

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108584

毫米波雷达海雾观测数据中的舰船杂波分析*

任 雍^{1,2} 吴雪菲² 陶 法¹ 陈斌源³ 冯 凯⁴(1. 中国气象局气象探测中心 北京 100044; 2. 福建省大气探测技术保障中心 福州 350008;
3. 漳州市气象局 漳州 363099; 4. 北京无线电测量研究所 北京 100854)

摘要: 海雾探测雷达由于架设高度低、观测仰角低,会受到众多来源的杂波干扰,这些杂波的分析是改善海雾探测效果的基础。本文针对毫米波海雾探测雷达数据中的舰船杂波,统计了舰船所造成杂波的时域及频域特性,提出了舰船杂波提取算法,实现了舰船信号和气象回波的分离。在此基础上,通过剔除舰船信号后的功率谱二次识别,实现了海雾观测数据中舰船信息的抑制,提升了毫米波雷达测雾数据的质量。更进一步,通过挖掘杂波中蕴含的信息,成功提取出舰船的长度、航速、航向等多重信息。初步探究了气象雷达在舰船监测方面的应用潜力。

关键词: 舰船识别;毫米波雷达;海雾观测

中图分类号: P4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.1520

Analysis of ship clutter in millimeter-wave sea fog detection radar data

Ren Yong^{1,2} Wu Xuefei² Tao Fa¹ Chen Binyuan³ Feng Kai⁴(1. Meteorological Observation Center of the China Meteorological Administration, Beijing 100044, China;
2. Fujian Atmospheric Detection Technology Support Center, Fuzhou 350008, China;
3. Zhangzhou Meteorological Bureau, Zhangzhou 363099, China;
4. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: Analysis of ship clutter in MMW sea fog detection radar data sea fog detection radar will be interfered by many sources of clutter, and the analysis of these clutter is the basis of improving the sea fog detection effect. In this paper, the ship clutter in the MMW sea fog detection radar data is analyzed, and the characteristics of clutter interference caused by the ship are counted. The separation of ship signal and weather echo is realized, and the data quality of sea fog detection is improved. By further mining the information contained in the clutter, multiple information such as the length, speed and course of the ship is extracted. The potential of weather radar in ship identification is preliminarily explored.

Keywords: ship identification; millimeter-wave radar; sea fog detection

0 引 言

海雾是海洋上低层大气中的一种水汽凝结(华)现象。由于水滴或冰晶(或二者皆有)的大量积聚,雾滴粒子对可见光产生散射作用,使水平能见度显著降低,可对港口运转、海上交通、海上生产作业等危害严重^[1-3]。我国台湾海峡福建海域兼受大陆性与海洋性气候相互影响,是海雾多发区。传统用于测量能见度的前散能见度仪受客观条件限制^[4],海上站点稀疏且代表性差,难以满足大范围海雾监测需求,且缺乏对分布广、空间差异大、生消快的海雾精细探测的能力^[5];卫星观测在对海雾和低云的识别精度、时空分辨率方面有待提高。近年来,随着毫米波雷达技术的发展,

毫米波气象雷达开始被用于海雾探测^[6]。相比其他测量手段,毫米波雷达具有覆盖范围广、扫描速度快、空间分辨率高、穿透性强、灵敏度高等一系列的优点,在海雾监测领域取得了一些成果。国外学者 Li 等^[7]对毫米波雷达反射率和能见度间的多种算法进行了对比分析,提出了一种新的能见度估算算法。国内北仑港区首次将毫米波雷达用于港区航道海雾的监测^[8],并借助前向散射能见度仪观测数据,开展海雾联合观测实验,建立雷达反射率与海雾能见度的关系^[9]。宁波舟山港重点对海雾过程毫米波雷达的探测结果进行分析,了解海雾过程的特征和雷达对海雾的探测性能,为港口海雾监测预报服务提供思路方法^[10]。潘致利^[11]提出了一种毫米波测云雷达组网观测系统,通过恰当的扫

收稿日期:2021-12-12

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家重点研发计划(2017YFC1501700)项目资助

描设置融合手段,有效扩大了海雾监测系统的覆盖范围。

在面向海雾探测这一应用背景下,毫米波雷达海雾监测具有低架设高度、低仰角的特点。毫米波测雾雷达架设高度需在海面以上 10~50 m 为宜,从而避免架设过高造成无法识别引起低能见度的云雾团是否接地,无法准确区分低云和雾。同时,毫米波雷达主要扫描方式的仰角需尽量低,仰角过高,电磁波在传播一定距离后会穿出雾顶,进而降低雷达的海雾监测范围^[12-13]。因此,毫米波雷达海雾探测过程中常常引入许多气象目标以外的杂波^[14],典型的杂波来源有海岛、建筑物、舰船、海浪、边界层浮游生物等。其中,舰船杂波由于目标体移动、信号较强等因素,会对气象目标的探测和显示造成较显著的影响。如果雷达架设在狭窄繁忙的航道,则影响更为明显。对于如何在海雾探测雷达中提取、利用、抑制舰船杂波,目前尚无相关研究。

本文利用毫米波雷达实测数据,重点对海雾观测数据中的舰船杂波进行分析。一方面,通过分析可以有效的实现气象目标与舰船杂波的分离,提升海雾监测水平;另一方面,期望通过舰船杂波信息的挖掘^[15],提取出海面舰船的船体长度、航速航向等有用参数,为多用途雷达的开发和应用积累一定的技术基础。

