

文章编号: 2096-1618(2024)02-0148-07

# 基于高斯拟合的复杂环境地杂波自适应抑制方法

顾桃峰<sup>1</sup>, 岳海燕<sup>2</sup>, 贾宁远<sup>1</sup>, 王斯正<sup>3</sup>, 陈俊<sup>3</sup>

(1. 广州市突发事件预警信息发布中心, 广东 广州 511430; 2. 广州市气象台, 广东 广州 511430; 3. 北京无线电测量研究所, 北京 100854)

**摘要:**针对风廓线雷达受到强地物杂波干扰探测数据存在较大偏差,使用常规地杂波抑制方法处理存在局限性这一问题进行研究,提出对功率谱数据进行基于高斯拟合自适应去地杂波处理的方法。通过数据验证,提出的算法能够有效抑制地物杂波信号,减少对有用回波信号识别的干扰。

**关键词:**风廓线雷达;地物杂波;高斯拟合;自适应

**中图分类号:** TN957.51

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.004

## 0 引言

地物杂波是气象雷达回波信号的主要干扰因素之一,地物杂波主要是雷达近地面树木、建筑物、车辆等目标回波通过天线旁瓣进入雷达接收支路<sup>[1]</sup>,此外还有发射泄漏到接收回路的直流信号等原因。这些干扰信号会在功率谱的零频附近形成强度较高的谱峰,影响谱识别算法对有效回波信号(风信号、降水回波信号)的识别成功率。采用各种方法力求消除或减弱这种影响,在设备硬件方面采用以减弱外部杂波影响的电磁屏蔽网、消除直流分量所采用的电磁隔离措施,处理算法方面应用最广泛的是基于时域数据处理的小波变换方法及天气雷达研究较多的高斯拟合方法。本文以高斯拟合为主要手段,提出一种基于高斯拟合的自适应方法,去除复杂环境下地杂波对风廓线功率谱数据的影响,通过理论分析、多源数据比对数据测试证明该方法的合理性。

## 1 复杂环境地杂波对传统地物杂波抑制方法的影响

对于风廓线雷达来说,地物杂波是最常见的干扰信号,一般分布在零频附近,且频谱宽度比风信号窄。当风速较低时,地物杂波干扰和风信号会发生混叠,造成风信号识别算法将风谱位置错误识别到地物杂波谱线上,造成测风精度下降。针对这种常见干扰信号,一般根据雷达使用环境或先验知识设定固定去地杂波宽度参数,对零频附近的功率谱数据直接进行去除和填

补,效果如图1所示。

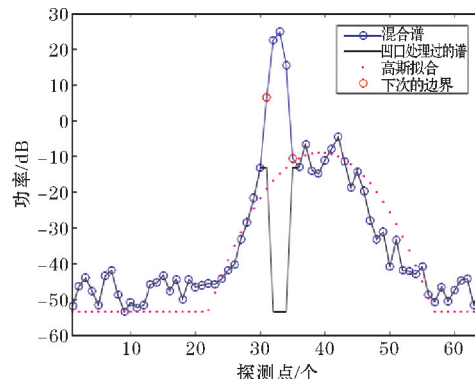
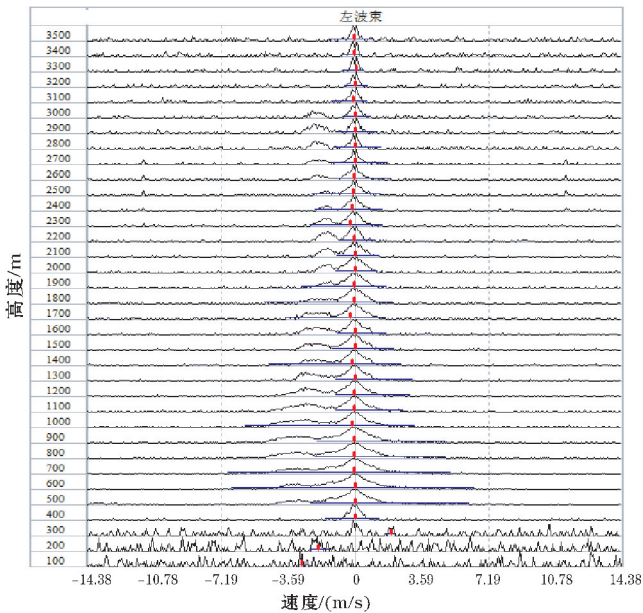


