

航海雷达图像阴影提取波高算法的改进研究*

卢志忠¹, 杨江洪¹, 黄玉², 卫延波¹, 杨子翰¹

(1. 哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学理学院 哈尔滨 150001)

摘要:应用几何阴影法从航海雷达图像中反演有效波高时,阴影分割的准确性直接影响估测波高的精度。针对这一问题,对Rune G提出的阴影算法(为便于表述,简称为Rune算法)进行了改进,基于差分边缘检测的思想提出了一种准确划分图像阴影的自适应方法,方法同时继承了Rune算法的优点,估计有效波高时无需外部提供参考。通过与Rune方法比较,所提出的方法分割的局部阴影更为合理。利用福建平潭试验基地获得的图像数据对该算法进行了验证,结果表明改进后的估测法获得的波高的精度有所提高。

关键词: 雷达图像;几何阴影;阴影分割;有效波高

中图分类号: TN911.73 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research on the improvement on the algorithm for retrieving wave height from shadow in marine radar images

Lu Zhizhong¹, Yang Jianghong¹, Huang Yu², Wei Yanbo¹, Yang Zihan¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: When the geometric shadow method is applied to retrieve the significant wave height from marine radar images, the accuracy of shadow segmentation directly affects the performance of wave height estimation. Aiming at this problem, the Rune G's shadowing algorithm (for the sake of convenience of description, the algorithm proposed by Rune's method) is improved; an adaptive method that can accurately segment the shadow of the radar images is proposed based on the idea of differential edge detection. This novel method also inherits the advantage of the Rune's algorithm, and could estimate the significant wave height without any external reference. Compared with the Rune's method, the partial shadow segmented using the proposed algorithm is more reasonable. The image data acquired from Pingtan Test Base, Fujian were used to verify the effectiveness of the proposed algorithm. The results show that the improved estimation algorithm increases the accuracy of the wave height.

Keywords: radar image; geometric shadow; shadow split; significant wave height

1 引言

海浪的准确观测对船舶的航行安全及航路选择、海洋军事技术、国家海洋安全和灾害预报等方面都具有重要的意义,对海洋实现全方位、多手段立体监测的需求迫切^[1-3]。传统的海浪观测方式大多为海上单点观测,其费用较高,无法大面积进行,随着海洋遥感技术的发展,海浪大面积测量已成为可能,利用X波段船用雷达对海浪

进行实时监测是近年来海洋遥感的一个研究热点^[4-6]。

目前,利用X波段雷达海面图像提取海浪波高的主流方法有两类,分别是谱分析法与图像统计法。谱分析法,通常需要利用现场实测波高数据来标定。1985年,Young I. R.等人^[7]利用X波段雷达海杂波信号在空间和时间上的变化特性首次采用三维傅里叶方法计算图像的波数频率谱,为此后工程上利用信噪比测波高奠定了基础;1999年,Nieto-Borge J. C.等人^[8]首次提出了基于信噪比计算有效波高的方法,采用最小二乘法拟合工程参

数,并与浮标数据进行了对比;2002年,Gangeskar R^[9]提出了基于加权最小二乘的改进色散关系滤波器,使得海浪谱估测更加准确,提高了波高估测精度;2008年,Nieto-Borge J. C. 等人^[10]通过对信噪比进行分析,提出利用背景噪声的谱能量来估计有效波高,取得较好的实验结果;2011年,Serafino F 等人^[11]对海浪信息提取中混叠效应的影响进行了分析,基于线性重力波理论提出了消除混叠效应的方法,提高动态环境下的波高检测精度;2011年,袁赣南等人^[12]提出了一种基于自适应阈值选取的迭代估流方法,提高了色散滤波器精度,波高估测精度进一步改善;同年,沈继红等人^[13]利用改进 Laplace 算子对图像噪声进行预处理,提高了信噪比计算精度;2013年,沈继红等人^[14]借助样本的 P 分位值法剔除数据中的异常点,并利用分段最小二乘法提高了有效波高拟合精度。

