

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[J]. 气象, 2012, 38(6): 758-763.

边界层风廓线雷达在降水时段中的 的在线分析应用研究^{*}

吴志根

上海市气象局, 上海 200030

提 要: 本研究提出了一种在边界层风廓线雷达连续运行的降水探测时段中对降水频谱进行在线分析的新的应用方式。详细介绍了边界层风廓线雷达在线分析原理和方法。同时结合典型降水频谱个例, 分析了可获得的多个潜在的气象参数和信息。并指出, 该在线分析方式的实施可以使风廓线雷达的应用领域从晴空探测向降水测量拓展; 有效缓解当前风廓线雷达应用存在的瓶颈问题; 间接证明边界层风廓线雷达组网间距不固定的观点。文章分析说明, 随着在线分析方式的推广应用, 边界层风廓线雷达将成为单站精细化气象探测和预报/服务的重要工具。

关键词: 在线分析, 降水频谱, 组网间距, 系统设计, 边界层风廓线雷达

On-Line Analyses and Studies of Boundary Wind Profilers During the Precipitation Period

WU Zhigen

Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030

Abstract: In this paper, a new application manner by on-line analyses for the stacked spectral plots (SSP) in the control & dwell display window of boundary wind profiler (BWP) obtained during the rainfall time periods has been introduced. The paper has described the principle and method of BWP on-line analyses in detail, and by combined with some typical cases of precipitation SSP analyses, the evidences of potential parameters extracted from SSP have been presented. The advantages and benefits for implementation on-line analyses on SSP of precipitation, including extension application fields of BWP from clear air to rainfall weather, mitigation current BWP's application bottle-neck, as well as indirect verification of the stand-point for non-constant interval distance in BWP networking, have been indicated. It is believed that during the precipitation time sections BWP will be a very important tool for the weather stations to carry out detailed weather surveillance and forecast/service with the manner application and expansion of on-line analyses of BWP.

Key words: on-line analysis, rainfall spectra, networking interval, system design, boundary wind profiler (BWP)

引 言

众所周知, 自从大气风廓线雷达问世以来, 各种

实际应用对这类气象雷达设备始终采取了连续运行且无人值守的工作方式, 并为全球相关的科学研究和业务应用提供了大量有用的探测资料^[1-5]。然而, 本研究认为风廓线雷达的这种连续运行且无人值守

^{*} 上海市气象局边界层风廓线雷达组网项目资助
2011 年 7 月 29 日收稿; 2012 年 3 月 11 日收修定稿
作者: 吴志根, 从事风廓线雷达以及气象综合探测技术研究, Email: zgwu@smb.gov.cn

的工作方式并没有将设备和系统的能力发挥到最大,还存有一定的潜力可以发掘。对此,文章将在上述工作方式的基础上,提出一种使得边界层风廓线雷达能够实现精细化探测的新的应用方式,即:在边界层风廓线雷达连续运行探测的降水时段中对系统中各个扫描波束捕获的而且是实时显示的高时间分辨率的降水频谱图形资料进行在线分析应用。

本研究发现这种新的应用方式在实际工作中将会在以下几个方面取得成效:一是拓展和发掘边界层风廓线雷达设备的探测潜能,使其能够从晴空风测量向降水时对风和雨的综合探测延伸,进而实现边界层风廓线雷达设备在性能上的晴/雨二用,有效缓解风廓线雷达设备应用的瓶颈问题。因为在无降水和有降水之间,目前商用的各类风廓线雷达设计探测的重点是前者,但实际气象和服务应用关注的重点则是后者。所以本研究提出的对边界层风廓线雷达在降水期间的探测实行在线分析的应用方式是解决上述矛盾的有效手段。

二是在降水期间实行在线分析应用工作方式,可以充分发掘目前边界层风廓线雷达的探测潜力,而且已有研究表明,边界层风廓线雷达完全有可能成为单站精细化探测和精细化预报/服务的有效工具。对边界层风廓线雷达各个波束扫描得到的高时间分辨率的降水频谱进行在线分析不仅可以实时估测风向/风速,并且还可以得到多种可用于单站精细化预报/服务的潜在的气象信息^[6]。目前国内外的许多研究人员已经利用边界层风廓线雷达的降水探测资料做了大量的分析和研究工作^[7-12],并且取得了丰硕的成果。本文认为这些研究成果均是充实、提高和完善边界层风廓线雷达进行精细化探测并使其成为精细化预报/服务有效工具的坚实基础。

