

吴志根,丁若洋,郑杰,等. 边界层风廓线仪多普勒频谱高度图综合应用初探[J]. 气象,2011,37(8):1006-1017.

边界层风廓线仪多普勒频谱高度图综合应用初探^{*1}

吴志根¹ 丁若洋¹ 郑 杰² 陈浩君² 查亚峰¹ 李建成³ 胡 平²

1 上海市气象局,上海 200030

2 上海市气象信息与技术支持中心,上海 200030

3 上海市闵行区气象局,上海 201100

提 要: 文章介绍了边界层风廓线仪多普勒频谱高度图的原理,并且给出了无降水、有降水、降雪、速度折叠、地物杂波、外界信号干扰等典型的多普勒频谱高度图型。研究发现,多普勒频谱高度图除了可以从中提取测风产品所需的数据外,该在线显示的图形还实时提供了许多其他潜在的气象信息,并可用于:连续监视测站上空天气;提前了解测站上空风的垂直切变;发现并确定降水起始时间;在线估测风向风速;实时判别降水云底高度和 0°层的范围;验证和解释风羽剖面图产品中的奇异现象;帮助固定和移动风廓线仪选址;诊断风廓线仪系统故障;评价风廓线仪系统软/硬件性能优劣等。文章指出:深入发掘边界层风廓线仪在降水天气系统中进行高时间密度探测的潜力,使得它可以晴雨两用,对今后将边界层风廓线仪配备到一般气象观测站,提高单站天气监测/预警能力和开展精细化天气预报意义深远。文章还对当前商业化的边界层风廓线仪提出了具体的改进意见,以满足频谱在线分析的需要。

关键词: 多普勒频谱, 速度折叠, 频谱高度图型, 单站天气监测, 在线分析

Preliminary Analyses on Comprehensive Applications of Stacked Spectral Plots in the Control and Dwell Display Window of Wind Profilers

WU Zhigen¹ DING Ruoyang¹ ZHENG Jie² CHEN Haojun²
ZHA Yafeng¹ LI Jiancheng³ HU Ping²

1 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030

2 Shanghai Meteorological Information and Technical Support Center, Shanghai 200030

3 Shanghai Minhang District Meteorological Office, Shanghai 201100

Abstract: The paper has described the principals of the stacked spectral plots (SSP) in the control and dwell display window of boundary wind profiler (BWP). Some typical SSP patterns including precipitation, non-precipitation, snow, radial velocity ambiguity, ground clutter as well as outliers have been provided in the paper for application references. It has also been found that the raw data of BWP for producing wind measurement products can be obtained not only from the SSP on-lined, but also it can offer lots of potential meteorological information in a real-time. All of those said above can be used to carry out a round-clock weather monitoring over the observation station, understand the wind shear with height in advance, determine rainfall commence time and estimate the wind direction and speed, on-line estimate the bottom height of rainfall clouds and the range of 0° layer, verify the data quality in other non-real-time products, support site selection for both stationary and mobile BWP, diagnose BWP system issues, assess the software and hardware of BWP, etc. It has been pointed out for the first time that developing the potential abilities of BWP sounding in the rainfall weather systems with a high temporal resolution and making it working well in both precipitation and non-precipitation conditions are signifi-

* “上海市气象局边界层风廓线仪组网项目”资助

2010 年 10 月 4 日收稿; 2011 年 3 月 18 日收修定稿

第一作者: 吴志根, 从事风廓线仪以及气象综合探测技术研究, Email: zgwu@smb.gov.cn

cantly meaningful with respect to BWP to be deployed to the weather observation stations nationwide in the near future to enhance the integrated capabilities in weather surveillance and detailed weather forecast. The comments and suggestions are also presented in order to improve the performance for the current commercial BWP to meet on-line analysis demand.

Key words: Doppler spectra, speed ambiguity, pattern of SSP (stackd spectral plots), station weather monitoring, on-line analysis

引 言

采用先进技术,大幅度提高气象卫星和气象雷达探测的时间分辨率,以获取被测天气系统内部的精细信息,是开展精细化天气预报的基础。为此,全球气象业内外进行了长期而艰苦的不懈努力,并且已经取得了巨大的成就。仅以美国为例,从 GOES-I 静止气象卫星起,由于采用了先进的三轴定向卫星姿态控制技术^[1],使得对卫星云图产品的刷新时间达到了 60 秒以内。美国的下一代天气雷达正在实施“多功能相控阵雷达”计划的项目试验(Multifunction Phase Array Radar, MPAR)^[2]。MPAR 采用的核心技术之一是将目前在雷达系统中广泛使用的“机械式扫描天线”彻底更新为相控阵、多波束同时发射/接收的“电智能扫描天线”。主要是实现三个方面的目标,一是统一美国本土与气象、商业、交通、军事以及航空有关的各种雷达系统,包括民航导航雷达;二是实行统一管理,提高运行效率,降低当前各自为阵的雷达运行成本;三是将现在 NOAA/NWS/ROC 的 WSR-88D 多普勒天气雷达网中的每 6 分钟一次的体扫描时间分辨率提高至每 30 秒刷新一次,以获取中小尺度强烈灾害性天气系统内部的精细数据和结构。

事实上,边界层风廓线仪在对晴空大气进行测量时,主要探测自由大气中满足一半雷达波长的湍流尺度的后向散射。其探测高度取决于大气中与雷达波长相匹配的湍流尺度的多少。由于大气中的湍流尺度随高度变大,所以一般用 UHF 频段的风廓线仪探测对流层大气,而用 VHF 频段的风廓线仪测量直到平流层的高度。使用同一种型号的风廓线仪探测大气时,有降水时比无降水时测的高,坏天气或有天气系统影响时比好天气或无天气系统时高。

边界层风廓线仪也是一种进行高时间分辨率精细化气象探测的有效工具。它实行无人值守 365 天 $\times$ 24 小时不间断连续运行并且在设备的显示屏上实时提供高时间分辨率的多普勒频谱高度图。但

是,这种每隔约 30 秒刷新一次的实时显示的图形自从边界层风廓线仪商业化以来一直没有引起充分的重视。包括设备制造商在内,几乎无一例外的将它看作是设备本身给用户提供的—种显示界面而已。其实这是对该实时显示图形产品认知上的不充分。其结果是,一边在苦苦追求高时间密度的大气探测数据,一边却对已经获得的这种高时间密度的实时显示图形资料视而不见。出现这种现象的直接原因是,在业内外大家普遍关心风廓线仪的测风和测风的精度,故忽视了对这种在线显示的高时间分辨率的多普勒频谱高度图的关注。