图1 地杂波谱线示意图

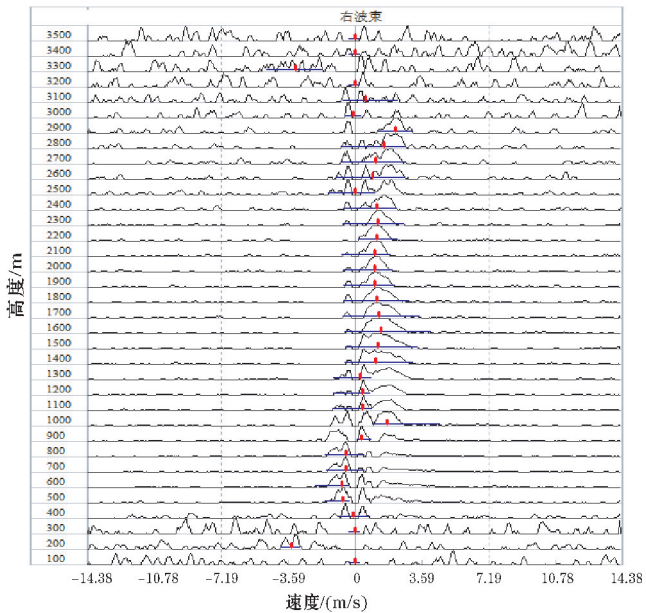
这种处理方法是目前风廓线雷达后端处理软件中固化的地杂波抑制方法,能有效对地杂波进行抑制。但是在2020年8月26日,风廓线雷达在南京溧水地区与探空仪的一次比测试验中,风廓线雷达回波功率谱中所有风信号均被地杂波信号覆盖,测风精度大幅度下降,风谱信号识别结果如图2所示。

由图2(a)可以看出,从第一个距离高度400 m开始(100~300 m无有效回波),至最后一个距离高度3500 m,所有高度层径向速度均小于0.2 m/s,但与之对称的波束图2(b)中识别出的径向速度与探空仪数据接近。图2(a)中大部分高度层能看到明显的风谱回波信号。根据功率谱数据得到风廓线数据后,将风廓线数据与探空仪数据对比,对比结果表明风廓线得到的风向数据与探空仪基本一致,但风速数据偏低。

综合这些情况,基本可以判定风廓线雷达左波束受到强地杂波干扰,并且使用常规地杂波抑制方法未能有效去除地杂波影响。



(a) 左波束受地杂波影响

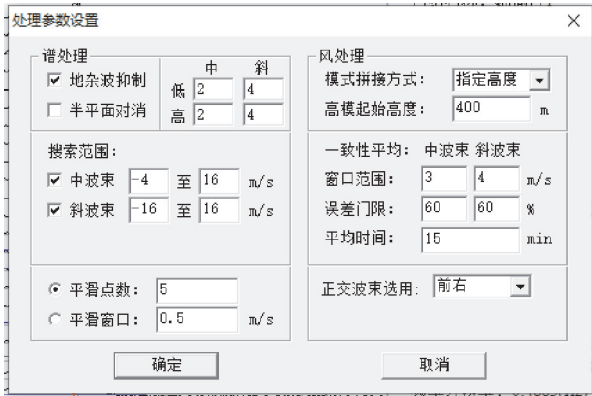


(b) 右波束未受地杂波影响

图 2 强地杂波影响 2020 年 8 月 26 日 15:20 实测结果

对现场分析,发现在风廓线雷达左波束(西波束)对应方向百米外是一片树林,而且当天地表风较大(风速 5~6 m/s),树木摆动幅度较大,进一步强化、展宽了地物杂波。而风廓线雷达地杂波处理参数选用的

如图 3(a)所示的常规处理参数,即斜波束零频点附近选取 4 个点进行扣除与填补,但是由于杂波展宽,去除后剩余的杂波强度依然远高于风谱回波强度(图中功率谱显示方式为对数谱)。



(a) 常规处理



(b) 修改谱处理后参数

图 3 地杂波抑制处理参数

通过修改谱处理参数如图 3(b)所示,得到如图 4 所示的处理后功率谱,将地杂波抑制范围翻倍并加入了半平面对消后,地杂波才最终得到抑制,风谱重新识别到正确位置。在实际应用中,风廓线雷达设备操作人员一般无法准确地对谱处理参数进行调整,粗糙的参数设置往往会造成探测精度下降。因此需要能根据地杂波特点自动调整处理范围与处理力度的方法,实现地杂波的自适应抑制。张福贵等<sup>[2]</sup>通过对小波变化中的小波系数模值大小进行判定,确定地杂波的处理程度,郑秀明等<sup>[3]</sup>也针对低空连续地杂波进行高斯拟合处理。针对这种大风条件下的展宽地物杂波,本文提出了一种基于高斯拟合的自适应地杂波去除方

