

杜言霞,吴勇凯,程思,等.综合识别法去除风廓线雷达地物杂波的可行性研究[J].干旱气象,2019,37(1):166–172, [DU Yanxia, WU Yongkai, CHENG Si, et al. Feasibility Study on Removing Ground Clutter of Wind Profiler Radar Based on Comprehensive Recognition Method [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1):166–172], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0166

综合识别法去除风廓线雷达地物杂波的可行性研究

杜言霞,吴勇凯,程思,杨泽鑫,李智成,陈斯智

(福建省泉州市气象局,福建 泉州 362000)

摘要:以杂波谱极小值连线的思想为基础,针对强风天气条件下的风廓线雷达地物杂波信号,提出一种综合识别杂波的去除方法,并与常规的地物杂波抑制方法相比较。结果表明:利用该方法对强风天气下的地物杂波有更好的抑制效果,水平风速得到了明显增强,与地面观测数据相比,雷达产品更趋于真实风速。

关键词:风廓线雷达;地物杂波;综合识别;去除

文章编号:1006-7639(2019)01-0166-07 **DOI:**10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0166

中图分类号:P413

文献标志码:A

引言

风廓线雷达以大气湍流作为探测目标,在近地层,其微弱的回波信号很容易受地物杂波干扰,特别是强风天气条件下,通常会对2 km高度以下的回波信号功率谱产生较大影响^[1]。此时,地物杂波信号显著增多增强,而湍流回波本身很弱,常被完全淹没,导致回波信号功率谱难以提取,同时在峰值检测上,强地物杂波往往造成气象目标的误判,从而影响风场反演产品的精度。

传统的地物杂波抑制处理方法分别在时域和频域中进行。目前,在时域中,主要采用滤波器对地物杂波进行滤波^[2],该方法能实现对地物杂波快速实时地去除,但也存在杂波残留现象。在频域中,对地物杂波的抑制以获取真实湍流回波信号谱为目的,NOAA在实际业务中利用均值法去除地物杂波^[3],在无风或风力较小的天气条件下,该方法对地物杂波的抑制效果较明显。但当风力较强时,地物杂波信号的能量大于回波信号,其附近的真实回波淹没其中,此时均值法不能有效地对功率谱中的杂波信号谱进行去除。

针对强风天气下地物杂波的去除,本文基于杂

波谱极小值连线的思想,提出一种地物杂波的综合识别方法。该方法以实际业务应用为目标,尽量避免相对繁琐的计算,利用地物杂波的极小值连线对其进行抑制,并对低模式不同高度层的实际大气返回信号包络谱峰进行有效识别,再通过连续性检测剔除个别跳跃点等一系列综合识别步骤对有用信号峰值进行标识,使波束合成分得到的水平风更加符合真实风场的情况。最终通过对不同型号雷达的大量实际个例进行验证,结果表明该方法能够在一定程度上改善传统均值滤波方法的杂波抑制效果,从而提高提取风廓线雷达大气信号的准确性,为得到较高精确度的风场信息打下数据质量控制基础。

1 湍流回波特征量

风廓线雷达接收的回波信号包括大气湍流的后向散射回波、系统噪声回波及地物等影响的杂波^[4]。在频域中,湍流回波功率谱呈现为在均匀噪声谱之上的气象信号谱峰以及地物杂波谱峰。地物杂波由雷达附近的静止目标对天线旁瓣散射造成,在频域上位于零频附近^[5],谱宽比湍流信号谱窄,而强风天气时,谱宽较宽,能量也会比大气湍流信号

收稿日期:2017-11-07;改回日期:2018-03-14

基金项目:2018年福建省泉州市气象局科研项目基金资助

作者简介:杜言霞(1983—),男,工程师,主要从事大气探测技术保障工作。E-mail:277618620@qq.com。

高出几倍。此时,湍流回波信号弱于地物杂波信号,甚至几乎被淹没。湍流回波和地物杂波信号的功率谱特征在整个频域范围内都呈近似高斯分布谱,系统噪声功率频谱呈均匀分布^[6]。

2 地物杂波综合识别方法

强风天气条件下,地物杂波综合识别方法具体步骤如下:(1)利用3点滤波平滑法去除噪声干扰^[7];(2)利用分段平均法确定噪声电平,并以高出噪声电平的极大值初步确定信号峰值^[8];(3)利用地物法杂波的极小值连线法去除地物杂波;(4)通过垂直方向上连续性检测对信号目标进行判别和调整;(5)根据识别的信号谱峰信息,求各阶谱矩。

