

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209311

# 基于雷达视频累积的海冰密集度检测精度优化

李诺舟<sup>1</sup> 罗小泽<sup>2</sup> 刘彤<sup>1</sup> 李航琪<sup>1</sup>

(1.大连海事大学航海学院 大连 116026; 2.大连海星航海科技有限公司 大连 116023)

**摘要:**针对海冰流速较慢的特点和雷达海冰监测系统对海冰密集度检测精度的需求,提出视频累积和优化均值滤波算法,分别在时间域和空间域两个维度对数据滤波。采用去卷积算法处理雷达回波,减小水平波束宽度 $\theta_H$ 导致的角向误差和雷达脉宽效应引起的径向误差。以噪声的统计特性为基础,利用数值仿真验证视频累积和优化均值滤波算法对海冰雷达回波图像信噪比的提升效果。以车载移动雷达 FAR-2117 在夏家河水域实测数据为例试验,结果表明,利用该方法检测海冰密集度的精度较高,误差在工程要求可接受的范围内。

**关键词:**海冰密集度;雷达;去卷积算法;视频累积;优化均值滤波算法

**中图分类号:** U666.14; TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.4099

## Optimization of sea ice concentration detection accuracy based on radar video accumulation

Li Nuozhou<sup>1</sup> Luo Xiaozc<sup>2</sup> Liu Tong<sup>1</sup> Li Hangqi<sup>1</sup>

(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Dalian HaiXing Navigation Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China)

**Abstract:** To focus on low drift of sea ice and to meet the accuracy requirement of radar monitoring system, a video accumulation and optimized mean filtering algorithm is proposed to detect sea ice concentration by data filtering in both time and space dimensions. The deconvolution algorithm is adopted for radar echo processing, which can reduce the angular error due to the horizontal beam width ( $\theta_H$ ) and the radial error due to the radar pulse width ( $\tau$ ) effectively. Based on the statistical characteristics of noise, simulation is used to verify the performance of video accumulation and optimized mean filtering algorithm on the Signal-to-Noise Rate (SNR) of sea ice echo images. Taking the measured data of vehicle-mounted mobile radar FAR-2117 in Xiajiahe for algorithm validation, the results show that the proposed method has high accuracy in detecting sea ice concentration and the error is satisfied to meet the engineering requirement.

**Keywords:** sea ice concentration; radar; deconvolution algorithm; video accumulation; optimized mean filtering algorithm

## 0 引言

对于结冰海域,尤其是季节性结冰海域,利用雷达海冰监测系统精确、及时地检测海冰密集度是保障冬季船舶航行安全、维护近岸海洋工程、处理海上突发事故以及研究海冰工程等的重要技术支撑,对避免航行受阻、降低海上事故风险以及减少近岸海洋工程损坏等具有重要意义。日前已有较多针对海冰密集度检测的研究:文献[1]提出一种稀疏去卷积算法。当雷达扫描区域内目标数量极少时可以判定目标的方位信息具有稀疏特性,以该稀疏特性作为先验信息构造贝叶斯模型,结合 Richardson-Lucy (RL)算法等,重建稀疏目标的原始方位和尺寸。该方法能够有效提高检测

准确性,使雷达图像质量得以保证;文献[2]根据二次规划理论,利用矩阵向量乘积形式将卷积回波模型改写,结合奇异值分解与 BFGS 算法构造观测模型,将方位超分辨问题转化为约束优化问题,进而利用拉格朗日优化定理计算模型的最优解,恢复目标原始方位信号;文献[3]提出一种 FCID 与 CID 交替的级联算法,极大的降低了去卷积计算的复杂度;针对冰水过渡区、碎冰覆盖区等低密集度海冰区域,文献[4]提出了最邻近像素法确定纯冰典型反射率的改进算法,有效提高了低密集度海冰的反演准确性;文献[5]采用 CART 决策树方法从 MODIS 卫星遥感数据种反演海冰面积,传统阈值法反演高悬沙等海洋环境时出现的海冰误判问题得到较好的解决。但相关研究依旧存在以下问题:

收稿日期:2022-03-17

1) 算法运行过程中放大雷达接收机中的噪声, 污染回波图像, 导致恢复的目标尺寸和方位仍存在偏差;

2) 构建收敛模型的过程中, 无法对收敛参数应用自适应计算, 导致算法计算复杂度较高, 不适用于雷达海冰监测系统;

