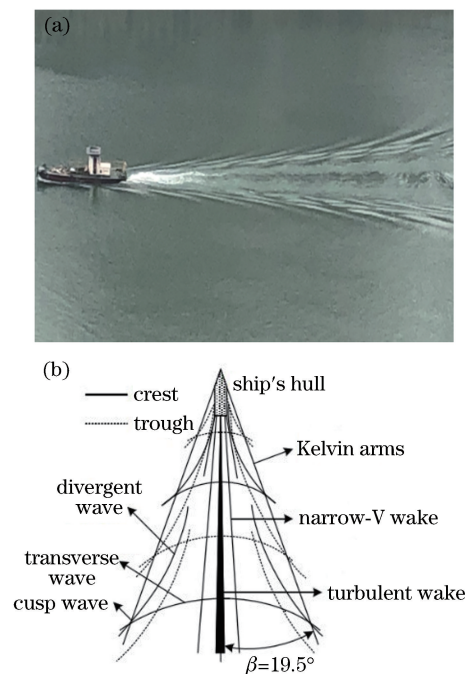


图 2 舰船的水面尾迹及其尾迹组成分量。(a)实际舰船尾迹;(b)尾迹组成分量的几何关系

Fig. 2 Ship's wake and components of the wake. (a) Actual ship's wake; (b) geometric relationship of wake components

在光学图像上,水下运动目标的水面特征波纹包括前端起伏的伯努利水丘、V型开尔文臂和湍流尾迹。开尔文尾迹包含分歧波和横断波两种明显的波形,属于长重力波。在两侧尾迹角内,分歧波和横断波相干涉形成尖头波。由于尖头波的波长短,每个波前不能够被独立地分辨开来,从而形成夹角为 39° 的开尔文臂。开尔文臂在光学图像中具有较为明显的线性特征,可用于尾迹的识别和提取。尾迹波纹图像既可采用波面反射图像,也可以采用波纹高度图像表示。

2.2 水面混合波纹模拟

基于水下运动目标的水面波纹模型和海面随机波浪模型,通过数字模拟叠加出海面混合波。

2.2.1 水下运动目标尾迹模拟

基于文献[11-12]中的模型和仿真软件,对水下运动目标的水面特征波纹尾迹采用三维非定常不可压缩的RANS方程(雷诺平均的Navier-Stokes方

程)、RNG $k-\epsilon$ 湍流模型(k 为湍流动能, ϵ 为湍流耗散率),以及VOF(Volume of Fluid)自由面处理方法,通过流体力学软件Fluent进行模拟仿真。模拟时采用长轴和短轴分别为60 m和6 m的回转椭球体代替水下运动目标,计算域大小为700 m \times 400 m。

图3给出了运动目标在水深15 m下以不同速度航行时产生的水面波纹图像,其中, v 表示目标航行速度,图像灰度代表波纹的起伏程度。可以看出:当目标运动速度较小时,水面波纹的横波特征较为明显;随着目标运动速度的增加,尾迹中分歧波系的成分逐渐增加并占据主导地位,且尾迹波长逐渐变大。

2.2.2 基于Pierson-Moscowitz的三维随机海浪模拟

Longuet-Higgins模型假设波浪沿固定方向前进,海面上一个定点的波面是由无限个不同振幅和频率的随机余弦波叠加而成的。定点在 t 时刻的波高表达式为

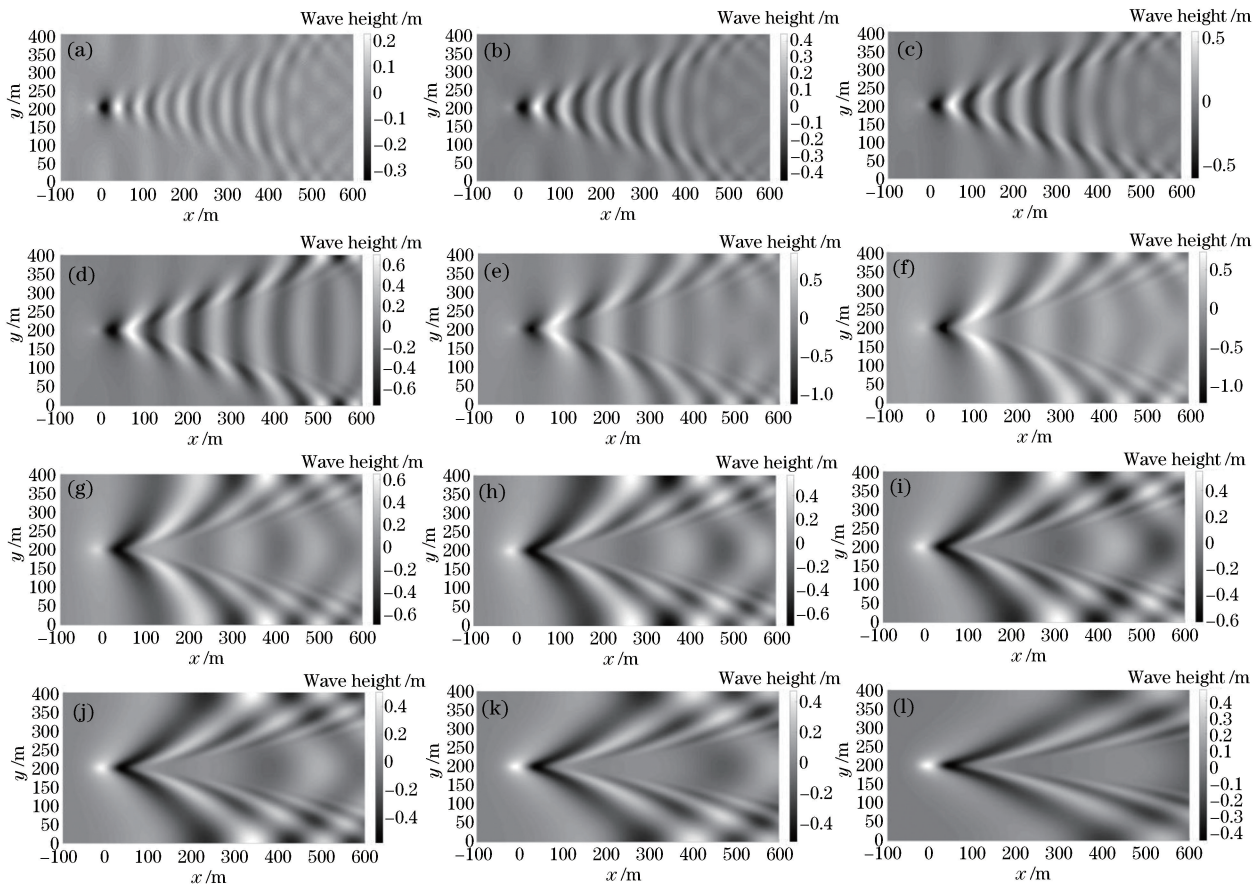


图3 水深15 m条件下不同分速的水面波纹。(a) $v=9$ m/s;(b) $v=10$ m/s;(c) $v=11$ m/s;(d) $v=12$ m/s;(e) $v=13$ m/s;(f) $v=14$ m/s;(g) $v=15$ m/s;(h) $v=16$ m/s;(i) $v=17$ m/s;(j) $v=18$ m/s;(k) $v=20$ m/s;(l) $v=25$ m/s
 Fig. 3 Surface waves with different wind speeds at water depth of 15 m. (a) $v=9$ m/s; (b) $v=10$ m/s; (c) $v=11$ m/s; (d) $v=12$ m/s; (e) $v=13$ m/s; (f) $v=14$ m/s; (g) $v=15$ m/s; (h) $v=16$ m/s; (i) $v=17$ m/s; (j) $v=18$ m/s; (k) $v=20$ m/s; (l) $v=25$ m/s