三是通过在降水期间实行在线分析应用方式后,将彻底冲破目前边界层风廓线雷达基本上不用于降水探测的束缚和制约,从而充分打开该探测设备的应用想象空间。例如,在特大型城市开展精细化预报/服务需要在户外活动现场进行精细化气象监测和保障,特别是对于一些重要的大型户外集会、体育赛事、娱乐活动等常常是需要几处同时进行现场的保障服务。目前的做法是将移动边界层风廓线雷达探测设备安置到服务现场运行,再将获得的数据传回来分析。由于目前风廓线雷达可用于精细化预报分析的资料主要是风羽时间剖面图,比较单一而且又是事后(一般都在15分钟或30分钟以后),

其探测和服务效果对用户而言是不理想的。现在由于对边界层风廓线雷达在降水期间的探测实行在线分析应用的工作方式,特别是通过对降水频谱的在线分析,现场的技术人员可实时获得很多的宝贵信息,可向用户实时提供更多精细有效的预报/服务资料。本研究认为,对降水频谱实行在线分析,给特大型城市的精细化探测和气象预报/服务增添了新的实质性内容。另一方面,将移动边界层风廓线雷达安置各个到户外活动现场运行获取资料进行气象保障服务的方式,也间接证实了笔者关于边界层风廓线雷达的组网间距没有统一的距离^[13]限制,而是按照实际应用的需求来确定的研究结论。

本文在后面的章节中详细介绍了降水频谱在线分析的基本原理和方法,同时结合典型频谱个例,介绍在线分析可以得到的部分潜在的精细资料和信息。

1 在线测风分析的主要原理

在边界层风廓线连续运行探测的有降水的时段中,本研究提出实行在线分析应用方式的主要作用对象是各个波束高/低模式扫描循环提供的30秒时间分辨间隔的降水频谱图。然而,在本研究之前,对这些高时间分辨率的频谱图是不进行实时应用的。本文提出的对降水频谱做实时在线测风分析的原理是利用了风廓线雷达探测的基本准则,即在边界层风廓线探测波束扫描覆盖的空域中,水平方向上大气应符合连续均匀性的假定原则。研究认为将该假定原则拓展到降水时段也是适合的,即在波束扫描探测覆盖的这块小空域中水平方向上的降水是连续而均匀的。按边界层风廓线雷达斜波束 75° 仰角值计算,可知在500 m高度上这块小空域的半径仅为130 m。所以在短时间里,且在较小的空域里测到的降雨满足水平方向上均匀的假设。对五波束扫描的风廓线雷达,公式(1)分别表示垂直波束、偏东波束和偏西(对称)波束、偏北波束和偏南(对称)波束测到的径向风 R_V 、 R_e 、 R_w 、 R_n 和 R_s 。显然从式(1)可知,下雨时斜波束测到的径向速度是由二部分构成,即:水平风分量(u 和 v)在波束径向上的投影以及雨滴的下降末速度(w)在波束径向上的投影二项之和。由于在下雨时常伴有风的影响,所以实际上雨滴不是垂直从天上掉下来,而是顺风走斜的下降路径。此时,垂直波束测到的径向速度(w)应该

是在水平风作用下的雨滴下降末速度在垂直方向上的投影。图 1 是降水期间对称扫描波束中径向速度的合成示意图解。此时,按照风廓线雷达探测的假定原则,认为在边界层风廓线雷达扫描波束覆盖的空间范围里,在水平方向上降水是均匀连续的前提下,从图解可知,在降水期间若有水平风影响,则在对称扫描波束的频谱图形中反映出来的径向速度(朝着雷达为正,离开为负)的数值是指向水平风来向的斜波束中的值大于指向水平风去向的斜波束中的值。理由是前者的径向速度测值是水平风分量 E_1 的投影值 E_2 与雨滴下降速度 V_i 的投影值同号相加,而后者中的 E'_2 与 V_i 的投影值则是异号相减。当测站上空出现大风、大雨时,往往指向水平风来向的斜波束中的径向速度值会达到甚至超出边界层风廓线雷达的 Nyquist 速度,使得该斜波束中的径向速度出现折叠现象。具体风速/风向的在线估算方法可详见文献[6]。