1 毫米波海雾探测雷达概述

毫米波雷达利用雾滴粒子对电磁波的散射作用,对 15 km 范围内低云、海雾、弱降水的空间位置与分布、强度、速度、谱宽和线性退极化比等进行定量探测,获取团雾、低云的顶高、厚度、移动速度、内部结构等信息^[16],应用于港口及航道的海雾监测及预警方面。

典型的毫米波海雾探测雷达技术性能指标如表 1 所示。

表 1 毫米波海雾探测雷达主要技术指标

| 项目 | 主要技术指标 |
|--------|---------------------------------|
| 工作频率 | Ka 波段 |
| 雷达体制 | 脉冲多普勒,全相参,全固态 单发双收线极化 |
| 探测目标 | 云、雾、弱降水 |
| 探测能力 | ≤ -30 dBZ@5 km |
| 探测距离 | 120 m~15 km |
| 方位扫描范围 | 0°~360° |
| 俯仰扫描范围 | -2°~182° |
| 空间分辨率 | 30 m, 60 m |
| 发射峰值功率 | 200 W |
| 天线口径 | 1.8 m, 2.4 m |
| 扫描方式 | 固定指向, PPI, RHI, VOL, sRHI, sPPI |
| 基础数据产品 | 回波强度, 径向速度, 速度谱宽 线性退极化比 |
| 二次数据产品 | 雾顶高、雾底高、雾厚、能见度 |

福建省大气探测技术保障中心部署于漳州东山岛的毫米波测云雷达离海面高度 18 m,且位于航道上,船只往来频繁。因此,使用该雷达获取的数据将作为本文分析舰船杂波的主要依据。该雷达外观图片如图 1 所示。