2.1 功率谱的预处理

回波信号功率谱的预处理首先利用3点滤波平滑法去除功率谱上的一些“跳点数据”,然后利用分段平均法计算噪声功率谱密度。图1为原始回波信号功率谱,可见在信号峰值功率附近,存在一些分布较零散、谱宽较窄的峰值毛刺。采用3点滤波平滑方法进行去除,峰尖值被抑制,幅度有所降低,整个谱线得到平滑(图2)。图2中红色直线表示由分段平均法得到噪声功率谱密度,可以看出噪声功率谱密度呈均匀分布。

2.2 谱峰的初步检测

经过上述功率谱预处理,假设在功率谱分布图上,大气回波信号谱的谱峰普遍高出噪声毛刺谱,则其功率谱密度值也应最大。对回波信号功率谱谱峰进行初步检测:从第1个点开始,前1个点与后1个点对应的功率谱值进行对比,选取较大值,直至将所有点检测完毕,最终确定的极大值所在位置标记为峰值点,然后寻找下一个谱极大值点,直至5个波束(中、北、东、南、西)所有高度层的谱线峰值点都得到确定。图3为一个6 min时间段内,5个波束方向功率谱经过初步检测的谱峰效果。可以看出,在南波束870、750、630 m高度,西波束390、270 m高度,北波束870、510、270、150 m高度都存在一个共同特征,经初步检测后,谱峰都位于0 m·s⁻¹速度点,而在0 m·s⁻¹速度点的峰值周边有一个较小的谱线峰包络,其所处位置与相邻高度上检测出的谱峰有较好的连续性。通常认为,湍流回波信号应为此小谱线峰包络,但所在高度的地物杂波强度大于湍流回波信号,在初步检测进行自动搜索功率谱峰值时,容易识别靠近0 m·s⁻¹速度点的地物杂波谱峰。如果能剔除上述高度上在0 m·s⁻¹速度点分布的这段谱线,即可检测出真实信号峰值。但目前检

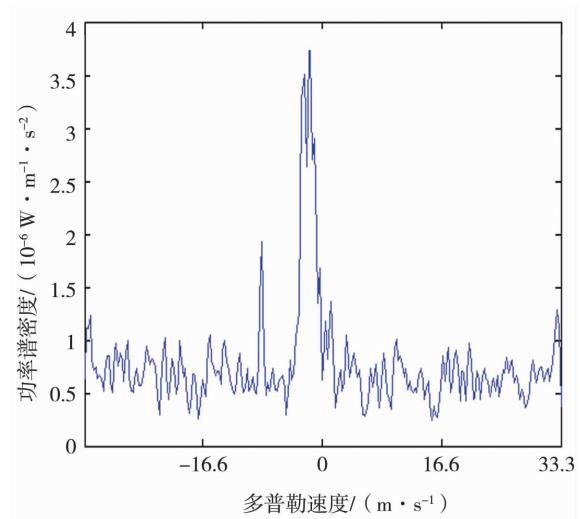


图1 原始信号功率谱

Fig. 1 Original signal power spectrum

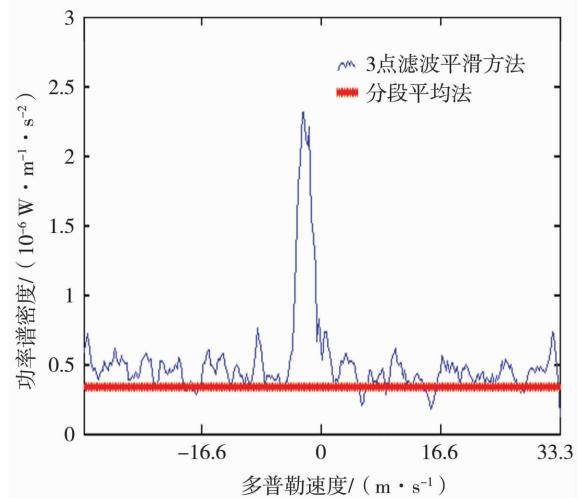


图2 利用3点滤波平滑法和分段平均法处理后的信号功率谱

Fig. 2 Signal power spectrum after using 3 points filtering smoothing method and piecewise average method preprocessing