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(\omega_i t + \epsilon_i), \quad (1)$$

式中： a_i 、 ω_i 、 ϵ_i 分别为第 i 个余弦波的振幅、角频率和初始相位， $\epsilon_i \in [0, 2\pi]$ 。

$S(\omega)$ 表示海浪频率间隔 $\Delta\omega$ 内的平均能量，也被称为海浪能谱或频谱^[13]，其表达式为

$$S(\omega) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_{i=\omega}^{\omega+\Delta\omega} \frac{1}{2} a_i^2, \quad (2)$$

式中： ω 为角频率。

常用的海浪频谱模型有 Pierson-Moscowitz 谱 (PM 谱)、Neumann 谱 (N 谱)、ITTC (International Towing Tank Conference) 双参数波谱等。PM 谱因计算量较小，且能相对真实地反映海面风浪情况，是目前应用最为广泛的海浪谱。PM 谱的表达式为

$$S(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp\left[-0.74 \left(\frac{g}{u_{19.5} \omega}\right)^4\right], \quad (3)$$

式中： $u_{19.5}$ 为海面上方 19.5 m 高度处的平均风速 (下文所说的海面风速均指海面上方 19.5 m 高度处的风速)； g 为重力加速度。

实际上，组成海浪的余弦波不仅振幅、频率不同，而且传播方向也不同。在 Longuet-Higgins 模型的基础上，双叠加模型可用来表示传播方向也不相同的三维不规则海浪波，任一点 (x, y) 在 t 时刻的波高为

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} \cos[\omega_{ij} t - k_{ij}(x \cos \theta_{ij} + y \sin \theta_{ij}) + \epsilon_{ij}], \quad (4)$$

式中： a_{ij} 、 ω_{ij} 、 k_{ij} 、 θ_{ij} 、 ϵ_{ij} 分别表示第 i 个余弦波在第 j 个传播方向上的振幅、角频率、波数、方向角和初相位。根据色散关系，波数 k 和角频率 ω 的关系为 $\omega^2 = kg$ 。

与 $S(\omega)$ 类似，方向谱密度函数 $S(\omega, \theta)$ 的定义为

$$S(\omega, \theta) = \frac{1}{\Delta\omega \Delta\theta} \sum_{i=\omega}^{\omega+\Delta\omega} \sum_{j=\theta}^{\theta+\Delta\theta} \frac{1}{2} a_{ij}^2, \quad (5)$$

式中： θ 为方向角； $\Delta\theta$ 为方向角变化量。

根据(5)式即可求出第 i 个余弦波在第 j 个传播方向上的振幅 a_{ij} ：

$$a_{ij} = \sqrt{2S(\omega_{ij}, \theta_{ij}) \Delta\omega \Delta\theta}. \quad (6)$$

将 a_{ij} 代入(4)式中可得三维不规则海浪波的表达式为

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sqrt{2S(\omega_{ij}, \theta_{ij}) \Delta\omega \Delta\theta} \cdot \cos[\omega_{ij} t - k_{ij}(x \cos \theta_{ij} + y \sin \theta_{ij}) + \epsilon_{ij}]. \quad (7)$$

方向谱密度函数一般可写为

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) \varphi(\theta), \quad (8)$$

式中： $\varphi(\theta)$ 为波能扩散函数。本文采用 ITTC 建议的扩散函数：

$$\varphi(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta. \quad (9)$$

利用上述理论对海面海浪进行仿真，图 4 给出了 200 m × 200 m 海域在不同海面风速条件下的三维随机海面模拟图像。可以看出：风速越低，海洋表面波浪越细碎；随着风速增加，海浪平均波高增大，能量增大，波长增大，频率降低。

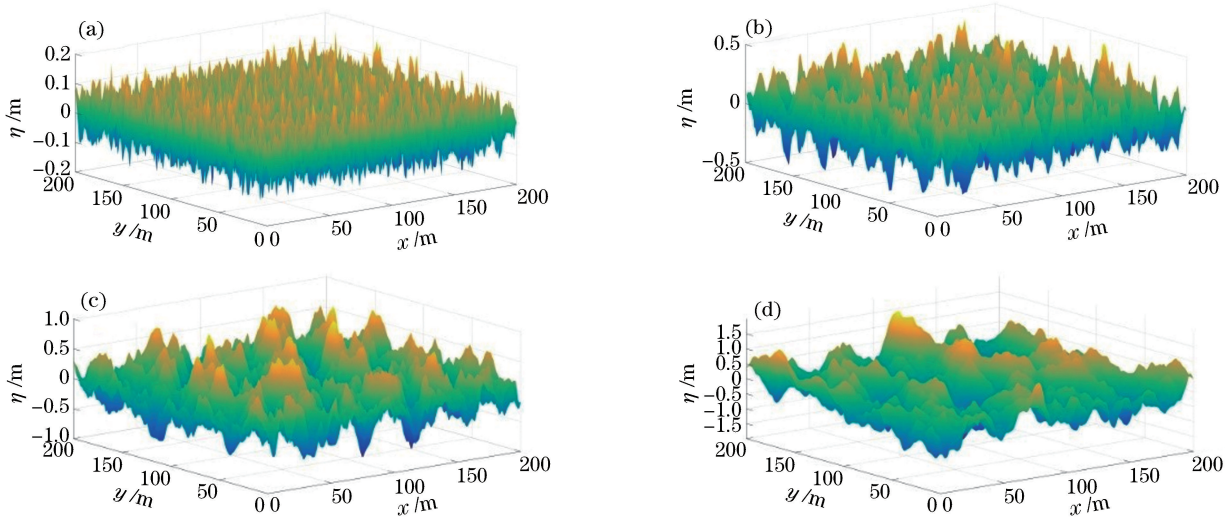


图 4 不同风速下的三维海面模拟。(a) $u_{19.5} = 3$ m/s; (b) $u_{19.5} = 5$ m/s; (c) $u_{19.5} = 7$ m/s; (d) $u_{19.5} = 10$ m/s

Fig. 4 Three-dimensional sea surface simulation images under different wind speeds. (a) $u_{19.5} = 3$ m/s;

(b) $u_{19.5} = 5$ m/s; (c) $u_{19.5} = 7$ m/s; (d) $u_{19.5} = 10$ m/s

2.2.3 海面混合波纹模拟

根据波动叠加原理,海面混合波纹是水下运动目标的水面特征波纹与海面随机海浪波纹的叠加。因此,利用前面模拟仿真的水面波纹在海平面空间和波纹起伏尺度上匹配叠加,即可获得各种目标状态在不同海况状态下的海面混合波纹图。

以水深 $h=15\text{ m}$ 处运动目标以 25 m/s 速度航行时的水面尾迹为例,图 5 是与不同风速随机海浪波叠加后的混合波纹,图中像素点的灰度值表示波纹超出海平面的尺度。可以看出:随着风速增大,海浪波的波高逐渐增强,一开始清晰可见的尾迹逐渐被淹没在海浪中,变得模糊不清。