法,该方法应用部分 GMAP(高斯模型自适应滤波器),处理结果有效提高了风廓线数据与探空仪数据的比对精度。

## 2 基于高斯拟合的地物杂波抑制算法简述

### 2.1 高斯拟合定位地杂波位置

基于高斯拟合的地杂波处理方法首先对谱线进行单峰高斯拟合,对拟合结果的峰值位置(地杂波中心点、峰值幅度)、地杂波影响范围(宽度)进行分析,确定地物杂波信息。

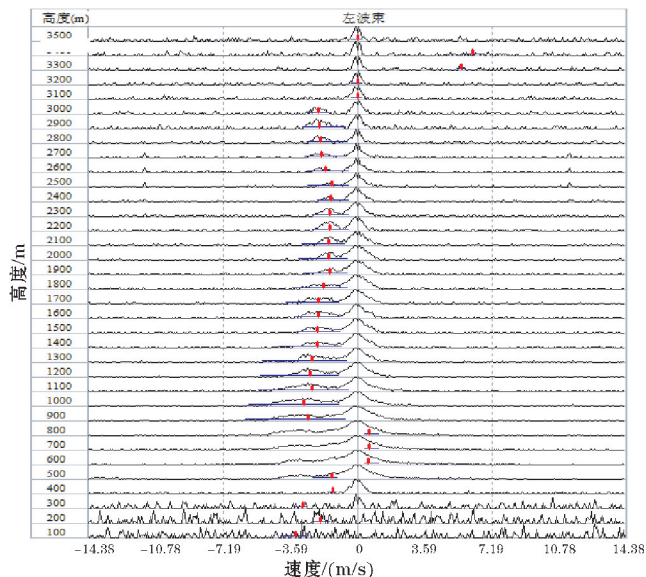


图4 调整地杂波处理参数后功率谱识别

经过展宽的地杂波功率谱与高斯函数的形状较为相似,设速度谱形状满足高斯函数,即:

$$S_m(v) = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left(-\frac{(v-\bar{v})^2}{2\sigma_v^2}\right)$$

其中  $S_0$  即为信号功率,  $\bar{v}$  为平均多普勒速度,  $\sigma_v$  为多普勒速度标准差,因此,如果能够拟合出这样的高斯函数,也就获取了谱的相关信息。该方法根据最小二乘法进行拟合,也称为基于最小二乘的高斯拟合法。

令去完噪底后的观测值为  $S(v_i)$ , 根据最小二乘法,即求  $S_0, \bar{v}, \sigma_v$  取何值时使观测值与模型值之间的差距最小,因为  $S_m(v)$  与  $S_0, \bar{v}, \sigma_v$  有关,则可以将其改写为  $S_m(v; S_0, \bar{v}, \sigma_v)$ , 两者之间的差距表示为:

$$\varepsilon^2(S_0, \bar{v}, \sigma_v) = \sum_{i=1}^N (S_m(v_i; S_0, \bar{v}, \sigma_v) - S(v_i))^2$$

其中,  $N$  为参加拟合计算的点数。从数学的角度来理解,即求  $S_0, \bar{v}, \sigma_v$  使得  $\varepsilon^2(S_0, \bar{v}, \sigma_v)$  最小,在实际操作中,由于  $S_m(v; S_0, \bar{v}, \sigma_v)$  非线性,可以考虑采用非线性拟合计算,但是从实际计算复杂性的角度考虑,结合其本身函数的特殊性,可以将公式两边求自然对数,将其转化为线性函数进行线性拟合。

采用单峰值高斯对2020年8月26日的某一层实测数据进行拟合处理,得到如图5所示的单层功率谱数据处理结果。图中高斯拟合结果范围与地杂波范围一致性较好,拟合后的高斯函数顶点位于257.2处,宽度8.02。得到高斯函数后可以将高斯函数窗口范围内信号使用噪声电平功率代替,压低地杂波影响,但是由于删除高斯后的功率谱依然高于有效风信号,因此需要对功率谱数据进行进一步处理。