然而,笔者通过对边界层风廓线仪实时显示的多普勒频谱高度图的综合分析研究后发现:该多普勒频谱高度图不仅可以生成风羽时间剖面图和其他多种非实时产品,而且在有降水时,还可以利用它,在线直接提取许多测风以外的实时气象信息。这些高时间分辨率的潜在的实时气象信息将为精细化监测和精细化气象预报/服务的开展奠定坚实的基础。所以,深入研究多普勒频谱高度图,学习掌握多普勒频谱高度图在线分析技术,增强边界层风廓线仪在降水云中的探测能力^[3-7],使得边界层风廓线仪能够晴雨两用;同时发掘边界层风廓线仪新的适用于一般单站天气监测/预报的信息和资料是非常有意义的。

1 原理简介

边界层风廓线仪多普勒频谱高度图是一种在风廓线仪运行中产生的在线图形显示产品,它的屏幕刷新时间为 30 秒(图 1)。单幅多普勒频谱高度图是由风廓线仪某一波束在其探测高度范围内,从下至上的不同高度层上的一组多普勒频谱构成。它表示沿着该波束指向上,在规定的驻留时间里,探测到的各个高度层上的大气多普勒频谱的实况。而作为频谱高度图构成元素的多普勒频谱则是提取对应高度层的风廓线仪探测基本数据,如信号功率(零阶矩)、径向速度(—阶矩)、信号谱宽(二阶矩)、信噪比(SNR)以及噪声电平^[8]等的源。

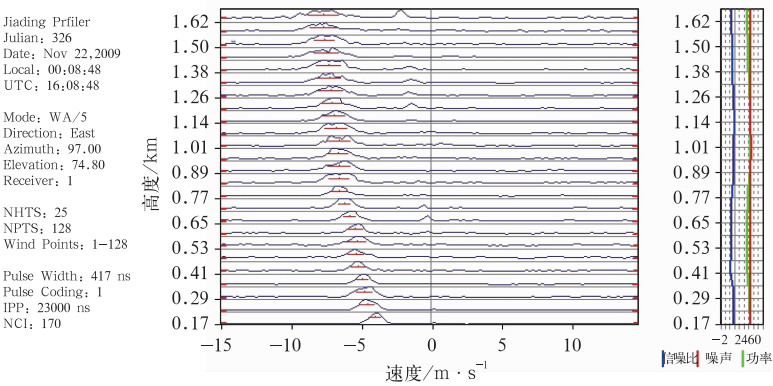


图 1 边界层风廓线仪实时显示的多普勒频谱高度图
Fig. 1 An on-line displayed stacked spectral plots of BWP

边界层风廓线仪的斜波束偏离天顶为 15° 。一般五波束运行扫描的顺序是:垂直(低模+高模)→偏北(低模+高模)→偏西(低模+高模)→偏南(低模+高模)→偏东(低模+高模),为一个循环扫描周期。每个扫描方向上波束的驻留时间为 60 秒,最密时每 5 分钟即可获得一条测站上空的水平风廓线。

图 2 是水平风径向投影的几何分析。图中假定在风廓线仪探测范围内水平方向上气象条件连续, H_1 高度上有一风速为 U_1 ,风向为 X 的水平风吹过该风廓线仪的偏东和偏西波束。该水平风经过在东至西平面上一次投影和在斜波束上的二次投影后,得到两个大小相等方向相反的矢量,其多普勒径向速度值分别为 V_1 和 $-V_1$ 。规定离开风廓线仪的投影矢量取负值,朝着风廓线仪的投影矢量取正值。经 FFT 变换后在频域中显现的风信号频谱相对 0 速度是互相对称的。另外,晴空时垂直波束中风谱测值较小,一般在 0 速度附近的 $\pm 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围,但出现重力波^[9]的情况除外。实际上,在晴空或无雨条件下测到的频谱高度图中的信号频谱并非完全对称,而是存有差异。主要有两个方面的原因,其一在风廓线仪波束探测范围内垂直方向各个高度上的水平风随空间和时间会有(涨落)变化;其二是风廓线

仪系统本身软/硬件的测量误差所致。

风廓线仪测风信号采样和处理流程^[10]见图 3 所示。该框图表明,为了获取可以显示的 H 高度层上的频谱,首先需要对该高度层进行 N 个点的信号采样,且每个采样点都要经过 m 个脉冲采样值的时域相干累积处理,再将这些经过相干累积后的采样值做 N 点的 FFT 变换,得到一个测风频谱,最后再做 L 个测风频谱的平均后得到 H 高度上显示的频谱。图 4 是理想的频谱模型^[11-12]。需要指出,在获得可显示频谱的同时,风廓线仪系统的算法软件^[13-14]也从频谱中估算了多普勒三阶矩、信噪比以及噪声电平参数。并将每个探测波束的径向速度代入计算公式^[15]即可得到 H 高度上的水平风向和风速。

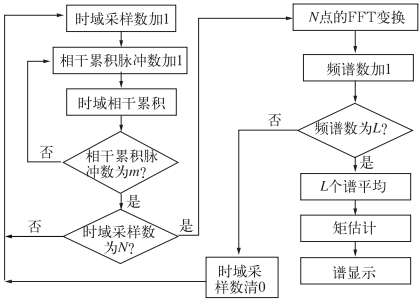


图 3 风廓线仪测风信号采样及处理流程
Fig. 3 Flow chart of BWP sampling data processing

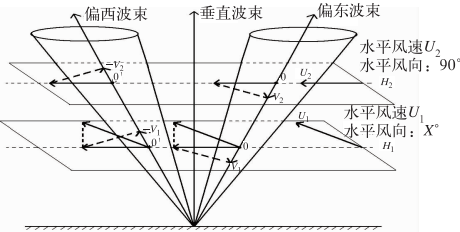
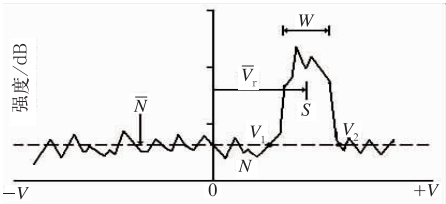


图 2 水平风在波束上的投影
Fig. 2 Illustration of horizontal wind projection on the bias beams

从该信号采样和处理流程可知,边界层风廓线仪系统界面在线显示的频谱高度图实际上是一个中间产品,它等同于多普勒天气雷达在某一方位和仰角下对其径向上各个距离库上的目标采样且经 FFT 变换后得到的频谱。不同之处,一是风廓线仪天线波束扫描仅为 5 个方位,波束驻留时间较长,而