图像统计法的基本原理是海浪遥感成像中的各种物理调制特性在雷达灰度图像统计中有显著特征,根据这一特点可获取海浪波高等参数。1990年,Wetzel L. B.^[15]将海面假设为高斯面,利用粗糙面几何光学原理分析了电磁波低掠射角入射下的海面后向散射模型,根据灰度阈值将海面雷达图像分割为亮区和暗区,通过求取图像上亮暗面积比例来估测波高;1998年,Buckley J. R. 等人^[16]针对 Wetzel 方法在高海况下失效的问题,提出基于归一化雷达截面(normalized radar cross section, NRCS)对灰度阈值进行分段标定的方法,实验证明改进方法估测的波高精度有所提高;2000年,Gangeskar R^[17]通过大量实验发现高海况下随着图像阴影比例增加,差分图像灰度的方差与波高呈现线性变化,利用这一关系得到波高与方差相关系数在0.9左右;2001年,Buckley J. R.^[18]通过仿真实验分析了 Wetzel 出现计算偏差的原因,并讨论了径向距离与阈值的关系,提出阈值应随着雷达有效作用距离变化,其结论表明在有效的掠射范围 $1^\circ \sim 10^\circ$ 内阈值变化的范围是有限的;2012年,Plant W. J. 等人^[19]讨论了不同的极化方式下几何阴影与局部阴影在阴影调制中主导作用问题,实验表明局部阴影在海杂波阴影调制方面占主导作用,研究结论为利用阴影计算波高提供了理论依据;2014年,Gangeskar R^[20]认为 Plant W. J. 等人实验讨论的两种阴影间的差别较小,而且与信噪比、几何因素及雷达机理有关,因此在实际应用中很难辨别雷达图像是主要受几何阴影还是局部阴影影响。进而 Rune 方法利用边缘检测思想设计了一个带通滤波器来提取雷达图像中阴影,并结合随机粗糙面几何阴影理论获得了有效波高,算法成功解决了阴影辨别问题,在无需外部参考标校下便可直接估计波高。但 Rune 并没深入讨论阴影分割问题,而是采用固定参数对阴影区进行粗略划分并分别求取阴影比例,这降低了波高估测的精度。2016年,Liu X 等人^[21]针对 Rune 方法中固定阈值选取的缺

陷,提出了通过平滑灰度强度柱状图来提高阈值选取精度的方法,但该方法仍然采用 Rune 的图像分割方法。2016年,Wijaya A. P. 等人^[22]根据雷达图像中阴影随到雷达天线距离变化的特征,提出一种利用可视化函数来估计有效波高的新方法,并用仿真的雷达图像证明了该方法的可行性。

在 Rune 基础上,结合随机粗糙面几何光学理论和雷达图像处理技术分析了导航雷达图像序列的阴影特性和处理算法,进一步讨论了图像阴影区块的自适应分割问题,采用一阶差分法实现了局部阴影区块的准确分割,更精确地计算出阴影比例,提高了复杂海况下波高估测的准确度。结合实验数据分析了坡度最优值选择,最后用实测波高数据作为参考来评价改进后有效波高估测算法的性能。

2 X 波段雷达图像阴影估测波高

2.1 低掠射下的海面几何阴影

在真实自然界中海面由许多个随机余弦波的叠加而成,电磁波照射下的海面可以看成是二维随机粗糙面模型。为了便于研究,国内外的学者将进一步简化成一维粗糙表面模型^[23]。一维高斯面建立的低掠射下的海面阴影模型如图1所示。

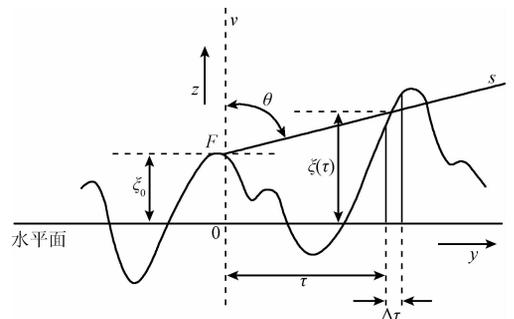


图1 电磁波低掠射照射下的一维海面模型

Fig. 1 One-dimensional sea surface model under low grazing illustrating of electromagnetic wave

高斯面高度密度函数 $P(\xi)$ 为:

$$P(\xi) \Delta \xi = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \nu} e^{-\xi^2/2\nu^2} \cdot \Delta \xi \quad (1)$$