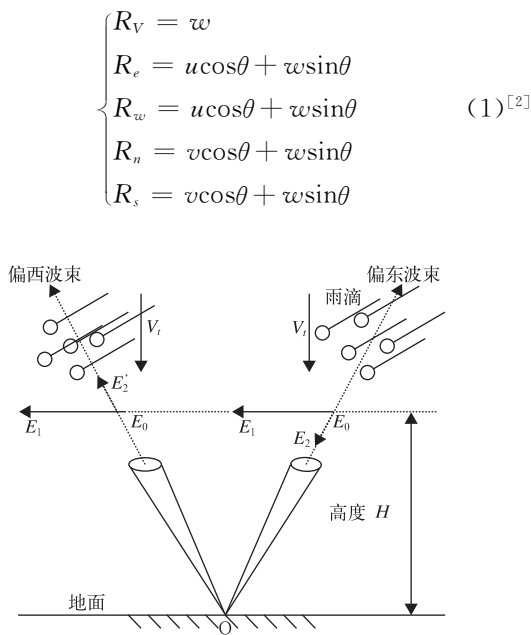


图 1 降水期间对称扫描波束中
径向速度的合成示意图解

Fig. 1 Illustration of combined
radial velocity in symmetrical
bias-beam pair during precipitation

2 在线分析应用个例

已有研究发现,在线实时分析显示屏上 30 秒刷新的高时间分辨率的降水频谱图形资料,能够获得

许多精细化监测预报所需的高时间分辨率的潜在的信息和参数,下面文章将结合降水频谱个例,在线分析实时获得前面介绍的部分潜在的信息和参数的方法,未涉及部分内容读者可以参阅文献[6]的介绍。

个例分析一:图 2 是 2010 年 12 月 12 日嘉定边界层风廓线雷达探测到的一次降雨过程中的其中一个 5 分钟(从 19:13:25 至 19:17:38)扫描周期里的高(右半部)低(左半部)二个模式测到的频谱高度图。从该图中的低模式频谱图可知,此时正在下雨且较强,因为 5 个波束中均是正的径向速度值,其中垂直波束中的径向速度达到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而且各个高度上谱信号区的谱宽很宽,这是降水的典型频谱。由于最大下降速度不在垂直波束中,因此可基本判断有水平风伴随。另外,对偏东/偏西对称波束的频谱图分析可知,从 170 m 至 1.62 km 的高度范围里,基本上维持东风分量,只是到 1 km 高度以上后略偏小一点;而从偏南/偏北对称波束中可看到,向上直至 1.62 km 高度处,有一个南风分量逐渐增大而北风分量同时逐渐减小的过程。综合分析认为,从底层 170 m 向上至 1.62 km,其风向从东北风转变成了东南风。按照文献[6]的方法,可估测出水平风速在 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。对图 2 中右半部分的高模式时的频谱分析得知,此时的 0°C 层在 3.02 km 以上,因为该高度下其频谱谱宽突然变宽,而在此高度以上出现了径向速度从小突然变大的现象。另外,分析二对对称波束的频谱图可以得出 870 m 高度以上,随高度的上升东南风逐渐转为西南风并且风速变大,最大风速在 0°C 层(3.02 km)附近。

个例分析二:图 3 是上海嘉定边界层风廓线雷达在 2011 年 1 月 18 日探测到的一次降雪过程中的其中一个 5 分钟(从 10:30:17—10:34:27 时)扫描周期的降雪频谱高度图。其中图 3 的左半和右半部分的 5 幅频谱图分别表示低模式和高模式时 5 个波束的扫描结果。在线分析得知,此时正在降雪。因为可看到低模式中整个探测层次中各个高度上的反射信号频谱部分的外形包络基本相似,大小相同,且信号的谱宽较窄,下降速度在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。由于最大下降速度也不在垂直波束里,所以在线分析判定下雪时有水平风伴随。根据低模式的频谱图,还可在线判定此时在测站上空 1 km 左右的高度上,水平风出现了垂直切变现象。这是因为按风向风速估算规则,知在此高度以下风廓线雷达的东/西对称波束中是东风,南/北波束中为北风,其矢量