多普勒天气雷达天线需在不同仰角下做 360° 方位的扫描,采样驻留的时间很短。二是前者设计探测(高度)距离较近,仅为 $3\sim 5\text{ km}$ 左右;而后者探测距离远,几乎是前者的 2 个数量级。应该指出,风廓线仪探测对象是大气中 Bragg 匹配反射的弱小信号,需要对此弱信号做时域相干积分处理来提高信噪比(SNR)。所以通过 m 个连续脉冲返回信号的时域积累处理后,改善了 SNR,且 $V_{m(\text{Nyquist})} = \lambda/4mt$,这里 t 是脉冲发射周期。有研究表明,信号相干时间,对 VHF 风廓线雷达是秒级,对 UHF 则是毫秒级。一般时域脉冲相干处理的脉冲个数 m 取值为几百,太多了对 SNR 的改善无效。后者主要是探测大气中水凝体反射的强信号,故无需对采样信号做时域处理,直接做 FFT 变换即可得到测量的多普勒频谱。

本研究采用的资料和个例均来自 Lap-3000 型边界层风廓线仪,扫描时同时运行高/低两个模式,低模式运行时的多普勒频谱高度图分为 25 层,每层间隔为 60 m ,探测高度 $1\sim 2\text{ km}$ 。而高模式时则是有 31 层,每层间隔为 100 m ,探测高度为 $3\sim 4\text{ km}$ 。对每个高度分辨层进行 128 或 256 点的信号采样,且每个点的时域脉冲累积个数 m 取 $100\sim 200$ 不等。进行 128 或 256 点的离散 FFT 变换,最终显示平均后的多普勒频谱高度图。若从 $-V$ 到 $+V$ 为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,256 点 FFT 变换频谱的径向速度分辨率为 $0.12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。



S: 信号功率, $\bar{V}_r$: 径向速度, W : 谱宽, $\pm V$: 最大径向速度范围, $\bar{N}$: 噪声电平, V_1 和 V_2 : 信号频率上下限, N : 噪声

图 4 在 H 高度上的风廓线仪多普勒测风频谱模型

Fig. 4 Typical Doppler signal spectrum of BWP

2 典型多普勒频谱高度图例

根据上海组网边界层风廓线仪的探测存档资料,整理筛选了几种不同天气条件下典型的、具有代表性的多普勒频谱高度图,为频谱分析、系统识别以及相关的研究与应用提供参考依据。

2.1 无降水频谱高度图型

图 5 是无降水时边界层风廓线仪探测到的多普勒频谱高度图。自右向左分别是垂直、偏南、偏北、偏西和偏东共 5 个波束的测值。该图形给出的最显著特征,一是在垂直波束中整个频谱高度图上显示的径向速度约为 $+1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,二是在同一平面上扫描的二组对称波束(偏南/偏北,偏东/偏西)从下至上每一层的多普勒频谱信号相对于 0 速度轴左右二

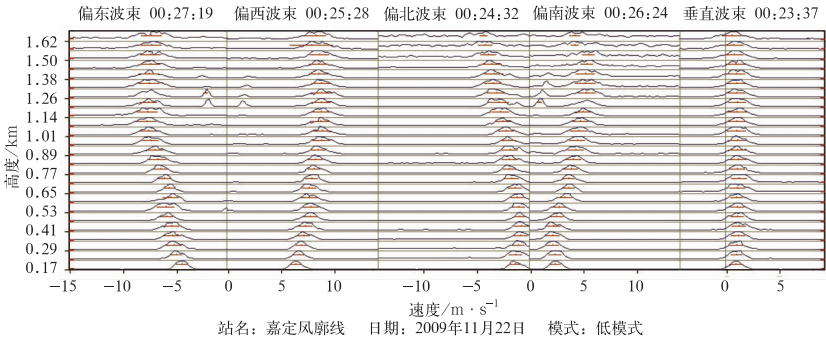


图 5 无降水频谱高度图

Fig. 5 Typical non-precipitation pattern of BWP stacked spectral plots

边基本上互为对称,出现该种对称现象的详细分析见图 2 所示。

2.2 有降水频谱高度图型

图 6 是 2009 年 11 月 09 日 17 时 05 分上海嘉定边界层风廓线仪的探测实况,这是比较典型的降水时的多普勒频谱高度图。当时距离该风廓线仪

4.2 km 和 5.6 km 处的嘉定周泾和外岗地面自动雨量站在 16 时至 17 时记录的降雨量分别达到 3.4 mm 与 5.6 mm ,17 时至 18 时的降雨量分别达到 4.6 和 8.6 mm 。该组频谱高度图的特点,一是 5 个波束中均为较大的“正”的(朝着风廓线仪)径向速度值。二是 5 波束高度图中的每一高度层上,多普勒信号的频谱较宽,其取值范围约为 $3\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且

信号外形相似,符合许多研究中指出的雨的频谱特点。三是 5 个波束中给出的频谱高度图外观形态都很相似,这表明当时在该风廓线仪探测上空出现了持续且较为均匀的降水,且雨量较大。四是从 3.94 km 高度往下到 2.81 km 高度,其间多普勒信号的谱宽变

宽,多普勒径向速度的正值变大,这些信息都表明在上述高度范围中,降水的相态等出现了改变。五是最大径向速度不是出现在垂直波束中,这种情况反映了二种可能的影响因素,即:降水的不均匀性和水平风的影响。本分析认为,主要是水平风的影响。

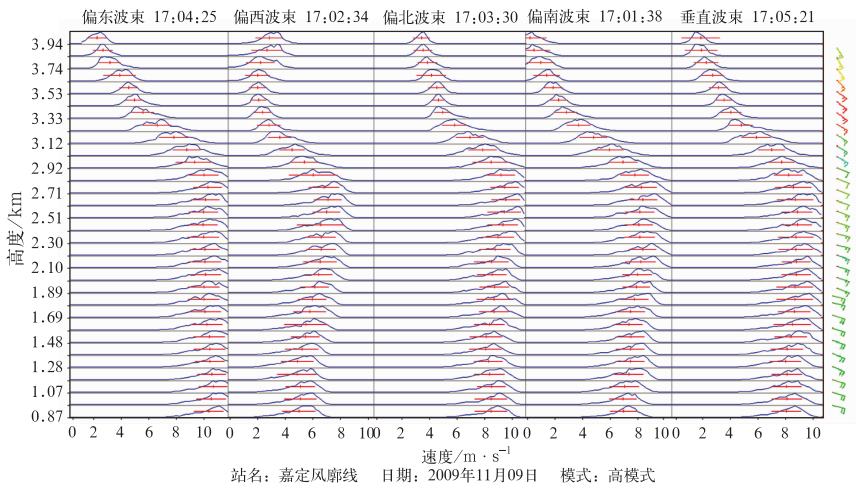


图 6 典型降水频谱高度图
Fig. 6 Typical precipitation pattern of BWP stacked spectral plots

2.3 典型降雪频谱高度图

图 7 是 2008 年初我国南方冰雪灾害天气期间上海嘉定风廓线仪在一次降雪过程中测到的频谱高度

图。从该个例可清楚地看到,降雪时风廓线仪测到的多普勒频谱高度图的整层频谱的谱宽较窄,取值基本相同,且频谱中多普勒信号部分的外形廓线很相似。无风影响时雪的下降末速度一般为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [16]。