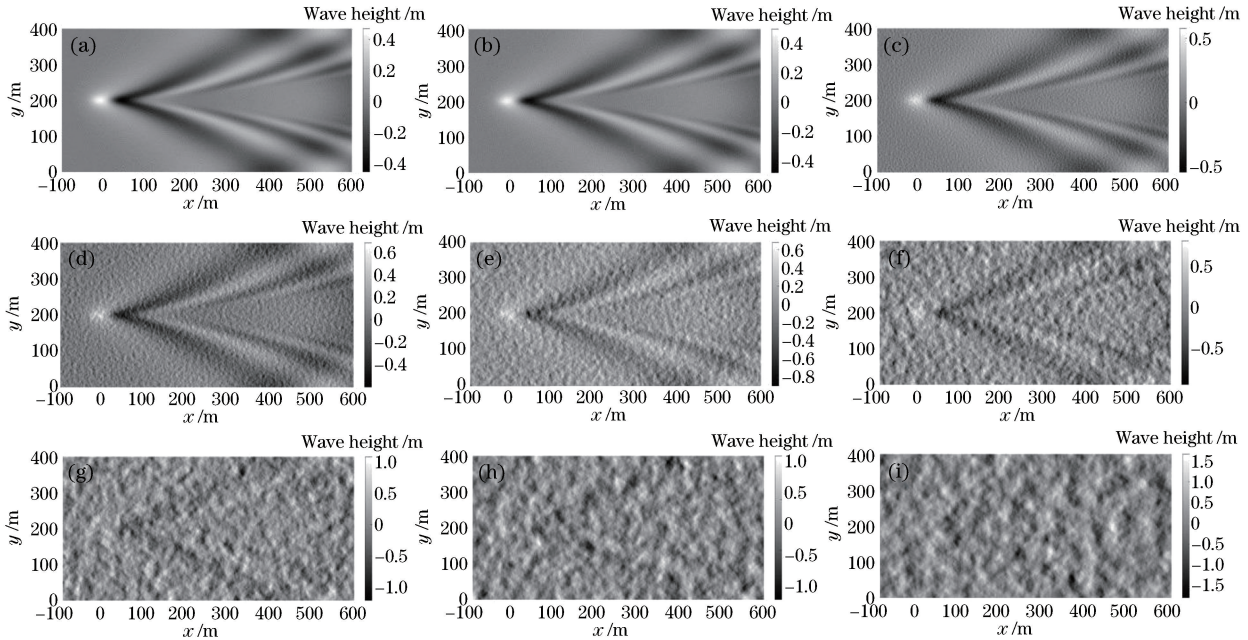


图 5 不同风速下的海面混合波纹模拟图像。(a) $u_{19.5}=1\text{ m/s}$; (b) $u_{19.5}=2\text{ m/s}$; (c) $u_{19.5}=3\text{ m/s}$;

(d) $u_{19.5}=4\text{ m/s}$; (e) $u_{19.5}=5\text{ m/s}$; (f) $u_{19.5}=6\text{ m/s}$; (g) $u_{19.5}=7\text{ m/s}$; (h) $u_{19.5}=8\text{ m/s}$; (i) $u_{19.5}=9\text{ m/s}$

Fig. 5 Mixed wave simulation images of sea surface under different wind speeds. (a) $u_{19.5}=1\text{ m/s}$; (b) $u_{19.5}=2\text{ m/s}$; (c) $u_{19.5}=3\text{ m/s}$; (d) $u_{19.5}=4\text{ m/s}$; (e) $u_{19.5}=5\text{ m/s}$; (f) $u_{19.5}=6\text{ m/s}$; (g) $u_{19.5}=7\text{ m/s}$; (h) $u_{19.5}=8\text{ m/s}$; (i) $u_{19.5}=9\text{ m/s}$

3 基于 Radon 变换的水下运动目标特征波纹探测方法

3.1 Radon 变换

Radon 变换是检测图像中线性特征的有效工具,是计算图像矩阵在某一指定角度 θ 方向上投影的变换方法,其具体表现形式是将 (x, y) 空间的一条直线 $\rho=x\cos\theta+y\sin\theta$ 映射成 Radon 空间中的一个点 (ρ, θ) ,可表示为^[14]

$$R(\rho, \theta) = \iint_D f(x, y) \delta(\rho - x\cos\theta - y\sin\theta) dx dy, \quad (10)$$

式中: D 代表整个图像平面; $f(x, y)$ 是坐标 (x, y) 处像素点的灰度值; δ 为狄拉克函数,当 $\rho - x\cos\theta - y\sin\theta = 0$ 时, $\delta = 1$, 否则, $\delta = 0$; ρ 为 (x, y) 平面直线到原点的距离; θ 为直线法线与 x 轴的夹角。

Radon 变换的几何原理如图 6 所示, Radon 变

换域的横坐标为 θ , 纵坐标为 ρ 。由 (10) 式可知, (x, y) 图像区域的灰度值较高/低的直线, 在 (ρ, θ) 空间会转换成一个亮/暗点, 即 Radon 变换能够将 (x, y) 平面中的直线检测问题转化为 (ρ, θ) 变换域中的峰值点提取问题。

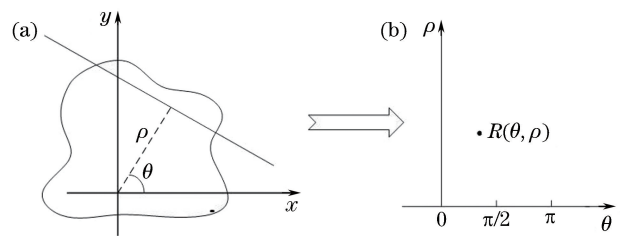


图 6 Radon 变换几何原理示意图。

(a) Radon 空间域; (b) Radon 变换域

Fig. 6 Geometric schematic diagram of Radon transform.

(a) Radon space domain; (b) Radon transform domain

3.2 对称直线的 Radon 变换域特征

水下运动目标尾迹的线性特征主要是多条近似

平行且夹角成 39° 的对称开尔文臂直线。以与尾迹形状相似的对称直线为例,分析其在 Radon 变换域的特点。假设通过平移和旋转变换,已将水下运动目标变换为自右向左水平运动,且运动轴线位于图像上下中线。

图 7 给出对称直线的 Radon 变换图,左侧图代表 (x, y) 空间域 $(400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel})$,右侧图对应 Radon 变换域, $\theta \in [0, 180)$, ρ 的取值范围为 $(-200\sqrt{2}, 200\sqrt{2})$ 。

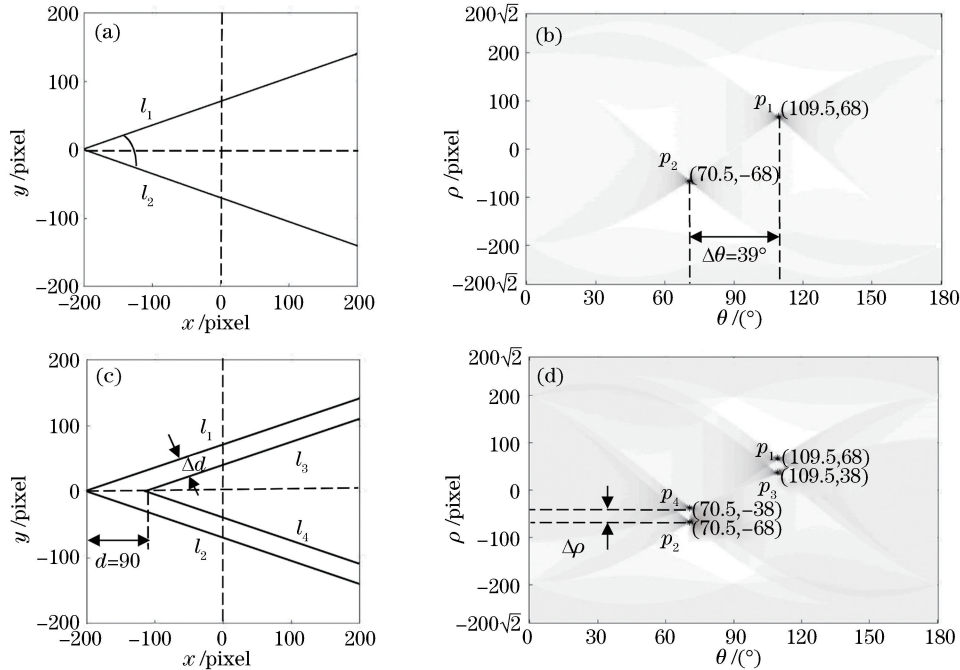


图 7 对称直线的 Radon 变换效果图。(a)对称直线 Radon 空间域;(b)对称直线 Radon 变换域;
(c)平行对称直线 Radon 空间域;(d)平行对称直线 Radon 变换域

