

文章编号: 2096-1618(2021)05-0485-08

一种综合的风廓线雷达数据质量控制方法

陈 夏¹, 王海江¹, 吴 蕾², 杨馨蕊²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘要:风廓线雷达是新一代高空大气探测设备, 可实现对大气风速、风向、温度、湿度的遥感探测, 但受探测原理的约束, 当存在地物、降水等情况时观测数据可信度将大大降低。为提高数据质量, 选取多地风廓线雷达数据和探空气球观测资料, 建立一套完整的风廓线雷达数据质量控制流程。研究结果表明: 通过谱线和廓线质量控制相结合, 对比探空气球观测数据和雷达厂家质控数据后发现质控后的数据可信度大大增加; 在有效高度内, 将所得数据分解为水平北风和水平东风, 质控后的风速数据与探空气球观测风速数据误差不超过5 m/s, 为二次产品的开发打下良好的数据质控基础。

关键词:风廓线雷达; 质量控制; 谱峰搜索; 水平风; 地物杂波; 中值检验

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.05.002

0 引言

风廓线雷达使用微波遥感探测方式, 可以监测大气运动速度、方向以及大气的温度、湿度等, 是新一代高性能的大气监测装置。

随着风廓线雷达资料的数量呈指数增长, 其应用也越来越广泛, 但过低的数据质量成为难点。为解决这个问题, 首先需要对风廓线雷达数据有准确的理解: 与传统的监测设备相比, 风廓线雷达作为遥感设备, 受其监测原理的限制, 一旦遇到地面、鸟类等杂物或雨天等干扰, 数据会出现严重的质量问题, 可靠性会大大降低。目前, 许多国内外学者对风廓线雷达数据质量控制方法进行了研究, 研究内容可以分为两个方面。一方面是基于雷达功率谱等基础数据进行再处理: 周旭辉等^[1]在分析常规均值滤波算法的基础上提出一种改进的风廓线雷达地物杂波抑制方法, 抑制效果较好。张富贵等^[2]针对小波阈值滤波法在处理近零频回波被杂波覆盖时效果不佳的情况, 提出一种基于小波分解高频系数自适应确定阈值的方法。何平等^[3]依据噪声频域统计特性, 提出一种计算风廓线雷达功率谱噪声功率的方法, 并利用风廓线雷达实测功率谱数据进行检验。林晓萌等^[4]利用插值、平滑处理后的功率谱曲线判断其是否受到降水影响, 并利用功率谱曲线分离湍流谱和降水谱。陈浩君^[5]通过逐步对比分析该时段高低扫描模式实时径向功率谱数据, 指出在降水初期风廓线雷达软件质量控制出现错误的原因, 并重新识别了错误时段的功率谱, 反演了水平风场数据。陈兴娟^[6]将线性卡尔曼滤波方法

引入风廓线雷达进行数据质量控制工作, 有效去除高频干扰, 为风廓线雷达数据处理开拓了新的思路。另一方面是对谱矩参量估计后得到的风数据进行质量控制。Strauch等^[7]提出利用一致性平均方法处理径向风速。Lambert等^[8]提出利用Weber-Wuertz(WW)算法与中值检验结合进行质量控制。周芯玉等^[9]采用求取中位数法对风廓线雷达观测资料进行质量控制, 并结合气球探空资料, 对比分析质量控制效果。左泉等^[10]针对风数据首先进行极值检验和垂直一致性检验, 然后分别利用EOF分析重构法和高斯滤波法对其进行质量控制。

文中基于现有方法进行改进, 提出风廓线雷达质量控制的完整流程。该算法以实际业务应用为目标, 尽量避免相对烦琐的计算。利用风廓线雷达基数据, 首先对功率谱数据进行质量控制, 主要使用平滑滤波、极小值连线法抑制地物杂波、谱峰搜寻等算法; 其次对由谱矩参量估计生成的径向风数据进行质量控制, 主要使用一致性平均、中值检验、模式拼接等算法。最后通过对不同型号雷达的大量实际数据与探空气球数据进行对比验证得出结论。

1 资料与方法

1.1 资料

使用的风廓线雷达观测资料由两部分组成。一部分是由北京无线电测量研究所生产, 雷达型号包括CFL-03、CFL-06, 来自北京南郊、天津宝坻、河北石家庄等地2019年4、5、7月的功率谱数据。CFL-03、CFL-06的观测时间分辨率均为3 min; 它们的垂直空间分

分辨率因模式不同而不同,CFL-03 低模式垂直空间分辨率为20 m,高模式垂直空间分辨率为40 m;CFL-06 低模式垂直空间分辨率为120 m,高模式垂直空间分辨率为240 m;CFL-03、CFL-06 的起始探测高度分别是60 m、150 m。另一部分是由北京敏视雷达有限公司生产,雷达型号包括 TWP3、TWP8、TWP16,来自广东梅州五华、广东郁南、辽宁盘山等地 2019 年3月、4月、7月、8月的功率谱数据。TWP3、TWP8 的观测时间分辨率均为5 min,TWP16 则为10 min;TWP3 的垂直空间分辨率均为60 m,TWP8、TWP16 则因观测模式不同而不同,低模式垂直空间分辨率为120 m,高模式垂直空间分辨率为240 m;TWP3 的起始观测高度为100 m,TWP8、TWP16 的起始观测高度为150 m。若按照雷达种类分类,风廓线雷达还分为边界层风廓线雷达、中对流层风廓线雷达、高对流层雷达,分别用于探测不同高度层的风场。考虑到风廓线雷达特性,随着高度的增加,探测数据的获取率会降低^[11],所以选用6000 m以下高度层的功率谱数据进行研究。