3) 仅在空间域对图像做处理, 没有基于海冰流速慢这一基本特征, 将时间域和空间域统一起来提高海冰密集度检测精度;

4) 未考虑雷达波束与海面交角的存在以及波束功率分布对角向误差补偿的影响。

本文基于在辽东湾海域红沿河、夏家河、鲅鱼圈等地投入使用的 X 波段 12 kW 车载移动雷达 FAR-2117 采集到的海冰雷达回波数据, 首先应用去卷积<sup>[5]</sup>算法做回波处理, 减小水平波束宽度  $\theta_H$  导致的回波图像角向展宽以及雷达脉宽效应引起的“拖尾”。而后分别在时间域和空间域两个维度采用视频累积和优化均值滤波算法, 对回波数据滤波, 提高图像信噪比, 进而提高海冰密集度检测精度。

## 1 研究路线与研究依据

### 1.1 整体研究路线

本文采用去卷积算法, 减小雷达脉宽效应引起的“拖尾”, 以及水平波束宽度  $\theta_H$  导致的回波图像角向展宽, 再利用视频累积和优化均值滤波算法实现图像在时间域和空间域上的滤波, 提高海冰雷达图像信噪比。最后跟踪海冰边缘得到海冰面积, 与该海域面积相比得到海冰密集度。检测海冰密集度的流程如图 1 所示。

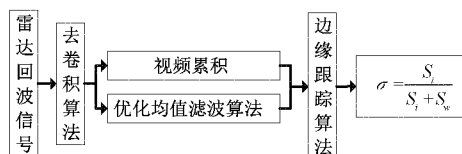


图1 海冰密集度检测流程

其中,  $\sigma$  为海冰密集度,  $S_i$  为海冰面积,  $S_w$  为所检测海域面积。

以雷达接收机端采集的回波信号作为输入, 首先, 针对架设高度  $H$ 、地球曲率以及波束功率分布对角向误差应补偿值的影响, 提出一种角向误差补偿的修正算法, 基于此, 采用去卷积算法减小了雷达脉宽效应引起的“拖尾”, 修正了水平波束宽度  $\theta_H$  导致的回波图像角向误差补偿。然后在时间域和空间域分别利用视频累积和优化均值滤波算法滤波, 解决海冰雷达图像信噪比较低的问题。最终跟踪海冰边缘得到海冰面积, 进而得到海冰密集度。

### 1.2 研究依据

在实际观测中, 海冰流速较慢。以辽东湾海域为例, 其海冰运动受风和海流的作用以及地形和岸线的影响。由冰速各分量的线性回归方程, 按照一般的流速 (40~50 cm/s) 和风速 (5~10 m/s) 计算, 风速各分量产生的冰速分量是流

速各分量产生冰速分量的  $1/5 \sim 1/3$ <sup>[7]</sup>。以 24 rpm 的天线转速为例, 雷达采集到连续两幅间隔 2.5 s 的回波图像中, 同一海冰的移动距离通常不超过 50 cm。

雷达能够探测到物体, 有赖于物体对电磁波的反射。冰面相较于海面更加光滑, 电磁波在空气-冰界面处会发生完全折射, 回波信号较弱。

海冰的弱回波特征使得雷达在直接探测海冰时受噪声影响较大。虽然海冰回波淹没在噪声中, 但基于噪声的随机性和海冰流速慢这一基本特征, 本文将时间域和空间域联合起来, 分别采用视频累积和优化均值滤波算法处理海冰雷达回波图像。一方面抵消具有随机性的噪声信号, 另一方面增强较弱的海冰回波信号, 有效地提高海冰雷达图像信噪比。

## 2 回波失真分析与处理

雷达脉宽效应引起的“拖尾”, 以及水平波束宽度  $\theta_H$  导致的回波图像角向展宽, 使得雷达回波图像失真。以下将“拖尾”现象以及角向展宽所致检测值与真实值的差分别定义为径向误差和角向误差。基于雷达原理, 本文利用去卷积算法减小径向误差和角向误差, 提高检测精度<sup>[8]</sup>。