Fig. 7 Radon transform diagrams of symmetric lines. (a) Radon space domain of symmetric straight lines; (b) Radon transform domain of symmetric straight lines; (c) Radon space domain of parallel symmetric straight lines; (d) Radon transform domain of parallel symmetric straight lines

由第一组图[图 7(a)、(b)]可以看出,关于图像上下中线对称且夹角为 39° 的 l_1 、 l_2 在变换域中对应为 p_1 、 p_2 两个暗点。 p_1 和 p_2 关于图像中心点对称,二者 θ 坐标的差值 $\Delta\theta = 39^\circ$,这与 l_1 、 l_2 在 (x, y) 域中的夹角一致。已知 ρ 表示 (x, y) 域中图像中心点到直线的距离,图中 p_1 和 p_2 的 ρ 数值相同、正负相反,说明 l_1 、 l_2 到图像中心点的距离相同,且分别位于图像上下中线的两侧。于是,通过 Radon 变换域的坐标值不仅可判断线段在 (x, y) 空间域中的位置信息,还可判断线段间的位置关系。

第二组图[图 7(c)、(d)]是将第一组图中已有的两条线段 l_1 、 l_2 向右平移长度 d ,得到 l_3 和 l_4 , Radon 变换域中 4 个对应的暗点分别为 p_1 、 p_2 、 p_3 和 p_4 。可以看出, p_1 和 p_3 、 p_2 和 p_4 的 θ 坐标相同,反映了它们在 (x, y) 坐标系下所对应线段间的平行关系。在 (x, y) 空间域中显然有

$$\Delta d = d \times \sin(\theta/2) = 90 \times \sin 19.5^\circ \approx 30.$$

(11)

Radon 空间域中, $\Delta\rho = 30$,可以看出, $\Delta\rho$ 表示的是平行线段间的距离。

综上,通过 Radon 变换域中不同点的 θ 值可以判断线段间的平行关系, $\Delta\rho$ 可以用来计算图像中平行或近似平行线段之间的距离, (θ, ρ) 的坐标可以用来确定线段在图像中的位置。

3.3 模拟尾迹的 Radon 变换域特征

对图 3 未叠加海浪波的水下运动目标尾迹模拟图像进行 Radon 变换。图 8 给出水下运动目标在不同速度下(9, 17, 25 m/s)尾迹模拟图的 Radon 域及峰值点。可以看出,在未叠加海浪的情况下,尾迹的线性特征在 Radon 变换域中表现得较为明显,通过简单的峰值点提取算法即可在每组图中得到 8 个峰值点(为了突出显示,下文均使用白色叉号表示极小值峰值暗点,使用黑色实点表示极大值峰值亮点)。这些峰值点关于图像中心点两两对称,并且与 θ 坐标也存在着相近的关系。

通过 Radon 逆变换将提取的峰值点还原叠加

到 (x, y) 坐标系原图像,结果如图 9 所示,其中黑色线段为图 8 中白色叉号经过逆变换得到的,表示提取到的灰度值较低的尾迹暗线位置,白色线段由图 8 中黑色实点经过逆变换得到,表示提取到的灰度值较高的尾迹亮线所在位置,下文中的黑、白线段均代表上述含义。可以看出:这些峰值点对应的线段

代表着模拟尾迹图像中明显的线性特征,说明通过 Radon 变换能够较好地提取水下运动目标的尾迹。由图 3 可知,随着运动速度增加,尾迹中分歧波的成分逐渐占主导地位,尾迹图像的线性特征更加明显,因而,提取出的线段与尾迹的一一对应关系更加明确,提取准确率更高。

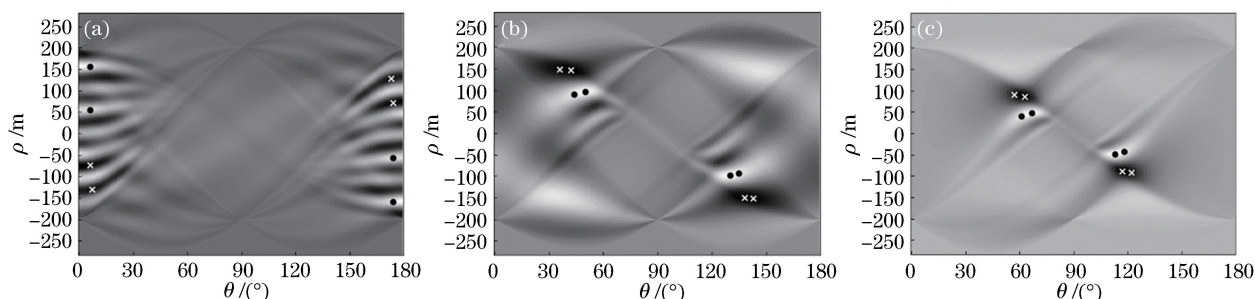


图 8 不同运动速度下尾迹模拟图的 Radon 变换域峰值点。(a) $v=9$ m/s;(b) $v=17$ m/s;(c) $v=25$ m/s
Fig. 8 Peak points of simulated wake at different movement velocities in Radon transform domain. (a) $v=9$ m/s;
(b) $v=17$ m/s; (c) $v=25$ m/s

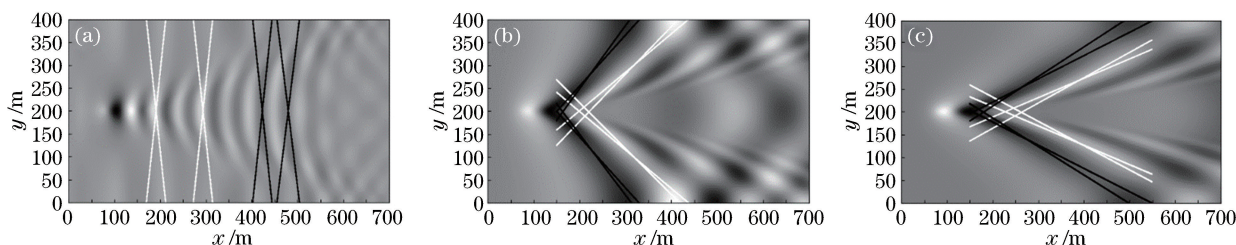


图 9 不同运动速度下尾迹模拟图的 Radon 逆变换结果。(a) $v=9$ m/s;(b) $v=17$ m/s;(c) $v=25$ m/s
Fig. 9 Inverse-Radon transform results of simulated wake at different movement velocities. (a) $v=9$ m/s;
(b) $v=17$ m/s; (c) $v=25$ m/s

对叠加海浪波的水下运动目标尾迹模拟图像($u_{19.5}=6$ m/s,水下运动目标速度 $v=25$ m/s),同样利用上述步骤进行提取,效果如图 10 所示。可以看出,图中共有 8 条线,其中 6 条为误检线段,误检率高达 75%。这是因为实际海面有大量海浪噪声