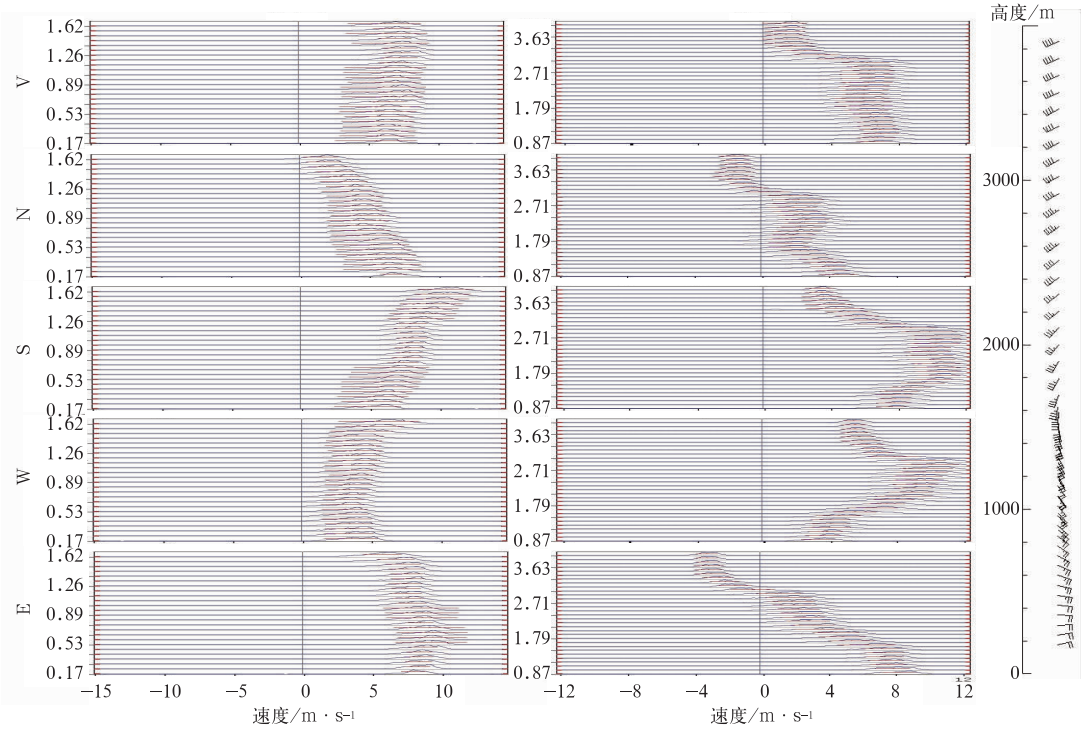


图 2 2010 年 12 月 12 日 19 时嘉定边界层风廓线雷达降水频谱图
(E、W、S、N 和 V 分别为东、西、南、北和垂直波束)

Fig. 2 Typical precipitation pattern of BWP stacked spectral plots at 19:00 BT 12 December 2010
(E, W, S, N and V are east, west, south, north and vertical wave beams respectively)