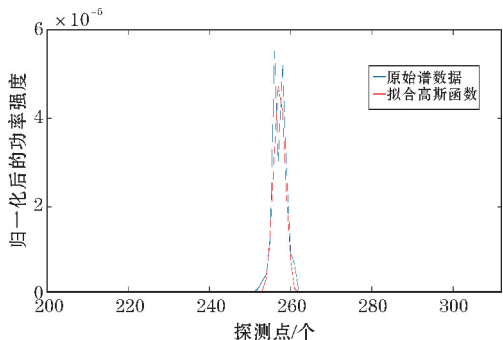


图5 调整地杂波处理参数后功率谱识别

根据图3可知,2020年8月26日数据经过地杂波处理参数为8的抑制后,风谱信号识别功能恢复正常,通过高斯拟合后的高斯函数宽度恰好接近8,由此判断高斯拟合可以作为常规地杂波抑制方法自适应调节处理范围的判别依据。

## 2.2 自适应地杂波抑制

根据图5可以看出,地杂波与风信号回波的强度量级相差较大,即使准确识别出地杂波范围进行去除,依然会残留部分高强度杂波参与量影响风谱识别结果,需要对处理后的谱线进一步进行优化。处理方式即在高斯函数拟合结果基础上向左、右继续扩展地杂波处理范围,设定地杂波处理参数  $\alpha$  为确定值,当处理范围左右两测不高于噪声功率的  $\alpha$  倍时,停止处理地杂波功率谱。

这种方式对于风信号淹没在地杂波功率谱下方时无法进行有效识别,但是在存在双峰、或风谱信号与地杂波距离较远时效果较好。

## 3 结果和分析

### 3.1 资料来源

风廓线雷达设备是由航天新气象科技有限公司研制的L波段风廓线雷达。该雷达采用固态、相控阵、脉冲多普勒体制,能够连续探测获取地面至6~8 km高度范围内各个波束指向上的径向速度数据,并反演得到各高度层的风速、风向与垂直速度信息,根据不同使用需求生成风羽图、风矢图等风廓线、Cn2数据,还能根据功率谱数据、径向数据等基数据进行二次开发,得到湍流耗散率、低空急流等二次产品,该系统原理框图如图6所示。风廓线雷达测量高度为6~8 km(受天气条件影响),垂直空间分辨率为50 m/100 m或120 m/240 m,时间分辨率为3~6 min。



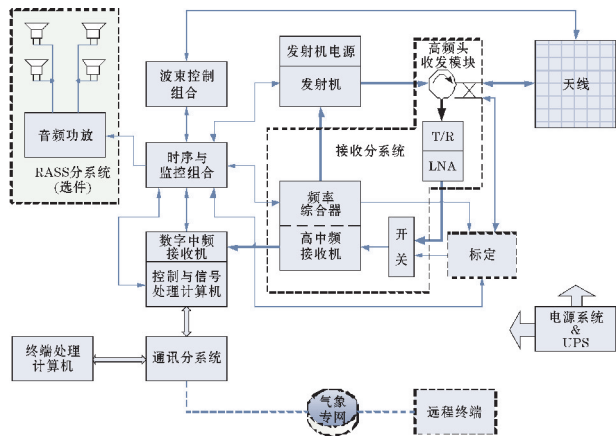


图 6 风廓线雷达原理框图

北斗探空系统是由航天新气象科技有限公司研制,基于北斗导航卫星定位体制(兼容 GPS 定位体制)的高空气象探测产品。该产品可以利用探空气球携带探空仪自由升空,实时测量地面到高空 30 km、斜距 200 km 范围内的大气温度、湿度、气压、风向和风速等气象要素,输出大气垂直廓线和特定报文产品。北斗探空系统可全天候探测,可实时准确获取现场大气垂直结构的温度、湿度、气压、风速和风向的气象数据,是现场高空气象探测的重要且唯一的手段。其测量高度 0~30 km,垂直空间分辨率 4~8 m,时间分辨率为 1 s。系统原理框图如图 7 所示。

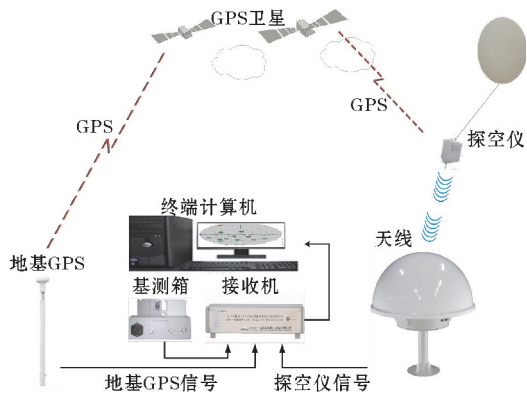


图 7 北斗探空原理框图

激光测风雷达是由航天新气象科技有限公司提供的,其原理框图如图 8 所示。该雷达利用多普勒频移原理测量风速,通过激光发射源产生激光束并放大后变为高功率激光信号,经过光学环形器后由光学天线发射向大气,与大气中的气溶胶粒子发生米散射相互作用,大气中气溶胶粒子的运动使后向散射信号中包含一个与气溶胶粒子运动速度有关的多普勒频率,相干接收机接收到这个弱回波信号后,与留在接收机中的本振激光经光纤耦合器进行混频干涉处理,提取出与气溶胶粒子运