和强杂波存在,情况更为复杂,仅利用 Radon 变换检测无法保证准确率,很容易出现虚警率过高、误检等问题,因此需要引入相关的约束处理。

3.4 复杂海面情况下的尾迹提取方法

针对仅采用 Radon 变换从海面混合波中提取

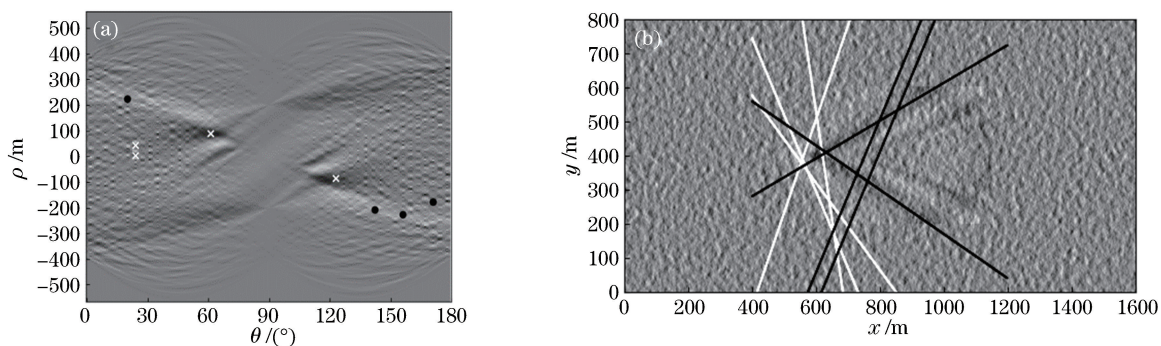


图 10 叠加海浪波情况下的 Radon 空间域及其逆变换图像($u_{19.5}=6$ m/s, $v=25$ m/s)。
(a) Radon 空间域图像;(b) 逆变换图像

Fig. 10 Radonspace domain and inverse-Radon images in the case of superimposed wave ($u_{19.5}=6$ m/s, $v=25$ m/s).
(a) Radon space domain image; (b) inverse-Radon image

水下运动目标特征波纹虚警率高和误检的问题,提出一种基于 Radon 变换的复杂海面尾迹提取算法,流程如图 11 所示,图中 CWT 为连续小波变化。1)通过双邻域自适应门限法提取 Radon 变换

域中的局部峰值点;2)通过小波变换对峰值点的截面进行特征提取;3)使用支持向量机(SVM)分类算法对峰值点特征进行决策判别,找出代表尾迹的峰值点。

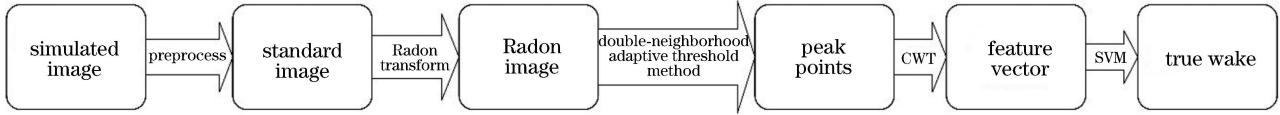


图 11 基于 Radon 变换的复杂海面尾迹提取算法流程图

Fig. 11 Flow chart of extracting wake from complex sea based on Radon transform

3.4.1 图像预处理

1) 均值滤波

假设原始图像任一点的灰度值为 f , 计算其邻域窗口内的灰度均值 μ_1 和标准差 σ_1 。剔除图像中强亮点或者强暗点的方法可表示为

$$f_1 = \begin{cases} \mu_1, & |f - \mu_1| > l\sigma_1 \\ f, & |f - \mu_1| \leq l\sigma_1 \end{cases}, \quad (12)$$

式中: f_1 为均值滤波后图像的灰度值; l 为阈值参数, 取值范围一般为 $[1, 5]$, 通过调节 l 的取值可以改变抑制程度。

2) 图像标准归一化处理

假设经均值滤波后, 图像灰度均值和标准差分别为 μ_2 和 σ_2 。为了减弱 Radon 变换的固有缺

陷——双 X 状亮线对峰值点提取造成的影响, 将图像中每个点的像素值减去 μ_2 , 再除以 σ_2 , 即

$$f_2 = (f_1 - \mu_2) / \sigma_2, \quad (13)$$

式中: f_2 为经均值滤波和标准归一化处理后的图像的灰度值。

图 12 给出海面风速为 6 m/s, 水下运动目标速度分别为 9, 17, 25 m/s 时的水下运动目标尾迹模拟图像(下文中所有效果展示的图均以这 3 种情况为例)。

图 13 分别给出了预处理前、后图像对应的 Radon 空间域, 可以看出, 预处理后明亮的双 X 状线及边缘部分的黑色区域消失了, 说明预处理有效降低了峰值点提取受到的干扰。

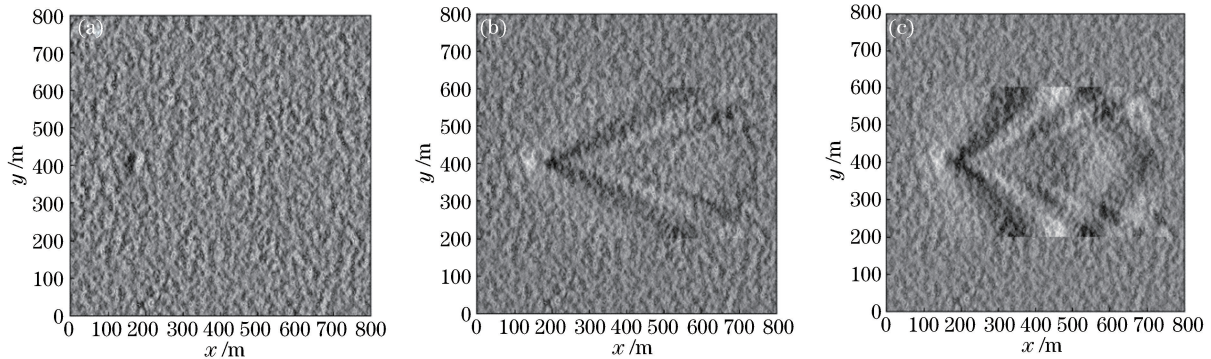


图 12 预处理后的标准图像 ($u_{19.5} = 6$ m/s). (a) $v = 9$ m/s; (b) $v = 17$ m/s; (c) $v = 25$ m/s

Fig. 12 Standard images after preprocessing ($u_{19.5} = 6$ m/s). (a) $v = 9$ m/s; (b) $v = 17$ m/s; (c) $v = 25$ m/s

3.4.2 双邻域峰值提取方法

局部峰值点提取方法与均值滤波算法类似。设邻域窗口尺寸为 $M \times M$, 若 M 取值过大, 会导致难以提取目标线性特征引起的真实峰值, 从而出现漏检情况; 若 M 取值过小, 会无法有效去除由噪声斑点引起的虚假峰值, 从而出现误检情况。

设邻域窗口的均值为 μ_M , 标准差为 σ_M 。Radon 变换域的局部峰值点 (ρ, θ) 满足

$$t = \frac{|\mu_N - \mu_M|}{\sigma_M} > T, \quad (14)$$

式中: μ_N 为该邻域窗口内的均值; T 代表门限值,

根据峰值点提取的虚警率进行自适应变化, T 越小提取的峰值点越多, 意味着虚警率越高, 一般情况下 $T \in [1, 4]$ 。考虑到尾迹不是孤立的直线, 在 Radon 变换域中表现为突出的区域, 选取尺寸为 $N \times N$ 的邻域窗口。值得注意的是, N 取值过大, 会导致尾迹特点被过分平均, 无法检测到尾迹; N 取值过小, 会导致无法达到削弱噪声、增强尾迹的目的。

本文取 $M = 30, N = 5$, 通过 T 的自适应变化, 在 Radon 变换域中提取 12 个峰值点(多次实验表明, 当提取峰值点的数量在 12 个左右时, 能够得到有效尾迹)。具体的 Radon 变换图如图 14 所示。