1.2 质控方法

对于风廓线雷达功率谱数据来说,只需要按照《风廓线数据格式》解码出 FFT 数据,便可继续进行计算功率谱参数。但是,在现实中,需要对选定的 FFT 数据进行持续的质量控制,以获得准确可靠的数据。具体质量控制步骤如图1所示。

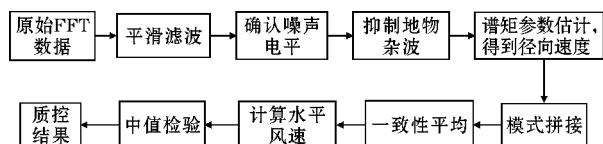


图1 风廓线雷达数据质量控制流程

1.2.1 平滑滤波

平滑滤波能有效抑制明显的、突变的噪声和干扰信号,得到较平滑的 FFT 数据,以便进一步处理。在大气运动较小的时候,大气湍流回波相较于干扰回波而言会非常微弱和分散,若不加以处理,会将窄而强的干扰信号识别为大气湍流信号,造成后续非常大的计算误差。为解决这类干扰信号的问题,提高谱峰识别能力,采用平滑滤波算法对功率谱数据进行预处理。

平滑滤波能有效抑制突出的噪声,是一种非线性的滤波器。算法基本步骤如下:分别对数据集中非边界数据点加5点窗口后用窗口中所有点进行平均,替代原数据点数据。对边界数据加3或4点窗口后进行平均,替代原数据点数据。

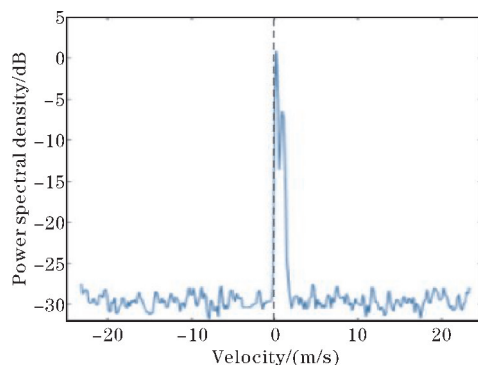
1.2.2 地物杂波抑制

在两公里范围内,大气湍流回波很容易因过强的

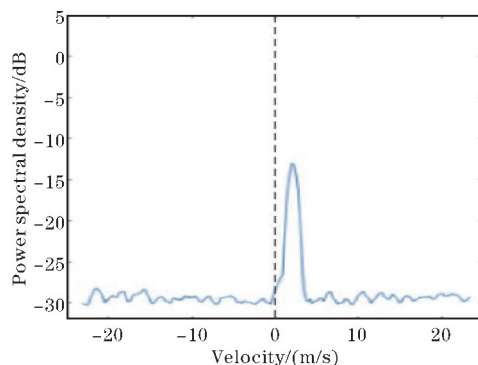
地物杂波而被忽视,甚至淹没。地物杂波位置单一,仅分布于零速度附近,因为它的回波信号很强,所以很难确定大气湍流回波的位置,造成误识别,从而影响风场输出的准确性。

利用极小值连线法对地物杂波进行抑制,主要步骤如下:首先利用客观噪声电平法^[14]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。以功率谱0频为中心的13点范围作为信号谱峰的判断范围^[13],若所搜寻的峰值未在此范围内,则认为此高度的信号没有受地物杂波干扰;若所搜寻的峰值在此范围内,则认为此高度的信号受到地物杂波干扰,需进行抑制。寻找地物杂波的回波两端的合适的极小值,使用球面插值所得点替代极小值间的数据。

图2为抑制地物杂波效果图,虚线代表零速度线。由图2(a)可见,地物杂波信息对风廓线雷达的探测结果影响明显。经过上述方法进行抑制地物杂波后,得到如图2(b)的结果,该结果表明上述方法能够精确地抑制地物杂波,凸显真实的大气湍流回波。



(a) 地物杂波抑制前



(b) 地物杂波抑制后

图2 抑制地物杂波效果图

1.2.3 谱峰搜寻

风廓线雷达的主要用途是探测风场,但根据其监测原理,它还会监测到其他引起大气运动的回波,如雨粒子等其他干扰引起的散射回波。在降水时,降水粒子的垂直下落速度会使功率谱的谱峰发生较明显的

偏移,如果不抑制,由此数据计算得到的径向风速会有较大的误差。降水等干扰是导致水平风速计算错误的重要原因,所以识别正确的大气湍流回波并对降水等干扰回波进行抑制显得尤为重要。

风廓线雷达能够监测到大气运动的速度和方向的原理取决于大气的均匀性,也就是存在大气变化的时刻,相反波束监测到的信号应为大小相同、符号相反,即相反方向波束所得的信号在功率谱图上应存在对称性。

雨水粒子一般只对大气运动产生垂直方向的速度,在水平方向速度几乎为零,所以对应4个方向波束监测到的雨水粒子造成的大气运动就不具有对称性,使用这个特点作为判断依据,便可对降水等干扰回波进行筛选、剔除。虽然现实中的大气并不符合理论中的均一性,风廓线雷达所得功率谱密度函数中的真正大气湍流回波也不符合理论中的大小相同方向相反,但差异非常小。

谱峰搜寻的主要步骤如下:首先根据垂直速度和信噪比判断其是否受到降水影响^[14]:

$$Y = -55 + 17.54 \cdot V + \text{SNR} \quad (1)$$

其中: V 为垂直径向速度,单位为 m/s ; SNR 为信噪比,单位为 dB 。当 $Y > 0$ 时,认为此时数据受到降水影响;当 $Y < 0$ 时,认为此时数据未受降水影响。