测算法不能去除特定高度层上0频附近的杂波谱,因此,在检测出信号谱峰值之后,需进行分类检测^[9]。

2.3 极小值连线法抑制地物杂波

由于湍流回波与地物杂波的强弱在不同高度呈不同形态,因此进行分类检测。传统的均值滤波法在去除地物杂波时^[10],首先以功率谱0频为中心的13点范围作为信号谱峰的判断阈,若峰值所在点未落在此范围,则判此阈内的湍流信号未受地物杂波干扰,可被识别出并作为可信信号;若峰值点落在此阈内,则判为地物杂波信号,需进行去除计算。即对以0频为中心的3、5、7、9、11点对应的功率谱密度值作均值处理,这些点也被称作均值端口宽度^[11]。端口是以0频为中心的左右对称矩形窗,具体情况

不同,采用端口宽度也不同,然而该方法无法较理想地去除强风条件下的强地物杂波。图4为原始功率谱及经过5、7、9点均值处理过的谱信号,可见,左侧的杂波峰值仍高于右侧信号谱峰值,在进行峰值检测时,将首先识别出杂波峰,而无法有效识别出真实信号。

图5为150~1590 m高度上5个波束经过常规均值滤波法处理前后的对比,可见,该方法无法对强风条件下的地物杂波进行有效抑制。因为在中波束870 m,北波束390、510、870 m,南波束630、750、870 m,西波束270、630、990、1470 m高度层上,其0频对应的峰值在均值处理后没有得到有效消减,即在谱峰识别过程中,仍将地物杂波判断为湍流回波。

以上分析了均值滤波方法的局限性,因此提出一种针对强风条件下地物杂波抑制的改进方法。其原理是以经过分类检测得到的杂波峰值为中心,依次向左右两侧搜索极小值,以两侧的极小值为端点构造虚拟直线,并用该线上的点代替两极小值之间的值。图6为福建德化风廓线雷达750 m高度上的原始功率谱及用极小值法去除杂波后的功率谱。可以看出,在原始功率谱上,经过分类检测,0频处功率较强的波峰为杂波,约为实际回波信号的5倍,若利用均值滤波对其进行杂波抑制,以自动识别的最大值作为实际回波,则导致对湍流目标的错误识别

和最终合成风数值出现偏差。用极小值连线方法可以对强风条件下0频处窄而强的地物杂波完全去除,真实回波得以保留并且强度有所提升,取得较好的抑制效果。

2.4 连续性检测

在空间及时间尺度上,风场应具有一定的连续性,如果上下高度层谱峰位置的水平差距在某个范围内,则认为该数据是连续的,否则其值出现跳变现象^[12]。根据上述原理,分别检测5个波束指向的各高度层之间径向速度值的连续性。理想情况下,所有高度层上的峰值点都可以通过连续性检测,但由于杂波干扰的影响,导致某些高度层的功率谱线呈茅草般分布,使其无法通过上下相邻高度层的连续性检测。此时,利用已通过各高度层上连续性检测的径向速度,使其峰值位置生成一个变化阈^[13],据此在没有通过检测的功率谱中开展谱峰搜索,将峰值位置超出上述变化阈作为新的目标峰,得到出现跳变的峰值。

图7为存在地物杂波的原始5波束功率谱及利用极小值法和连续性检测(综合识别法检测)去除地物杂波的功率谱。可以看出,在中波束870、750 m高度,南波束870、750、630 m高度,西波束990、390、270 m高度上,利用综合识别法检测后,在0频附近的真实回波谱峰得以凸显,使回波整体高度上的连续性得到改善。

