

陈浩君, 黄兴友, 孙婧, 等. 基于径向功率谱的风廓线雷达错误风数据处理. 应用气象学报, 2015, 26(4): 460-471.
doi:10.11898/1001-7313.20150408

基于径向功率谱的风廓线雷达错误风数据处理

陈浩君^{1)2)*} 黄兴友¹⁾ 孙婧³⁾ 孙娟²⁾ 尹春光²⁾
郑杰²⁾ 王勤典²⁾ 薛昊²⁾

¹⁾(南京信息工程大学, 南京 210044)

²⁾(上海市气象信息与技术支持中心, 上海 200030)

³⁾(中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘 要

选取上海市世博园区站、金山站和嘉定 F1 赛车场站 3 个风廓线雷达站 2012 年 3 月 7 日凌晨一次降水过程生成的错误水平风场数据, 通过对比该时段高、低模式扫描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, 并重新识别错误时段的功率谱, 反演水平风场数据。分析表明: 在降水初期由于风廓线雷达各波束探测的数据在空间上不一致, 易导致雷达软件采用的质量控制算法并不能全部识别和消除降水对数据的干扰, 从而出现偏差。基于风廓线雷达高时空分辨率径向功率谱数据的分析处理方法可有效验证雷达软件质量控制算法, 且经过该方法反演后的水平风场更为合理。

关键词: 径向功率谱; 高、低模式扫描; 水平风羽数据; 质量控制

引 言

风廓线雷达是新一代无线电遥感测风系统, 以晴空大气作为探测对象, 主要探测自由大气中满足半雷达波长湍流尺度的后向散射信号, 是除探空资料以外获得高空风资料最直接的来源。风廓线雷达具有时空分辨率高、自动化程度高、业务运行成本低等优势, 为全球相关科学研究和业务应用提供了大量的探测资料。主要研究应用于大气边界层厚度变化的监测、推断大气运动的湍流结构、确定风切变等。近年来, 国内外更多的研究集中于风廓线雷达在降水时段的探测, 研究表明: 风廓线雷达在降水时段探测高度比无降水时高, 且风廓线雷达提供的信噪比、折射率结构常数、水平速度、垂直速度等资料可以从多角度了解降水过程, 清楚地反映降水开始、结束以及降水强度。使风廓线雷达资料的应用不再仅局限于晴空大气的研究, 扩展到晴雨两用^[1-11]。

值得一提的是, 风廓线雷达不断更新的波束径向功率谱图, 可以更早地为台站技术人员提供更快的实时气象信息, 可以从中提前发现风切变信息、确定降水起始时间、在线估测风向及风速等^[12-16]。

个例分析表明, 径向功率谱图还能够用于验证和解释风羽产品的错误数据, 判别降水零度层高度范围, 诊断风廓线雷达软硬件性能等。因此, 掌握风廓线雷达径向功率谱, 有利于提高单站风廓线雷达资料的分析应用水平。

1 径向功率谱数据简介

边界层风廓线雷达径向功率谱图(也称功率谱高度图)是风廓线雷达在探测过程中生成的在线图形化显示产品, 约为 30 s 更新 1 次, 高、低模式扫描交替显示。径向功率谱图由一个波束探测高度范围内, 从下至上不同高度层上的一组多普勒径向功率谱构成。它表示在规定时间内, 该波束径向上探测

2014-11-14 收到, 2015-04-01 收到再改稿。

资助项目: 上海市气象局科技开发项目(QM201507), 上海气象局研究性项目(YJ201403)

* email: chj513@163.com

到的各个高度层上大气多普勒功率谱的实时情况。通过功率谱可以提取对应高度层上的基本探测数据,如信号功率(零阶矩)、径向速度(一阶矩)、多普勒信号谱宽(二阶中心距)及信噪比(SNR)等。

当水平风吹过偏南和偏北波束或者偏东和偏西波束(此处假设在探测范围内水平方向上风场均匀连续),在两个对称波束上投影或二次投影后,可得到两个大小相等、方向相反的沿波束指向的风矢量,规定朝向雷达的风矢量取正值,离开雷达的风矢量取负值。在功率谱图中可以看见,两个径向功率谱相对于零速度互相对称。在实际情况中,由于湍流的变化、降水的污染和系统本身误差使对称波束上的径向功率谱并非完全对称。在有降水的情况下,斜波束测到的径向速度由两部分构成,即为纬向风和经向风(u, v)分量在波束径向上的投影以及雨滴的下落末速度在波束径向上的投影之和。假设降水在较小的空间范围内也连续均匀。雨滴在降落过程中由于水平风的作用,使得下降路径并不是垂直的,垂直波束测到的径向速度应该是在水平风作用下的雨滴下落速度在垂直方向上的投影。因此,降水期间在对称波束的功率谱图形中反映出的径向速度数值是指向水平风来向的斜波束的、值大于指向水平风去向的斜波束中的值。因为前者的径向速度值是水平风分量的投影值与雨滴下落速度的投影值同号相加,而后者则是两个投影值异号相减^[17-18]。

2 数据

本文所采用的资料和个例均来自 TWP3 型边界层风廓线雷达,采用 5 波束高、低模式交替的扫描方式。低模式扫描共有 45 个距离库,探测高度为 0.10~2.74 km;高模式扫描有 83 个距离库,探测高度为 1.06~5.98 km;由于采用相位编码和脉冲压缩技术,每层间隔均为 60 m。低模式下脉冲重复周期为 22 μs ,时域平均数为 160,快速傅里叶变换点数为 256,谱平均数为 24;高模式下脉冲重复周期为 48 μs ,时域平均数为 60,快速傅里叶变换点数为 256,谱平均数为 35。

2.1 个例简介

2012 年 3 月 7 日 00:00—00:45(北京时,下同)上海边界层风廓线雷达网金山站、嘉定 F1 赛车场站、世博园区站和奉贤站风廓线雷达依次在探测到的风羽产品图上出现错误风数据(本文以世博园区站风廓线雷达数据为例进行描述,其余站出现的情况相同)。图 1 为上海世博园区风廓线雷达站该时段的风羽产品图,可以看到在图中矩形框范围内为错误风数据出现的时段和变化过程。00:05 开始 460 m~1 km 高度之间突然出现与上下高度层风向不连续的偏西风数据,风向与上下层偏东风向形成了强烈的对比,似出现局部风切变现象。随着时间