式中: ξ 为高斯面距离水平面的起伏高度, $\Delta \xi$ 为水平轴方向增加 $\Delta \tau$ 下高斯面的高度增量, ν 为起伏高度的均方根。根据 Smith B. G. 的结论,图1中高斯面上点 F 不位于阴影中的概率^[23](称为照度概率)为:

$$L(\theta) = \frac{1 - 0.5 \operatorname{erfc}(\mu \sqrt{2} \sigma_{rms})}{\Lambda(\mu) + 1} \quad (2)$$

其中:

$$\Lambda(\mu) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sigma_{\text{rms}} / \mu \cdot e^{-\mu^2/2\sigma_{\text{rms}}^2} - \text{erfc}(\mu/\sqrt{2}\sigma_{\text{rms}})}{2} \quad (3)$$

$$\mu = \tan(\theta) \quad (4)$$

式中: σ_{rms} 为均方根坡度, erfc 余补误差函数。根据随机粗糙面几何阴影中照度(亮区概率)与阴影比例函数的关系为:

$$S(\theta) = 1 - L(\theta) \quad (5)$$

上式将阴影比例与照度、均方根坡度联系到一起。式(2)将作为本文的史密斯拟合函数^[23], 用来估测均方根坡度 σ_{rms} 。

根据上面简单阐述的几何光学估测波高的理论, 获取照度概率的关键在于准确计算阴影比例函数, 重点体现在从图像中准确提取阴影。

2.2 估计阴影灰度阈值

由于海浪的调制效应, 海面雷达图像由亮暗相间的条纹组成, 根据上述模型首先需要得到图像的阴影比例, 而提取图像阴影的前提是要估测阴影阈值。现有的阴影阈值估计方法主要有两种, 其一是一阶差分图像直方图中通过观测获取阈值, 存在无法进行直观校验、阈值不稳定等缺陷。另一种较好的策略是基于粗糙度和边界特征直接检测图像阴影区^[24], 本文采用的方法是基于图像的边缘估计与边缘检测^[25], 该方法首先需要估测阴影区域, 然后在对阴影区域数据进行处理, 计算阴影阈值。

2.2.1 图像阴影边缘检测

首先对雷达图像进行简单单元差分算子(见式(7))处理得到梯度图像, 对雷达图像相邻的8个方向上分别进行卷积运算^[21]。如对简单单元差分算子在右边邻域内做卷积:

$$\mathbf{I}_{E_1}(r, \theta) = \mathbf{I}(r, \theta) \otimes \mathbf{H}_1(r, \theta) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{I}(r, \theta)$ 是原始雷达图像, r 是距离, θ 是方位角, $\mathbf{I}_{E_1}(r, \theta)$ 是左侧方向的边缘梯度。右边邻域像元差分算子 \mathbf{H}_1 给出如式(7)所示, 不同方向上差分算子记为 $\mathbf{H}_1 \sim \mathbf{H}_8$ 。

$$\mathbf{H}_1(r, \theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其次, 选取前 $N\%$ 时对应的像素值作为阈值, 对单个方向上卷积后图像梯度 $\mathbf{I}_{E_1} \sim \mathbf{I}_{E_8}$ 提取图像边缘^[19]。以第 i 幅边缘图像求取为例:

$$\mathbf{I}_{T_i}(r, \theta) = \begin{cases} 1, & \mathbf{I}_{E_i}(r, \theta) > \text{threshold} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

最后, 将8个方向的边缘图像叠加成一个整体的边缘图像, 将各个方向上边缘图像做和:

$$\mathbf{I}_T(r, \theta) = \sum_{i=1}^8 \mathbf{I}_{T_i}(r, \theta) \quad (9)$$

2.2.2 剔除孤立噪声点

为了删除某些孤立暗点噪声, 利用边缘比较法将每个点与阈值 τ_F 作比较:

$$\mathbf{I}_F(r, \theta) = \begin{cases} 1, & \mathbf{I}_T(r, \theta) \in [1, \tau_F] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

可疑孤立噪声点的判定原则是: 若这个点在各个方向都有边缘, 则认为该点属于孤立噪声需要移除, 由于噪声会影响阴影阈值分布, 因此孤立点移除对于全局有用数据信息影响较小^[20-21, 26]。