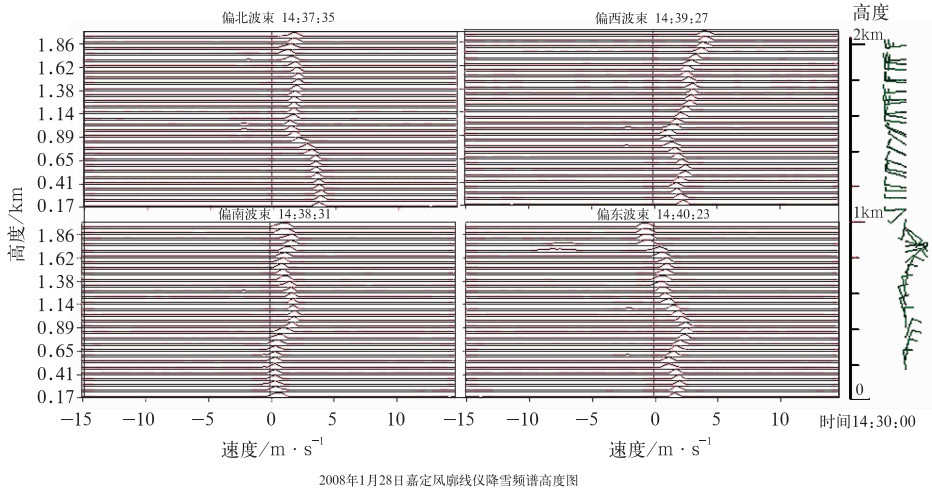


图 7 2008 年 1 月 28 日嘉定降雪时的频谱高度图
Fig. 7 Typical snowfall pattern of BWP stacked spectral plots

2.4 速度折叠频谱

图 8 是上海嘉定风廓线仪于 2008 年 7 月 2 日 15 时 37 分 56 秒至 15 时 40 分 42 秒探测到得 4 个

方向上的多普勒频谱高度图。此前上海中心气象台已于当日的 15 时 05 分发布了雷电黄色和大风蓝色预警信号。从中可以看到当时偏西波束中测到的 2.71 km 至 3.94 km 各个高度层中的径向速度已

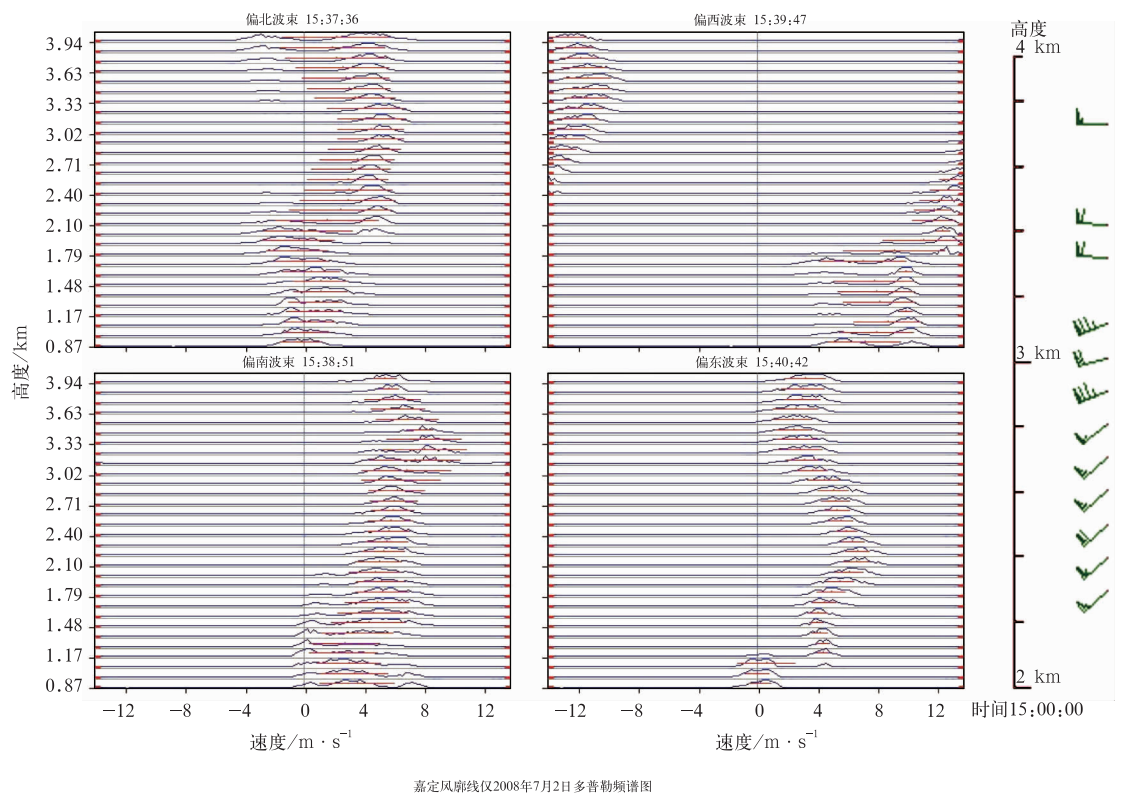


图 8 2008 年 7 月 2 日速度折叠频谱
Fig.8 Ambiguous radial velocities in BWP stacked spectral plots

经超过了 Nyquist 范围,从正值变成了负值,其数值范围为一13.91~−10.20 m·s^{−1}。若 Nyquist 范围是±14 m·s^{−1},故退模糊后 2.71 km 至 3.94 km 高度范围内实际的径向速度应该是+14.09 m·s^{−1}至+16.8 m·s^{−1}。同一时刻附近的周泾地面自动站雨量记录从 15 时至 16 时的 1 小时雨量为 3.8 mm,外岗自动站雨量计在相同时刻的测值为 3.4 mm。分析基本判定,出现径向速度折叠完全是强对流期间风雨相加所致。

2.5 地杂波频谱高度图

图 9 是 2009 年 1 月 10 日 03 时 05 分 09 秒至 03 时 06 分 53 秒上海青浦边界层风廓线仪在低模式扫描时 5 个波束受到地物杂波干扰的例子。图中从左向右依次是偏东、偏西、偏南、偏北以及垂直波束的多普勒频谱高度图。该图的特征是:在风廓线仪每一波束探测的频谱高度图中的最低几个高度层上 0 速度附近,都出现较强的回波信号,且信号的强度和速度谱的宽度变化缓慢。有时地物杂波仅只影响风廓线仪的个别波束,而非像本例中全部波束的情况。一般在频谱高度图中的地杂波信号不会自行消失,但是当测站出现较强的降水(雪),地杂波信号