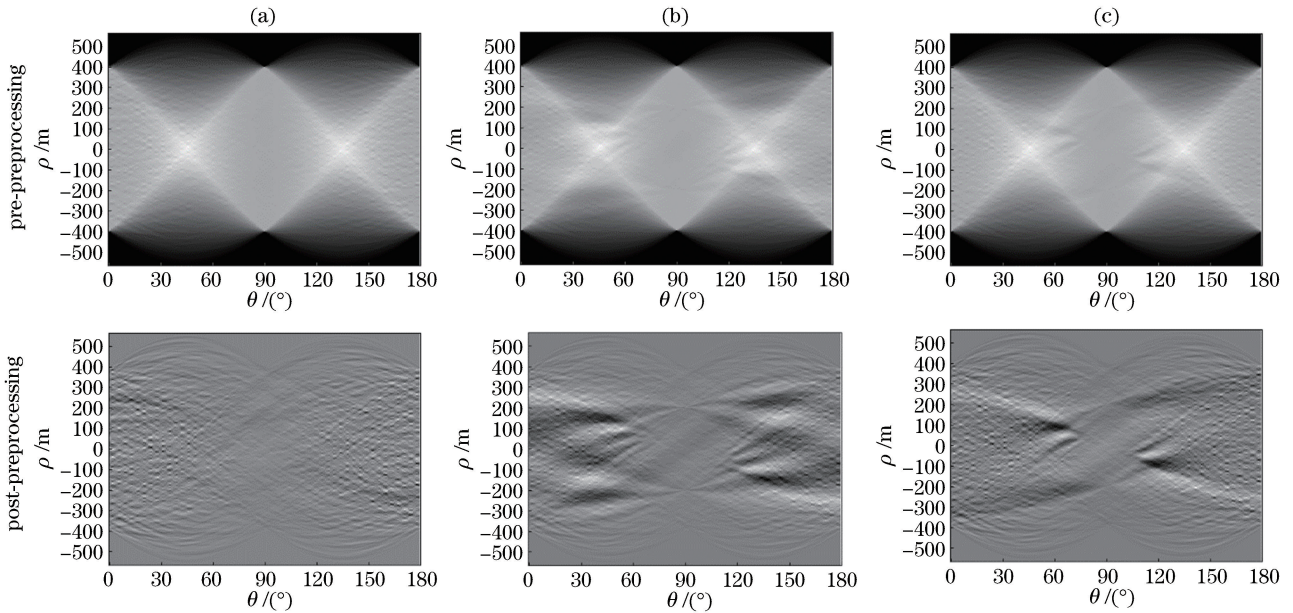


图 13 预处理前、后图像的 Radon 空间域 ($u_{19.5} = 6 \text{ m/s}$)。 (a) $v = 9 \text{ m/s}$; (b) $v = 17 \text{ m/s}$; (c) $v = 25 \text{ m/s}$

Fig. 13 Radon space domains of pre- and post-preprocessing images ($u_{19.5} = 6 \text{ m/s}$).

(a) $v = 9 \text{ m/s}$; (b) $v = 17 \text{ m/s}$; (c) $v = 25 \text{ m/s}$

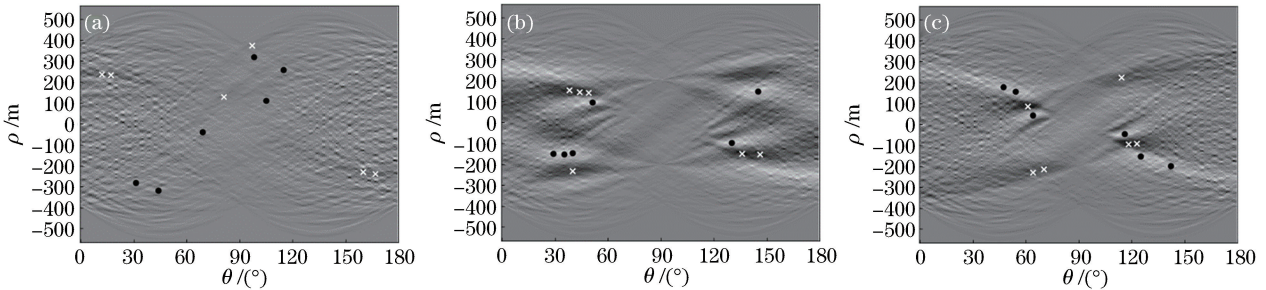


图 14 双邻域窗口法提取 Radon 空间域局部峰值点。 (a) $v = 9 \text{ m/s}$; (b) $v = 17 \text{ m/s}$; (c) $v = 25 \text{ m/s}$

Fig. 14 Double neighborhood window method for extracting peak points in Radon space domain. (a) $v = 9 \text{ m/s}$;

(b) $v = 17 \text{ m/s}$; (c) $v = 25 \text{ m/s}$

对提取到的峰值点进行逆变换,还原到原来的混合波纹图像中,如图 15 所示。每幅图中包含 12 条直线。其中,第 1 幅图中误检线段为 6 条,误检率为 50%;第 2 幅图中误检线段为 6 条,误检率为 50%;第 3 幅图中误检线段为 4 条,误检率为 33.3%。可以看出,采取双邻域峰值提取法得到的峰值点集合与图 10 相比,效果更好,能够有效覆盖尾迹的线性特征,但是仍有误检情况存在,需要做进一步的决策判别。

3.4.3 基于连续小波变换特征的决策判断

为了对峰值点进行决策判别,首先需要对峰值点进行特征提取,并用特征向量来进行定量描述。除了利用峰值点的自有特征外,还使用连续小波变换方法分析峰值点截面的波形特征。

1) 连续小波变换的特征向量提取

在图 14 中,峰值点区域呈现长条形,区域内 θ 方向上灰度变化不明显,说明峰值点在 θ 方向上比 ρ 方向上的相关性强。以峰值点为中心在距离 ρ 方向上截取长度为 X 的截面,记为 $s(\rho)$ 。将 $s(\rho)$ 归一化到 $[-1, 1]$ 区间,记为 $s'(\rho)$,使用连续小波变换对 $s'(\rho)$ 进行分析,得到 $s(\rho)$ 的波形特征用于后续决策。归一化的方法可表示为

$$s'(\rho) = \frac{s(\rho)}{\max(|s(\rho)|)} \in [-1, 1]. \quad (15)$$

连续小波变化可表示为^[15]

$$f_{\text{CWT}}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\rho) \varphi^* \left(\frac{\rho - b}{a} \right) d\rho, \quad (16)$$

式中: a 为尺度; b 为位移值, $b \in [1, X]$, $b \in \mathbf{R}$; φ 为小波函数; $*$ 表示共轭。

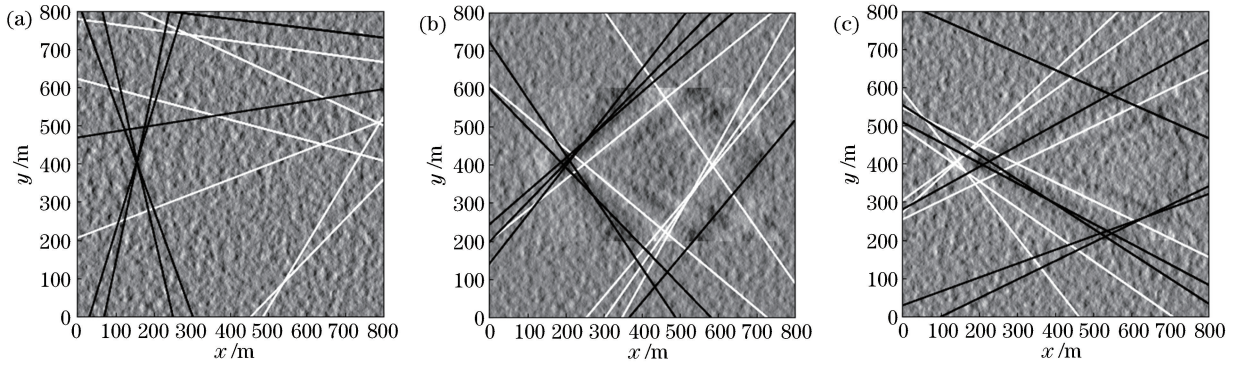


图 15 Radon 逆变换图像。(a) $v=9$ m/s; (b) $v=17$ m/s; (c) $v=25$ m/s

Fig. 15 Inverse-Radon transform images. (a) $v=9$ m/s; (b) $v=17$ m/s; (c) $v=25$ m/s