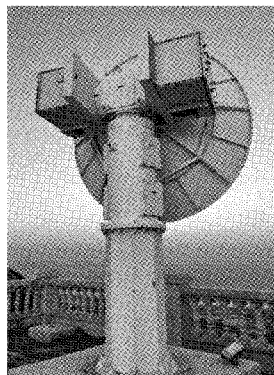


图 1 东山海雾探测雷达

雷达覆盖范围及周边地形如图 2 所示。

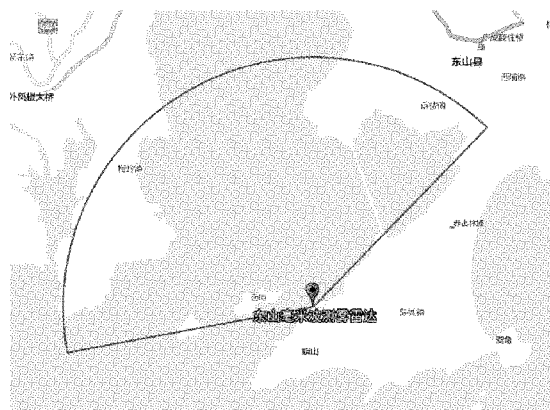


图 2 雷达覆盖范围及地形示意图

2 舰船数据的特征

舰船数据在气象雷达一次产品中的显示如图 3 所示。

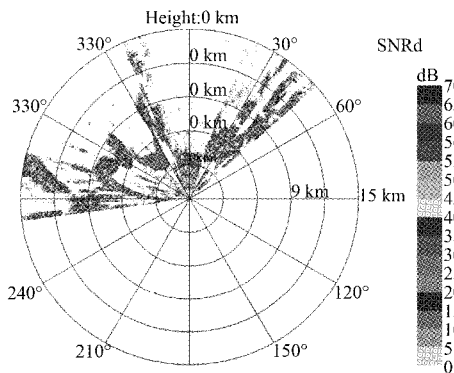


图 3 船舶信号在气象雷达上的显示图

由图 3 可以看出,相比气象回波,舰船回波强度上较强,形状较为规则,脉冲压缩旁瓣较为明显。对雷达发射电磁波的继续传播有一定的阻挡作用。

舰船数据的谱数据如图 4 所示。与气象回波常见的高

斯谱相比,其谱宽更窄。

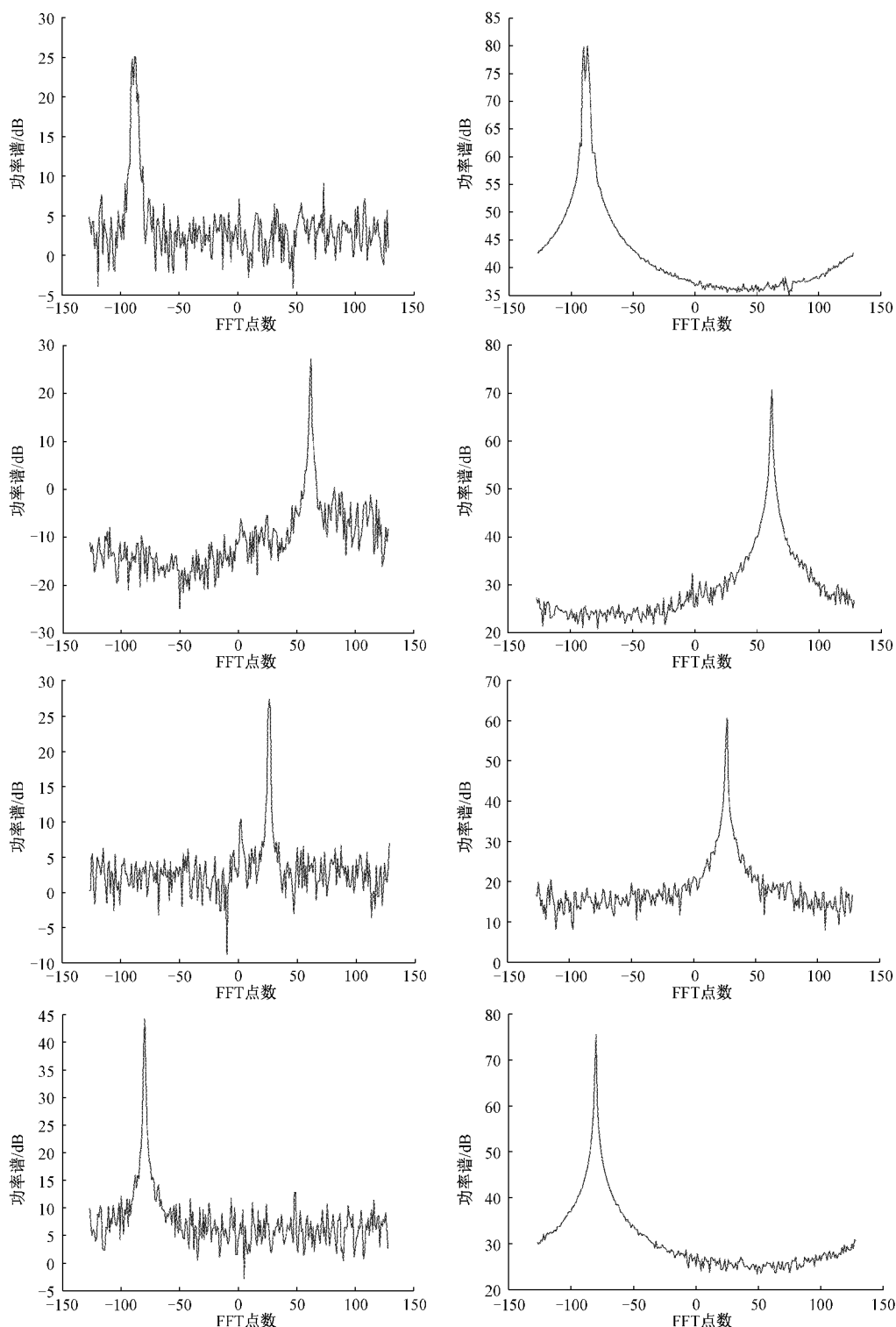


图 4 舰船信号功率谱展示

3 舰船的识别

针对舰船的上述特点,提出舰船识别算法流程(图 5)。

识别结果如图 6 所示,图 6 中的十字和圆圈代表识别出的舰船,十字和圆圈大小代表反演出的船体长度,颜色代表运动方向。自动识别出的舰船列表如表 2 和 3 所示,其中 NaN 为缺省值。

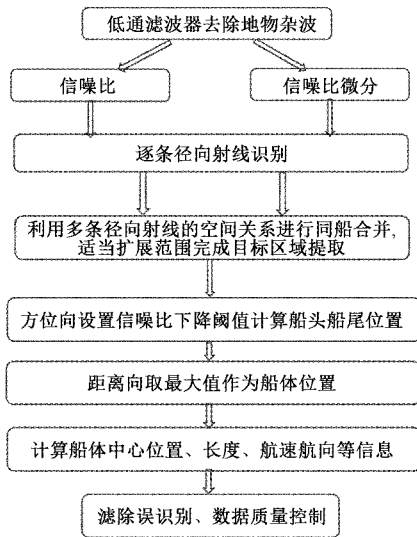
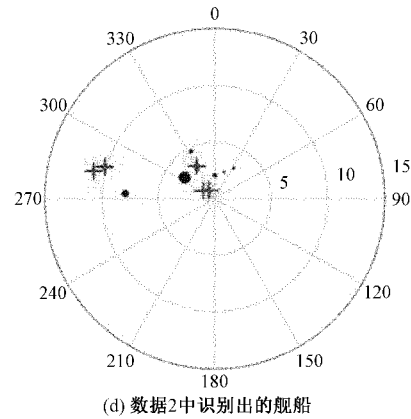
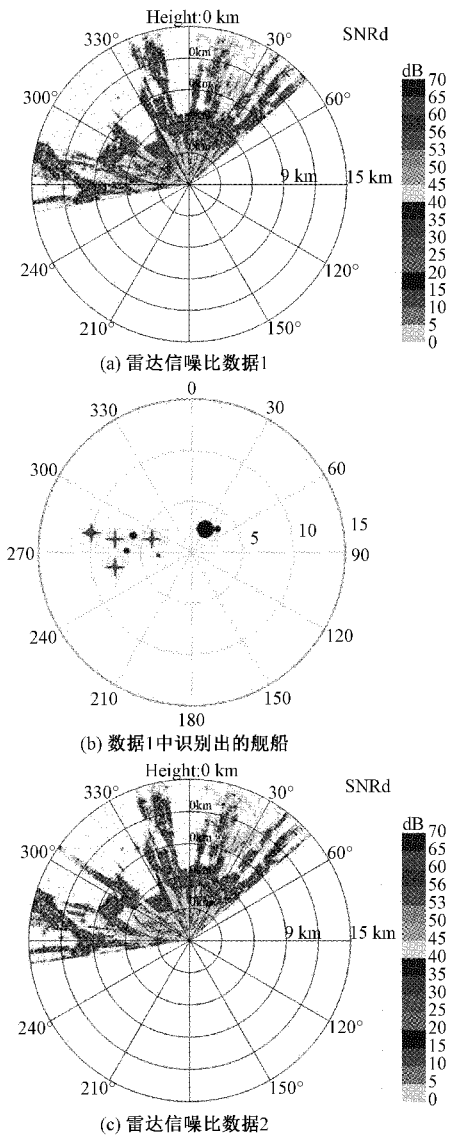