### 2.1 径向误差分析

雷达发射脉冲宽度  $\tau$  会造成雷达回波图像向外侧扩展而引起“拖尾”现象。

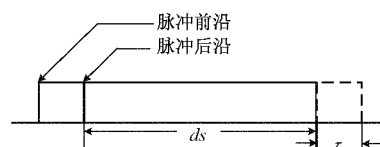


图2 雷达径向误差示意图

如图 2 所示。由于雷达发射脉冲宽度  $\tau$  的存在, 脉冲照射到径向长度  $ds$  海冰的时间内, 雷达接收机始终能够接收到返回的电磁波, 因此在雷达显示器上会持续显示该目标, 将真实的海冰径向长度拉长。雷达探测的径向误差表达式为

$$E_r = \frac{c \times \tau}{2} \quad (1)$$

其中,  $E_r$  为雷达探测的径向误差,  $c$  为光速,  $\tau$  为脉冲宽度。由式(1)可知, 脉冲宽度为  $0.08 \mu\text{s}$  的短脉冲探测时的径向误差为 12 m。

### 2.2 角向误差分析

#### 1) 角向误差产生

雷达探冰时的角向误差主要与天线水平波束宽度引起的回波图像角向扩展有关。如图 3 所示,  $\theta_H$  为天线水平波束宽度,  $\theta_H/2$  为单侧角向误差的理论值。

在雷达天线扫描海冰的过程中, 自雷达波束右边缘  $a$  遇到目标始至左边缘  $b$  离开目标止, 雷达显示器上持续显示回波。因此在理论上, 雷达回波图像单侧扩展  $\theta_H/2$ 。然

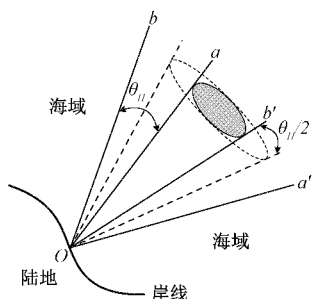


图 3 目标回波角向误差示意图

而,在实际工程应用中,由于最大功率雷达波束通常并未落在海面上,且不同距离处海冰能否被雷达波束探测到不完全以半功率点为界。因此,对角向误差的实际补偿一般与理论值有所出入<sup>[9]</sup>。以下着重分析架设高度  $H$ 、地球曲率以及波束功率对车载雷达角向误差补偿的影响,并论述不同工程应用场景下补偿角度的选择依据。

2) 角向误差补偿的修正

(1) 架设高度对角向误差补偿的影响

雷达探测海冰时,为获得更大的探测范围,通常将雷达车开至较高处,因此最大功率雷达波束一般并未落在海面上。如图 4 所示为距离  $L$  处的纵向和横向雷达波束示意图。

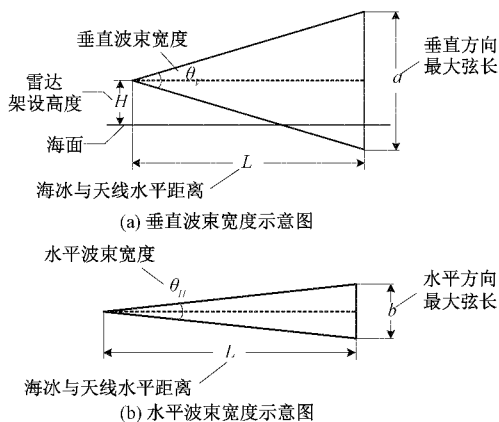


图 4 垂直与水平波束宽度示意图

其中,  $H$  为车载雷达天线距离海面的高度,  $L$  为需要角向误差补偿的海冰距离,  $\theta_V$ 、 $\theta_H$  分别为垂直和水平波束宽度,  $a$ 、 $b$  分别为垂直和水平方向最大弦长。由几何关系可以得到式(2)所示关系。

$$\begin{cases} a = 2 \times L \times \tan \frac{\theta_V}{2} \\ b = 2 \times L \times \tan \frac{\theta_H}{2} \end{cases} \quad (2)$$

由以上分析,分别以水平、垂直波束宽度所在的直线为  $x$  轴、 $y$  轴,建立直角坐标系如图 5 所示。

其中,  $\theta'$  为实际与海面接触的雷达波束宽度。由几何关系和圆锥曲线方程计算得知,实际应补偿的角度如式(3)。

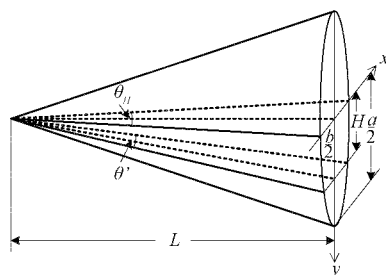


图 5 雷达波束直角坐标系

$$\frac{\theta'}{2} = \arctan \frac{b \times \sqrt{a^2 - 4H^2}}{2 \times a \times \sqrt{L^2 + H^2}} \quad (3)$$