对未受到降水影响的数据,选取功率谱高于噪声电平的部分进行拟合,并根据拟合结果搜寻极大值,若该极大值满足信噪比大于 5 dB ,则标记该点为谱峰。设置相对波束上同一高度功率谱函数横轴相差不大于 2.5 m/s 为对称,相同波束上连续高度功率谱函数横轴相差不大于 3 m/s 为连续。根据对称性和连续性筛选谱峰,得到大气湍流回波,其余谱峰直接剔除。对受到降水影响的数据,仅根据拟合后的连续性识别大气湍流回波,若识别结果有双峰的情况,则根据大气湍流谱峰位置总是比降水谱峰位置更靠近零频的规律,采用对称法识别并补全大气湍流回波。若大气湍流回波被降水回波完全淹没,则不识别该距离库的大气湍流谱峰。

1.2.4 参数计算

基于上述谱线级质量控制算法处理,对整个功率谱高于噪声电平的部分进行谱矩估计,得到相应回波功率、平均多普勒频率和速度谱宽。具体计算如下:

$$m_0 = \sum_{i=1}^h p_i \quad (2)$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^h v_i p_i \quad (3)$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^h v_i^2 p_i \quad (4)$$

其中, m_0 、 m_1 、 m_2 分别为功率谱的零阶矩、一阶矩和二阶中心矩, p_i 为第 i 点功率大小, v_i 为第 i 点速度。由

式(2)~(4)可得:

$$P_r = m_0 \quad (5)$$

$$\bar{v} = \frac{m_1}{m_0} \quad (6)$$

$$\bar{w} = 2 \times \left[\frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^h \left(\frac{P_i - \frac{P_N}{N}}{P_N} \right)}{\frac{P_N}{N}} \right) \quad (8)$$

其中: P_r 、 \bar{v} 、 \bar{w} 、 SNR 分别为回波功率、平均径向速度、速度谱宽、信噪比; P_N 为噪声功率、 N 为 FFT 点数。

1.2.5 一致性平均

风是所有气象要素中变化最频繁的,这一特性严重影响了探测数据的可靠性和可用性。因此世界气象组织(world meteorological organization, WMO)规定,使用气象探测数据时应取一段时间内该气象要素的平均值,以获得相对稳定且质量稍高的数据,作为天气预报和气候统计的依据^[12]。

一致性平均方法为风廓线雷达径向风速数据的经典处理方法^[15],首先将平均时间内所有相差在阈值范围内的数据组成数组,然后找到包含数据个数最多的组,若数量超过所设阈值,则求出该组所有数据的平均值,并将该平均值作为该时间点的观测值。

要实现该方法,需要3个重要的参量:一致性平均时间、一致性窗口宽度以及一致性门限。一致性平均时间是指需要集合的数据范围;一致性窗口宽度是将2个数据定为一组的阈值;一致性门限是指最大数量需要满足的样本个数,一般使用总个数的百分比来计算。

1.2.6 水平风的合成

基于上述处理,得到5个波束径向速度,即可生成水平风,计算原理如下:

假设水平风场是均匀的且线性的,则根据图3五波束风廓线雷达东西方向平面示意图,可得

$$u_E = \frac{V_{RE} - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \quad (9)$$

$$u_W = \frac{V_{RW} - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \quad (10)$$

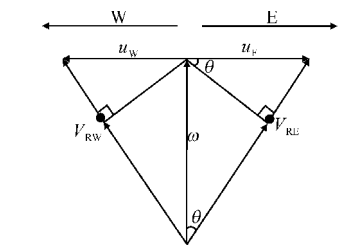


图3 五波束风廓线雷达东、西方向平面示意图

V_{RW} 、 V_{RE} 分别为西、东方向的径向风速, ω 为垂直

方向径向速度, θ 为东、西波束与垂直波束夹角, u_E 为东水平风速分量, u_W 为西水平风速分量。如果东、西方向径向风速为有效数据, 能计算出正确的风速, 则由假设大气风场满足均匀一致, 可得 u_E 和 u_W 是一对方向相反、大小相同的值, 那么根据式(9)、(10)可得

$$u_E = \frac{V_{RE} - V_{RW}}{2\sin\theta} \quad (11)$$

同理可得北方向水平风速 v_N :

$$v_N = \frac{V_{RN} - V_{RS}}{2\sin\theta} \quad (12)$$

其中 V_{RN} 、 V_{RS} 分别为北、南方向的径向风速, θ 为南、北波束与垂直波束夹角。

1.2.7 中值检验

中值检验是对数据进行距离门和时间上的中值判断。当前数值与中值处于一定门限内, 且满足数据数量门限要求, 则认为通过中值检验, 保留该位置上的值, 否则认为没有通过中值检验, 设该位置值为无效值, 后续使用线性插值补全。

使用 14 点邻域中值检验, 排列方式如图 4 所示。每个点的中位数可由其在序列中的位置确定, 如图 5 所示, 图中所标注的红色位置的中值可由红框内的数据求得。