会被强降水信号淹没。本图例中显示的地杂波信号一直到了 1 km 的高度层,干扰严重。但是系统的信号处理软件对出现双峰的高度层仍作出了正确的测风判断,而且 600 m 以上正确地显现出了对称探测波束的频谱高度图相互对称分布的图形。

2.6 有外界干扰的频谱高度图

图 10 是浦东凌桥边界层风廓线仪在 2010 年 8 月 9 日凌晨 02 时 11 分 23 秒偏东波束收到的一张多普勒频谱高度图。从中可看到外界干扰信号的径向速度是+5 m·s^{−1},且从 670 m 至 1630 m 各个高度层上的信号谱宽均匀。

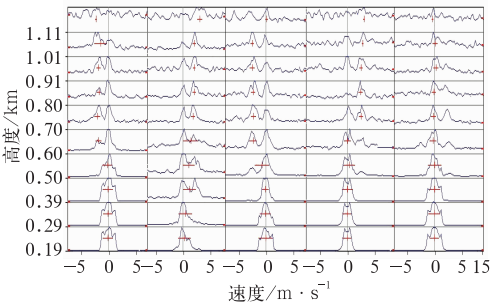


图 9 地物杂波频谱
Fig.9 Typical SSP case with ground clutter

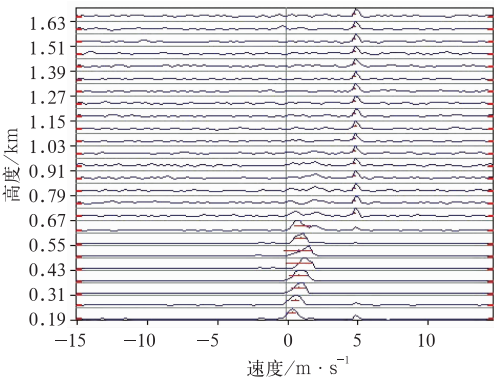


图 10 外界干扰频谱图

Fig. 10 An outlier jamming in BWP SSP

3 综合应用分析

分析和研究发现,边界层风廓线仪在线给出的多普勒频谱高度图除测风以外的综合应用潜力包含但又不局限于以下几个方面。

3.1 连续监视发现并确定降水的起始时间

在上海市青浦气象局(站号:58461)内安装的 Lap3000 风廓线仪从 1999 年 7 月开始连续运行,期间做过一次软/硬件系统性能的升级。本研究利用该设备观测的多普勒频谱高度图与青浦本站的自动站分钟雨量数据进行了详细的分析比对,发现了与本站自动雨量计分钟降水起始记录时间相匹配的“降水指示性频谱高度图”型,详见图 11。该降水指示图型的基本特点是:

- (1) 在一次高或低模式的循环扫描中,各个探测波束的多普勒频谱高度图中的信号部分基本上落在正速度区;
- (2) 各个扫描波束的多普勒频谱高度

图的信号频谱较宽且外观大致相似;(3) 径向速度取值在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或以上且最大值一般不在垂直波束中。

按以上特点,表 1 列出了从 2010 年 8—9 月期间发生的 11 次对流性降水中选定的指示性频谱高度图的首次出现时间与青浦本站地面自动站分钟雨量首次出现 0.1 mm 雨量记录的时间对照。结果表明,该降水指示性频谱图型出现的时间与青浦本站分钟雨量出现的时间吻合较好,对本站出现降水的时间有指示作用,且还有大约 0~10 分钟左右的提前量。

所以预报员只要在线从显示屏幕上发现符合上述特点的降水指示性频谱图型,就可预测本站出现降水的起始时间。但必须指出:

(1) 该降水指示性频谱高度图型目前仅是夏季出现对流性降水时初步的分析结果,对其他季节及其他降水类型的指示作用还需做进一步的深入研究。

(2) 分析研究发现,具备上述特点的频谱高度图的降水指示作用与地面自动站的分钟雨强成正比,即:分钟雨强越大则降水指示频谱高度图型就越典型,也更容易识别;雨强较小时则降水指示频谱图型不典型,在线识别较困难。

(3) 实时显示的降水指示性频谱高度图型常与图 11 有一定的差异。经常会看到有一束波的径向风为“负”值,而且各束波的频谱高度图型也不尽相同。这种现象经常出现在较小的降水或是降水的初期。此外,非典型的降水多普勒频谱高度图型的出现主要是水平风的作用结果。因为,按公式 $0.2679H$ 计算出的边界层风廓线仪波束在各个高度上覆盖区域的半径很小,如在 500 m 高度上仅是

表 1 青浦站分钟雨量起始时间与降水指示性频谱出现的时间对比
Table 1 The comparison results of rainfall commence time between co-located ground gauge's 1-min rainfall record and the SSP pattern on raining indicator

个例	上海青浦 Lap3000 降水指示性 频谱高度图起始时间	上海青浦(58461)自动站 分钟雨量起始时间	降水指示频谱与自动站 雨量记录时间差
1	2010/08/06 09:29:06	2010/08/06 09:31:00	提前 1 分 54 秒
2	2010/08/06 17:45:51	2010/08/06 17:49:00	提前 3 分 09 秒
3	2010/08/15 17:24:11	2010/08/15 17:24:00	滞后 11 秒 *
4	2010/08/26 18:39:37	2010/08/26 18:51:00	提前 11 分 23 秒
5	2010/08/27 14:24:23	2010/08/27 14:23:00	滞后 1 分 23 秒 **
6	2010/08/31 11:14:45	2010/08/31 11:22:00	提前 6 分 15 秒
7	2010/09/01 09:49:59	2010/09/01 09:51:00	提前 1 分 01 秒
8	2010/09/11 09:15:54	2010/09/11 09:22:00	提前 6 分 06 秒
9	2010/09/11 10:28:59	2010/09/11 10:28:00	滞后 59 秒 *
10	2010/09/13 07:06:52	2010/09/13 07:13:00	提前 6 分 08 秒
11	2010/09/14 11:24:40	2010/09/14 11:35:00	提前 10 分 20 秒