显然,实际应补偿角度略小于  $\theta_H/2$ 。

(2) 地球曲率对角向误差补偿的影响

随着雷达探测距离的增大,地球曲率对探测精度的影响愈加显著。如图 6 所示,地球曲率的影响体现在给架设高度  $H$  附以高差  $h$ 。

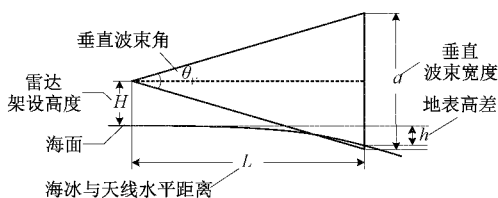


图 6 地球曲率对角向误差的影响

此时,将式(3)中架设高度  $H$  增加高差  $h$  计算,即可得到考虑地球曲率情况下的应补偿角度。

(3) 波束功率对角向误差补偿的影响

由于沿波束轴线方向的雷达波功率最大,而轴线以外功率逐渐减小,因此在船舶导航雷达的实际应用中,一般仅考虑以半功率点定义的水平波束宽度对目标的检测。然而针对本文所涉及的海冰探测需求,沿岸海冰距离雷达发射机近,在半功率点以外的一定角度内(约  $0.5^\circ$ ) 仍然有可能观测到海冰;而由于远距离传输的功率损耗,离岸较远处即便位于水平波束宽度以内的海冰也难以被雷达探测到。因此,应结合不同情况下的各要素,对理想波束形状加以修正。以此获得更准确的去卷积结果,提高海冰密集度检测精度。

在极坐标下的雷达图像中,将  $360^\circ$  等分为一系列方位量化单元  $\Delta\alpha$ ,同理,将探测半径等分为距离量化单元  $\Delta r$ 。首先,以雷达天线为圆心,依次遍历雷达观测平面上的每一个“量化单元”,将其灰度值存储在构建的  $m \times n$  ( $m$ 、 $n$  分别表示距离、方位量化单元  $\Delta r$ 、 $\Delta\alpha$  的个数)的矩阵中。其次,对雷达波束施以相同的转换。至此,雷达波束在极坐标下以角速度  $\omega$  旋转探测的过程转换为在直角坐标下以线速度  $v$  平移探测。坐标转换后,直角坐标系下的海冰雷达图像灰度值如图 7 所示。

综合架设高度、地球曲率及波束功率三者,为还原不同

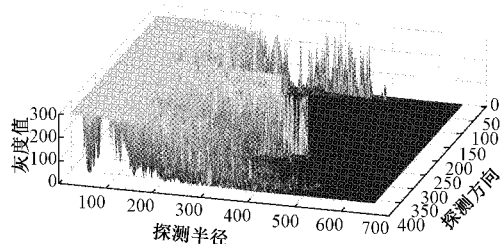


图7 直角坐标系下海冰图像

距离处海冰回波的角向误差,提高去卷积算法后海冰密集度检测精度,本文通过拟合得到雷达波束在直角坐标系下的方程如式(4)所示。

$$f(x) = \begin{cases} 12 - 13.2 \times \exp(-0.7x^2), & x \in [-b, b] \\ 0, & x \in (-\infty, -b) \cup (b, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $x$  为方位,单位为度,  $y$  为探测距离,单位为 n mile,  $b$  为零辐射角对应的方位,根据不同工程的实际情况做调整。式(4)为定义在  $0^\circ$  方位角附近的波束函数,实际卷积产生与应用去卷积算法时,可理解为其沿方位轴平移。本文取 10 幅图像验证该算法精度,得到结果如表 1 所示。

表1 角向误差补偿修正前后海冰密集度对比

序号	实际值/%	修正前/%	修正后/%
1	86.81	90.94	87.25
2	92.69	96.81	93.69
3	88.75	92.88	89.75
4	95.81	96.19	95.90
5	78.25	82.50	80.13
6	58.19	56.94	57.56
7	46.88	45.63	45.13
8	40.19	38.88	39.75
9	20.31	18.75	20.00
10	24.13	22.94	23.56
均方根误差		2.79	0.99