2.2.3 计算阴影阈值

经过上述处理得到图像边缘 \mathbf{I}_F (过渡区) 来绘制过渡区的灰度直方图。对于在图像边缘的每一个孤立的1, 所对应的原始雷达图像中的像素值 η , 通过对应关系来建立一个过渡区的图像直方图函数 $F_H(\eta)$ 。之后, 对直方图函数取众数定义为阴影灰度阈值 τ_s 。

$$\tau_s = \text{mode}(F_H(\eta)) \quad (11)$$

2.2.4 提取阴影图像

利用 τ_s 将原始雷达图像分割成阴影图像 \mathbf{I}_s ^[19]:

$$\mathbf{I}_s(r, \theta) = \begin{cases} 1, & \mathbf{I}(r, \theta) < \tau_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{I}(r, \theta)$ 原始图像。

2.3 改进阴影分割法求取阴影比例

2.3.1 分割阴影区

阴影比例 $S(\theta)$ 是掠射角的函数, 为了提高计算精度需按掠射角 θ 划分成若干个区块, 才能准确计算出阴影比例值。因此首先将雷达图像按方位角每 10° 左右划分为不同的区, 再将每一区按径向距离分割成若干块并分别求取阴影比例。

在雷达天线高度固定的条件下, 以天线为圆心的坐标系中, 掠射角的大小与径向距离的长短有关, 如式(17)所示, 通过合理分割径向距离的大小达到合理划分掠射角的效果。

Rune 的分块方式是: 将每一区按 35 ~ 50 m 的径向步长平均分割为固定的 50 块左右, 这种分割方式存在明显缺陷, 无法保证在不同海况条件下所分区块能同时覆盖亮区和暗区, 更无法保证二者比例的一致性, 导致阴影比例计算误差较大且不稳定。

根据阴影比例的定义, 所分区块中亮暗区应成对出现, Rune 的固定分割法没办法准确划分出有效区块, 特别是在高海况、长波长极限条件下沿波向方向的固定分块中仅包含亮区或暗区, 导致阴影比例计算完全失效。

针对上述缺点, 提出了一种基于图像差分法自适应阴影分割算法, 保证了分割块中分布有亮暗条纹, 并计算出每一分块对应掠射角, 具体步骤如下。

1) 处理后阴影图像 I_s 由 0 个 1 组成, 其中阴影为 1, 非阴影为 0, 基于阴影图像这一特点首先采用一阶图像差分法对 I_s 进行处理。例如: 对分区中的一条线数据做差分, 如式(12)所示第 i 条线差分为:

$$I_p(r, \theta_i) = I_s(r, \theta_i) \otimes \mathbf{w} \quad (13)$$

式中: \mathbf{w} 为差分算子, $\mathbf{w} = [1, -1]$, I_p 值为 $1/-1$ 时说明该点位于暗区和亮区的分割点, 0 则为非分割点。

2) 统计第 i 条线 I_p 上 1 的个数, 设为 m 个, 则第 i 条线最佳阴影划分块数为 n_i 。

$$n_i = m - 1 \quad (14)$$

依此类推得出每条线计算的最佳阴影块数 n_i 并组成的集合 f 。对集合 f 中记录的该分区所有线的最佳块数值取众数, 即可得到该分区所需分割的块数 N :

$$N = \text{mode}(f(n_i)) \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (15)$$

式中: L 为该分区中的总线数。

3) 将该区分成 N 块, 其中第 j 块的分割点的坐标:

$$x_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{ij} \quad (16)$$

式中: k 为该区线中分割块数等于众数块数 N 的线的总数, x_j 为分割块终止坐标, x_{ij} 为分割块坐标。第 j 块对应的掠射角 θ_j 为:

$$\theta_j = \tan\left(\frac{h}{(x_i + x_j)/2 \cdot dr}\right) \quad (17)$$

式中: x_i 为与 x_j 同一分割块的起始坐标, dr 为距离分辨率, h 为天线高度。

2.3.2 计算阴影比例并求取平均均方根坡度

通过上述算法计算分割得的每一块的阴影比例 $S(\theta)$, 利用每一个区上得到阴影比例 $S(\theta)$ 后代入式(2)与(5), 采用下山单纯形法拟合求取均方根坡度 σ_{rms} 如下式:

$$\sigma_{\text{rms}}^A = \sqrt{\frac{1}{H} \sum \sigma_{\text{rms}}^2} \quad (18)$$