动速度有关的多普勒频率信号,再经平衡光电探测器入信号采集处理系统处理,经过处理后得到一组径向风速信息。该设备波长 1550 nm,可探测距离 3 km,垂直空间分辨率为 15 m/30 m,时间分辨率 5 s~5 min 可调,观测期间设置数据输出时间分辨率为 1 min。

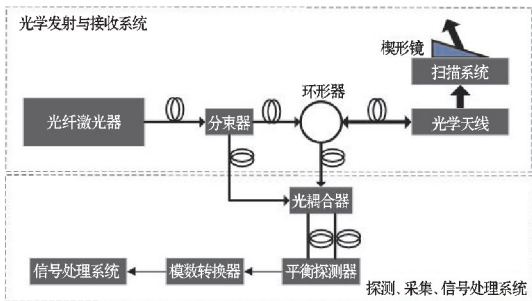
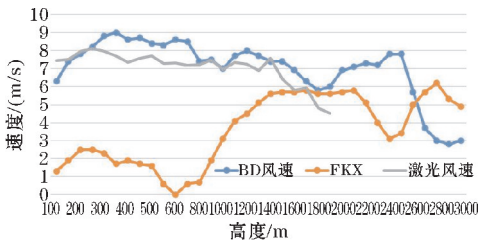


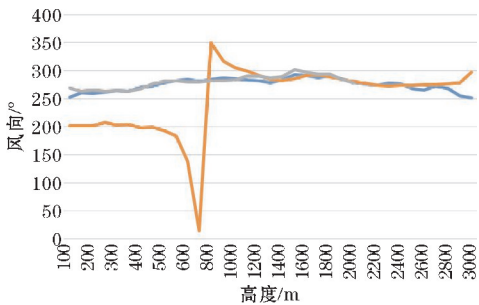
图 8 激光测风雷达原理框图

3.2 2020 年 8 月 26 日南京某地风廓线雷达与探空、激光测风雷达数据对比分析

2020 年 8 月 26 日,风廓线雷达和探空、激光测风雷达进行精度比对测试结果如图 9 所示,其中激光雷达与探空数据一致性较高,风廓线雷达 1800 m 以下比对结果较差,经上述内容判定为地杂波影响。



(a) 3 套探测设备风速对比结果



(b) 3 套探测设备风向对比结果

图 9 3 套系统风速、风向比对折线图

通过本文提出方法对各组功率谱(主要是左波束)进行去地杂波处理,得到如图 10 所示效果。地杂波处理后的部分虽然有明显凹陷,但处理后的风谱识别率明显提高,但也存在由于功率谱凹陷造成的识别错误。后续还需对算法进行完善。