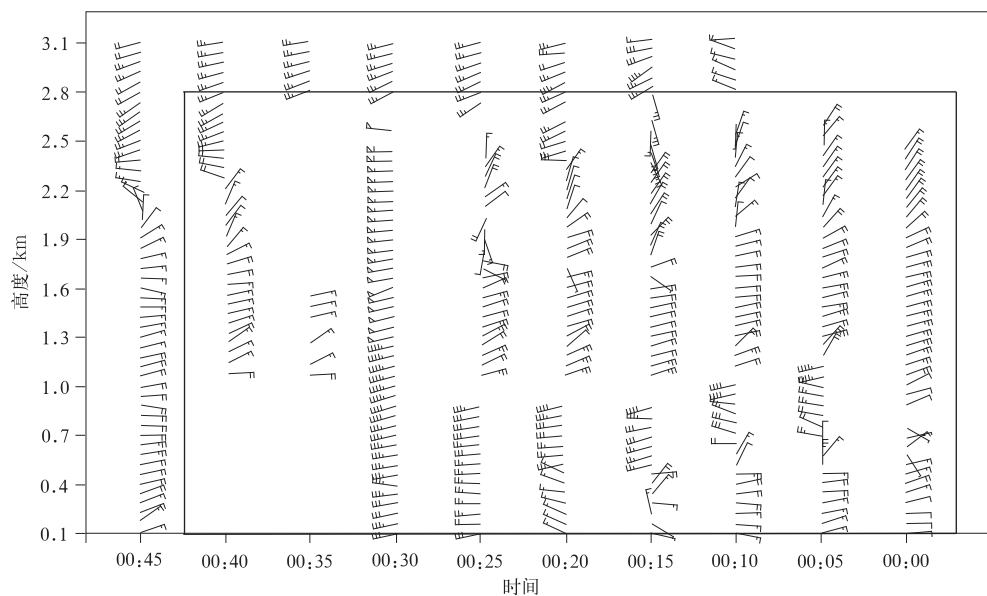


图 1 2012 年 3 月 7 日 00:00—00:45 上海世博园区风廓线雷达站点风羽产品图

Fig. 1 The wind product plot of Shanghai Expo wind profiler site during 0000—0045 BT on 7 Mar 2012

的推移,1 km 高度以下各层偏西风向不变,并逐渐向下延伸,00:20 和 00:25 1 km 高度以下全部变为西风且风速越来越大,1.6~2.5 km 高度的风羽数据变得杂乱无章,空间和时间上均不再连续。00:30 从地面到2.5 km 高度范围内突然出现风速较大的偏西风,软件计算数据显示,2.44 km 高度处出现了 $32.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极大风速。00:35 和 00:40 2.5 km 高度以下风数据缺失大部分,且探测到的风数据突然转变为偏东风。直至 00:45,风廓线雷达的风羽数据才恢复正常,从地面到高空风向连续,且可以观察到在 1.72 km 高度以上,风向从偏东风开始逆转,2.26 km 高度处风向变为偏东风。

00:05—00:40 风数据出现反常,经检查,几部风廓线雷达在此时段内均运行正常,系统指标也在规定范围内,因此,排除因系统硬件故障导致的错误风数据。

2.2 个例分析

图 2 为 2012 年 3 月 7 日 00:20—00:38 上海 S

波段天气雷达反射率因子图,红色三角形标识为世博园区风廓线雷达站所在位置。由图 2 可知,此次降水强度不大,覆盖范围较大,为典型的层状云降水。回波由西南向东北方向移动,在该时段内先后经过金山站、嘉定 F1 赛车场站、世博园区站和奉贤站 4 个风廓线雷达站,与各站出现错误风数据的先后次序相同,可以判断,出现错误风现象与此次降水过程有关。风廓线雷达探测水平风的基本准则是在探测波束扫描覆盖的空域中,水平方向上大气应该符合连续均匀性的假定原则。如果某个波束在探测过程中受到降水影响,探测到的数据与对称波束在空间上有很大区别,将导致计算水平风数据时出现错误,即所谓降水对于风廓线雷达探测的污染。

风廓线雷达径向功率谱可用于识别是否有降水、判断降水起始时间和降水强度,是最快获得雷达上空实况数据的便捷途径。图 3 为上海世博园区风廓线雷达站 2012 年 3 月 7 日 00:15—00:40 截取的偏东、偏西和垂直 3 个波束高模式扫描的径向功率

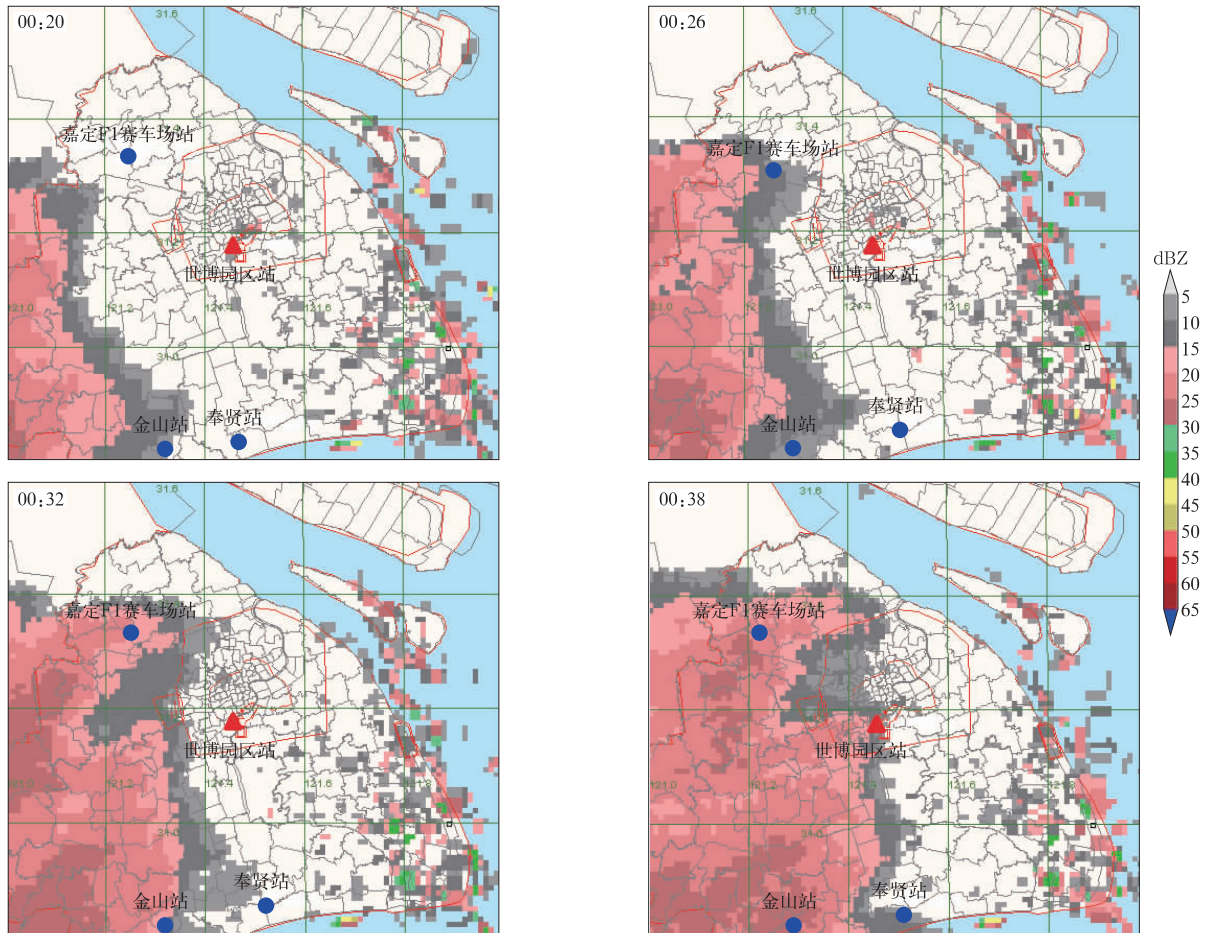


图 2 2012 年 3 月 7 日 00:20—00:38 上海天气雷达反射率因子图

Fig. 2 The Shanghai weather radar reflectivity echoes during 0020—0038 BT on 7 Mar 2012