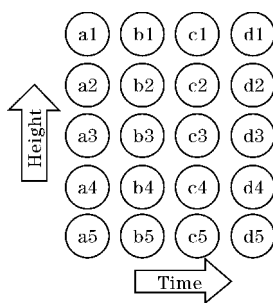


图4 雷达水平相邻时次、相邻高度数据位置示意图

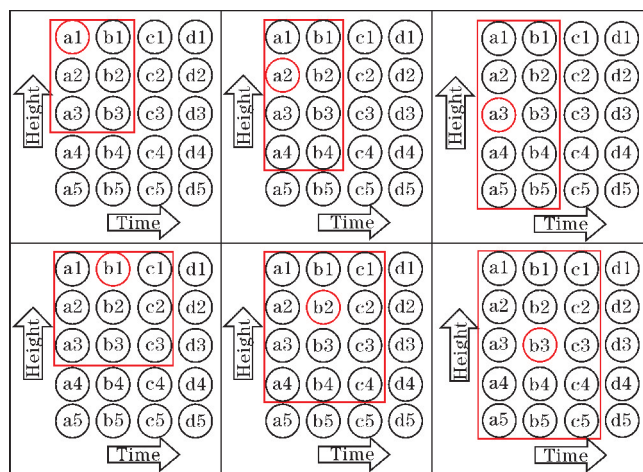


图5 各位置中值的计算方式

2 质量控制结果分析

基于上述的质量控制方法, 使用雷达型号为 CFL-06, 2021 年 6 月 3 日 00:35 UTC 北京南郊站点的风廓线雷达基数据进行质量控制。

图 6、7 为经过谱线处理后低模式和高模式的谱峰识别结果, 图中星形符号代表使用本文算法识别的结果, 三角符号代表由雷达生产厂家识别的结果。由图 6、7 可见, 本文算法有效抑制了地物杂波, 且能较完整地保留零速度附近的大气湍流回波; 针对多峰问题, 本文算法能够正确识别噪声回波和大气湍流回波, 且在谱峰识别结果中相较于雷达生产厂家体现出更好的连续性和对称性。针对此部雷达高空信噪比较低的情况, 对高模式设定的信噪比阈值有所降低, 在 6000 m 以下的识别正确率较高, 6000 m 以上识别正确率有所降低。