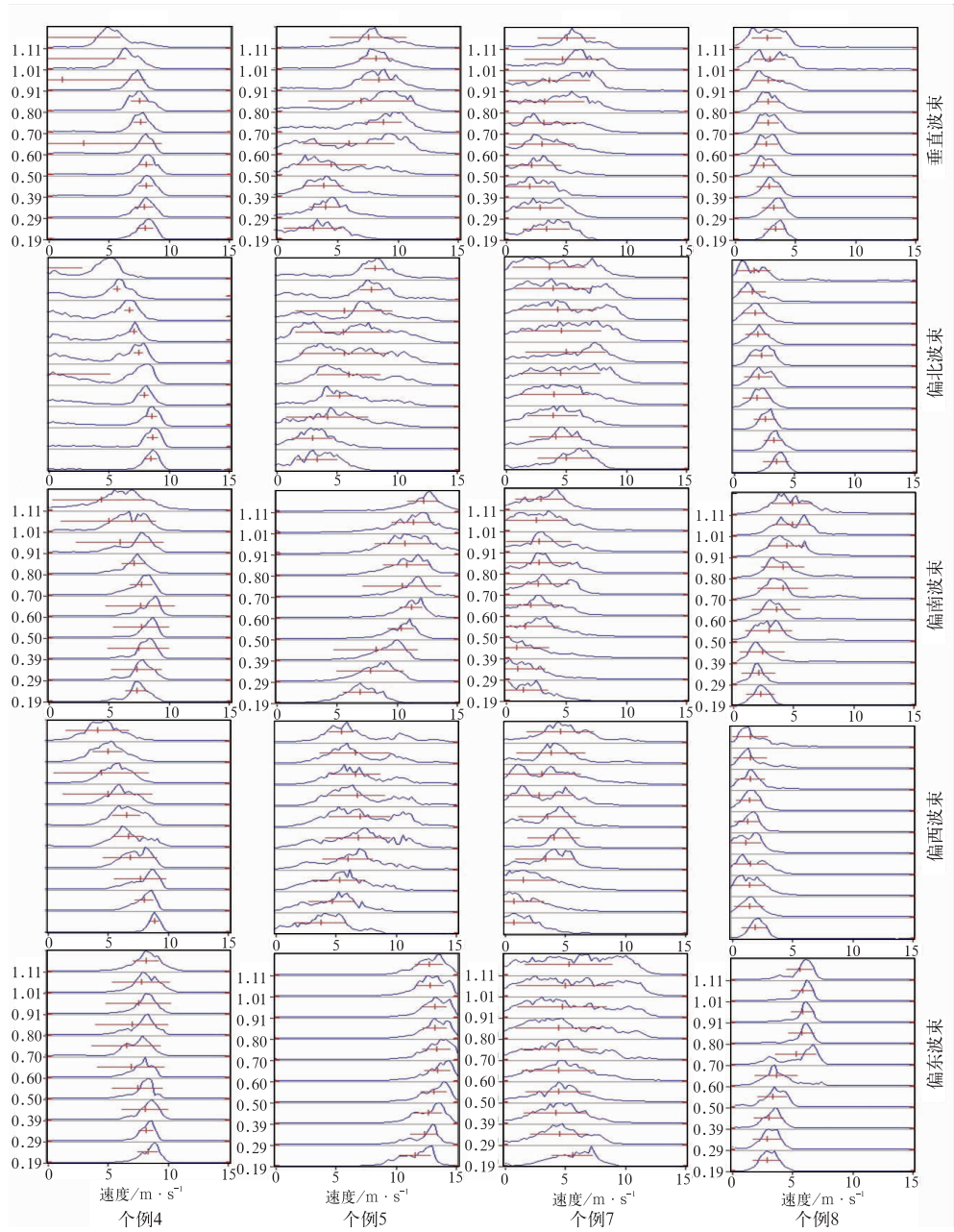


图 11 降水指示性频谱高度图型个例

Fig. 11 Typical SSP pattern cases for indicating raining commence time

半径约为 134 m 的一个圆,故基本上可以认为在较短的时间、较小的空间中测到得降水是均匀的。

(4) 有时出现了典型的降水指示频谱高度图型,但地面雨量计的分钟雨量隔了很长时间后仍无降水记录。其原因可能是出现了雨幡现象,否则就是地面雨量计出现了故障。所以降水指示性频谱高度图也可检验地面雨量计是否正常。

(5) 本文的降水指示频谱高度图型均是低模式扫描时的频谱图。表 1 中有 * 号的个例表示其滞后

主要是低模式前面高模式扫描的占时给耽误的。而 ** 号则是其他的原因。

(6) Lap3000 风廓线仪 5 波束运行时,在线分析的最长时间为 5 分钟。对降水指示性频谱高度图型的准确判别和把握有一个熟能生巧的实践过程。

3.2 利用频谱高度图在线确定测站上空水平风向与风速

假定该边界层风廓线仪安装后的 4 个斜波束分

别指向 0° 、 90° 、 180° 和 270° , 结合气象观测规范中确定的 16 个风向方位, 根据实时提供的多普勒频谱高度图, 分无降水和有降水两种情况, 即可在线分析测站上空的水平风向或者风速。首先在无降水天气条件下, 直接用风廓线仪实时给出的频谱高度图 (图 1), 进行风向估测。其方法是: 出现“正”径向速度值的波束即是水平风的来向, 即: 东风 (0° 至 180°)、西风 (180° 至 360°)、南风 (90° 至 270°) 或是北风 (270° 至 90°)。如图 1 中显示的是偏东波束的频谱, 且为“负”径向速度值, 即可得出是西风。至于是吹西北风还是西南风, 则需用另一组对称波束中的值来判定。在图 1 例中的另一对共面波束 (图略) 中, 偏南波束为“正”值, 故为南风, 最终可判定是西南风。至于是西风的成分大还是南风的成分大, 则比较 2 个“正”值的大小, 值大表示风向分量也大, 反之亦然。其次有降水时, 由于边界层风廓线仪的探测高度低, 波束覆盖范围较小, 所以可以认为波束覆盖区域里的降水在水平方向满足均匀性假定。具体分析判断的方法是: 在线查看屏幕上实时给出的 5 幅多普勒频谱高度图并且直接比较选定层上的径向速度值的大小。此时一般会出现以下几种情况: (1) 5 个波束中的径向速度取值大小基本相同, 且垂直波束中的值最大, 这表明此时测站上空风速较小, 风向不能在线确定; (2) 在两组对称波束里, 其各自对称波束的径向速度都不相同, 表示可排除 0° 、 90° 、 180° 、 270° 风向; (3) 若有一组对称波束的径向速度相同, 另一组对称波束中径向速度大的斜波束, 即是水平风的来向。

利用以上方法, 对图 6 中的频谱高度图例进行分析, 其结果是: 最大径向速度不在垂直波束中, 偏南波束中的径向速度值比偏北波束大了约 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而偏东波束的径向速度值比偏西波束中的值明显大了约 $4 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即可实时确定从 $0.87 \sim 2.92 \text{ km}$ 高度范围里的水平风向基本上为东东南 (ESE)。

同样从图 7 的降雪频谱中也可分析得出 890 m 高度以上吹西风, 而以下则吹北风。因为, 若将这 4 幅图均以 890 m 为界分成上下两部分, 则可发现右边这对对称波束的频谱高度图形在 890 m 以上基本是互为对称的, 只是对称轴不在 0 速度分界线上, 而此高度以下的频谱图形与取值大体相似; 而左边这两幅频谱高度图在 890 m 以上和以下部分的情况刚好与右边两幅图完全相反, 即, 在此高度以上部分对称波束的频谱图形与取值大体相似, 以下部分