谱。因图 1 中错误风数据的风向问题主要出现在东西两个方向,可以判断南北波束探测的数据及后期处理计算时并没有受太大影响,因此,只列出偏西、偏东和垂直 3 个波束对比,由于高空功率谱变化不大,只截取到 4.06 km 高度。

由图 3 可知,00:15 和偏西波束具有很好的对称性,且两波束在 3.40 km 高度以上谱宽较宽,并有从高空逐渐向下延伸的趋势。00:20—00:25 较

宽的功率谱信号逐渐向低高度层延伸,在偏西和垂直波束上尤为明显,而偏东波束的反映相对较为迟缓。这两个主要原因:一是对比图 2 雷达回波的运动方向,从西南移向东北,偏东波束较偏西波束在时间上受降水回波影响晚;二是雷达 5 波束扫描的顺序是偏东—偏北—垂直—偏西—偏南,虽然 3 个波束显示在同一个时次径向功率谱上,实际上偏东波束获得的数据较垂直和偏西波束共 4 个高、低模

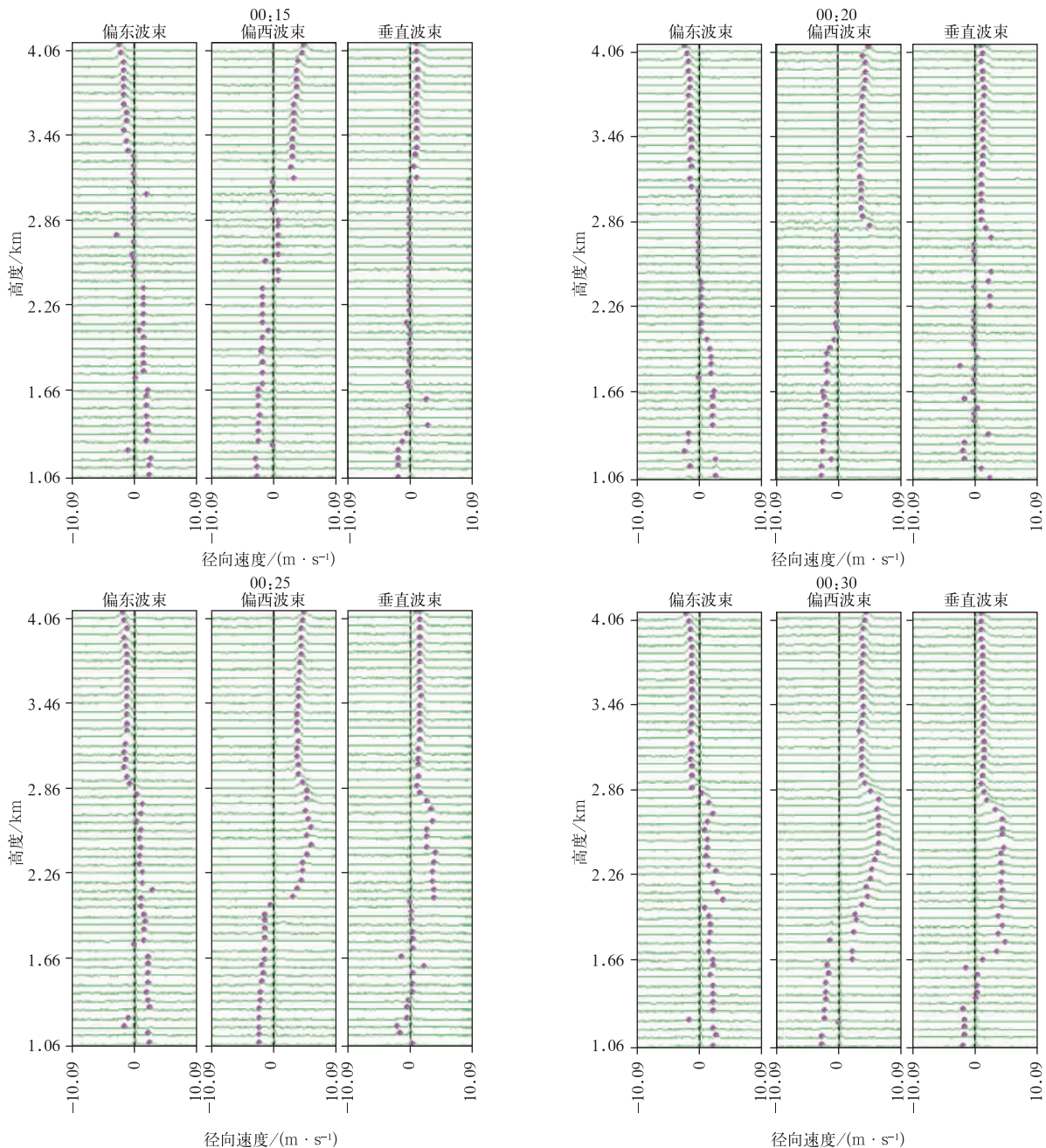
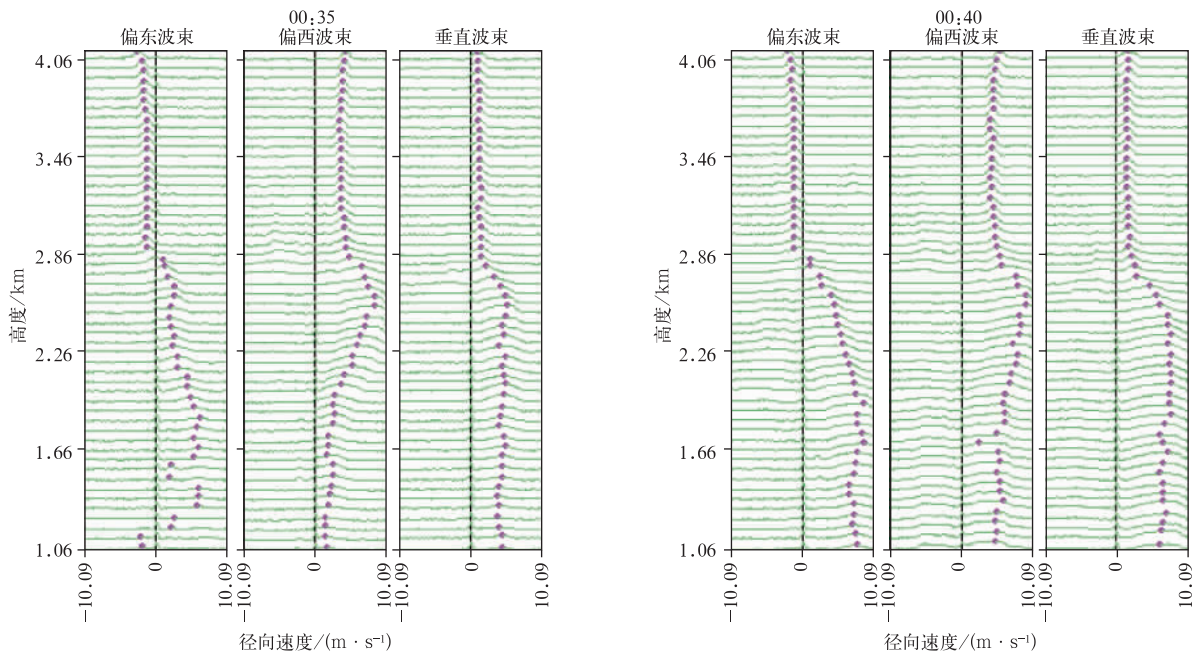