本文选取 $X=100$, 尺度 $a \in [2^0, 2^1, \dots, 2^{10}]$, 分别用高斯小波和墨西哥帽小波^[16]作为小波函数对 $s'(\rho)$ 进行连续小波变换。图 16 分别是尾迹截面和噪音截面与两种小波函数的拟合示意图, 图中实线

表示峰值点截面波形, 虚线表示高斯小波拟合波形, 虚点线表示墨西哥小波拟合波形。可以看出: 尾迹与噪音截面呈现出不同的波形, 两种小波函数能有效拟合尾迹截面。

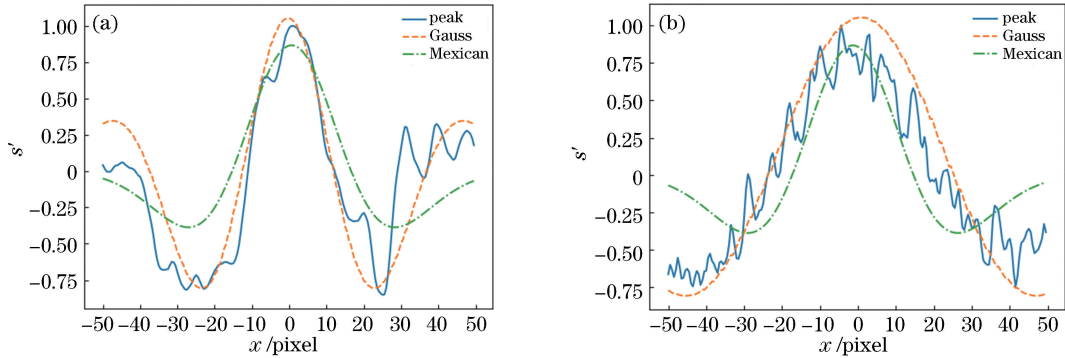


图 16 小波变换效果图。(a) 尾迹截面; (b) 噪音截面

Fig. 16 Wavelet transformation diagrams. (a) Wake section; (b) noise section

定义 $W = \max[f_{\text{CWT}}(a, b)]$ 表示不同尺度和位移下小波变换的最大值, 衡量选定小波与 $s'(\rho)$ 的拟合程度, 即 $s'(\rho)$ 的波形特征。将高斯小波和墨西哥帽小波对应的结果分别记为 W_{Gauss} 和 W_{Mexican} , 对应的尺度 a 分别记为 a_{Gauss} 和 a_{Mexican} 。计算 $s(\rho)$ 的标准差和均值, 分别记为 $r_{\text{std}}[s(\rho)]$ 和 $r_{\text{mean}}[s(\rho)]$, 使用 $r_{\text{std}}[s(\rho)]/r_{\text{mean}}[s(\rho)]$ 来衡量 $s(\rho)$ 的离散程度。 $t(\rho, \theta)$ 是峰值点 (ρ, θ) 依(14)式计算的结果, 可使用六元组 \mathbf{F} 作为描述峰值点的特征向量:

$$\mathbf{F} = [t(\rho, \theta), r_{\text{std}}[s(\rho)]/r_{\text{mean}}[s(\rho)], \text{lb}(a_{\text{Gauss}}), W_{\text{Gauss}}, \text{lb}(a_{\text{Mexican}}), W_{\text{Mexican}}]。 \quad (17)$$

2) 基于连续小波特征向量的 SVM 决策判别

使用 SVM 方法对特征向量 \mathbf{F} 的真实性进行决策判别^[17]。SVM 主要用来解决数据的二分类问题, 属于有监督的机器学习方法, 旨在空间中找到一个超平面, 将待分类的数据分隔在超平面两侧, 使点到平面的距离之和最大, 从而实现二分类的效果。

应用 SVM 进行决策判别分为 2 个过程: 训练和预测。SVM 模型有非常重要的参数——惩罚系数 C : C 越大, 对出现误差的容忍率越低, 容易导致模型出现过拟合, 使得模型仅在训练集上有很高的准确率, 而对训练集之外的数据预测准确率较低; C 越小, 越容易出现欠拟合, 导致模型不能在训练集上得到较高的准确率。在训练过程中, 使用留一交叉验证方法对参数 C 进行优化, 选取在训练集中分类效果最好的模型。在预测过程中, 将待判定的特征向量输入到训练好的 SVM 模型中, SVM 模型会给出其对应的分类, 即决策结果。

首先, 手动标注从 100 张不同风速、不同水下目标速度的尾迹图片中提取的 1200 组特征向量, 将尾迹对应特征向量标注作为尾迹类并作为正样本, 将非尾迹的特征向量标注作为噪声类并作为负样本。随机打乱 1200 组特征向量的顺序, 取其中 1000 组作为训练集, 另外 200 组作为测试集。

在训练过程中, 当 $C=4.0$ 时模型在训练集

(Train set)上取得了最好的分类效果,对应的统计数据如表 1 所示。可以看出,模型对训练集数据有很好的分类效果,准确率(Accuracy)(所有预测正确的数据占总数据的比例)为 97.80%,召回率(Recall)(正样本判断为正的数目占有正样本的比例)为 97.85%,精确率(Precision)(正样本检测为正的的数据占总的检测为正的的数据比例)为 98.50%。在测试集(test set)上,将 200 组特征向量输入到训练得到的模型中进行决策,从表 1 可以看出,模型在测试集上有着 86.50%的准确率、93.48%的召回率和 87.76%的精确率。这表明通过 SVM 能够有效地对峰值点的真实性进行决策判别,训练模型具有很好的适用性,对于不参与训练的测试集数据仍然

有 86.50%的准确率。

经过决策判别后的峰值点分布情况如图 17 所示,通过 Radon 逆变换还原到原始图像空间,如图 18 所示。可以看出,经过决策判别后,干扰的噪声峰值点被有效滤除,留下来的均是尾迹的有效线性特征。随着水下目标运动速度的增加,尾迹中分歧波的成分逐渐占据主导地位,在模拟图像上的线性特征愈加明显,这在本文的提取算法中也有体现:速度为 25 m/s 时的提取效果最好,速度为 17 m/s 时的提取效果次之,速度为 9 m/s 时尾迹已基本被淹没在海浪波中,凭借肉眼很难判断出尾迹位置,但由于伯努利水丘的存在,依然可以用上述方法进行提取。

表 1 训练集和测试集的模型准确率数据

Table 1 Model accuracy data for train set and test set

Dataset type		True number	False number	Accuracy /%	Recall /%	Precision /%
Train set	Positive	592	13	97.8	97.85	98.5
	Negative	9	386			
Test set	Positive	129	9	86.5	93.48	87.76
	Negative	18	44			