图 5 舰船识别算法流程



(d) 数据2中识别出的舰船

图 6 舰船识别结果

4 舰船信息分析及提取

4.1 舰船回波强度分析

图 7 统计了单个船只回波中最大信噪比的直方图, 可以看出, 整体而言, 船只的回波功率很大, 最大区间范围在 70~90 dB, 此区间对于雷达接收系统已在饱和或趋近饱和的范围。因此以下将从两个方面来考虑, 一是按照当前信噪比及其随距离的变化关系外推, 预测毫米波测云雷达在舰船测量上最远可以探测多远的距离; 二是如果船舶距离雷达过近, 回波是否会对雷达接收系统有损害。

为考虑回波强度与目标所在距离的关系, 首先需要明确雷达发射功率的传播过程及雷达定标原理, 气象雷达方程为:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta \phi c \tau}{512(2\ln 2) \pi^2 R^2 \eta} \quad (1)$$

式中: P_r 为接收功率, P_t 为发射功率, G 为天线增益, λ 为工作波长, θ 与 ϕ 为雷达波束宽度, c 为光速, τ 为脉冲宽度, R 为目标到雷达的距离, η 为雷达反射率。

根据雷达反射率与反射率因子的关系, 有:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (2)$$

式(2)在瑞利散射条件下成立。上式中, K 为常数, 对于毫米波来说, 取 0.93。 Z 为反射率因子。

将上两式融合后, 得:

$$Z = \frac{P_r R^2 \lambda^2}{P_t G^2 \theta \phi \tau} \cdot \frac{512(2\ln 2)}{c \pi^3 |K|^2} \quad (3)$$

取对数后:

$$\begin{aligned} dBZ = & 10\log P_r + 10\log R^2 - 10\log P_t - 10\log G^2 - \\ & 10\log \theta \phi - 10\log \tau + 10\log \frac{512(2\ln 2)}{c \pi^3 |K|^2} \end{aligned} \quad (4)$$

由于 K 比较接近于 1, 造成的影响可忽略不计, 单位的统一方面, P_t 与 P_r 均用 mW, 可相互抵消, 根据反射率因子的定义公式:

$$Z = \int_0^\infty n(D) D^6 dD \quad (5)$$

表 2 自动识别出的舰船列表(a)

| 舰船航速 | 舰船航向 | 所在库数 | 最大信噪比 | 中心点对应方位角 | 所占射线数 | 舰船长度 |
|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-------|-----------|
| NaN | NaN | 261 | 63.155 33 | 259.940 2 | 2 | NaN |
| 227.735 3 | 10.643 12 | 110 | 69.876 34 | 264.186 4 | 2 | 44.009 87 |
| 334.213 1 | 69.370 3 | 213 | 72.719 71 | 271.393 4 | 2 | 79.641 85 |
| NaN | NaN | 257 | 79.563 48 | 279.303 6 | 2 | NaN |
| 100.106 9 | 29.950 62 | 338 | 69.964 06 | 280.759 3 | 2 | 123.274 1 |
| 310.392 | 33.397 61 | 200 | 79.232 8 | 285.769 | 2 | 106.465 3 |
| 53.537 11 | 19.328 33 | 142 | 79.987 47 | 287.219 2 | 3 | 47.136 13 |
| 242.854 1 | 17.626 16 | 87 | 83.754 01 | 30.089 72 | 9 | 271.798 5 |
| 275.132 2 | 24.681 08 | 113 | 56.946 53 | 47.360 23 | 3 | 88.450 68 |

表 3 自动识别出的舰船列表(b)

| 舰船航速 | 舰船航向 | 所在库数 | 最大信噪比 | 中心点对应方位角 | 所占射线数 | 舰船长度 |
|-----------|-----------|------|-----------|-----------|-------|-----------|
| 223.282 1 | 17.974 47 | 27 | 41.026 55 | 31.809 08 | 2 | 37.037 98 |
| 274.613 2 | 20.762 12 | 44 | 43.583 09 | 19.592 29 | 2 | 21.562 62 |
| 264.208 3 | 13.069 93 | 70 | 82.737 94 | 0.871 582 | 6 | 58.892 99 |
| 240.208 5 | 7.325 639 | 108 | 61.186 82 | 333.537 6 | 2 | 54.784 01 |
| 127.420 7 | 10.743 01 | 113 | 79.954 96 | 329.934 1 | 3 | 91.817 25 |
| NaN | NaN | 128 | 58.728 57 | 319.167 5 | 2 | NaN |
| 253.534 1 | 39.972 5 | 147 | 86.667 96 | 305.456 5 | 6 | 165.479 5 |
| NaN | NaN | 150 | 81.534 66 | 303.303 2 | 2 | NaN |
| NaN | NaN | 173 | 82.604 28 | 286.779 8 | 3 | NaN |
| NaN | NaN | 178 | 56.802 2 | 283.176 3 | 2 | NaN |
| 305.099 2 | 23.247 2 | 192 | 58.747 1 | 273.118 3 | 2 | 96.817 7 |

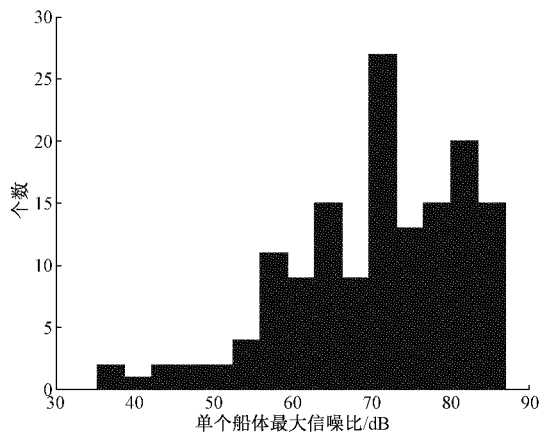


图 7 舰船信号信噪比分布直方图

式(5)中 D 为粒子的直径, $n(D)$ 为直径在 D 到 $D+dD$ 之间的粒子数密度。

由于 Z 用 mm^5 , 因此取对数后相差 180。

$$dBZ = (10\log\lambda^3 - 10\log P_t - 10\log G^2 - 10\log\theta\phi - 10\log\tau) + (10\log P_r - L - 10\log G_r) + 10\log R^2 + \left(10\log \frac{512(2\ln 2)}{c\pi^3} + 180\right) \quad (6)$$