图 3 2012 年 3 月 7 日 00:15—00:40 上海世博园区风廓线雷达站高模式径向功率谱

Fig. 3 The high mode radial wind power spectra plots of Shanghai Expo wind profiler site during 0015—0040 BT on 7 Mar 2012



续图3

式偏早约 2 min。

00:25 偏西和垂直波束在 2.02~2.80 km 高度范围内出现了明显的降水功率谱信号,而此时在对应的天气雷达回波图上未发现降水回波。随着时间推移,降水功率谱的高度不断向下降低,00:40 3 个波束均为典型的降水径向功率谱,即为外形相似、功率谱较宽、具有正的较大的径向速度。根据站内雨量筒记录显示,00:45 后开始出现降水数据,说明径向功率谱发现了降水的起始时间。此外,2.80 km 向下到 2.44 km 高度,信号的谱宽和径向速度从上往下逐渐变大,表明在这个高度范围内,降水的相态出现了改变,即水凝体经过零度层附近,由固态变为液态,雨滴的下落速度、功率谱宽度和反射强度均出现突变。

此时若仅以图 3 所示高模式扫描的径向功率谱对 1.06 km 高度以上的数据进行水平风计算,应该可以得到较好的水平风羽数据,但对比图 1 相同高度层以上的数据发现,00:25 1.72~2.74 km 高度范围内水平风数据杂乱且缺少部分高度层数据,00:30 1.06 km 高度层以上出现奇异极大风,00:35 1.54~2.74 km 高度范围内没有风数据。由于高模式扫描 1.06~2.80 km 高度范围与低模式扫描范围重合,在计算该高度范围内的水平风数据时,需经过软件质量控制算法,部分高度层数据会被标记或直接去除。通过对比检查这些时间点各个高度层径向

速度发现,虽然在径向功率谱图上各波束、各高度层的信号具有较高的信噪比,可以被软件识别,但某些高度层在经过质量控制后径向速度被置为 0。检查发现,偏西波束高模式 00:25 2.50 km 以下至 1.06 km 高度层、00:30 2.32 km 至 1.06 km 高度层、00:35 2.08 km 至 1.06 km 高度层径向速度全部被软件置为 0。因此,还需结合相同时段低模式扫描的径向功率谱共同判断重合高度层和低层出现奇异水平风的原因。

图 4 为世博园区风廓线雷达站 2012 年 3 月 7 日 00:15—00:40 探测时段偏东、偏西和垂直 3 个波束的低模式径向功率谱图。00:15—00:20 偏东波束在 0.94 km 高度以上径向速度全部置为 0,而偏西波束 0.52 km 以上各高度层为信号谱识别出的径向速度,而以下全部置为 0。00:25 偏西波束所有高度层径向速度值全部保留实测值。00:30—00:40 偏东波束全部高度层的径向速度均被软件去除置为 0,偏西波束径向速度全部被保留。同时,在零速度线右侧有典型的降水径向功率谱从高空不断向下延伸。00:40 偏东波束降水功率谱到达 1.30 km 高度,可软件仍识别了信号较小、谱宽较窄的左侧负速度功率谱,偏西波束扫描由于在偏东波束之后,降水功率谱信号基本已到达较低高度层,所有高度层降水功率谱信号全部被软件识别出用于计算。直到 00:45(图略),偏东波束内的所有高度层才被软件识

别出来用于计算水平风,此时,3个波束呈现典型的降水功率谱结构,对应图1风羽产品,到此时次风羽产品方恢复正常。

通过以上分析可以发现,很多时段部分高度范围内即使功率谱图中识别出信号谱,但后期被软件质量控制去除,这与出现错误风数据与软件质量控制的算法有关。根据 TWP3 型边界层风廓线雷达用户手册所述,软件处理数据的步骤包括:统计平

均、速度退模糊、计算纬向风和径向风并进行订正、计算风产品、通过 Weber/Wuertz 连续性检查进行质量控制等^[19]。Weber/Wuertz 连续性检查方法提出,对一段时间内(通常为 1 h),每个波束上的每个体扫的数据进行时间和高度上连续性的检验。低模式和高模式扫描的数据将同时考虑,不满足连续性的检测的径向速度将会被标记或直接去除,如果去速度模糊处理得到的数据通过了连续性检验,去模