由计算和分析可知,按照实际波束宽度补偿角向误差时,实际对近处(约 4 n mile 以内)水平波束宽度  $\theta_H$  以两侧各  $0.5^\circ$  的展宽,而对远处(约 8 n mile 以外)以两侧各  $0.3^\circ$  的削减,距离介于两者之间的实际补偿按照式(4)曲线修正。结果表明,经过修正的补偿方法均方根误差较修正前小,得到的雷达图像几乎不受波束功率影响。以上补偿方法满足本文所涉及的实际需求,其补偿原理同样适用于指导其他工程项目的角向误差补偿修正。

由应补偿角度与距离  $r$  的乘积可以得到探测产生的角向误差。综合以上对于径向误差和角向误差的分析,其综合误差如图 8 所示。

以辐射器长度为 120 cm,脉冲宽度为  $0.08 \mu\text{s}$  的 X 波段雷达探测  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的海冰为例。由于径向误差和角向误

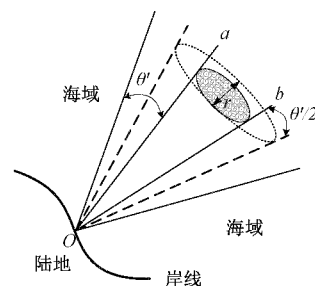


图8 角向误差与径向误差综合示意图

差的共同影响,其测量面积在 1 n mile 处扩展至  $1250 \text{ m}^2$ ,在 8 n mile 处扩展至  $680 \text{ m}^2$ 。因此,下文利用去卷积算法减小径向误差和角向误差对海冰密集度检测精度的影响。

### 2.3 去卷积算法

在雷达接收机端做适当的信号处理能够有效去除卷积所导致的图像“拖尾”。雷达接收机的输出信号为:

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t) \quad (5)$$

其中,  $x(t)$  为目标原始回波,  $h(t)$  为天线方向图,  $n(t)$  为白噪声,  $y(t)$  为雷达接收机输出信号。为去除  $x(t)$  与  $h(t)$  卷积造成的雷达“拖尾”效应,希望找到卷积函数  $g(t)$  满足:

$$\hat{x}(t) = g(t) * y(t) \quad (6)$$

$\hat{x}(t)$  为  $x(t)$  的最小均方差估计。

基于此,通过一个去卷积滤波器,从频域去除卷积,该滤波器在频域描述为:

$$G(f) = \frac{H^*(f) \times S(f)}{|H(f)|^2 \times S(f) + N(f)} \quad (7)$$

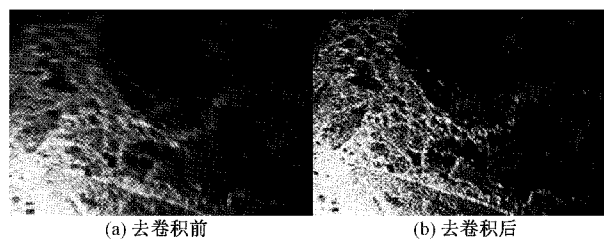
式中:  $G(f)$  和  $H(f)$  分别为  $g(t)$  和  $h(t)$  在频域的傅里叶变换<sup>[10]</sup>,  $S(f)$  和  $N(f)$  分别为  $x(t)$  和  $n(t)$  的功率谱。因此,时域的滤波过程可以在频域完成<sup>[11]</sup>。

$$\hat{X}(f) = G(f) * Y(f) \quad (8)$$

将去卷积后的频域结果还原至时域,即:

$$\hat{x}(t) = \text{IFFT}[\hat{X}(f)] = \text{IFFT}[G(f) * Y(f)] \quad (9)$$

本文基于车载移动雷达 FAR-2117 接收机端采集的图像,利用去卷积算法,削弱其对海冰密集度精度检测的影响。实验结果如图 9 所示。



(资料来源:夏家河车载移动雷达站 FAR2117 雷达实测数据)

图9 去卷积前后图像对比

经过去卷积后的海冰雷达回波图像不含“拖尾”效应,基于去卷积算法的雷达信号处理是可行的。这为进一步边

缘跟踪计算海冰面积提供了清晰的边界。

### 3 雷达图像处理

基于海冰的弱回波特征,空间域的均值滤波算法无法对海冰雷达图像实现有效去噪。因此,本文先利用视频累积在时间域滤波,再利用优化均值滤波算法<sup>[12]</sup>在空间域滤波,两者结合,降低白噪声对海冰密集度检测的干扰。