式中: H 为阴影图像分割成的区的总数。

2.4 估测有效波高

根据波浪链坡度的定义^[21], 在满足深水条件假设时, 得到有效波高为:

$$H_{m0} = \frac{\delta_{\text{rms}}^A \cdot g \cdot T_{m02}^2}{\sqrt{2} \cdot \pi} \quad (19)$$

式中: T_{m02} 为跨零周期, g 为重力加速度。

2.5 雷达图像阴影提取波高主要流程

- 1) 估计灰度阈值将图像分割为阴影区与非阴影区;
- 2) 计算阴影图像的局部阴影比例;
- 3) 利用史密斯函数(2)式估计均方曲面坡度;
- 4) 通过均方根坡度、跨零周期与有效波高之间的关系估测出有效波高。

算法关键在于准确估计阴影灰度阈值来合理分割阴影, 求取图像阴影比例^[21]。

3 数据实验分析

2005 ~ 2012 年, 哈尔滨工程大学承担了国防重点型号科研项目“舰载 X 波段航海雷达反演海浪技术”, 研究领域覆盖雷达遥感海浪、海流、海面风场、降水强度等, 期间分别在山东龙口、福建平潭等地开展了为期 4 年的海上定平台数据采集和性能验证试验, 并利用试验舰在东海、南海等地开展了为期 2 年的动平台海上科研试验, 积累了 X 波段航海雷达在不同海况条件下的大量实测数据, 本文所用的数据来源于 2010 年 10 ~ 11 月福建平潭海域实测数据共 87 组, 以及 2011 年 12 月在渤海海域船载试验数据共 10 组。

实验航海雷达的工作方式为旋转周期性扫描, 参数如表 1 所示, 图像的分辨率为径向 7.5 m、角度向 0.1°, 距离向共采样 600 个点, 雷达图像回波强度是 0 ~ -2.5 V, A/D 变换后映射在 0 ~ 8 191 范围内, 时间分辨率约 2.5 s, 天线高度岸基为 45 m、船基为 25 m。

表 1 X 波段导航雷达参数

Table 1 The X-band navigation radar parameters

雷达参数	参数值
天线旋转速度	22 r/min
脉冲功率	25 kW
天线增益	31 dB
极化方式	HH
水平波束宽度	0.9°
垂直波束宽度	21°
脉冲重复频率	2 000 Hz
脉冲宽度	0.07 μs

实验期间风速大多在 15 m/s, 海上数据波高范围为 2 ~ 3 m。由于回波强度随着雷达探测半径逐渐减弱, 远处海杂波信号将降低至背景噪声以下, 故选取的径向图像上限为 2 000 m, 剔除遮挡因素角度向范围为 0° ~ 180°, 按角度向划分为每 10° 一个区。

首先需要进行稀疏化处理, 由于原始雷达图像的角度分辨率较高, 图像灰度沿角度向变化平缓, 不利于图像边缘检测, 为此首先将图像角度向分辨率降低至 0.6°。

之后获取图像阴影阈值, 取图像前 10% 的像素值作为梯度阈值, 取 $\tau_F = 6$ 去除孤立噪声点。获得过渡区(阴影边缘), 进行直方图统计得到阈值 τ_s , 经过阈值比较后得到阴影区, 如图 2 所示。

阴影图像船向/(°)=215 风向/(°)=40.81 风速/m=13.26 浪高/m=4.0

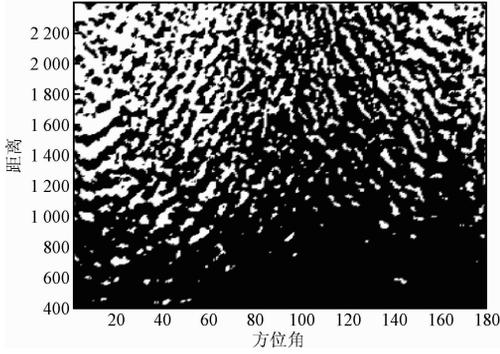


图2 阈值处理后的阴影图像(亮的部分为阴影), $\tau_F = 6, N = 10$, 阈值 $\tau_S = 800$

Fig.2 The shadow image after threshold processing (the bright part is the shadow), where $\tau_F = 6, N = 10$, threshold value $\tau_S = 800$