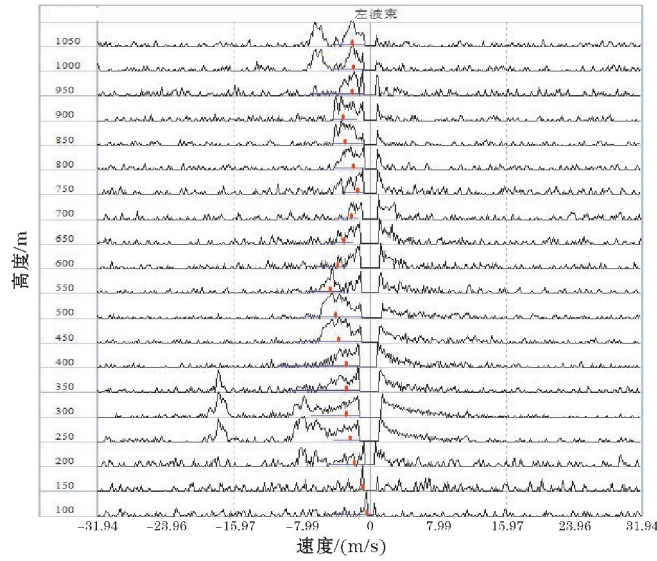


图 10 抑制地杂波结果后示意图

随后根据处理后的功率谱数据重新生成风廓线数据,并与探空数据进行比对,得到如图 11 所示结果。与原比对效果相比,处理后数据与探空数据一致性得到明显改善。

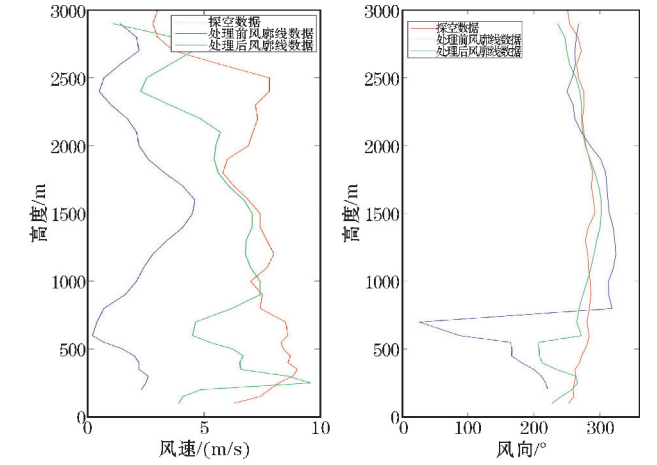


图 11 抑制地杂波结果前后对比结果示意图

3.3 2022 年 3 月 15 日至 4 月 15 日北京某地风廓线雷达与 ERA5 背景场数据对比分析

本文对 2022 年 3 月 15 日至 4 月 15 日北京某地风廓线雷达的低模式前 10 个距离门数据做地物杂波自适应抑制的重处理,图 12 给出了使用地物杂波自适应抑制方法处理前后反演出的水平风与 ERA5 背景场数据比对廓线图,黑色实线表示 ERA5 背景场数据,蓝色实线表示未使用地物杂波自适应抑制方法之前反演出的水平风,红色实线表示使用地物杂波自适应抑制方法之后反演出的水平风,可以看出 3 个时刻处理后的数据与 ERA5 背景场数据的一致性均高于处理之前的对比结果。