#### 3.1 视频累积

由于海冰表面平整,其回波信号较弱,在雷达图像上亮度低。相较而言,白噪声在回波图像上亮度高,不利于海冰边缘线的确定。雷达接收机端的输出可以看作海冰回波信号与噪声叠加而成,其中,海冰回波信号在时间上具有确定性,而噪声信号随机且服从高斯概率密度分布函数。并且,连续两幅时间间隔为 2.5 s 的雷达回波图像中,同一海冰的移动距离通常不超过 50 cm。因此可以通过视频累积的方式抑制噪声,增强海冰回波,提高回波探测的信噪比。

雷达工作时产生的白噪声,在统计特性上服从高斯概率密度分布。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (10)$$

其中,  $\sigma$  为白噪声的均方差,  $x$  为白噪声幅度,  $\mu$  为白噪声均值。雷达接收机端的输出可以表示为:

$$Y(t) = X(t) + s(t) \quad (11)$$

其中,  $X(t)$  为白噪声,  $s(t)$  为海冰回波信号。本文采用的视频累积基本原理可以表示为:

$$Y_N(t) = \sum_{i=1}^N [X_i(t) + s_i(t)] \quad (12)$$

其中,  $N$  为累积次数。  $X_i(t)$  服从高斯分布,且  $N$  次实验独立同分布,本文取  $N=20$  做仿真试验如图 10 所示。

由仿真试验结果可知,经过累积的信号信噪比较原信

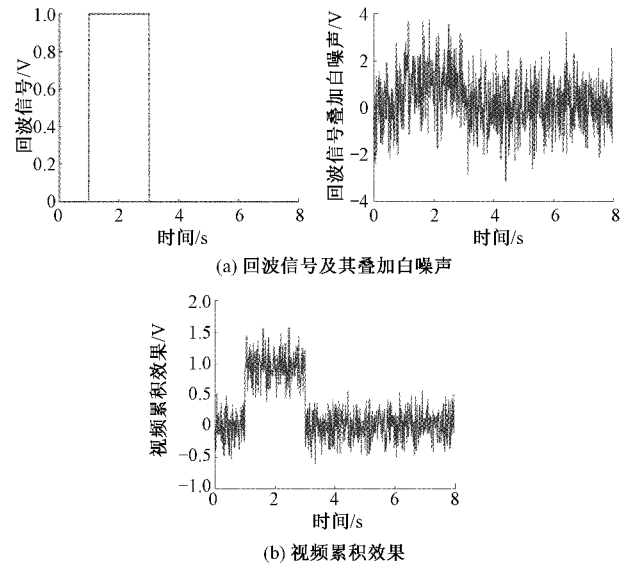


图 10 信号累积去噪仿真

号提高。由概率论可以得到<sup>[13]</sup>:

$$\sigma^2 = N\sigma_0^2 \quad (13)$$

$$SNR = \sqrt{N} \times SNR_0 \quad (14)$$

式(11)、(12)下标 0 表示累积之前的信号特征,无下标表示累积之后的系统特征,累积之后信噪比变为原来的  $\sqrt{N}$  倍。

为证明视频累积在海冰密集度检测方面的有效性,本文在时间域对 7 幅连续的海冰雷达回波图像(图 11(a)~(g))累积结果如图 11(h)所示。求得 7 幅图像各个像素点的灰度平均值,作为该像素点的真实灰度值,由图 11(a)~(g)可以看出,图像中随机分布大量斑点噪声,而经过视频累积后,如图 11(h)所示,噪声减弱,图像信噪比提高<sup>[14]</sup>。

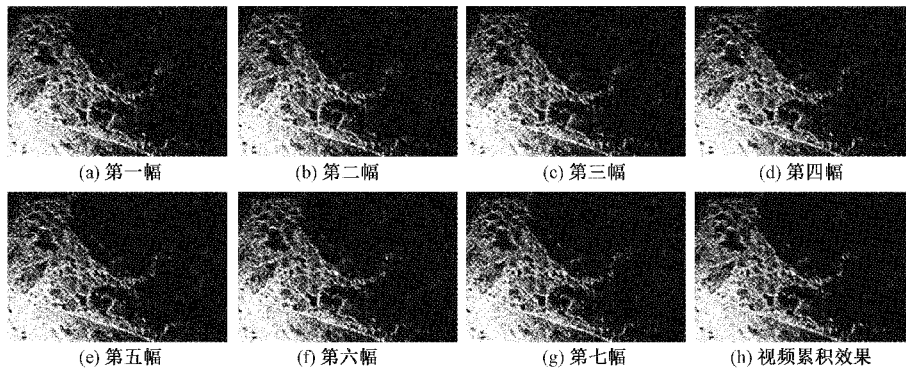


图 11 视频累积提高海冰雷达回波图像信噪比效果图

#### 3.2 优化均值滤波算法

在空间域上,采用优化均值滤波算法减弱噪声干扰<sup>[15]</sup>。基于一个数据集的均值仅与各元素值的累加和有关,而与其分布形式无关的特点,在计算同一行从一个像素点  $g(x, y)$  移动到下一个像素点  $g(x, y+1)$  时,灰度