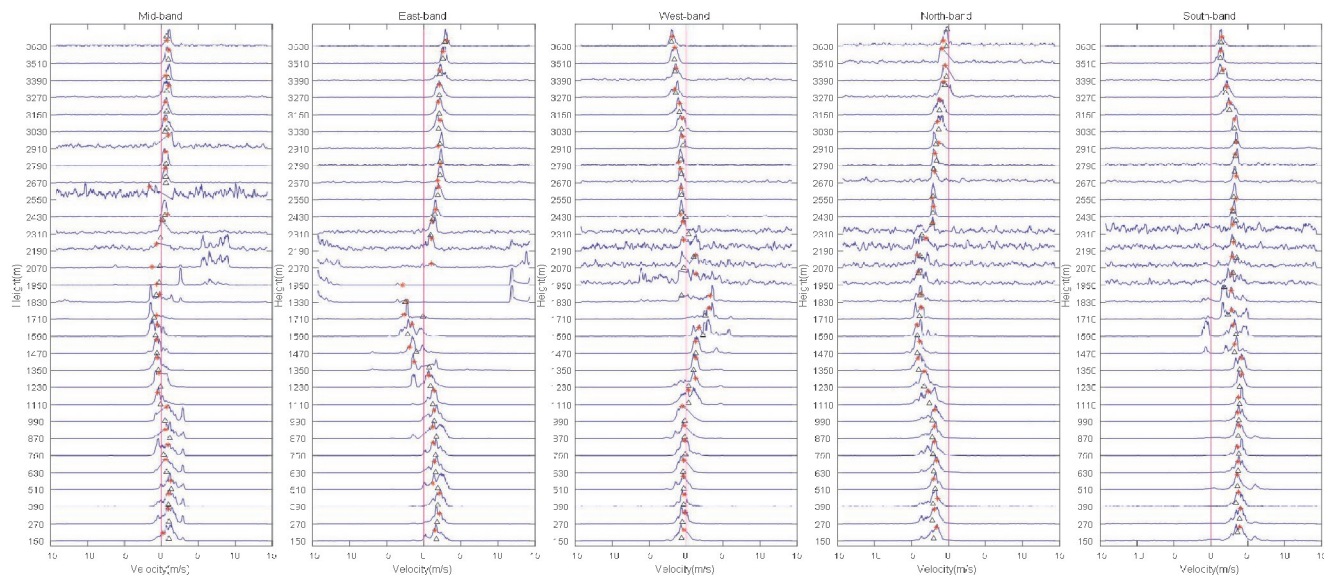


图6 CFL-06 低模式下的谱峰识别结果

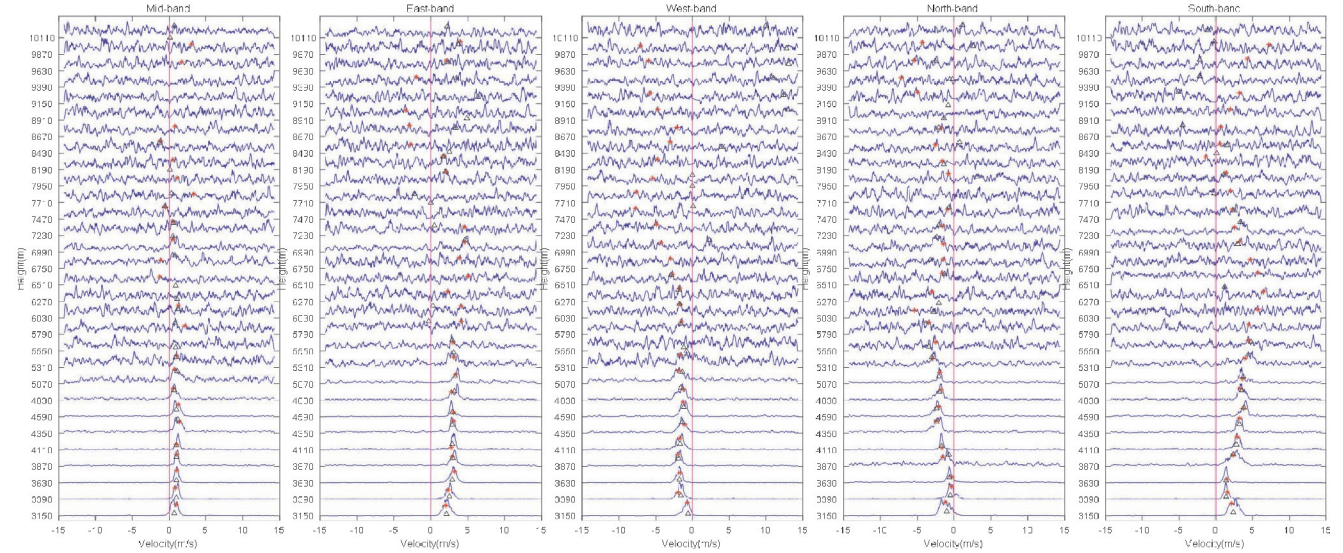


图 7 CFL-06 高模式下的谱峰识别结果

图 8 为经过廓线处理后的水平风结果,将水平风分解为水平东风与水平北风进行对比,实线代表探空气球数据,三角连线代表厂家质控后的数据,星形连线

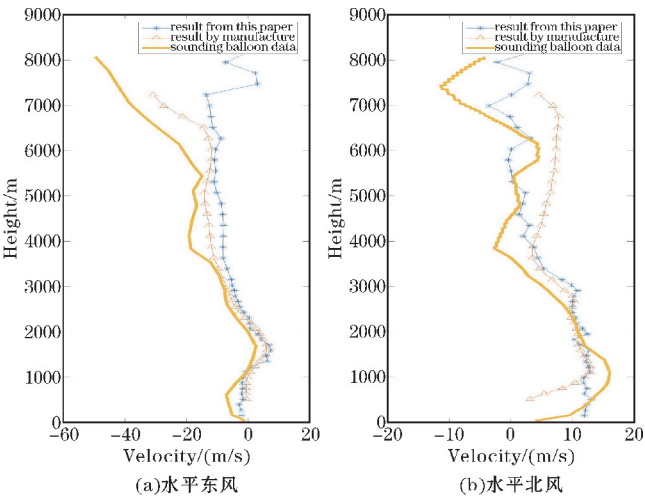


图 8 CFL-06 风廓线结果

代表本文质控算法结果。由三线对比可见,本文算法质控效果良好,几乎能与探空气球风速趋势保持一致,且在高度为6000 m以下的误差小于5 m/s。在水平北风4000~6000 m处质控效果超过了雷达生产厂家的质控效果,但在水平东风6000~8000 m处质控效果略有不足。且本文算法的有效高度相对较高。

为验证本文算法的普适性,同时使用雷达型号为TWP8, 2021 年 6 月 2 日 23:00UTC 北京的风廓线雷达基数据进行质量控制。

图 9、10 为经过谱线处理后低模式和高模式的谱峰识别结果。与 CFL-06 不同的是,TWP8 的信号强,地物杂波相对较宽,其他干扰相对较少,针对这种情况对实验的干扰识别条件和抑制地物杂波的强度稍作调整,得到最优结果。由图 9、10 可知,针对地物杂波和多峰问题,本文算法处理结果较好,且谱峰识别结果也拥有较好的连续性和对称性。高模式下6000 m以上信噪比偏低,未能识别出正确的大气回波。