的频谱图形互为对称, 但对称轴也不在 0 速度分界线上。故此高度以上的风向取决于右边对称波束两幅图的上半部分, 而此高度以下的风向取决于左边对称波束两幅图的下半部分。

图 8 是短时强对流期间, 径向风速出现折叠的个例。按照上述方法分析可知, 在观测时刻的高度范围里, 主要是吹很强的西南风。因为, 南/北对称波束的频谱高度图形外观基本相似, 只是径向速度取值偏南波束明显大于偏北波束; 而偏西波束中 2.4 km 以上各层的径向风出现折叠, 分析认为这是风雨叠加后造成的, 且整层径向速度取值明显大于偏东波束。

在图 6~8 的右侧给出了对应或相近时刻的风羽剖面图的测风廓线。显然, 验证了前面的分析是正确的。所以在无降水和有降水天气下, 掌握上述分析方法, 在线分析屏幕上实时给出的多普勒频谱高度图至少可提前约 $(T-5)$ 分钟, 即能大致了解测站上空风向, 而不必再等到风羽时间剖面图产品生成以后再看到水平风廓线的实际情况。T 是风羽时间剖面图上生成一条风廓线的时间间隔。

在降水中测量时, 初步估算径向风速分量的公式: $(V_d - V_x)/2$ 。其中 V_d 和 V_x 分别为对称波束频谱高度图中径向速度大的值和径向风速小的值。需要指出, 用此公式计算出风速分量后, 在线再计算合成风速需要花一些时间。但是若出现上述情况 (3), 即有一组对称波束的径向速度相同, 则将另一组径向速度用上面公式的计算值乘以 $3.8637 \approx 4$ 即是水平风速。

3.3 给出了确定降水云底高度和 0° 层高度范围的信息

在雷达定量测量降水中对降水云底高度和 0° 层高度范围的判定是非常重要的, 为此许多专家已经做了大量的有成效的工作^[17-19], 包括各种自动算法等。对图 6 的降水频谱高度图的分析还发现, 该图出现了可以确定上述两个参数的线索。降水云底的高度应该定在出现无降水频谱的高度上, 可惜的是该边界层风廓线仪的探测高度太低, 高模时其频谱高度图的上部边界仅为 3.94 km , 从图上无法直接确定。但还是给出此时降水云底的高度应在此高度以上的信息。对于确定 0° 层的高度范围, 从该图得到的信息是, 在 $2.92 \sim 3.94 \text{ km}$ 高度范围里, 5 幅频谱图上均出现了径向速度、谱宽从上下有一个明显变大的过程。这种现象与降水经过 0° 层高度

范围的物理现象几乎是一致的,即:水凝体在下落过程中,在 0° 层附近由固态变为液态后,其雨滴的下降速度、频谱宽度以及反射强度都会出现突变,这是多普勒测雨雷达判定 0° 层的依据。图 6 中个例与此物理过程是比较一致的,值得今后进一步深入做这方面的工作。

3.4 验证测风数据并解释特殊现象

事实上边界层风廓线仪运行时屏幕上实时显示的多普勒频谱高度图形千姿百态,研究发现掌握并且学会在线分析这些频谱高度图形,还可以解决以下问题。

(1)提前了解和掌握风廓线仪测站上空水平风的垂直切变

无降水时,测站上空水平风出现垂直切变的频谱高度图的特点是,至少有一组对称波束的径向风的取值随高度跨越 0 速度区,出现由“正”变“负”或是由“负”变“正”的情况。图 12 是一个典型的例子,从中可看到在 2.2~2.3 km 高度以上,两组对称波束的径向速度的取值和符号与此高度以下完全相反,即从原来的“正速度”变成了“负速度”且反之亦然。同时此高度以上的频谱图显示的径向速度的大小也出现了从 $0\sim1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $4\sim5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的突变。结合图 2 进行分析,两组对称波束的频谱高度图中的径向风在某一高度层上出现“符号”和“大小”上的突变至少在线提供了两方面的信息:其一是在上述高度范围里水平风向的改变为 180° ,其二是在相邻的高度层之间水平风速梯度很大。一般在频谱高度图上常常可看到一组对称波束出现径向速度有改变取值符号的现象,所以通过监测频谱高度图的整体特点即可及时了解测站上空水平风发生切变现象。图 14 是嘉定边界层风廓线仪与上述频谱高度图相对应时间的风羽时间剖面产品。从中可看到在上述频谱高度图中出现的风切变现象明显地反映在 02 时风羽时间剖面图对应的高度上(小红圈),即下层东北风 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而上层为西南风 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2)验证和解释风羽时间剖面图上怪异的风廓线结构

边界层风廓线仪的风羽-时间-高度剖面图目前应用较为广泛。通常应用此产品可以做单站(点)的天气学分析,并且发现各种天气系统的移动与演变,为天气监测预警/预报服务带来益处。但是对初学者而言,常常对该产品中奇特怪异的风廓线结构而费解。其中包括:风速梯度突变、风向垂直切变以