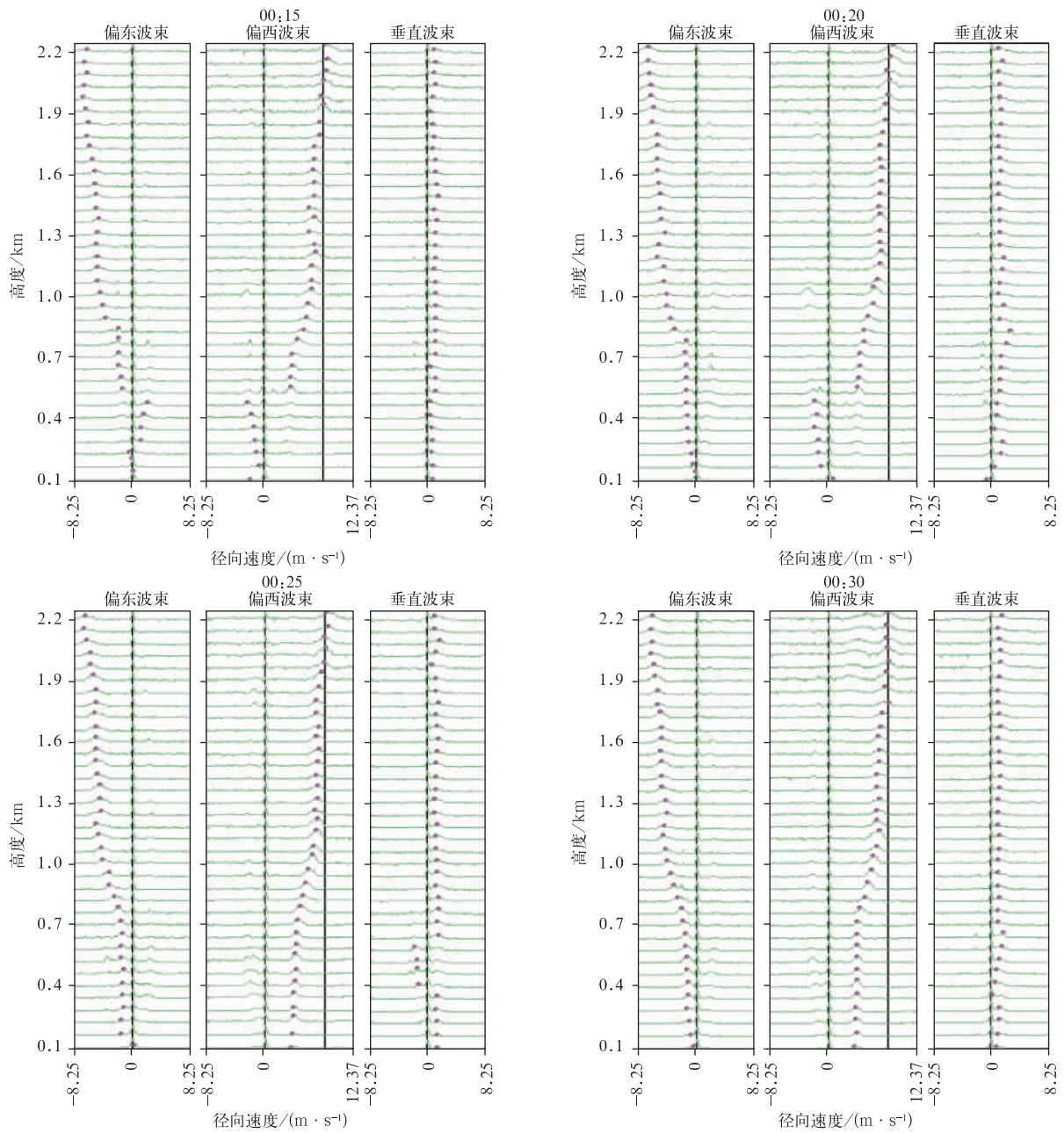
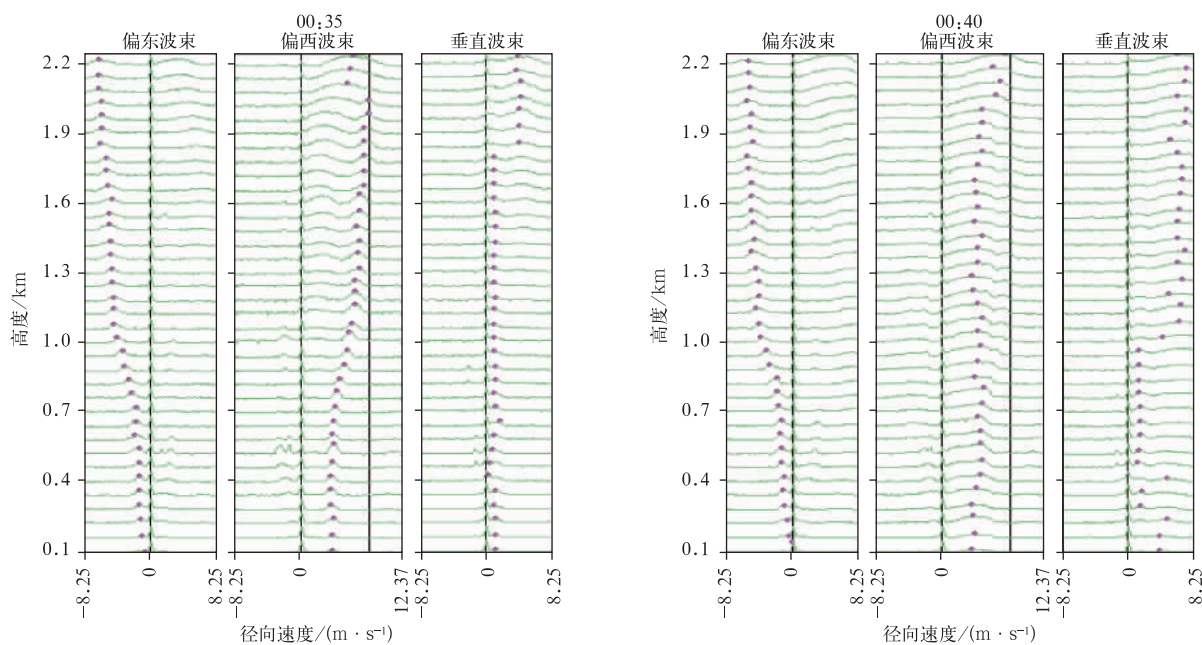


图 4 2012 年 3 月 7 日 00:15—00:40 上海世博园区风廓线雷达站三波束低模式径向功率谱
 Fig. 4 The low mode radial wind power spectra plots of Shanghai Expo wind profiler site during 0015—0040 BT on 7 Mar 2012



续图 4

糊后的数据将替代没有通过连续性检验的原始模糊数据。同时,利用垂直波束的径向速度对斜波束的径向速度的垂直分量进行订正,以去除大气的垂直运动对测量水平风造成的影响^[20]。TWP3 型风廓线雷达数据处理软件在处理高、低模式扫描重合区域数据时,高模式扫描的有效数据具有优先级,即高、低模式扫描重合区域数据在满足时间和空间连续性的情况下,若高模式扫描数据为有效数据,优先采用高模式扫描数据计算重合区域水平风速和风向,若高模式扫描数据无效,则采用低模式扫描数据代替;若高、低模式扫描重合区域不满足连续性要求,则进行质量控制,剔除不连续部分数据,径向速度置为 0。

以时间和空间连续性检查为前提,再次对比同时次高、低模式扫描径向功率谱图,对不同时刻部分高度层径向速度被置为 0 和出现错误风的原因进行分析。

00:15 和 00:20 偏东波束高模式扫描的重合区域径向速度为正值,而低模式扫描对应高度径向速度为负值;同样,偏西波束高模式扫描重合区域径向速度为负值,而低模式扫描为正值,两个波束重合区域均不符合空间连续性。偏西波束高模式扫描由于较宽的功率谱信号由高层逐渐向低层延伸,2.80 km 高度以上功率谱为正值,该高度以下功率谱为负值,出现非常大的跳变,空间上不连续,根据

质量控制原理,偏西波束高模式扫描 2.80 km 高度以下数据无效被置为 0,而偏东波束高模式扫描空间上数据较为连续,数据未被去除。由于在高、低模式扫描重合区间偏西波束高模式扫描数据被置无效,因此,低模式扫描 0.52 km 高度以上数据被识别,但 0.52 km 高度以下数据由于空间上不连续,质量控制后被去除。由于高模式扫描偏东数据依然有效,被用作计算重合区域 2.80 km 高度以下数据,根据质量控制原理,低模式扫描 0.94 km 高度以上所有高度层径向速度全部被置为 0,而 0.94 km 高度以下数据仍用于计算。风向方面,由于偏东波束和偏西波束在不同高度层被质量控制,在计算水平风向和风速时,风向变为偏西风且杂乱不连续,导致该时次该高度范围内出现错误风数据。