式(6)即为毫米波雷达定标所采用的工程计算式, 等式右边第 1 个括号内为由工作波长、发射功率、天线增益、波束宽度、脉冲宽度等雷达参数所决定; 第 2 个括号内为天线接收到的功率, 具体为终端功率减去接受增益 G_r , 再减去天线到接收机输入端的损耗 L ; 第 3 项由目标的距离决定; 第 4 项为常数项。

需要指出的是, 上述雷达方程是针对体目标而言, 如果目标为点目标, 则其接收功率与目标距离的关系则变为:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (7)$$

由于船只体积较大, 距离雷达的径向距离远近不一, 因此为分布式目标, 雷达距离方程比较复杂。图 8 给出了几只探测到的船只信噪比与距离的关系。

图 8 中, 4 条船只呈现出不同的变化趋势, 其中船 4 的信噪比变化趋势较为典型, 实测数据及拟合曲线如表 4 所示。

表 4 中可以看出, 船只在近距离处时, 信噪比与距离的二次方呈反比关系, 在中等距离时, 与距离的三次方呈反比, 在远距离时, 与距离的四次方呈反比。船只由近及远基本呈现出面目标、线目标、体目标的变化过程。

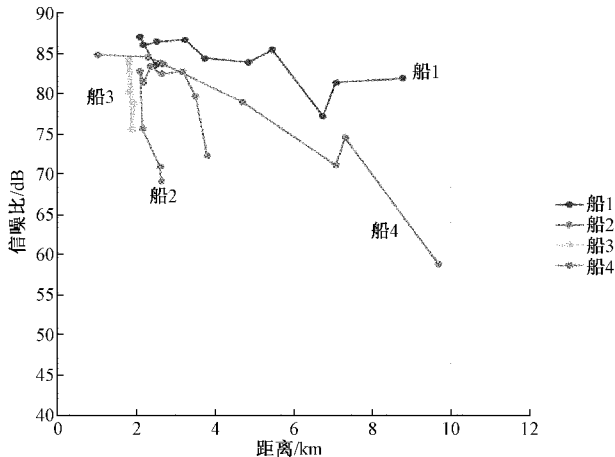


图 8 舰船信噪比与距离关系图

表 4 信噪比与距离的关系拟合对比

| 距离/ km | 信噪比/ dB | 距离的二次 方拟合 | 距离的三次 方拟合 | 距离的四次 方拟合 |
|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 2.7 | 83.613 62 | 83.613 62 | 83.613 62 | 83.613 62 |
| 4.71 | 78.925 7 | 78.76 | 76.34 | 74.0 |
| 7.08 | 71.082 41 | 75.2 | 71.0 | 66.8 |
| 9.69 | 58.804 97 | 72.4 | 66.8 | 61.2 |

根据船 4 在 9.69 km 处的信噪比值,按照距离 4 次方的关系,推出更远距离处的雷达回波强度如表 5 所示。

表 5 最大探测距离测算

| 距离/km | 信噪比/dB |
|-------|--------|
| 9.69 | 58.8 |
| 15 | 51.2 |
| 30 | 39.2 |
| 60 | 27 |
| 120 | 15 |

分析表 5 中数据可以看出,若考虑进去大气衰减,对于中等大小船只,雷达理论上探测的最远距离为 60 km。

同理,根据船 1 在 8.4 km 处的信噪比,若按此时接收动态曲线已进入上饱和点计算。最近的距离在 100 m 左右到达 10 dBm 的雷达收发保护开关承受功率临界值。还是应该尽量避免此种情况的出现。

4.2 舰船速度及航向信息提取

由于舰船是刚性目标,在不考虑自身相对旋转的前提下,船体各个部分的移动速度是一致的。因此其测速方法与风场反演方法较为类似。当天线以某一固定仰角作方位扫描时,把在某距离和方向上探测到径向速度记录并显示出来,雷达测得到船体的径向速度可表示为:

$$V_R(\beta) = V_{AN} \cos(\beta - \beta_0) + V_{AE} \sin(\beta - \beta_0) \quad (8)$$

式中: V_R 为船体径向速度, V_A 为船体径向速度的水平分量, β 为方位角, β_0 为船体航向与正北方向的夹角。

对于雷达作圆周扫描得到的不同点,假设其方位角分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M$ 。 M 为观测点的总个数,建立 M 行的矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} \cos(\beta_1 - \beta_0) & \sin(\beta_1 - \beta_0) \\ \cos(\beta_2 - \beta_0) & \sin(\beta_2 - \beta_0) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\beta_M - \beta_0) & \sin(\beta_M - \beta_0) \end{bmatrix} V = \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{AE} \end{bmatrix} F = \begin{bmatrix} V_R(\beta_1) \\ V_R(\beta_2) \\ \vdots \\ V_R(\beta_M) \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(3),可得:

$$XV = F \quad (10)$$

V 即为所要求解的速度。

由于 V 中包含有 3 个未知分量,故只要满足 $M \geq 3$,即可完成求解,一般情况下云雷达的 M 的值均可达到数千量级。为使误差达到最小,计算平均均方根误差:

$$E = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (V_R(\beta_j) - V_R(\beta_j)')^2} \quad (11)$$