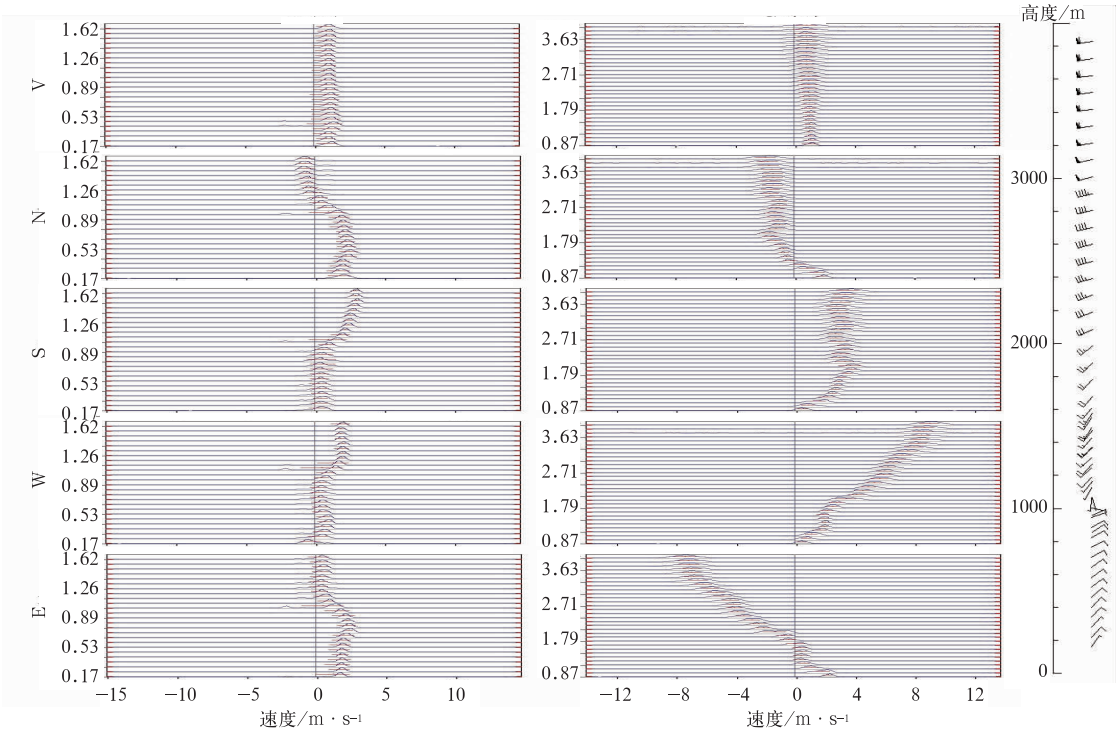


图 3 2011 年 1 月 18 日 10 时 30 分嘉定边界层风廓线雷达降雪频谱图
(E、W、S、N 和 V 同图 2)

Fig. 3 Typical snowfall pattern of BWP stacked spectral plots at 10:30 BT 18 January 2011
(E, W, S, N and V same as Fig. 2)

合成为东北风。而在该高度以上直至 1.6 km 处, 其东/西对称波束中是西风, 南/北波束中为南风, 其矢量合成为西南风。由于在整个低模探测的高度范围里, 二对对称波束中的径向速度值的差为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 按照文献[6]介绍的方法可算出, 直到 1.6 km 高度处各层的水平风速在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。另外, 对图 3 右半部分的频谱高度图分析可知, 此时测站上空存在逆温层, 0°C 层顶部出现在 1.8 km 高度上, 因为以该高度为分界线, 在上面的频谱很宽, 而此高度以下, 其频谱图上的谱宽突然变得很窄, 该特点在垂直波束中也是显而易见的。而且可分析得出从此高度向上西南风逐渐变强, 在频谱顶部 3.9 km 高

度上径向速度值达到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在图 2 和图 3 的最右边是对应时间的风羽剖面图的结果显示。

个例分析三: 图 4 是浦东凌桥边界层风廓线雷达捕获到的一次降水精细变化过程。从图中可知, 该风廓线雷达的偏北波束的高模式扫描于 2011 年 6 月 17 日早上 03:54:31 探测到在测站上空 1.63~2.5 km 附近的高度范围里首次出现有降水的频谱痕迹, 1 分钟以后降水频谱向上向下延伸, 并在又一个 1 分钟内降水频谱变得更为明显, 且高度范围覆盖 1.19~2.89 km。在随后对边界层风廓线雷达进行低模扫描获得的 6 张频谱高度图中, 可清楚地看到, 降水频谱的高度不断向下降低, 最后在 04:01:01