值累加和的变化时,可由式(15)表达。其中  $\sum_{j=n}^n g(x-n, y+j)$  为去掉的  $g(x, y)$  所使用窗口最左一列的像素点灰度值之和,  $\sum_{j=-n}^n g(x+n+1, y+j)$  为添加的  $g(x, y+1)$  所

使用窗口最右一列的像素点灰度值之和<sup>[16]</sup>。

$$sum' = sum - \sum_{j=-n}^n g(x-n, y+j) + \sum_{j=-n}^n g(x+n+1, y+j) \quad (15)$$

其中,  $sum'$  和  $sum$  分别为当前和前一次窗口内所有像素块像素值的和。本文采用优化均值滤波算法对海冰雷达图像去噪。如图 12 所示, 优化均值滤波后, 图像随机噪声明显减弱<sup>[17]</sup>, 为后续海冰密集度计算提供清晰的边界。

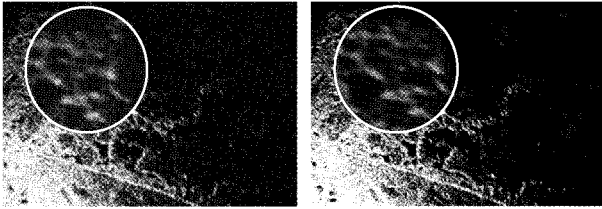


图 12 优化均值滤波算法滤波前后图像对比

本节对海冰雷达回波图像在时间域和空间域滤波, 平滑了来自雷达设备内部白噪声的干扰。二者相结合, 提高海冰密集度的检测精度。

#### 4 海冰密集度计算

本节利用八邻域法跟踪海冰边缘。自第一个灰度值为 1 的白色像素点始, 顺时针依次检测各像素块灰度值。

利用八邻域法对经上述算法处理后的海冰雷达图像做边缘跟踪, 得到实验结果如图 13 所示。

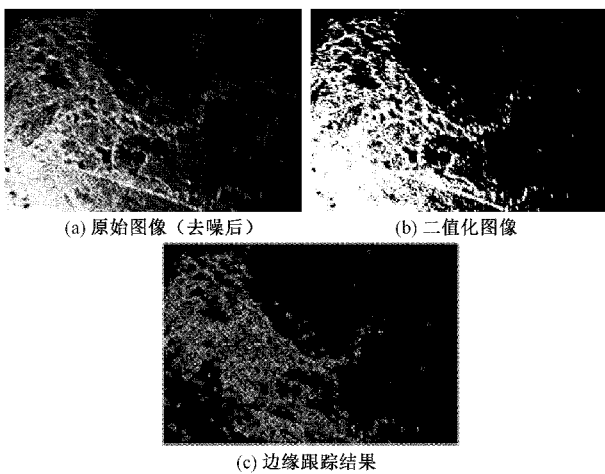


图 13 海冰图像边缘跟踪过程

图 13(b) 为利用灰度阈值 0.5 对原始海冰雷达图像 (图 13(a)) 二值化处理的结果, 13(c) 为边缘跟踪结果, 边界为所测海域海冰外缘线。记勾勒出的海冰面积为  $S_i$ , 计算该海域海冰密集度为:

$$\sigma = \frac{S_i}{S_i + S_w} \quad (16)$$

由式(16)的计算结果知, 经去卷积、视频累积和优化均值滤波算法处理前, 该海域海冰密集度计算值为 40%,

而经过上述处理后的计算值为 33.8%, 更接近于海冰密集度实际值 34.5%。通过对比分析可知, 本文提出的方法为工程需要提供了精确数值。

雷达天线高度为  $H$  时, 对探测半径  $R_{max}$  范围内的海冰雷达图像边缘跟踪, 可以得到该海域的海冰密集度。在实际工程实践中, 该方法适用的海域面积依赖于雷达天线高度, 天线高度与雷达探冰范围为:

$$R_{max} = 2.2 \sqrt{H} \quad (17)$$

其中,  $R_{max}$  为最大探测半径,  $H$  为车载雷达天线距离水面的高度。

#### 5 结 论

本文通过对信号处理和雷达图像预处理的研究, 利用去卷积算法削弱径向和角向误差, 其中, 在角向误差的补偿中, 本文从架设高度、地球曲率、波束功率三个方面分析, 最终得到不同探测距离处海冰回波的应补偿角度。基于海冰回波较弱的特征, 提出时间域和空间域联合的图像处理算法。通过理论计算得到累积后信噪比变为原来的  $\sqrt{N}$  倍, 同时, 运用仿真试验对海冰雷达回波图像 20 次累积, 证明了视频累积在时间域的有效性。最后, 由边缘跟踪算法提取海域内的海冰面积, 从而计算得到该海域的海冰密集度。

值得关注的是, 在角向误差的补偿中, 并没有一成不变的补偿角度, 雷达架设高度、地球曲率以及波束功率分布等共同影响着补偿角度的确定。但是, 对于水平波束宽度  $\theta_H$  的研究和应用从本质上解释了角向误差的补偿原理。综上所述, 本研究可为海冰密集度的精确测量提供有效方法和理论指导。

#### 参考文献

- [1] ZHANG Y, HUANG Y L, ZHA Y B, et al. Sparse maximum posterior algorithm for high angular resolution of scanning radar[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE Press, 2015.
- [2] 蒋平虎, 张鑫, 苏萍贞. 基于拉格朗日的雷达方位超分辨率方法[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(5): 915-922.
- [3] FU X, PENG S, QIAN S, et al. Superresolution imaging using constrained iterative deconvolution[C]. 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2016.
- [4] 史凯琦, 邹斌, 陈树果, 等. 中分辨率成像光谱仪的海冰密集度遥感反演[J]. 遥感学报, 2021, 25(3): 753-764.
- [5] 张娜, 张庆河. 基于 CART 决策树方法的 MODIS 数据海冰反演[J]. 海洋通报, 2014, 33(3): 321-327.
- [6] 毕海胜, 贞智强, 李慧瑶, 等. 基于盲目去卷积算法的声发射源信号复原研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 73-83.

- [7] 宋威娇,于华明,鲍献文,等. 威海海上风电场海流与海冰特征分析[J]. 海洋湖沼通报,2012,4:1-9.
- [8] 易开宇,戴贞明. 基于混合非凸性二阶全变分和重叠组稀疏的非盲图像去模糊算法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(9):229-235.
- [9] 杨晔,严利平,陈本永,等. 基于长度可变真空腔的激光干涉空气折射率测量误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报,2021,42(6):48-55.
- [10] 陈倩,王维庆,王海云,等. 基于混合卷积窗四谱线插值和改进全相位的谐波检测组合优化算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(8):1-6.
- [11] 李震驰,袁伟明,张锐. 基于压缩感知的雷达目标辨识[J]. 电子测量技术,2017,40(11):161-165.
- [12] LIU R C, LI Y F, WANG H D, et al. A noisy multi-objective optimization algorithm based on mean and Wiener filters [ J ]. Knowledge-Based Systems, 2021, 228.
- [13] 阮超,陈小莉,田茂. 基于 2D-LMS 的探地雷达背景噪声去除[J]. 电子测量技术,2015,38(1):113-119.
- [14] LI J, GONG W G, ZHAN H M, et al. Combining weighted curvelet accumulation with motion vector duty cycle for nonuniform video deblurring[J]. Image Communication, 2019, 70:89-103.
- [15] QIU Y, YANG Y, LIN Z, et al. Improved denoising autoencoder for maritime image denoising and semantic segmentation of USV [ J ]. China Communications, 2020, 17(3):46-57.
- [16] 何石,潘晓璐,李一民. 一种均值滤波的优化算法[J]. 信息技术,2012,36(3):133-134,137.
- [17] 常佳慧,赵建辉,李宁. 一种改进的 2P-CFAR SAR 舰船检测方法[J]. 国外电子测量技术,2021,40(11):7-12.

### 作者简介

李诺舟,硕士研究生,主要研究方向为雷达图像处理等。

E-mail:nzli@dlmu.edu.cn

刘彤(通信作者),教授,研究生导师,主要研究方向为交通信息工程及控制等。

E-mail:tonyliu@dlmu.edu.cn