式中: $V_R(\beta_j)$ 表示该圈上方位角为 β_j 的实测径向速度, $V_R(\beta_j)'$ 表示经最小二乘法拟合后,得到的在 β_j 处的径向速度。

令 E 对拟合得到的风速作偏导数,即 $\frac{\partial E}{\partial V'_R} = 0$, 即可求出 E 为极小值时的风场速度值,即完成公式(4)的求解。

解得 V_{AN} 和 V_{AE} 后,利用三角关系很容易就可求出船舶航行的速度与方向。

图 9、10 两图可以看出,速度及航向大体合理,一致性较好,个别点误差较大,可能与所用的点数过少有关,总体而言,船只越大,航速及航向的探测精度越高。

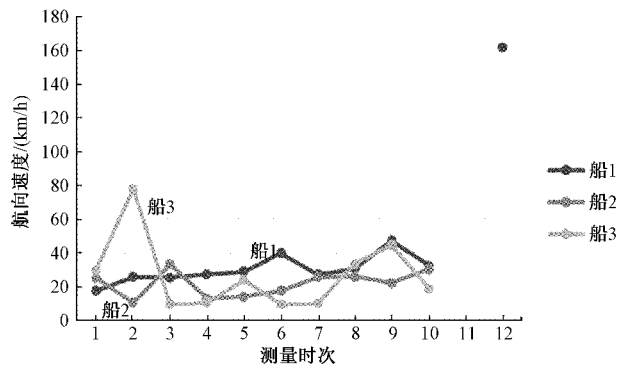


图 9 航速计算结果

4.3 船舶长度信息提取

根据船体位置在雷达回波图中的位置,计算船体长度(图 11)的公式可以表示为

$$L = \sqrt{(d_2 \times \sin\alpha)^2 + (d_2 \times \cos\alpha - d_1)^2} \quad (12)$$

由于雷达扫描速度较慢,因此在雷达扫描时间内船体移动所带来的长度测量误差变的不可忽略。修正(图 12)的公式如下:

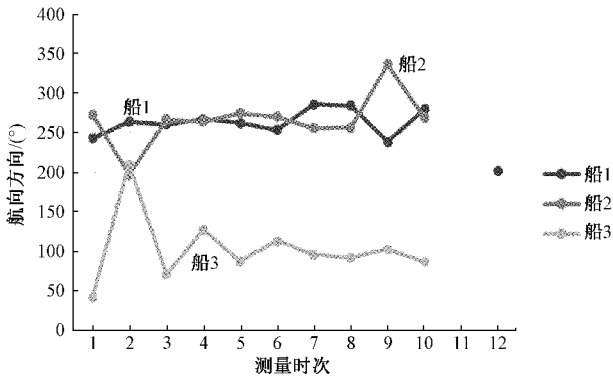


图 10 航向计算结果

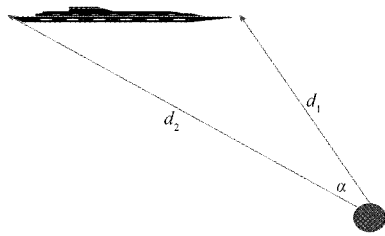


图 11 船体长度计算原理

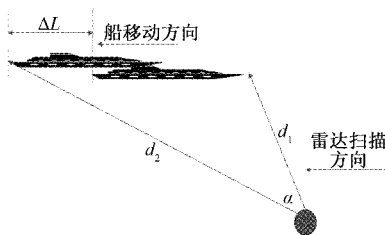


图 12 船体长度修正补偿

$$\Delta L = V_{\text{ship}} \times \Delta t \times \sin(\theta_{\text{direct}} - \theta_{\text{ship}}) \quad (13)$$

$$L' = L + \Delta L \quad (14)$$

图 13 和 14 可以看出,长度测量波动较大,可以大致定性,确定船只的长度量级,但定量较为困难。在船只航速和航向测量准确的前提下,考虑天线扫描时间的长度校正有一定的长度修正效果。

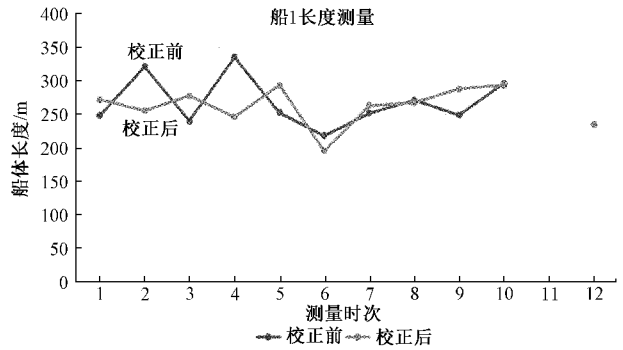


图 13 船体长度计算(a)

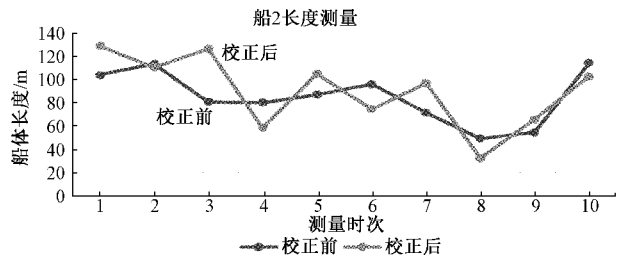


图 14 船体长度计算(b)