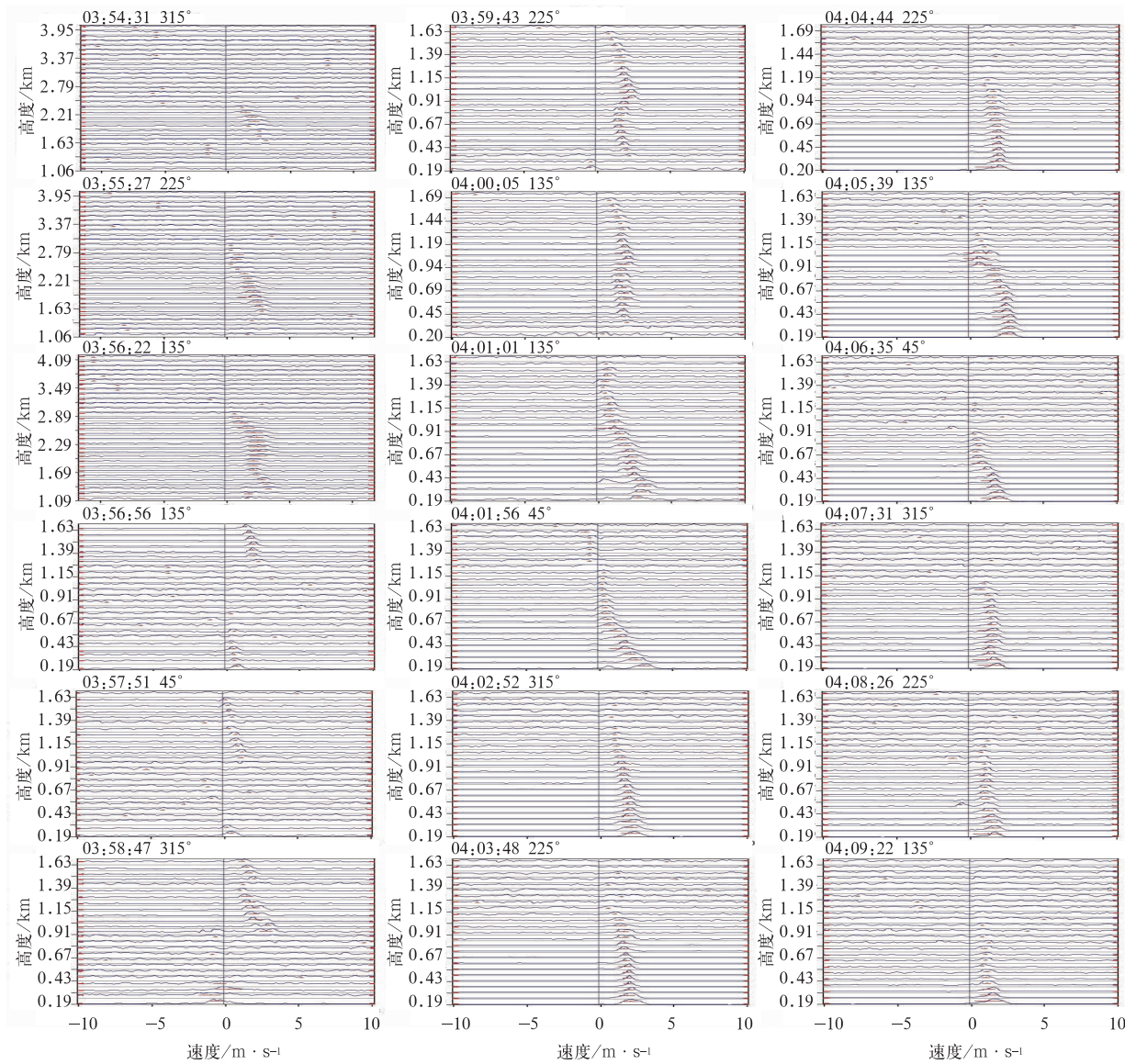


图 4 2011 年 6 月 17 日浦东凌桥边界层风廓线雷达探测降水精细化过程个例
Fig. 4 A detailed precipitation procedure in BWP stacked spectral plots on 17 June 2011

时刻到达高度0处,这正是风廓线雷达探测到的降水如何到达地面的精细变化过程。分析还可知从发现降水到雨滴落地约6分钟,而且落地时反映降水强度的雨滴的下降径向速度为 $3.5\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且该径向速度值一直维持到了04:02:52,之后才减小至 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这表明地面雨强从这一时刻起开始减弱。而且雨强的减弱一直持续到04:09:22,其中从04:05:39—04:06:35的1分钟里雨强减弱明显。分析还发现在雨强减弱的同时,从04:01:01时刻的频谱图开始直到最后04:09:22时刻的频谱高度图上可清楚地看到降水云顶的高度也在不断降低,最后降水云顶高度仅为800 m左右。本个例中的这些高时间分辨率的边界层风廓线雷达频谱高度图将降水云的精细变化刻画得非常清晰。与上述降水相对应的和该边界层风廓线雷达共站址布设的水文站地面雨量计实测的小时雨量结果是03—04时4.0 mm。然而布设在该边界层风廓线雷达西南2.34 km处的凌桥自动站,安置在西北方4.78 km处的吴淞自动站和建立在东南方4.79 km处的外高桥自动站的同一时段内的雨量记录均无记录。