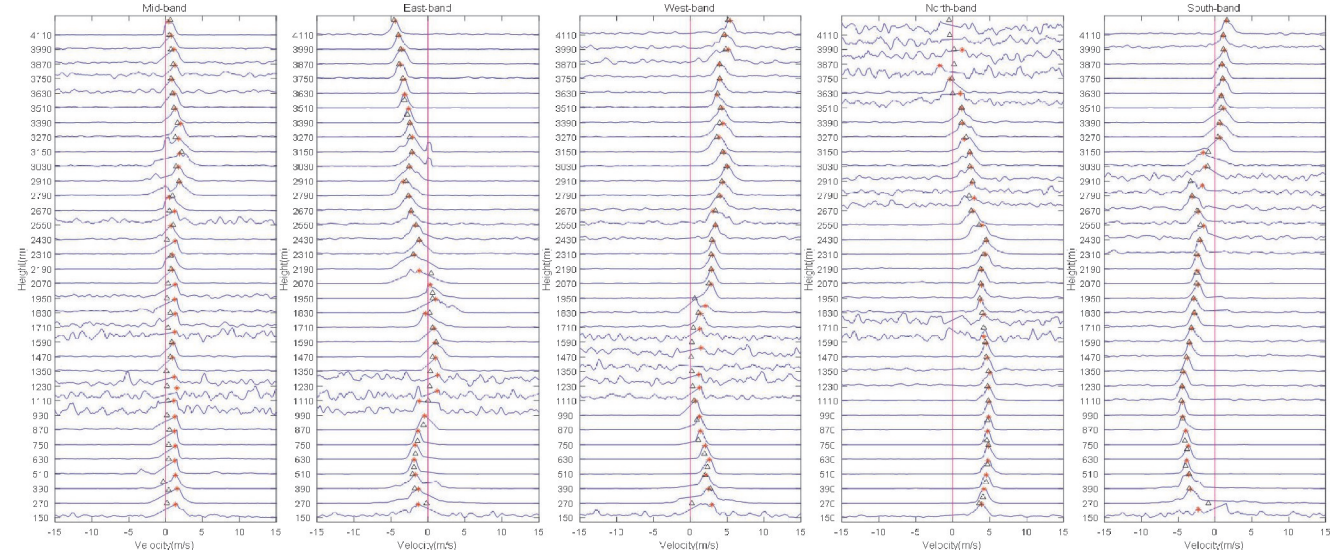


图 9 TWP8 低模式下的谱峰识别结果

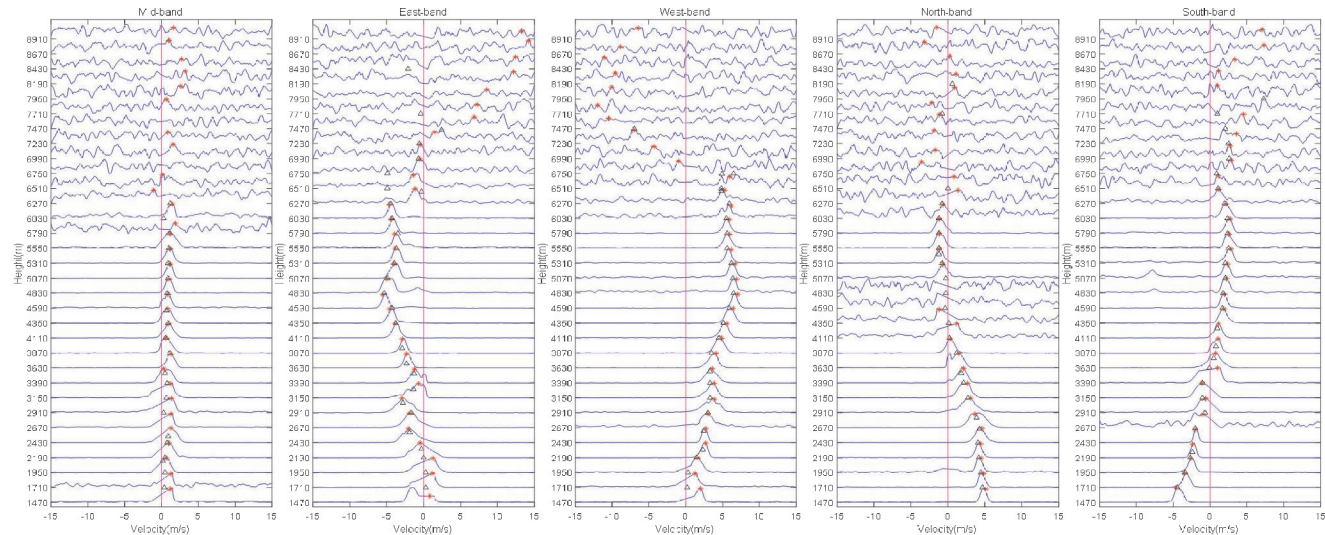


图10 TWP8 高模式下的谱峰识别结果

图11为经过廓线处理后的水平风结果,由三线对比可知,水平东风在有效高度以下质控效果优于厂家质控效果,而在7000 m以上因信噪比较低,谱峰识别正

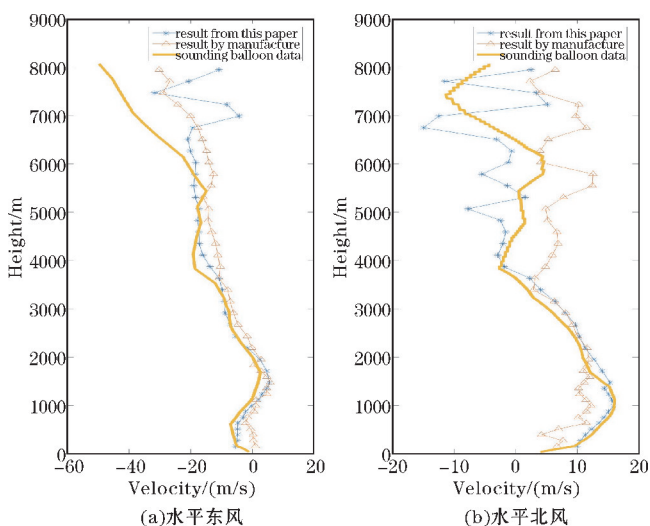


图11 TWP8 风廓线结果

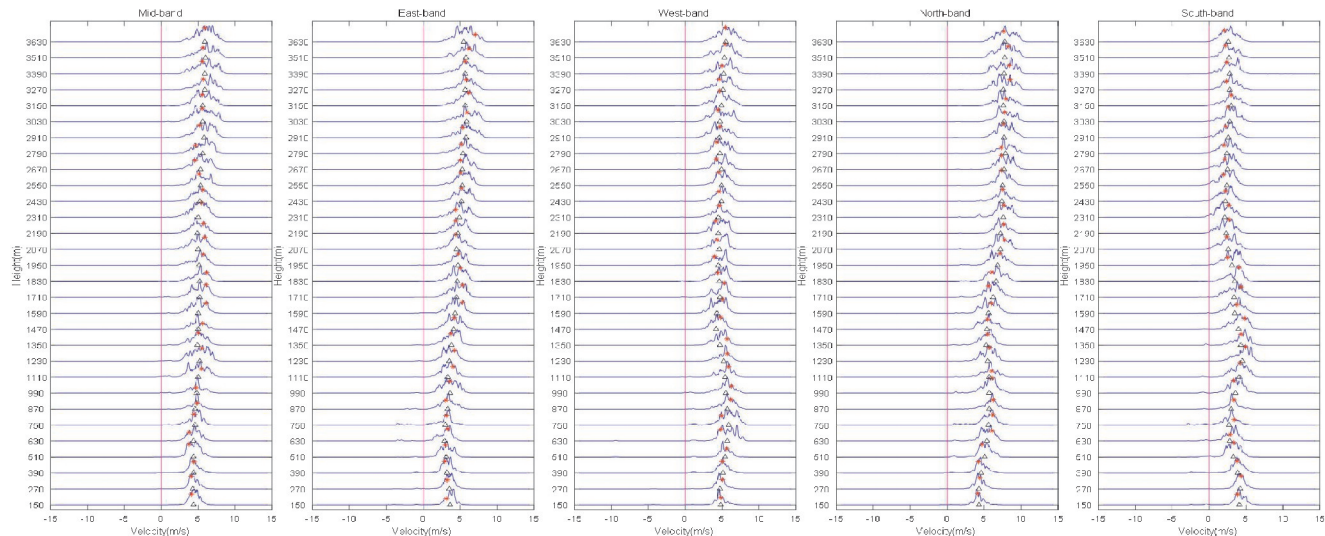


图12 降水时低模式下的谱峰识别结果

确率不高,所以有较大幅度的跳变,与探空气球有较大差异。水平北风总体质控效果优于厂家质控效果,特别是在4000~7000 m,厂家质控情况比较糟糕,而本文质控结果则较为良好,基本与探空数据误差保持在5 m/s内。