4.4 多组数据中的舰船关联

利用船舶航行方向,速度,配合长度及空间位置信息,可以对多次扫描中的船舶数据进行关联,识别出具体船只的航行轨迹。以两只船为例,航行轨迹如表 6 和 7。

表 6 船体关联识别(a)

| 航向/ (°) | 航速/ (km/h) | 距离/ km | 最大信噪比/ dB | 中心点对应 方位角/(°) | 所占射线数 | 长度/ m |
|------------|---------------|-----------|--------------|------------------|-------|----------|
| 242.85 | 17.62 | 2.61 | 83.75 | 30.08 | 9 | 271.79 |
| 264.54 | 25.82 | 2.49 | 83.48 | 28.03 | 11 | 255.65 |
| 260.83 | 25.49 | 2.1 | 86.99 | 355.86 | 11 | 277.61 |
| 267.65 | 27.59 | 2.19 | 85.97 | 339.55 | 15 | 246.05 |
| 262.55 | 29.09 | 2.52 | 86.42 | 319.39 | 9 | 293.36 |
| 253.53 | 39.97 | 3.24 | 86.66 | 305.45 | 6 | 195.47 |
| 286.44 | 27.56 | 3.75 | 84.36 | 298.11 | 7 | 262.78 |
| 284.60 | 30.77 | 4.86 | 83.85 | 290.78 | 4 | 267.38 |
| 238.94 | 47.53 | 5.46 | 85.39 | 286.91 | 4 | 288.01 |
| 279.94 | 32.64 | 6.75 | 77.14 | 285.46 | 3 | 293.73 |
| | | 7.08 | 81.32 | 282.87 | 2 | |
| 202.10 | 162.04 | 8.79 | 81.88 | 283.00 | 3 | 235.119 |

表 7 船体关联识别(b)

| 航向/ (°) | 航速/ (km/h) | 距离/ km | 最大信噪比/ dB | 中心点对应 方位角/(°) | 所占射线数 | 长度/ m |
|------------|---------------|-----------|--------------|------------------|-------|----------|
| 273.54 | 25.56 | 2.64 | 69.04 | 31.10 | 4 | 129.36 |
| 197.35 | 10.58 | 2.61 | 70.87 | 31.32 | 4 | 110.96 |
| 266.85 | 33.43 | 2.16 | 75.59 | 7.59 | 5 | 126.80 |
| 264.20 | 13.06 | 2.1 | 82.73 | 0.87 | 6 | 58.89 |
| 275.18 | 14.14 | 2.19 | 81.32 | 340.56 | 5 | 105.11 |
| 270.55 | 17.66 | 2.37 | 83.30 | 331.07 | 5 | 74.89 |
| 256.22 | 25.91 | 2.64 | 82.44 | 318.55 | 4 | 97.23 |
| 256.89 | 26.19 | 3.18 | 82.71 | 308.48 | 3 | 32.26 |
| 336.84 | 22.41 | 3.51 | 79.62 | 300.84 | 3 | 65.81 |
| 269.17 | 30.60 | 3.81 | 72.25 | 295.96 | 3 | 103.03 |

5 海雾观测数据中舰船杂波的抑制

对于海雾过程中毫米波雷达获取到的探测数据,根据舰船回波的特性,在提取出舰船目标后,从功率谱上对舰船的信号作针对性的抑制,从而进行二次谱估计,重新计算出气象目标的参数。具体抑制流程如图 15,包含舰船回波的海雾数据在功率谱上的抑制效果如图 16 所示。

按照上述方法对一次海雾过程的产品数据的舰船回波抑制前后对比如图 17 所示。

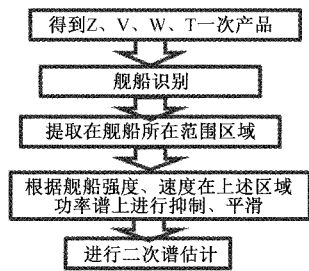
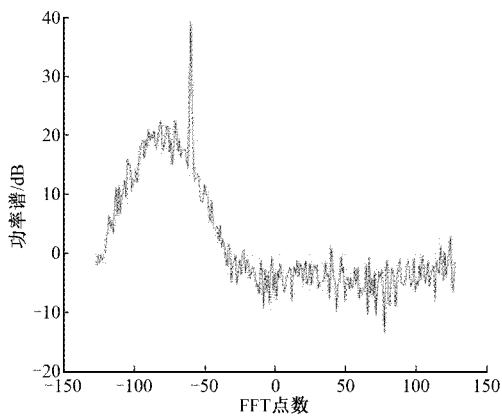
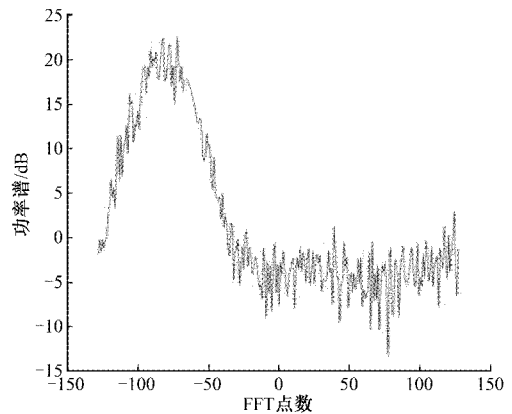