分别用 Rune 的分割法与本文提出的方法对阴影进行分割,求取阴影比例。利用式(5)得到一组的照度与掠射角关系,如图3所示,数据1和数据3分别为本文和 Rune 方法计算的亮区概率散点图,数据2曲线为利用式(2)得的照度曲线,横轴单位为 rad。通过比较散点图与参考亮区概率曲线的偏差可知,改进后散点更为集中在亮区概率曲线两侧。

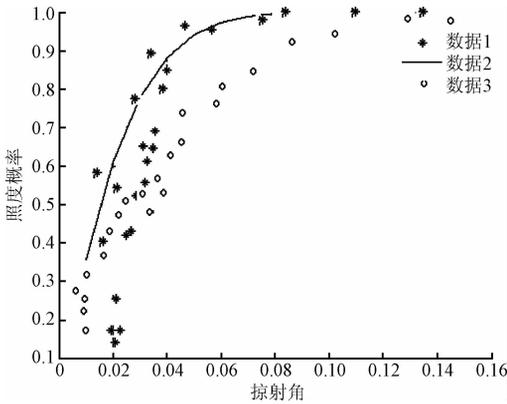


图3 两种方法得到的亮区概率与参照值比较示意图
Fig.3 Comparison schematic illustration of the probability of bright area and the reference value between two methods

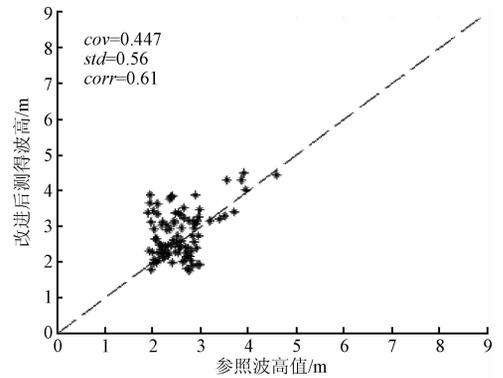
通过多组数据试验比较,Rune 方法求得的均方根坡度普遍高于本文所测得值,部分对比结果如表2所示。

选取97组数据重复上述实验,其中有10组海上数据,为了避免远近效应对阴影造成影响,求取阴影比例函数均只采纳掠射角大于1°的值。本文方法测得的有效波高与参考测出波高比较如图4所示,左图星状散点分布相对集中,而右图星状分布较散,且总体分布偏高。

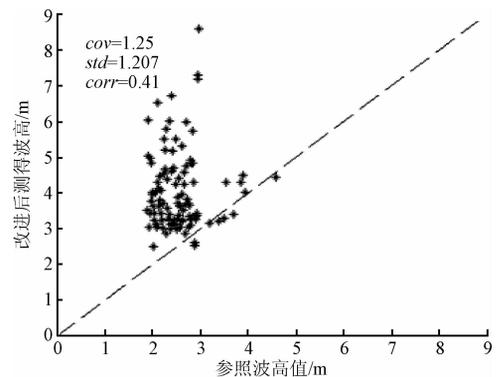
表2 两种方法得到坡度与参照标准对比

Table 2 The comparison of the obtained slope and the reference between two methods

参照有效波高	参照均方根坡度	本文方法得到坡度	Rune 方法计算坡度
2.00	0.015 2	0.018 0	0.021 0
2.20	0.016 8	0.023 0	0.022 3
2.30	0.018 9	0.019 3	0.024 7
2.40	0.018 3	0.024 1	0.025 1
2.80	0.034 0	0.032 5	0.037 2
2.93	0.029 5	0.029 0	0.032 1
3.70	0.037 2	0.046 0	0.042 1
3.86	0.041 0	0.047 1	0.051 3
3.91	0.046 0	0.054 1	0.057 1
4.59	0.046 9	0.050 3	0.053 0