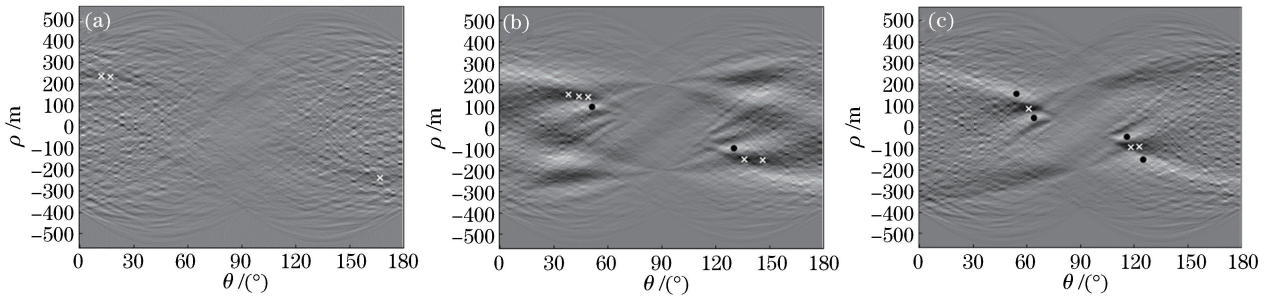


图 17 决策后 Radon 空间的域峰值点。(a) $v=9$ m/s;(b) $v=17$ m/s;(c) $v=25$ m/s

Fig. 17 Peak points in Radon space after decision. (a) $v=9$ m/s; (b) $v=17$ m/s; (c) $v=25$ m/s

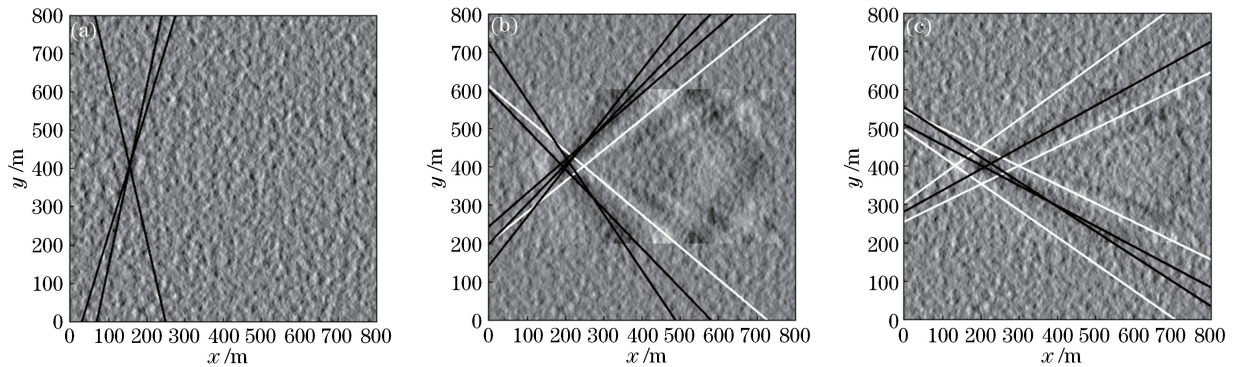


图 18 决策后尾迹提取结果。(a) $v=9$ m/s;(b) $v=17$ m/s;(c) $v=25$ m/s

Fig. 18 Wake extraction results after decision. (a) $v=9$ m/s; (b) $v=17$ m/s; (c) $v=25$ m/s

4 结 论

在基于水面波纹的水下运动目标成像探测背景下,研究了从水面混合波纹中提取水下运动目标水面特征波纹的 Radon 变换方法。首先,通过数值模拟的方法获得了不同海面风速、不同速度的海面混合波纹(水下运动目标的水面特征波纹结合海面风生重力波)图像,作为后续尾迹提取的数据集;然后,分析水面特征波纹在 Radon 空间域的表现特点;最后,提出一种基于 Radon 变换的水下运动目标探测算法,包括水面波纹图像预处理、Radon 变换域的双邻域自适应门限局部峰值点提取方法、基于连续小波变换的峰值点特征提取结合特征向量的 SVM 决策判别等。基于模拟数据集对提取算法的准确率进行评估,结果证明了算法的有效性,该研究为基于光学偏振成像的水下运动目标探测提供了参考。

从混合波纹中提取水下运动目标的特征波纹,并有效地进行水下运动目标的识别是一个复杂的过程。本研究采用的是模拟的混合波纹,但实际海面波纹具有更复杂的分布细节,在研究中需要加入更多的制约因素,这也将是下一步研究和实验的内容。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Zhang X C, Zhao F, *et al.* Progress of investigation on non-acoustic detection for submarine wake originated from naval hydrodynamics [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2003, 7(2): 121-128.
张军, 张效慈, 赵峰, 等. 源于水动力学的潜艇尾迹非声探测技术研究之进展 [J]. *船舶力学*, 2003, 7(2): 121-128.
- [2] Zhou Q F, Liu J H, Xiong W Z, *et al.* Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112005.
周前飞, 刘晶红, 熊文卓, 等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112005.
- [3] Lu X T, Jin W Q, Li L, *et al.* Theory and analysis of a large field polarization imaging system with obliquely incident light [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2495-2508.
- [4] Zhang Y J, Wang X, He S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized bi-directional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0329002.
- [5] Liu J, Lu X T, Jin W Q, *et al.* Transparent surface orientation from polarization imaging using vector operation [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2306-2313.
- [6] Rey M T, Tunaley J K, Folinsbee J T, *et al.* Application of radon transform techniques to wake detection in seasat-a SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 553-560.
- [7] Mata-Moya D, Jarabo-Amores P, Jimenez-Chaparro B, *et al.* Application of mean-shift filtering to ship wakes detection in SAR images [C] // 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), June 7-10, 2010, Aachen, Germany. New York: IEEE, 2011: 890-893.
- [8] Graziano M D. SAR-based ship route estimation by wake components detection and classification [C] // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July 26-31, 2015, Milan, Italy. New York: IEEE, 2015: 3255-3258.
- [9] Yang G Z, Yu J, Xiao C B, *et al.* Ship wake detection in SAR images with complex background using morphological dictionary learning [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(10): 1713-1725.
杨国铮, 禹晶, 肖创柏, 等. 基于形态字典学习的复杂背景 SAR 图像舰船尾迹检测 [J]. *自动化学报*, 2017, 43(10): 1713-1725.
- [10] Xing X W, Ji K F, Zou H X, *et al.* An enhancing normalized radon transform method for ship wake detection in SAR imagery [C] // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), April 23-26, 2012, Nuremberg, Germany. New York: IEEE, 2012: 559-562.
- [11] Li D M, Jin W Q, Li L, *et al.* Numerical simulation and analysis of free-surface wake generated by moving submerged target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1126004.
李丹梦, 金伟其, 李力, 等. 水下运动目标的水面波纹数值模拟及分析 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1126004.
- [12] Li H, Guo C, Li X F. 3-D visual simulation of irregular ocean waves based on Matlab [J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(7): 1057-1059.
李晖, 郭晨, 李晓方. 基于 Matlab 的不规则海浪三维仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2003, 15(7): 1057-1059.
- [13] Yang H P, Sun J G. Wave simulation based on ocean wave spectrums [J]. *Journal of System Simulation*,

- 2002, 14(9): 1175-1178.
- 杨怀平, 孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1175-1178.
- [14] Jain A, Ansari S. Radon transform theory for random fields and optimum image reconstruction from noisy projections[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), March 19-21, 1984, San Diego, CA, USA. New York: IEEE: 495-498.
- [15] Kaiser G, Hudgins L H. A friendly guide to wavelets [J]. Physics Today, 1995, 48(7): 57-58.
- [16] Zhou X, Zhao H. Three-dimensional profilometry based on Mexican hat wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 197-202.
- 周翔, 赵宏. 基于 Mexican hat 小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 197-202.
- [17] Wang S T, Wu X, Zhu W H, *et al.* Fluorescence detection of polycyclic aromatic hydrocarbons by parallel factor combined with support vector machine [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0530002.
- 王书涛, 吴兴, 朱文浩, 等. 平行因子结合支持向量机对多环芳烃的荧光检测 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0530002.