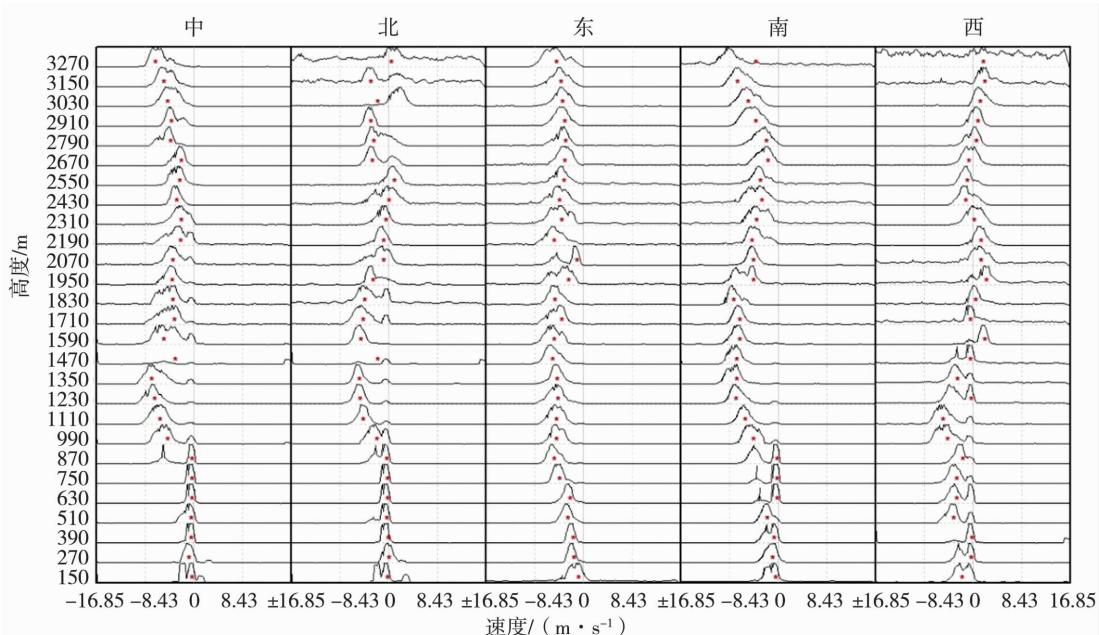


图3 经过预处理和初步检测的5波束功率谱
(红色星号表示谱峰所在位置,下同)

Fig. 3 Power spectrum of five beams after preprocessing and preliminary detection
(red asterisk indicates the position of the peak, the same as below)

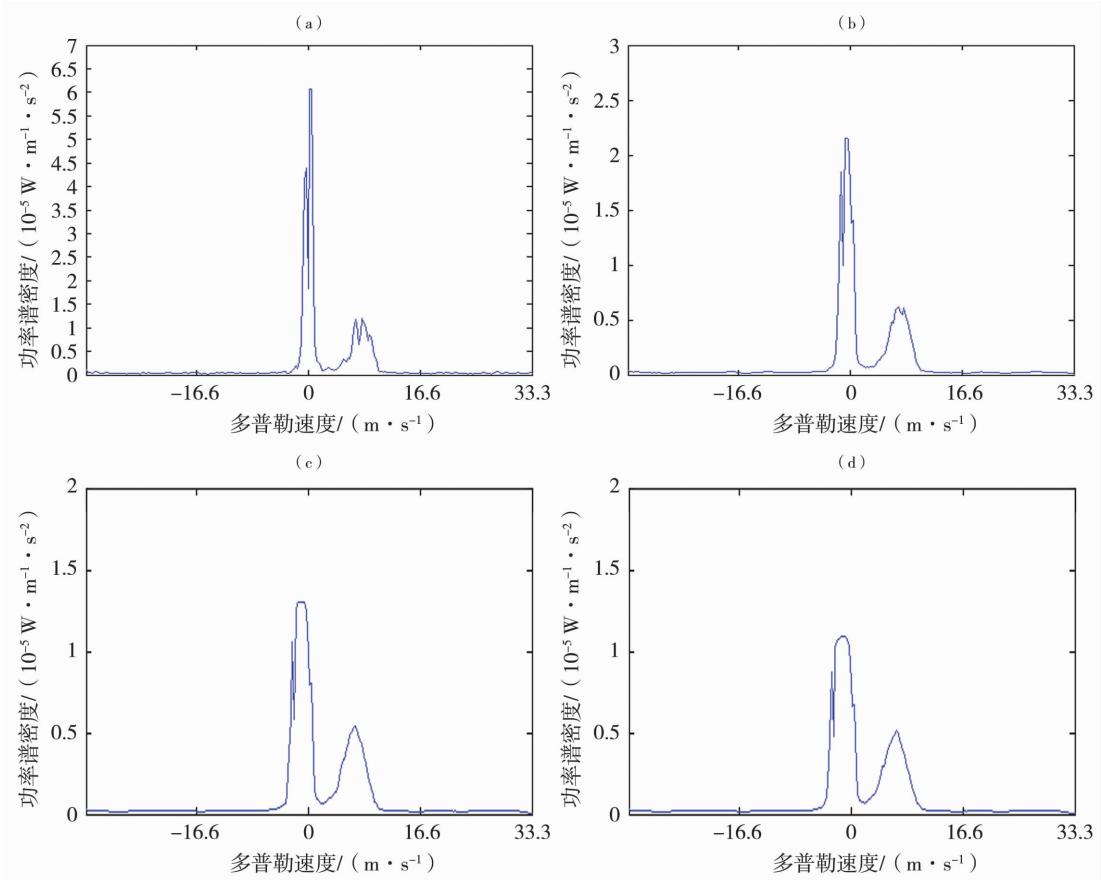


图4 原始信号功率谱(a)、经过5点均值(b)、7点均值(c)及9点均值(d)处理的功率谱

Fig. 4 Original signal power spectrum (a), the signal power spectrum of 5 (b), 7 (c), and 9 (d) points mean processing