针对降水的情况,文中选用雷达型号 CFL-06, 2021年7月21日北京怀柔的基数据进行质控。根据中国天气网查询当地天气,21日18:00有降水过程,所以对18:00左右的数据进行质控。

因每个站点雷达设置不同,该部雷达有3个模式。图12~14为经过谱线处理后低、中、高模式的谱峰识别结果。根据式(1)判断出该数据存在降水,故仅考虑连续性,不考虑对称性。由图12~14可知,该时间点大气回波信号较强,其他干扰杂波相对而言较弱,难以干扰识别结果;高模式下南波束5000 m以上大气回波位于零速度线附近,未被识别为地物杂波。谱峰识别结果拥有较好的连续性和对称性。

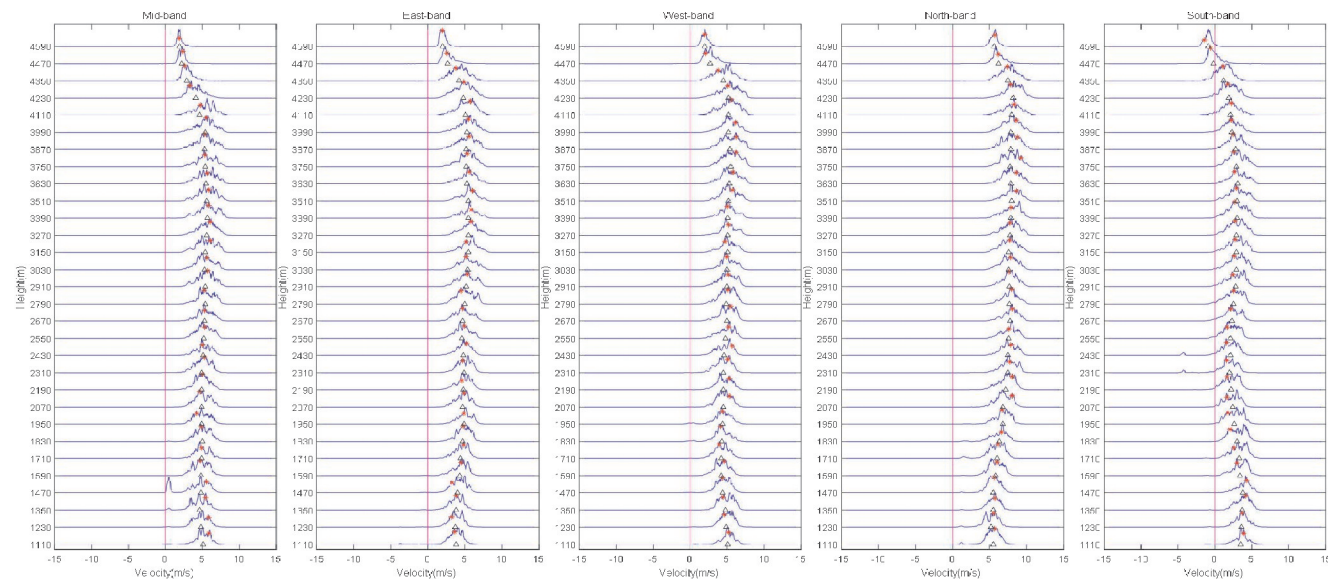


图 13 降水时中模式下的谱峰识别结果

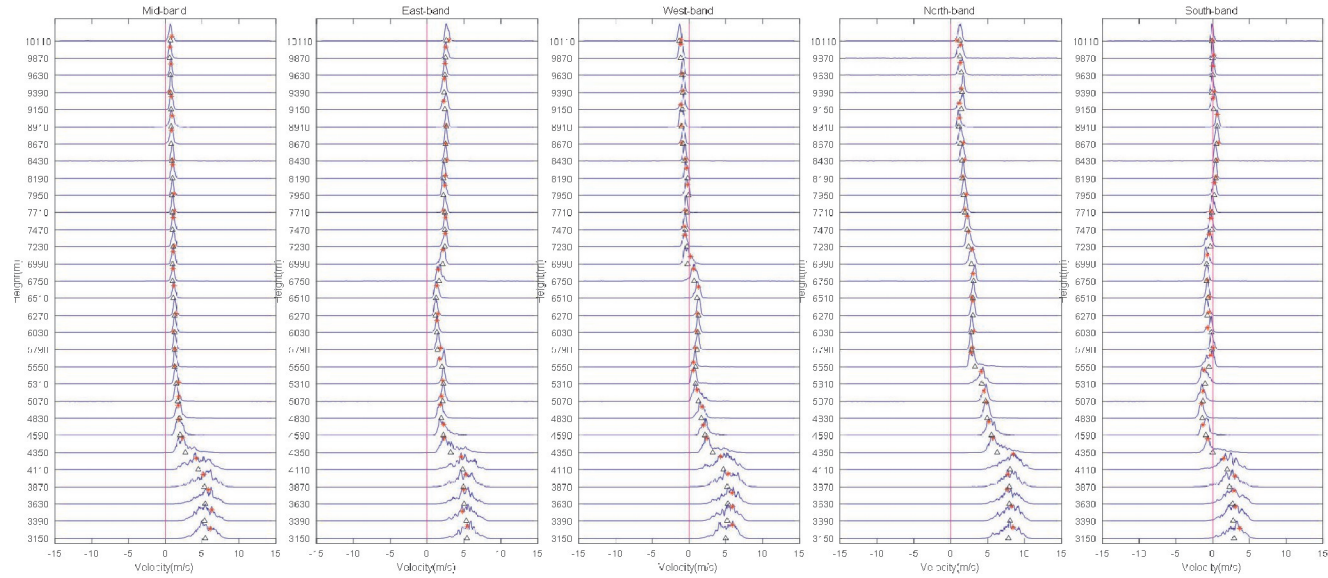


图 14 降水时高模式下的谱峰识别结果

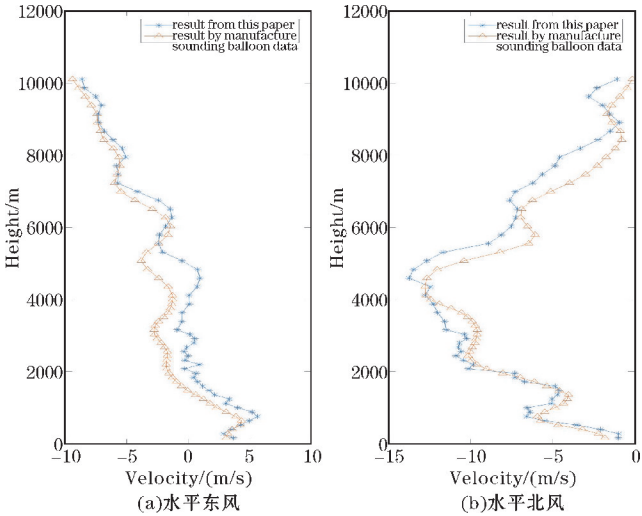


图 15 降水时风廓线结果

因该时间段没有探空气球数据,故仅将质控后的数据与厂家质控后的数据进行对比。图 15 为经过廓线处理后的水平风结果,由三线对比可知,本文质控结果与厂家质控结果基本一致,有效高度达到了9000 m 以上,且最大误差小于2 m/s。

3 结束语

详细介绍了风廓线雷达基数据质量控制的方法,将谱线和廓线质量控制相结合,从而达到平滑功率谱、去除地物、去除干扰回波和增加数据可信度的效果。在利用传统质控方法的基础上,在谱峰搜寻中增加了对称性的判断,并对中值检验算法进行一定的优化。同时,提出一套以实际业务应用为目标的质控算法流

程。根据不同天气下不同站点的测试结果表明,该算法较传统的单个质控方法,效果有所改善。在与雷达生产厂家质控效果对比时,本文质控算法结果有更好的连续性和对称性,在与探空气球观测数据对比时,本文质控算法结果在有效高度上基本与其保持一致,最大误差不超过5 m/s,一定程度上提高了风廓线雷达产品的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 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.
- [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):472-481.
- [3] 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.
- [4] 林晓萌,何平,黄兴友. 一种抑制降水对风廓线雷达水平风干扰的方法[J]. 应用气象学报,2015,26(1):66-75.
- [5] 陈浩君. 风廓线雷达功率谱数据的研究和应用[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.
- [6] 陈兴鹄. 风廓线雷达非线性滤波数据质量研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [7] Strauch, R, G, et al. The Colorado Wind-Profiling

- Network[J]. J. Atmos. Oceanic Technol, 1984, 1(1):37-49.
- [8] Lambert W C, Taylor G E. Data Quality Assessment Methods for the Eastern Range 915 MHz Wind Profiler Network, 1998.
- [9] 周芯玉,廖菲,胡东明. 利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降水类暴雨过程低空风场特征的研究[J]. 热带气象学报,2019,35(3):332-342.
- [10] 左泉,鲍艳松,董焱,等. 风廓线雷达数据精度评价与质量控制方法[J]. 遥感信息,2020,35(5):37-44.