00:25 与前两个时次一样,偏西波束高模式扫描在 2.50 km 高度以下仍被置为 0,低模式扫描数据连续且有效,全部用于计算水平风数据。从风羽产品看,00:30 出现了极大值的错误风数据。径向功率谱图上重合区域依然不连续,偏西波束高模式扫描数据被置为 0,低模式扫描全部数据被识别为有效数据,而此时偏东波束低模式扫描数据全部被置为 0。高、低模式扫描有效数据综合考虑后,2.80 km 高度以下水平风数据全部由偏西波束低模式扫描径向速度数据计算,而此时偏西波束均为很大的正值,最大值达到 $8.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在计算水平风时,

出现奇异的西风风向,且风速大,最大为 $32.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

00:35 和 00:40 由于典型降水径向功率谱向下传递,偏东波束虽然低模式扫描零速度右侧出现正值的谱峰却没有被识别,仍然识别左侧负的径向功率谱,导致和高模式扫描空间不连续,全部被置为 0。偏西波束从高模式到低模式扫描均为正的径向功率谱值,空间上连续,所有高度层数据被识别。在计算水平功率谱时,重合区域仍然用高模式扫描径向速度值代入计算,但低空数据计算时软件质量控制后却未使用偏西波束数据。直到 00:45,偏东波束低模式扫描也识别了正的径向功率谱,两个波束高、低模式扫描在空间上连续,所有高度层风速识别有效,计算出的水平风数据恢复正常。

2.3 数据处理反演

首先,对于 2012 年 3 月 7 日 00:15—00:40 世博园区风廓线雷达站高、低模式扫描的重合区域,认定高模式扫描具有优先级,当高、低模式扫描重合区域数据在空间上不连续时,优先利用高模式扫描的数据代入计算风场。由偏西波束高模式扫描 00:25 2.50 km 以下至 1.06 km 高度层、00:30 2.32 km 至 1.06 km 高度层、00:35 2.08 km 至 1.06 km 高度层、径向速度全部被软件置为 0 分析可以看出,偏西波束典型降水谱从高空不断向下延伸,导致低空和高空功率谱在空间上不连续,被置为 0。这些时段均为正确实测的数据,应保留并用于计算 1.06 km 高度以上的风场信息。在对应时次低模式扫描高空重合区域数据则被置为 0。

其次,由图 4 可知,00:15—00:40 低模式扫描 1 km 高度层以下东西两个波束径向功率谱图均出现双峰谱。00:15 偏东波束识别为正值即右侧功率谱,偏西波束识别为负值即左侧峰谱,00:20—00:35 偏东波束均识别为负值,偏西波束逐渐识别为正值。考虑到与对应时次高空低模式扫描径向功率谱的空间连续性,重新识别了 00:15—00:40 低模式扫描 1 km 高度以下的功率谱数据,其结果是 00:15—00:30 偏东波束右侧为正值功率谱,偏西波束左侧为负值功率谱;由于 00:35 和 00:40 可明显看到低模式扫描的降水功率谱从高空向下传导的过程,偏东波束右侧为正值功率谱,偏西波束维持原值不变。

第三,对各高度层识别处理出的径向速度值进行水平风的计算。TWP3 型边界层风廓线雷达采用 5 波束模式扫描,在计算水平风时采用 5 个波束

测量值联合计算,可以克服个别波束受污染的情况,提高风数据的质量。同时,还需要考虑以下几点:①由于所测得的各径向波束包含了水平和垂直分量,因此,在计算水平风速之前要先去除垂直分量的影响。②该雷达发射的偏北波束指向与正北有夹角,因此,在计算时还要考虑空间方位坐标系的转换。③在计算垂直气流时,由于垂直波束受到降水的污染使得探测到的径向速度包含了垂直气流和雨滴下落的末速度,为了清除这一影响,本文采用两组对称波束(偏西、偏东波束和偏北、偏南波束)先求出两组垂直气流数据,再对两组数据进行平均从而得到垂直气流。 α 表示偏北波束与正北方向的夹角, θ 为斜波束与地面的夹角,用 $V_{re}, V_{rn}, V_{rz}, V_{rw}, V_{rs}$ 分别代表实测东、北、垂直、西、南 5 个方向斜波束的径向速度,则水平风两个分量 u, v 和垂直风 w 计算如下:

$$u = \frac{(V_{re} - V_{rz} \sin\theta) \cos\alpha + (V_{rw} - V_{rz} \sin\theta) \sin\alpha}{\cos\theta}, \quad (1)$$

$$v = \frac{(V_{re} - V_{rz} \sin\theta) \sin\alpha - (V_{rw} - V_{rz} \sin\theta) \cos\alpha}{\cos\theta}, \quad (2)$$

$$w = \frac{V_{re} + V_{rw}}{2 \sin\theta}. \quad (3)$$

④在 5 波束联合计算时,遇到以下两种情况时的解决方案:第一,4 个斜波束测量的径向速度值均有效。则可以利用两两对称波束,先求出垂直气流,东西波束计算出 w_1 ,南北波束计算出 w_2 ,两者平均后求得 w ,即 $w = (V_{re} + V_{rw} + V_{rn} + V_{rs}) / 4 \sin\theta$,再利用求得的 w ,分别结合东、北波束和西、南波束测得的多普勒径向速度,利用式(1)和式(2),分别求得风分量 u_1, v_1 和 u_2, v_2 ,最后求得平均值 $u = (u_1 + u_2) / 2$, $v = (v_1 + v_2) / 2$,从而得到 u, v, w 。第二,只有 3 个斜波束测量的径向速度值有效。则 3 个斜波束中必有两个是对称波束(如东、西波束或南、北波束),设为 V_{r1}, V_{r2} ,根据式(3),利用这两个对称波束首先求出 $w = (V_{r1} + V_{r2}) / 2 \sin\theta$,再利用求得的 w 和第 3 个波束 V_{r3} ,分别与 V_{r1}, V_{r2} 组合成两组 3 波束,利用式(1)和式(2)分别求得 u_1, v_1 和 u_2, v_2 。平均后求得 $u = (u_1 + u_2) / 2$, $v = (v_1 + v_2) / 2$,从而得到 u, v, w 。最后得出水平风速 V_h 和风向 ϕ_h 的计算公式(4):

$$\begin{cases} V_h = \sqrt{u^2 + v^2}, \\ \phi_h = \arctan \frac{u}{v}. \end{cases} \quad (4)$$

图5为利用上述方法对问题时段数据进行质量控制后的水平风羽产品,对比图1可知,生成的水平风数据在空间和时间上较为连续,在低空没有出现风向突变和风速较大的情况。在某些高度层由于功率谱不能识别,该高度层的水平风为空。

为检验上述方法的有效性,对前文所述上海金山站和嘉定F1赛车场站风廓线雷达2012年3月7日00:15—00:40错误数据进行分析处理,质量控制前后反演的水平风羽产品对比如图6所示。由图6a和图6c可知,在相同时间段(矩形框内所示)两