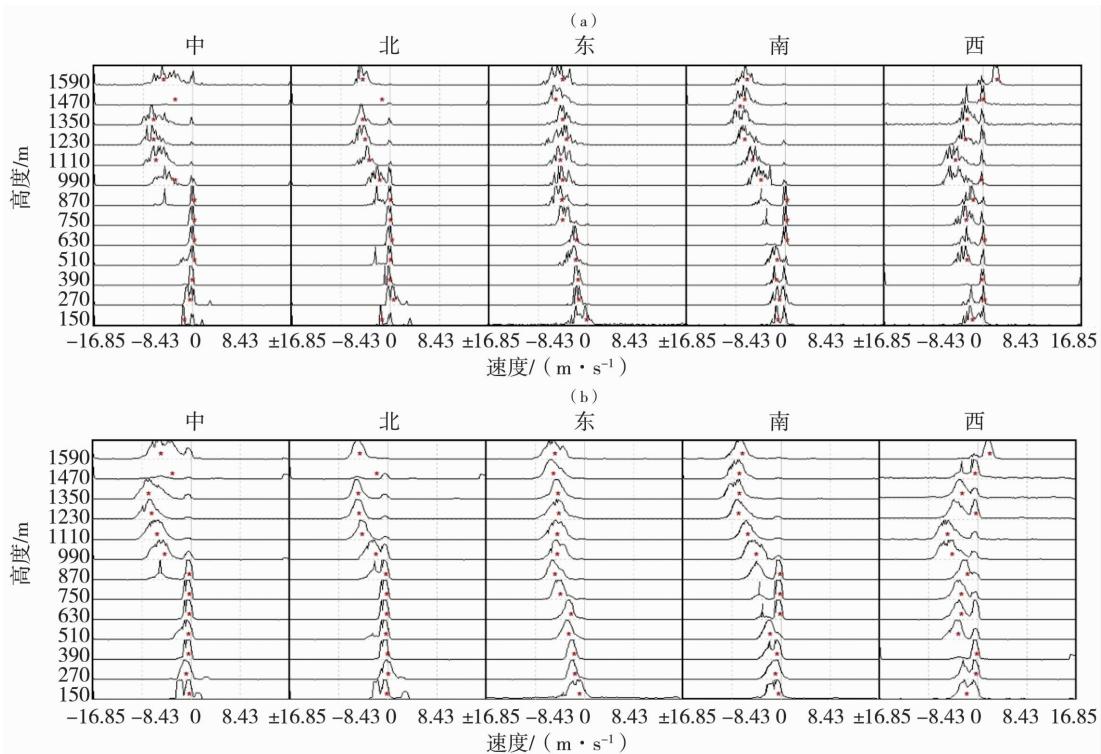


图5 均值滤波法处理前(a)及处理后(b)的功率谱

Fig. 5 Power spectrum before (a) and after (b) processing based on the mean filter method

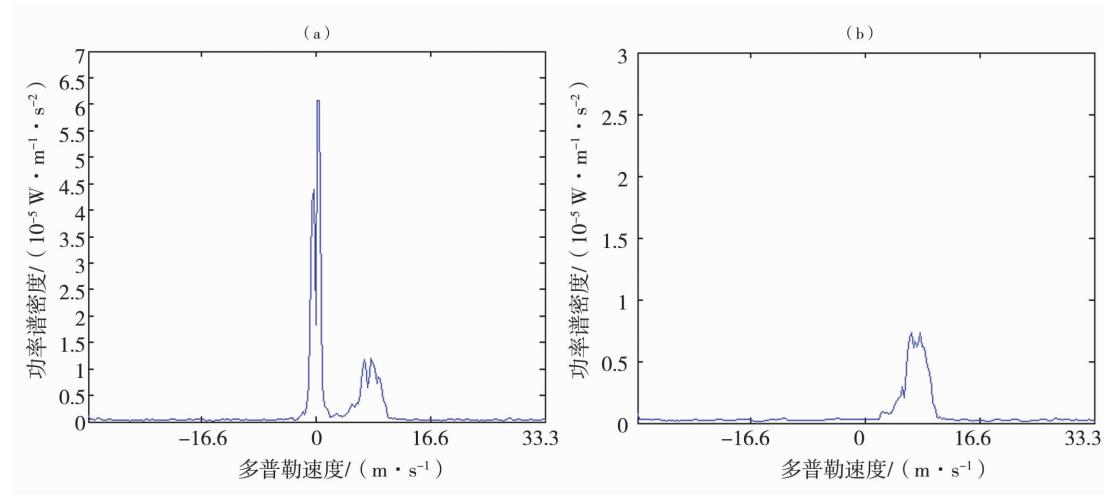


图6 福建德化风廓线雷达 750 m 高度上原始功率谱(a)及用极小值连线法去杂波后的功率谱(b)