图 15 舰船杂波抑制流程



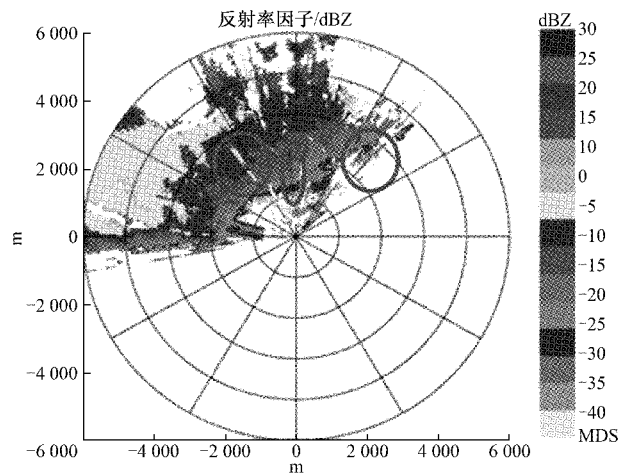
(a) 包含舰船杂波的海雾数据功率谱



(b) 抑制舰船杂波后的海雾数据

图 16 舰船杂波在功率谱上的抑制效果

从上图可看出,此方法取得了一定效果,尤其是对圆圈标记出的舰船杂波区域有明显的非气象回波抑制作用,使得海雾探测数据更加连续和平滑,改善了海雾探测雷达的数据质量。



(a) 舰船信号抑制前效果

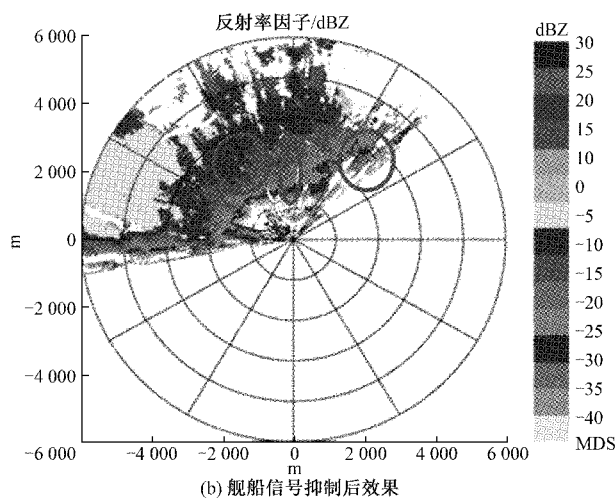


图 17

6 结 论

本文通过分析毫米波雷达海雾观测资料,得出以下结论:本文方法初步实现了海雾探测回波中的舰船杂波去除,提升了海雾探测的数据质量,为毫米波雷达更好地应用于海雾监测领域奠定基础;通过进一步分析气象雷达杂波中的舰船信息,提取出了航道中航向的舰船的长度、速度、航向等信息,挖掘了毫米波气象雷达在舰船识别方面的潜力,为后续相关研究奠定了基础,具有一定的应用前景。

未来,将致力于研究其他来源杂波的滤除,进一步提升毫米波雷达海雾观测效果。此外,还将研究探索舰船识别准确率及自动化程度提高的方法。

参考文献

- [1] ZHANG W, CHEN D, HU Y J, et al. Microphysical characteristics of a spring sea fog process along the coast of Southern Fujian [J]. *Meteorology*, 2021, 47(2): 157-169.
- [2] FU G, LI P Y, ZHANG S P, et al. A brief review of sea fog research in China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(2): 20-28.
- [3] 杨玉峰,蒋明争,李挺.海雾和陆雾的光散射特性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(9): 163-168.
- [4] 褚进华,唐修雄,矫健,等.能见度仪校准系统的不确定

度评定分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(2): 180-187.

- [5] GUO Y Y, YU S H S H, ZHAO W, et al. Review on the development of Sea Fog Visibility monitoring and prediction technology [J]. *Environmental Ecology*, 2021, 3(3): 39-42.
- [6] 刘光普,杜艳霞,吴雪菲,等.基于金属球的垂直指向型毫米波雷达标定[J]. *国外电子测量技术*. 2022, 41(1): 129-134.
- [7] LI Y, HOOGEBOOM P, RUSSCHENBERG H. A novel radar-based visibility estimator [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017: 3150-3168.
- [8] HU L J, FENG K, YANG H, et al. Application of millimeter wave radar in sea fog monitoring in Beilun port area[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2020, 48(2): 171-177, DOI: 10.19517/j.1671-6345.20190180.
- [9] 刘光普,黄思源,梁芎,等.毫米波雷达在港口海雾观测和能见度反演中的应用[J]. *干旱气象*, 2019, 37(6): 993-1004.
- [10] 张晶晶,吴福浪,俞科爱,等.基于毫米波雷达的一次海雾过程特征分析[J]. *气象科技*, 2020, 48(3): 406-414, DOI: 10.19517/j.1671-6345.20190201.
- [11] 潘致利.一种雷达组网系统, CN109901157A[P]. 2019.
- [12] 赵秀丽,李德鑫,刘长捷雾衰减对雷达探测距离影响分析[J]. *国外电子测量技术*, 2011, 30(10): 25-27, 75.
- [13] 李德鑫,陈曦,潘龙,等.海洋环境雷达探测效能评估系统设计[J]. *电子测量技术*, 2017, 40(7): 80-84.
- [14] 陈晔.毫米波雷达低角跟踪应用分析[J]. *舰船电子对抗*, 2000(4): 11-15, DOI: 10.16426/j.cnki.jedzdk.2000.04.004.
- [15] 朱丽军,陈玉坤.海面舰船目标微多普勒周期快速估计方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(6): 169-175.
- [16] 胡树贞,曹晓钟,陶法,等.舰载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. *气象*, 2020, 46(6): 745-752.

作者简介

任雍,硕士,高级工程师,主要研究方向为地基遥感观测设备数据产品分析应用。

E-mail: libraheart@163.com