(a) 本文算法估计的波高与参考值的散点图
(a) The scatterplot of the estimated wave height and reference value using the proposed method



(b) Rune算法估计的波高与参考值的散点图
(b) The scatterplot of the estimated wave height and reference value using the Rune's method

图4 估计的有效波高与参考值的散点图

Fig.4 The scatterplots of the estimated significant wave height and reference value

改进后的方法测得的波高的均方根误差为0.56,方差为0.45,而Rune均方根误差为1.21,方差为1.25。改进后的算法测得的波高与外部参考波高的相关系数为

0.61, Rune 的相关系数为 0.41。通过比较本算法绝对误差更小、相关系数更大,验证了本文提出的改进算法比 Rune 方法更有优势。

4 结 论

基于阴影比例的图像统计法估计有效波高时,具有不需外部提供参考进行标定的优势,具有较大的研究价值。目前采用固定步长对阴影分割的方法会导致不同海况条件下阴影比例计算误差较大且呈不稳定性分布,分割数量太多或太少都会丢失有效的数据信息,导致波高估测不准。

本文提出了一种自适应分割阴影区块的算法,基于图像差分的思想,该算法能够按照阴影区的分布特征,自动将其分成最佳数量的区块并确定最佳分割位置,有效提高了阴影比例计算的精度,进而提高了波高反演精度。对 Rune 阴影算法改进后采用实测的雷达图像数据进行了波高反演实验,改进后的算法估测有效波高值与参考波高的相关系数为 0.61,均方根误差为 0.56,方差为 0.45,均优于 Rune 算法估测结果。试验结果表明,合理分割阴影区块能提高波高估测的精度。在低海况件下阴影相对减少,阴影比例有所降低,改进后的算法检测得的波高精度与 Rune 相比有所提高。未来还需要进一步考虑不同海况、风向、风速、浪向等条件下算法的适用性。

参考文献

- [1] 何艳丽,吕雪芹,敖振浪. 海况环境对高频地波雷达信噪比的影响分析[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(增刊2): 201-204.
HE Y L, LV X Q, AO ZH L. Analysis of impact of environment on high frequency surface wave radar SNR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(Suppl. 2): 201-204.
- [2] LYU W H. Editorial: Special issue on marine instruments[J]. Instrumentation, 2015, 2(2): 1-2.
- [3] WEI Y, LU Z, HUANG Y. Wave Parameters inversion from X-band marine radar image sequence based on the novel dispersion relation band-pass filter on the moving platform [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, 13(8): 5470-5477.
- [4] 凌祥,王夷,赵雷鸣,等. 海况环境对高频地波雷达信噪比的影响分析[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 108-111.
LING X, WANG Y, ZHAO L M, et al. Simulation and generation methods of two-dimensional rang-doppler sea clutter signals [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 37(5): 108-111.
- [5] 高骥超,王小青,种劲松. 一种基于序列 SAR 图像的

海浪对消方法[J]. 国外电子测量技术. 2014, 35(9): 57-60.

GAO J CH, WANG X Q, CHONG J S. Ocean wave clutter cancellation method based on series of SAR images [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 35(9): 57-60.

- [6] WEI Y B, ZHANG J K, LU ZH ZH. A novel successive cancellation method to retrieve sea wave components from spatio-temporal remote sensing image sequences [J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 607.
- [7] YOUNG I R, ROSENTHAL W, ZIEMER F. A three dimensional analysis of marine radar images for determination of ocean wave directionality and surface currents [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C1): 1049-1059.
- [8] NIETO-BORGE J C, HESSNER K, REICHERT K. Estimation of the significant wave height with X-band nautical radars [C]. Proceedings OMAE Conference, 1999: 1-8.
- [9] GANGESKAR R. Ocean current estimated from X-band radar sea surface images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(4): 783-792.
- [10] NIETO-BORGE J C, HESSNER K, JARABO A P, et al. Signal-to-noise ratio analysis to estimate ocean wave heights from X-band marine radar image time series [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2008, 2(1): 35-41.
- [11] SERAFINO F, LUGNI C, NIETO-BORGE J C, et al. A simple strategy to mitigate the aliasing effect in X-band marine radar data: Numerical results for 2D case [J]. Sensors, 2011, 11(1): 1009-1027.
- [12] 袁赣南,贾瑞才,戴运桃,等. 基于海杂波图像的海表层流信息提取算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8): 1845-1850.
YUAN G N, JIA R C, DAI Y T, et al. Research on the extraction algorithm of ocean surface current based on sea clutter image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(8): 1845-1850.
- [13] 沈继红,李英,戴运桃,等. X波段雷达图像同频干扰的抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1089-1094.
SHEN J H, LI Y, DAI Y T, et al. Research on co-channel interference suppression algorithm for X-band radar image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1089-1094.
- [14] 沈继红,宋静怡,李焱,等. 导航雷达反演海面波高的方法研究[J]. 中国航海, 2013, 36(1): 9-12.