Fig. 6 Original power spectrum (a) and power spectrum removed clutter using minimum value connection method (b) on 750 m height from Fujian Dehua wind profile radar

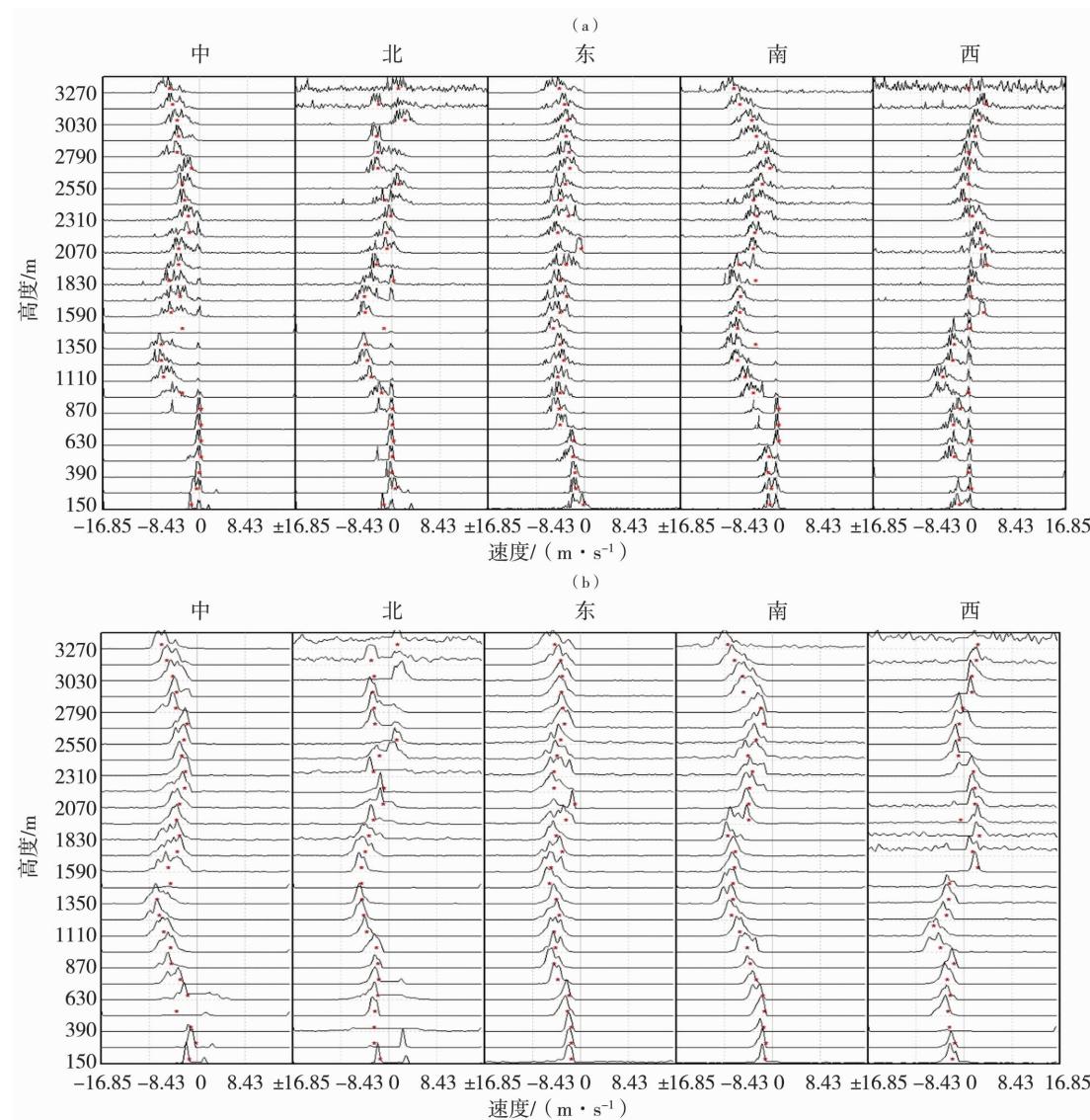


图7 原始5波束功率谱(a)及利用综合识别法检测后的功率谱(b)