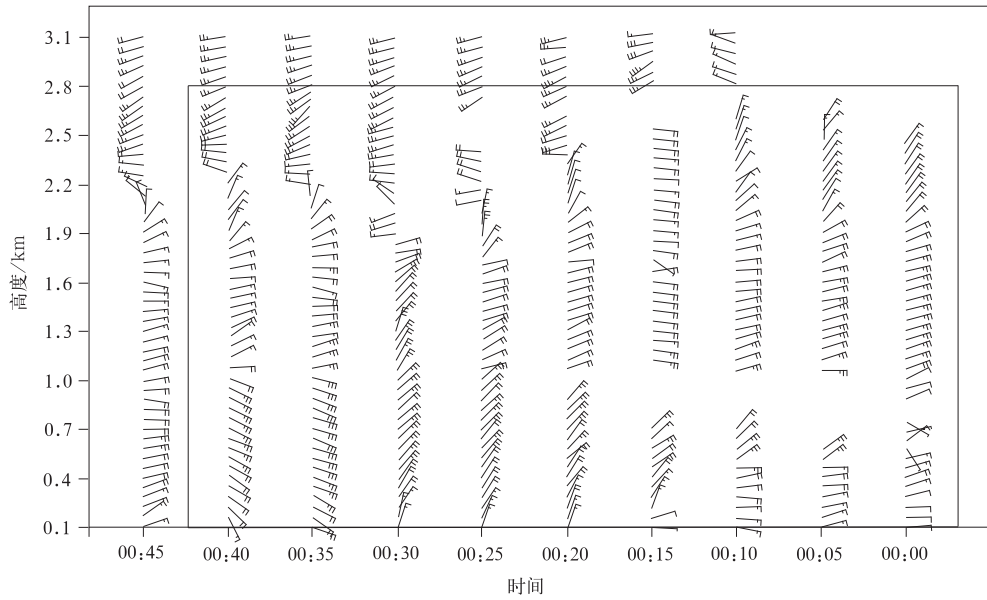


图5 2012年3月7日00:15—00:40上海世博园区风廓线雷达站经过质量控制后的风羽产品
Fig. 5 The wind product plot after reprocessing and inversion of Shanghai Expo wind profiler site during 0000—0045 BT on 7 Mar 2012

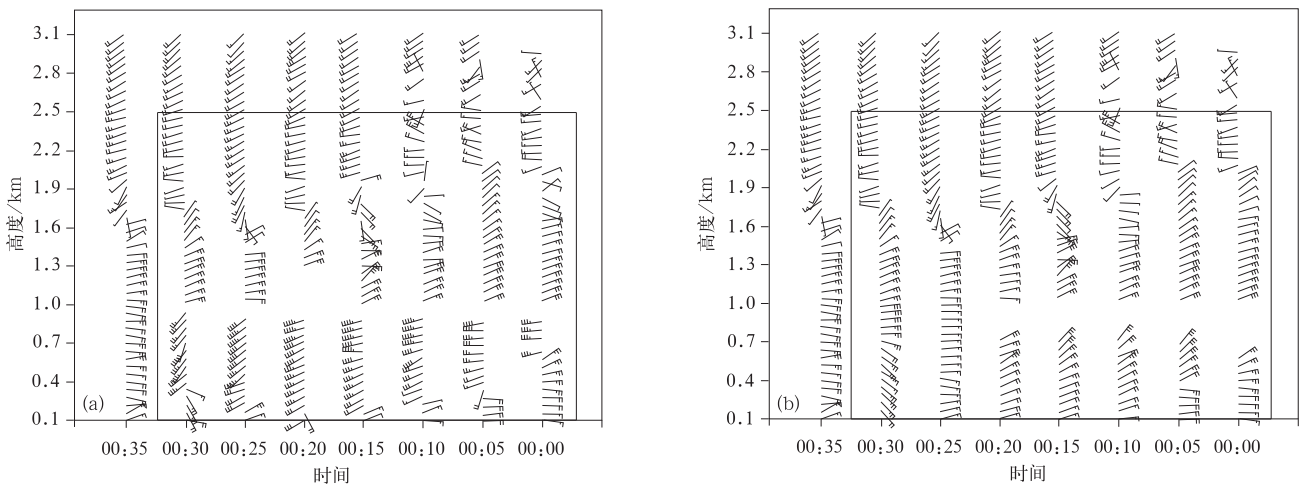


图6 上海金山站和F1赛车场站2012年3月7日00:00—00:35风廓线雷达风羽产品对比

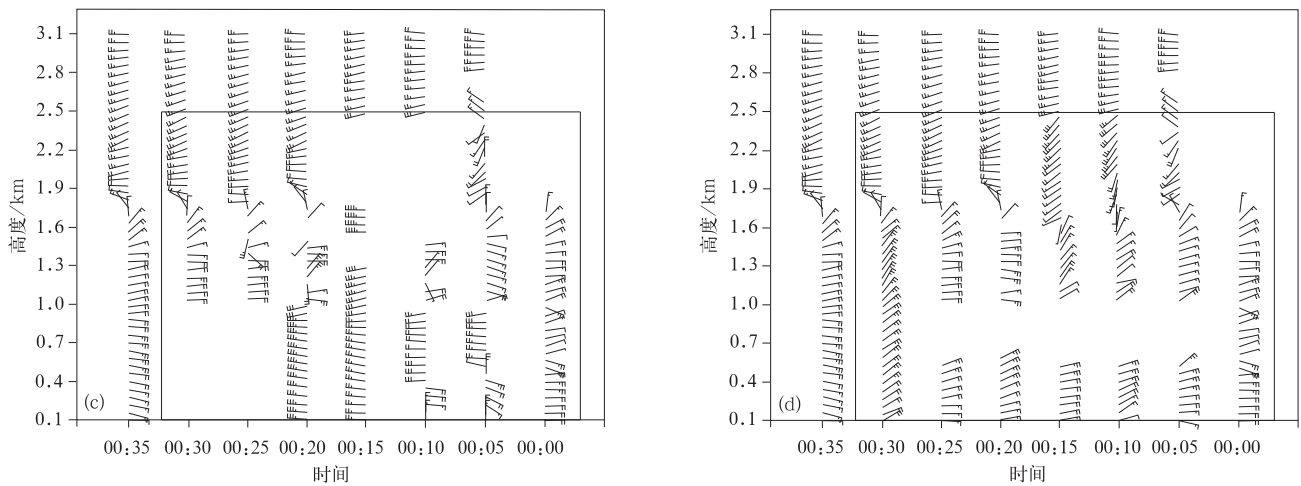
(a)金山站质量控制前风羽产品,(b)金山站质量控制后风羽产品,

(c)嘉定F1赛车场站质量控制前风羽产品,(d)嘉定F1赛车场站质量控制后风羽产品

Fig. 6 The wind product comparison chart of Jinshan and Jiading F1 racing sites wind profilers in Shanghai during 0000—0035 BT on 7 Mar 2012

(a)Jinshan site wind product before quality control,(b)Jinshan site wind product after quality control,

(c)Jiading F1 racing site wind product before quality control,(d)Jiading F1 racing site wind product after quality control