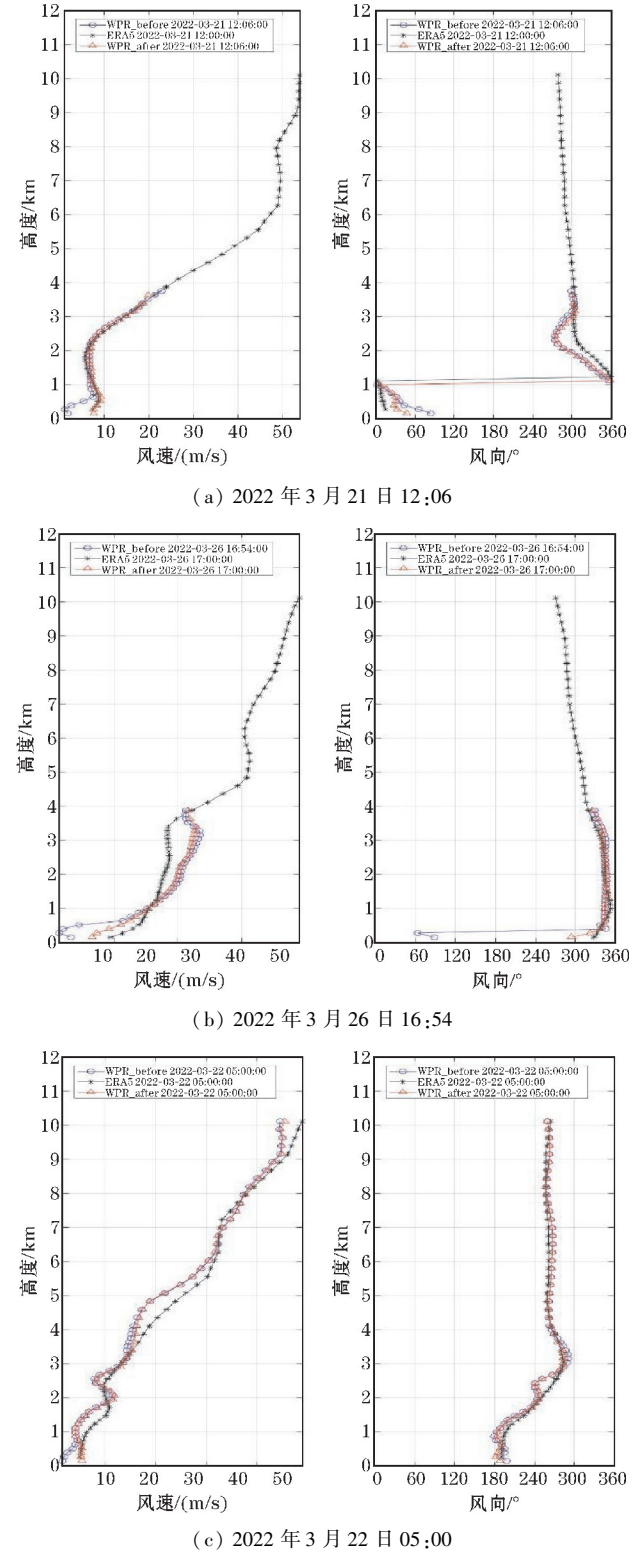


图 12 使用地物杂波自适应抑制方法处理前后反演出的水平风与 ERA5 背景场数据比对廓线图

表 1、表 2 给出 2022 年 3 月 15 日至 4 月 15 日北京某地风廓线雷达低空 10 个高度层使用地物杂波自适应抑制方法处理前后反演出的水平风速、风向与 ERA5 背景场数据比对系统误差、均方根误差等统计结果,从结果中可以看到,各类均差均有所收敛,充分说明了地物杂波自适应抑制方法的有效性。

表 1 使用地物杂波自适应抑制方法处理前后前 10 个高度层水平风速误差统计表

高度/m	系统误差/( m/s)		标准偏差/( m/s)		均方根误差/( m/s)	
	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后
150	-0.73	1.51	2.73	2.48	2.82	2.91
270	-2.43	-0.07	2.58	2.16	3.55	2.16
390	-2.41	-0.29	2.43	2.16	3.42	2.18
510	-1.43	0.10	2.52	2.19	2.90	2.20
630	-0.57	0.35	2.36	2.30	2.42	2.32
750	-0.15	0.45	2.44	2.41	2.44	2.45
870	0.12	0.55	2.51	2.46	2.51	2.52
990	0.30	0.62	2.51	2.52	2.52	2.60
1110	0.44	0.66	2.60	2.67	2.64	2.75
1230	0.53	0.64	2.79	2.74	2.84	2.81

表 2 使用地物杂波自适应抑制方法处理前后前 10 个高度层风向误差统计表

高度/m	系统误差/( m/s)		标准偏差/( m/s)		均方根误差/( m/s)	
	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后
150	6.99	9.25	51.23	32.51	51.71	33.80
270	0.42	4.30	38.33	25.98	38.33	26.33
390	0.65	2.47	30.25	25.36	30.26	25.48
510	1.15	3.00	23.91	21.20	23.94	21.41
630	0.86	1.74	18.80	19.15	18.82	19.23
750	-0.30	0.65	18.65	18.70	18.65	18.71
870	-1.67	-1.00	18.94	18.17	19.01	18.20
990	-2.38	-1.94	18.80	18.13	18.95	18.23
1110	-2.87	-2.56	18.67	18.79	18.89	18.97
1230	-3.44	-3.14	18.50	19.41	18.82	19.66

系统误差,即在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差,表示为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

式中: $\bar{x}$  为系统误差; $x_i$  为各次测量所得差值; $n$  为测量的次数。实际测量时不可能有无限多的次数。有限次测量的差值平均值也可称为系统误差,测量次数越多结果越接近系统误差的实际值。

标准偏差,即对同一被测量进行  $n$  次测量,表征测量结果分散性的量  $s$ ,公式如下:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

式中: $s$  为标准偏差; $\bar{x}$  为系统误差或测量结果的平均值; $x_i$  为各次测量所得误差或测量结果。在用测量结果进行直接计算时  $s$  通常称为标准差,在用各次测量的误差进行计算时  $s$  则通常称为标准偏差。

在误差分析中,系统误差反映测量值整体偏离实际值的程度,标准偏差则反映测量值的离散程度,如果使用标准偏差来表征系统特性,仅从标准偏差来看是

片面的,系统误差在一定区间内,标准偏差的结果才算是有效的,即能反映系统的特性,遂引入均方根误差。根据 IOM-79 (Instruments and observing method report No. 79, world meteorological organization),对均方根误差定义如下

$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$$

式中: $x_i$  为各次测量所得误差或测量结果。根据统计计算关系,当  $n$  较大时, $rmse^2 = \bar{x}^2 + s^2$ ,也可以看到,均方根误差是综合反映系统误差和标准偏差的统计量。

4 结论

风廓线雷达近地面数据质量受地物杂波影响较大,直接表现可能为近地面大风过程中风廓线雷达测得的风速偏小、风向不一致等问题,地物杂波的抑制与处理直接影响风廓线雷达的探测数据质量。但是地物杂波的形成因素很多,包括周边树木、地形等,传统的地物杂波抑制算法无法适应探测环境多变的情况,特别是地物杂波情况随天气等情况发生变化时。