- SHEN J H, SONG J Y, LI Y, et al. Research on co-channel interference suppression algorithm for X-band radar image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 36(1): 9-12.
- [15] WETZEL L B. Electromagnetic scattering from the sea at low grazing angles [C]. Surface Waves and Fluxes, 1990: 109-172.
- [16] BUCKLEY J R, ALER J. Enhancements in the determination of ocean surface wave height from grazing incidence microwave backscatter [C]. IEEE ICARSS, 1998: 2487-2489.
- [17] GANGESKAR R. Wave height derived by texture analysis of X-band radar sea surface images [C]. IEEE ICARSS, 2000: 2952-2959.
- [18] BUCKLEY J R. Can geometric optics fully describe radar images of the sea surface at grazing incidence [C]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing, 2001: 1732-1734.
- [19] PLANT W J, FARQUHARSON G. Wave shadowing and modulation of microwave backscatter from the ocean [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117 (C8): 72-82.
- [20] GANGESKAR R. An algorithm for estimation of wave height from shadowing in X-Band radar sea surface images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3373-3381.
- [21] LIU X L, HUANG W M, GILL E W. Wave height estimation from shipborne X-band nautical radar images [J]. Journal of Sensors, 2016, doi: 10.1155/2016/1078053.
- [22] WIJAYA A P, GROESEN E V. Determination of the significant wave height from shadowing in synthetic radar images [J]. Ocean Engineering, 2016, 114 (3): 204-215.
- [23] SMITH B G. Geometric shadowing of a random rough surface [J]. IEEE Transactions Antennas Propagation, 1967, 15(5): 668-671.
- [24] 李晖晖, 钱林弘, 杨宁, 等. 基于边缘预测和稀疏约束的湍流图像盲复原术 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 721-728.
- LI H H, QIAN L H, YANG N, et al. Turbulence degraded image blind restoration based on sparsity regularization and edge prediction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 36(4): 721-728.
- [25] PRATT W K. Digital image processing. Hoboken [M]. NewYork: Wiley, 1991.
- [26] 赵庆平, 陈得宝, 姜恩华, 等. 一种改进权重的非局部均值图像去噪算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 334-339.
- ZHAO Q P, CHEN D B, JIANG EN H, et al. Improved weighted non-local algorithm filter for image denoising [J]. Journal of Electronics Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3): 334-339.

作者简介



卢志忠(通讯作者), 1989年于复旦大学获得学士学位, 分别在2001年和2008年于哈尔滨工程大学获得硕士学位和博士学位, 现为哈尔滨工程大学自动化学院教授, 主要研究方向为舰船综合水文信息监测及预报保障技术。

E-mail: lu_zhi_zhong@sina.com

Lu Zhizhong (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1989 from Fudan University, received his M. Sc. degree in 2001 and Ph. D. degree in 2008 both from Harbin Engineering University. Now, he is a professor in College of Automation, Harbin Engineering University. His main research interest is marine integrated hydrological remote sensing and information forecasting technology.



杨江洪, 2012年于黑龙江科技大学获得学士学位, 现为哈尔滨工程大学硕士研究生, 主要研究方向为海洋遥感。

E-mail: yjh_only@163.com

Yang Jianghong received his B. Sc. degree in 2012 from Heilongjiang University of Science and Technology. Now, he is a master student in College of Automation, Harbin Engineering University. His main research interest is ocean remote sensing.