Fig. 7 Original five beams power spectrum (a) and power spectrum detected by comprehensive recognition method (b)

2.5 水平风合成及效果验证

对所有波束的探测数据经综合识别法检测后,各方向的径向速度可由目标峰值功率点所在位置计算得出,再利用水平风合成公式,便可得出水平风的风向和风速,进而生成雷达产品图,即风羽图^[14]。图8为2016年3月4日德化自动站(紧邻德化风廓线雷达)地面逐时水平风速的观测值。可以看出,12:00—16:00(北京时,下同)地面水平风速在 $3.5 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,随高度的增加,风速也逐渐增大。图9为德化风廓线雷达2016年3月4日12:00—16:00的利用传统均值滤波法及综合识别法去除杂波后的风羽图。由图9(a)可见2 km以下的风速约为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,500 m以下的风速多在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,与近地面实测风速相比,风速偏小。由图9(b)可见利用综合识别法对数据处理后的风速大小更接近地面实际观测数据,可见该方法抑制地物杂波效果更为理想。

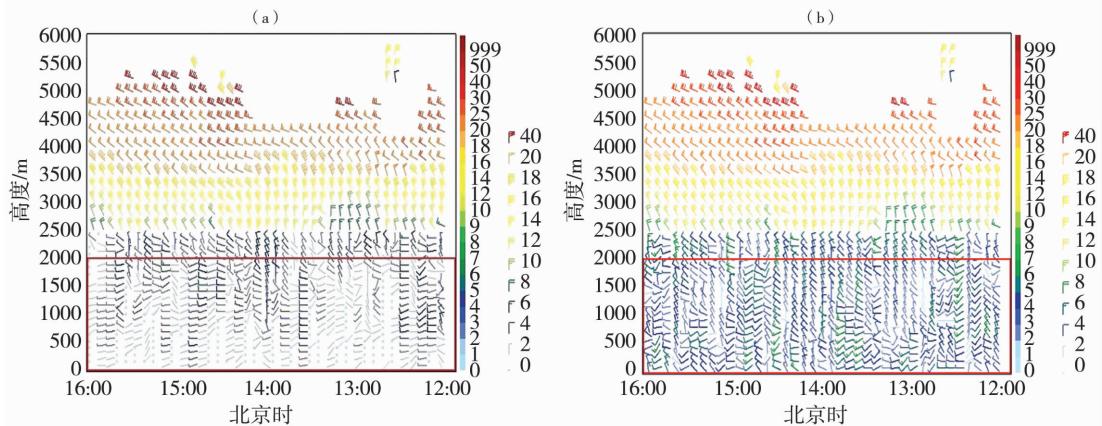


图9 德化风廓线雷达2016年3月4日12:00—16:00利用均值滤波法(a)及综合识别法(b)处理后的风羽图

Fig. 9 The wind plume processed by mean filter method (a) and comprehensive recognition method (b) from Dehua wind profile radar in Fujian Province from 12:00 BST to 16:00 BST on 4 March 2016

另外针对CFL-03和CFL-06型号的雷达分别搜集了83个和68个大风条件下受污染的个例,首先对这些个例采用传统均值滤波法进行地物杂波去除,然后利用综合识别法对其进行效果验证。结果表明,分别有43个和32个个例效果改善较为明显,占比分别为51.8%和47%。进一步分析改善效果不明显的个例,发现其雷达回波信号功率谱上的“跳点数据”普遍偏多,可能是湍流信号受到强度较大的干扰,因此在进行连续性检测时,剔除的数据点也较多,从而影响了识别效果。