从上面几个例分析可以看到,在边界层风廓线雷达连续和无人值守的运行方式下的降水时段中实施在线分析的新的应用方式,对发掘用边界层风廓线雷达进行精细化探测和精细化预报/服务的潜力是很有实际意义的。必须指出,由于目前业务用风廓线雷达还不完全具备马上就可进行在线分析应用的条件。当务之急是需要在线分析应用中重新设计一个新的在线分析应用的显示界面。

3 小 结

(1) 本研究在目前始终沿用的风廓线雷达连续运行且无人值守的工作方式的基础上,提出了在降水时段中对边界层风廓线雷达进行在线分析的新的应用方式。并且指出该在线分析方式可使边界层风廓线雷达的应用在降水探测中得到加强,实现晴雨二用,从而缓解目前边界层风廓线雷达应用的瓶颈问题。

(2) 文章介绍了对降水频谱图形资料在线测风分析的主要原理和方法。同时结合典型频谱图型,分析了可以在线提取的部分气象参数及信息,并且还给出了边界层风廓线雷达对降水过程进行精细化

探测的证据。

(3) 本文分析介绍的均是比较典型的多普勒频谱图形个例,而在实际应用中其频谱的情况会出现很多变化,文章认为熟能生巧应是读者真正掌握的一般道理。

综上所述,文章提出的对边界层风廓线雷达降水频谱图形资料的在线分析应用,其方法简单,且适合推广。但是本研究的结果还是初步的,笔者希望经本文的介绍能引起业内的广泛关注,并且通过进一步的深入研发使得边界层风廓线雷达早日成为精细化气象探测和精细化气象预报/服务的有效工具。

参考文献

- [1] Strauch R G, Merritt D A, Moran K P, et al. The Colorado wind-profiling network[J]. *Atmos & Oceanic Tech*, 1984, 1: 37-49.
- [2] Strauch R G, Weber B L, Frisch A S, et al. The precision and relative accuracy of profiler wind measurements[J]. *Atmos & Oceanic Tech*, 1987, 4: 563-571.
- [3] Srinivasa R I, Anandan V K. Evaluation of DBS wind measurement technique in different beam configurations for a VHF wind profiler[J]. *Atmos & Oceanic Tech*, 2008, 25: 2304-2312.
- [4] NOAA/NWS. A review of U. S. wind profilers, prepared for profiler signal processing workshop held in Boulder, Co in April 1997. FCM-R14-Maryland 20910. Washington, DC March 1998.
- [5] NOAA/NW & OAR, Aug., 1994. A wind profiler assessment report and recommendations for future 1987—1994. NOAA/FSL, 325 Broadway Boulder, CO 80303-3328.
- [6] 吴志根,丁若洋,郑杰,等. 边界层风廓线雷达多普勒频谱高度图综合应用初探[J]. *气象*, 2011, 37(8): 1006-1017.
- [7] 阮征,葛润生,吴志根. 风廓线雷达探测降水云体结构方法的研究[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(3): 330-338.
- [8] 王晓蕾,阮征,葛润生,等. 风廓线雷达探测降水云中雨滴谱的试验研究[J]. *高原气象*, 2010, 29(2): 498-505.
- [9] 何平,朱小燕,阮征等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(4): 465-470.
- [10] 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.
- [11] Wuertz D B, Weber B L, Strauch R G. Effects of precipitation on UHF wind profiler measurements [J]. *Atmos & Oceanic Tech*, 1988, 5: 450-464.
- [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[J]. *Bulltin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(10): 1717-1739.
- [13] 吴志根,沈利峰. 边界层风廓线雷达应用中存在的若干问题[J]. *高原气象*, 2010, 29(3): 801-809.