续图 6

个站均出现了与世博园区站相似的错误风数据,经过质量控制后(图 6b 和图 6d),水平风数据在时间和空间上较为连续,明显好于质量控制前数据。说明针对这种情况该方法相对有效。

由以上分析可以看出,降水初期由于边界层风廓线雷达各个波束探测到的数据在空间上不一致,违反了风廓线雷达探测前提,即风场连续均匀的假设,即使处理软件使用了多种质量控制方法,在识别和判断此时段风廓线径向功率谱时仍产生了偏差,从而计算生成了奇异的风羽产品数据。结合高、低模式径向功率谱图,对该时段径向功率谱数据进行精细化分析,查找出生成错误数据的原因,并在此基础上对数据进行再处理,去除软件质量控制算法错误判断的部分,通过 5 波束联合算法重新计算水平风数据,从而得到较为合理的风羽产品。

3 小 结

研究表明:

1) 基于风廓线雷达高时空分辨率径向功率谱数据的逐步分析方法,可以有效查找出降水初期雷达软件质量控制判断出错的原因,以及高、低模式扫描中被质量控制的数据范围。

2) 经过径向功率谱数据分析处理后得到的降水初期水平风场更为合理,通过对比文中 3 个风廓线雷达站点处理前后的水平风场数据可以验证。同时也反映出目前雷达厂家采用的质量控制算法并不能全部识别和消除降水对数据的干扰,还需要进一步改进质量控制算法,剔除错误数据,以提高风廓线

雷达的数据质量。

本文的研究和得出的结论是初步的,还需要进行大量深入细致的工作。目前,全国各省市已经开始布设风廓线雷达探测网,风廓线雷达数量的剧增使得单站监测研究和应用的需求越发迫切,希望通过对边界层风廓线雷达径向功率谱数据分析方法、软件质量控制原理及修正方法的介绍,特别是对于降水时段出现错误风数据过程的解释和重新处理反演,能够使广大站点技术人员加深对边界层风廓线雷达以及径向功率谱资料的理解,从而开展进一步的应用研究和相关技术的讨论,特别是降水前后数据质量控制算法的研究,以提高雷达探测数据质量。

参 考 文 献

- [1] Ralph F M. Using radar-measured radial vertical velocities to distinguish precipitation scattering from clear-air scattering. *Atmos Oceanic Technol*, 1995, 12: 257-267.
- [2] Wuertz D B, Weber B L, Strauch R G. Effects of precipitation on UHF wind profiler measurements. *Atmos & Oceanic Tech*, 1988, 5: 450-464.
- [3] 阮征, 葛润生, 吴志根. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. *应用气象学报*, 2002, 13(3): 330-338.
- [4] 杨引明, 陶祖钰. 上海 LAP-3000 边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探. *成都信息工程学院学报*, 2003, 18(2): 155-160.
- [5] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用. *气象科技*, 2008, 36(3): 300-304.
- [6] 何平, 朱小燕, 阮征, 等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 465-470.
- [7] 董保举, 刘劲松, 高月忠, 等. 基于风廓线雷达资料的暴雨天气过程分析. *气象科技*, 2009, 37(4): 411-415.

- [8] 郑祚芳,刘红燕,张秀丽.局地强对流天气分析中非常探测资料应用.气象科技,2009,37(2):243-247.
- [9] 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和评价.大气科学学报,2010,33(5):576-581.
- [10] 郑石,黄兴友,李艳芳.一次短时暴雨WP-3000边界层风廓线雷达回波分析.气象与环境学报,2011,27(3):6-11.
- [11] 邓闯,阮征,魏鸣,等.风廓线雷达测风精度评估.应用气象学报,2012,23(5):523-533.
- [12] Ralph F M, Neiman P J, Van de Kamp D W, et al. Using spectral moment data from NOAA's 404-MHz radar wind profilers to observe precipitation. *Bull Amer Meteor Soc*, 1995, 76(10):1717-1739.
- [13] David A Merritt. A statistical averaging method for wind profiler Doppler spectra. *Atmos & Oceanic Tech*, 1995, 12: 985-995.
- [14] 何平,李柏,吴蕾,等.确定风廓线雷达功率谱噪声功率方法.应用气象学报,2013,24(3):297-303.
- [15] 何越,何平,林晓萌.基于双高斯拟合的风廓线雷达反演雨滴谱.应用气象学报,2014,25(5):570-580.
- [16] 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.应用气象学报,2015,25(1):66-75.
- [17] 吴志根,丁若洋,郑杰,等.边界层风廓线雷达多普勒功率谱高度图综合应用初探.气象,2011,37(8):1006-1007.
- [18] 吴志根.边界层风廓线雷达在降水时段中的在线分析应用研究.气象,2012,38(6):758-763.
- [19] TWP3型边界层风廓线雷达用户手册.北京:北京敏视达雷达有限公司,2009.
- [20] Weber B L, Wuertz D B, Welsh D C, et al. Quality controls for profiler measurements of winds and RASS temperatures. *J Atmos Oceanic Technol*, 1993, 10:452-464.

The Error Wind Data Processing Based on Radial Power Spectrum of Wind Profiler Radar

Chen Haojun¹⁾²⁾ Huang Xingyou¹⁾ Sun Jing³⁾ Sun Juan²⁾ Yin Chunguang²⁾
Zheng Jie²⁾ Wang Qindian²⁾ Xue Hao²⁾

¹⁾(*Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

²⁾(*Shanghai Meteorological Information and Technical Support Center, Shanghai 200030*)

³⁾(*Shanghai Typhoon Institute of CMA, Shanghai 200030*)

Abstract

Wind profiler radar is a new generation of radio sounding wind detecting system, which takes atmospheric turbulence backscattered signal as its main detecting object. It is the most direct source to obtain high-altitude wind data in addition to the sounding data. In recent years, researches on the wind profiler radar detection are widely carried out during precipitation periods. It shows that the signal to noise ratio (SNR), the refractive index structure constant (CN2), horizontal speed, vertical wind speed and other information provided by the wind profiler could help to know the precipitation process, and clearly reflect the start time and the intensity of precipitation. The real-time high resolution radial power spectrum data provided by wind profiler radar, can not only be used to extract the wind data, but also estimate the height range of freezing layer and verify quality control performance of the wind profiler radar software. The application of wind profiler radar data is no longer limit to only study the clear air atmosphere.

However, during a precipitation process, especially at the beginning of the precipitation, uneven rainfall leads to inconsistent beams in the space, and the quality control (QC) algorithm of the software used in radar cannot identify and eliminate all interference made by precipitation, leading to horizontal wind data errors.

In order to improve data quality, the radial wind power spectrum data of wind profiler radar is analyzed to find out QC problems and identify and remove erroneous data. First, under the premise of fully knowing the principle of software QC method, the location and cause of software QC judgment errors are identified by progressively comparing the radial power spectrum data of the high and low mode. And then, the radial power spectrum data in problem period is reprocessed. Finally, the wind data is recalculated. Case analysis shows that the error wind data processing based on radial power spectrum of wind profiler radar could improve software QC methods and improve the quality of wind profiler radar data.

Key words: radial power spectrum; high and low mode scan; horizontal wind data; quality control