3 结 论

在分析利用传统均值滤波法抑制地物杂波的局限性基础上,提出了一种在强风条件下地物杂波的

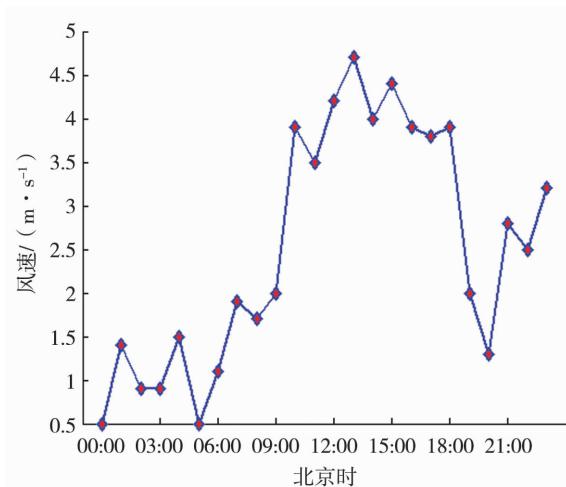
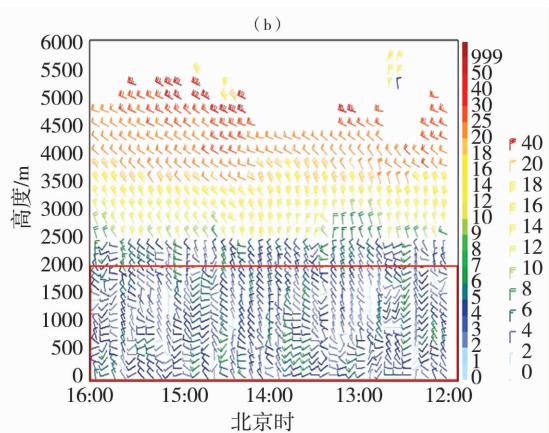


图8 2016年3月4日福建德化站
地面逐时水平风速

Fig. 8 Hourly horizontal wind speed on the ground at Dehua station of Fujian Province on 4 March 2016



综合识别方法。研究表明,该方法虽然有其固有的局限性,但较传统均值滤波法在识别强风条件下的地物杂波时,效果有所改善,一定程度上提高了风廓线雷达产品的准确性和可靠性,为风廓线雷达的地物杂波去除方法的研究提供了一种新思路。

参 考 文 献:

- [1] 张小雯,郑永光,吴蕾,等. 风廓线雷达资料在天气业务中的应用现状与展望[J]. 气象科技,2017,45(2):285-297.
- [2] 胡明宝,郑国光,肖文建. 风廓线雷达数据获取率的统计分析[J]. 现代雷达,2008,30(10):14-15.
- [3] BARTH M F, CHADWICK R B, VAN DE KAMP D W. Data processing algorithms used by NOAA's wind profiler demonstration network[J]. Ann Geophys, 1994, 12: 518-528.
- [4] 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):21–22.
- [5] 阮征,高祝宇,李丰,等. 风廓线雷达与天气雷达风廓线数据的融合及应用[J]. 气象,2017,43(10):1213–1223.
- [6] 刘成,车达生,柯宗建. 风廓线雷达在高空风场分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(2):56–60.
- [7] 王天义,朱克云,张杰,等. 风廓线雷达与多普勒天气雷达风矢产品对比及相关分析[J]. 气象科技,2014,42(2):231–239.
- [8] 曹俊武,胡志群. 多普勒天气雷达与风廓线雷达测风比较[J]. 雷达科学与技术,2013(6):605–610.
- [9] 李喆,何平,潘新民,等. 风廓线雷达回波强度和速度标定问题研究[J]. 气象,2015,41(8):1023–1027.
- [10] 胡明宝. 风廓线雷达数据处理与应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [11] 马秀梅,李文兆,赵坤,等. 非线性 VAD 反演低层风廓线拟合阶数优化方法[J]. 应用气象学报,2014,25(3):321–329.
- [12] 王令,王国荣,古月,等. 风廓线雷达垂直接近速度应用初探[J]. 气象,2014,40(3):290–296.
- [13] 刘梦娟,刘舜. 上海组网风廓线雷达数据质量评估[J]. 气象,2016,42(8):962–970.
- [14] 胡明宝,张鹏. 风廓线雷达测量性能分析[J]. 气象科技,2011,39(3):315–319.

Feasibility Study on Removing Ground Clutter of Wind Profiler Radar Based on Comprehensive Recognition Method

DU Yanxia, WU Yongkai, CHENG Si, YANG Zexin, LI Zhicheng, CHEN Sizhi

(Quanzhou Meteorological Bureau of Fujian Province, Quanzhou 362000, Fujian, China)

Abstract: Based on the idea of the minimum connection of clutter spectrum, a comprehensive recognition method of removing ground clutter which was directed against wind profiler radar ground clutter signals under strong wind conditions was proposed in this paper. Compared with the conventional ground clutter suppression method, the results show that this method had better inhibitory effect on ground clutter under strong wind weather condition, the horizontal wind speed was obviously enhanced, compared with ground observation data, radar products tended to true wind speed. Thus, the accuracy and reliability of extracting atmospheric profile data from wind profiler radar were improved, and a good data quality control foundation for the follow-up product development was built.

Key words: wind profiler radar; ground clutter; comprehensive recognition method; removal