- [11] 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.
- [12] 胡明宝. 风廓线雷达探测与应用[M]. 北京:气象出版社,2015.
- [13] 张旭斌. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用[A]. 中国气象学会. 第32届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报[C]. 中国气象学会:中国气象学会,2015:5.
- [14] 杨馨蕊,马舒庆,吴蕾. UHF 风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价[J]. 大气科学学报,2010,33(5):576-581.
- [15] 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.

A Synthetic Quality Control Method of Wind Profile Radar Data

CHEN Xia¹, WANG Haijiang¹, WU Lei², YANG Xinrui²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Wind profile radar is a new generation of high-altitude detection equipment, which can realize the remote sensing detection of wind speed, wind direction, temperature and humidity. However, due to its own detection principle, the information credibility will be greatly reduced when it is affected by landmarks and precipitation. In order to improve the data quality, this paper establishes a complete set of wind profile radar data quality control process by the multi-ground wind profile radar data and sounding balloon observation data. The results illustrate that the information credibility is greatly increased through the combination of power spectrum and wind profile quality control after comparing with the sounding balloon observation data and the quality control data from radar manufacturers. Within the effective altitude, the data after quality control is divided into horizontal north and horizontal east wind speed, and the error between it and the data observed by sounding balloon does not exceed 5 m/s, which lays a good data foundation for the development of secondary products.

Keywords: wind profile radar; quality control; spectral peak search; horizontal wind; ground clutter; median test