本文提出的自适应地物杂波抑制算法,通过对复杂环境下大风天气地杂波进行基于高斯拟合的抑制处理,有效降低了地杂波对测风精度的影响,得到以下结论:

(1)高斯拟合能够有效识别地杂波影响范围,支持常规地杂波抑制算法进行自适应处理范围判别,获取最优风谱识别效果;

(2)自适应地杂波抑制算法能够最大程度削减地杂波影响范围,提高风谱信号识别率;

(3)去除地杂波后风谱识别效果提升,通过处理功率谱计算得到的廓线数据准确性提升。

致谢:感谢广州市科技计划项目(202206010016)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 李腾伟. X波段天气雷达地杂波滤波技术[D]. 北京:国防科学技术大学,2016.
- [2] 张福贵,范潇,何建新. 自适应阈值方法去除风廓线雷达地物杂波[J]. 应用气象学报,2015,26(4):482-481.
- [3] 郑秀明,夏一凡,王志锐,等. 风廓线雷达中自适应抗干扰技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(3):391-396.
- [4] 杜捷,王海江,孙召平. 基于模糊逻辑的双偏振天气雷达地物杂波识别算法[J]. 成都信息工程大学学报,2022,37(2):159-164.
- [5] 李品,张冰瑞,徐东东. 基于自适应杂波抑制的气象参数估计和补偿技术[J]. 现代雷达,2021,43(6):10-14.
- [6] 刘清媛,吴松华,张凯临,等. 基于单-双高斯模型拟合法的测风激光雷达海上风电机组尾流特征分析[J]. 大气与环境光学学报,2021,16(1):44-57.
- [7] 邓闯,阮征,魏鸣,等. 风廓线雷达测风精度评估[J]. 应用气象学报,2012,23(5):523-533.
- [8] 孙旭映,韩晖,段海霞,等. 风廓线仪与气球测风资料的对比分析[J]. 干旱气象,2008(3):48-52.
- [9] 万蓉,周志敏,崔春光,等. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析[J]. 暴雨灾害,2011,30(2):130-136.
- [10] 胡明宝,李妙英. 风廓线雷达的发展与现状[J]. 气象科学,2010,30(5):724-729.
- [11] 邓闯,阮征,魏鸣,等. 风廓线雷达测风精度评估[J]. 应用气象学报,2012,23(5):523-.
- [12] 周旭辉. 风廓线雷达功率谱密度数据处理算法研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.
- [13] 王莎,阮征,葛润生. 风廓线雷达探测大气返回信号谱的仿真模拟[J]. 应用气象学报,2012,23(1):20-29.
- [14] 何平,李柏,吴蕾,等. 确定风廓线雷达功率谱噪声功率方法[J]. 应用气象学报,2013,24(3):297-303.
- [15] 林晓萌. 风廓线雷达的数据质量控制方法的应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.
- [16] 杜言霞,陈州川,吴勇凯,等. 风廓线雷达数据处理过程及产品质量控制介绍[J]. 气象水文海洋仪器,2018,35(3):4-8.
- [17] 陈夏,王海江,吴蕾,等. 一种综合的风廓线雷达数据质量控制方法[J]. 成都信息工程大学学报,2021,36(5):485-492.
- [18] Morse C S, Goodrich R K, Cornman L B. The Nima Method for Improved Moment Estimation from Doppler Spectra[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2002,19(3):274-295.
- [19] Cornman L B, Goodrich R K, Morse C S, et al. A fuzzy logic method for improved moment estimation from Doppler spectra[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1998,15(6):1287-1305.

## An Adaptive Clutter Suppression Method based on Gaussian Fitting in Complex Environment

GU Taofeng<sup>1</sup>, YUE Haiyan<sup>2</sup>, JIA Ningyuan<sup>1</sup>, WANG Sizheng<sup>3</sup>, CHEN Jun<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Emergency Warning Information Release Center, Guangzhou 511430, China; 2. Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430, China; 3. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Considering the significant deviation in wind profile radar detection data caused by strong ground clutter interference and the limitations of conventional ground clutter suppression methods, this paper introduces an adaptive ground clutter removal based on Gaussian fitting for power spectrum data is proposed. Through data verification, the algorithm proposed in this paper can effectively suppress ground clutter signals and reduce interference in the recognition of useful echo signals.

**Keywords:** wind profile radar; ground clutter; Gaussian fitting; adaptive