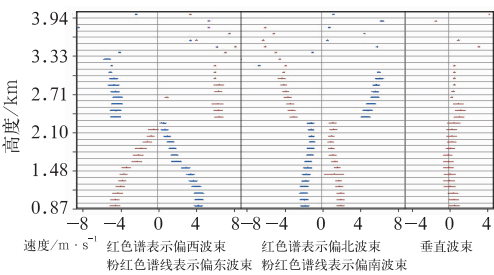


图 12 测站上空有风切边的频谱高度图
Fig. 12 Wind share SSP in BWP control and display window

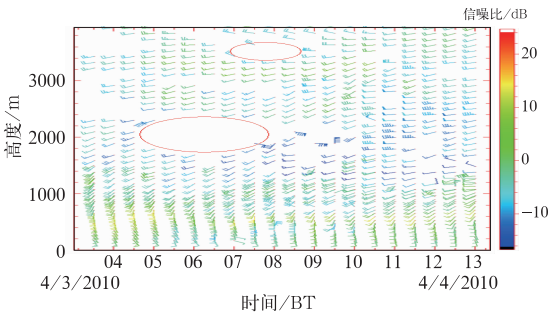


图 13 风羽剖面图上的“空洞”个例
Fig. 13 A typical hollow case in BWP products

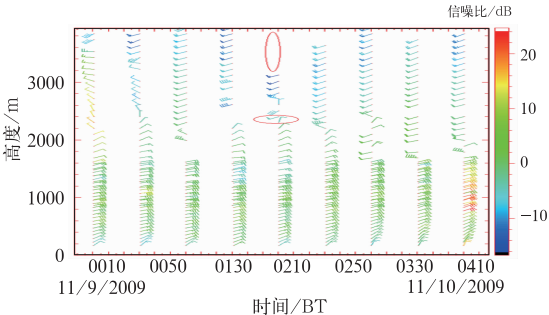


图 14 风切变个例
Fig. 14 The other hollow case in BWP products

及测风数据的“空洞”现象等。在许多情况下利用风廓线仪的多普勒频谱高度图,可以验证和解释风羽高度剖面图上的这些现象,为测风数据质量控制提供可靠依据。

本文将例举风羽-时间-剖面图上比较常见的“空洞”现象。其表现形式见图 13 中两个圈所示。即在一个时次或是多个时次给出的水平风廓线的高度覆盖范围里,其下部和上部均有测风资料,而中间却无测风数据存在,在时间高度剖面图上形成了一个无风羽的“空洞”。这种现象也常常出现在急流区或是其边缘,高空槽后空气干燥的平流区域里。造成这种空洞现象的直接原因是,在形成“空洞”的高度范围内大气平稳,湍流较少,基本上无信号可以反

射回来。图 12 中的频谱高度图基本上也对应反映了 2.6 km 以上湍流较少,气流平直。因为可明显看到垂直波束的谱宽从上述高度起变得很窄(小),而二组对称波束的频谱高度图的谱宽从 3 km 开始也突然变窄,恰好与图 14 中 02 时 3 km 以上的测风资料缺失现象(见椭圆)相对应。结合并参考前后两个时次的风廓线,也明显反映出了在此高度层以上的信号很差。

3.5 诊断系统故障与检验软件性能

倘若在线发现实时显示的共平面波束的频谱高度图形明显不对称或有较大的偏差,则考虑有以下几种可能的原因:

(1) 波束指向控制有问题,使得对称斜波束偏离天顶的角度不相一致,从而造成相同的水平风速在不同倾斜角的斜波束上投影矢量的大小产生偏差,使得整个频谱高度图中各个高度层上径向速度的绝对值出现明显误差。

(2) 当多普勒频谱高度图在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度附近有地物杂波干扰时,也会出现共面波束频谱高度图不对称的现象。但在发生这种情况时,一般频谱高度图不对称仅出现在 500 m 以下最低的几个距离门上,也有地杂波影响严重时会超过此高度的情况。外界电磁干扰也是原因之一。

(3) 共面对称波束也可能恰好探测到水平方向上风速不均匀且不连续的空间区域。如,在偏东波束中有降水,而在偏西波束中则没有降水,这种情况往往出现在夏季低空的对流边界上。又如,在共面对称的两个波束中某一个出现了类似于雨幡的降水现象。

(4) 天线安装的水平精度不达标,也是造成波束不对称的原因之一。由于垂直波束指向倾斜,从而导致斜波束仰角出现误差。有研究^[20]指出,垂直波束若有 0.05° 的倾斜,则会导致 $1.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直测速误差,从而引起 El Nino 研究的噪声。

边界层风廓线仪系统处理软件的优劣,也可直接从多普勒频谱高度图中进行验证。如从图 5 中可看到,偏东波束在 1260 m 高度以及偏南波束在 1200 m 处径向速度值的选择,在频谱中出现多个峰包的情况下,风廓线仪的应用算法出现了明显的误判现象。如果这种误判较多,则系统软件就需要改进提高。

此外,在冬季强冷空气过境后,大气均处于强冷锋过后的下沉空气中,此时是用多普勒频谱高度图

去验证风廓线仪的两组共平面探测波束测值对称与否的良机。

3.6 方便移动/固定边界层风廓线仪选址

移动边界层风廓线仪在野外开机后查看低模式时的频谱高度图,若与图 9 的情况相同,表示此处地杂波干扰严重,移动边界层风廓线仪应另外再选址。通常移动边界层风廓线仪的天线较小,波束较宽,很容易受到地杂波的干扰。所以,选择周围空旷无遮挡的地点,是进行有效观测的基础。在安装固定的边界层风廓线仪时,先暂时不固定天线,开机查看低模式时的频谱高度图,以判定选址处的地杂波情况。可直接调整天线安置的方向和位置,或者将该风廓线仪移动到新的观测位置,再查看频谱高度图上的地杂波干扰是否减轻或者消失。

4 增强边界层风廓线仪探测性能的建议

通过以上章节的分析,可清楚看到,除了探测测站上空水平风的垂直廓线以外,边界层风廓线仪确实具有实时获取对单站天气监测、预警和服务所需气象信息的潜力。

自 20 世纪 90 年代以来,上海市气象局的研究结果与实践经验证明,边界层风廓线仪可以在一般气象观测站选址设台^[21],进行连续的大气探测。为了使其成为普通观测站精细化气象监测和预报的有效工具,本研究提出以下建议:

(1) 重新设计边界层风廓线仪系统的显示界面,至少可同时显示最多五个波束的频谱高度图,且各个波束的多普勒频谱高度图可以灵活编排,方便在线分析。

(2) 将斜波束 75° 仰角改为 75.5° 。因 $\cos 75.5^\circ = 1/4$,使得用径向风值去反算水平风分量时则乘以 4 即可。方便在出现降水时直接用频谱高度图估算水平风速。

(3) 边界层风廓线仪的运行扫描采用不同的波束数配置。无降水时采用四波束,以增强采样时间密度,提高测风精度^[22];五波束配置可以改善有降水时的测风能力,还可以实现风廓线仪测风精度的比对和数据质量控制^[23]等。

5 小 结

(1) 利用上海市气象局存档的边界层风廓线仪

频谱资料,给出了无降水、有降水、降雪、速度折叠、地物杂波、外界信号干扰共 6 种典型的边界层风廓线仪多普勒频谱高度图型作参考。

(2) 边界层风廓线仪在线显示的多普勒频谱高度图是一种高时间分辨率的实时探测资料,它不仅可以获取测风等非实时产品所需要的各种数据,而且还可以用本文研究的方法在线获得许多其他潜在的实时气象信息的能力,其中包括:连续监视发现并确定降水的起始时间;用降水时的频谱高度图在线确定测站上空水平风向与风速;估计降水时的云底高度和 0°层的高度范围;验证测风数据并且解释风羽图上的特殊现象;诊断系统故障与检验软件性能以及帮助移动/固定边界层风廓线仪选址。这些潜在的实时气象信息对单站天气监测/预警和开展精细化天气预报/服务是十分有用的。

(3) 文章提出,深入开发边界层风廓线仪在降水天气系统中的高时间密度的探测能力,使得边界层风廓线仪可以晴雨两用,对今后将边界层风廓线仪配备到一般气象观测台站,提高单站天气监测和精细化天气预报服务综合能力有着非常重要的意义。为了实现这一目标,文章对当前商业化的边界层风廓线仪提出了具体的改进意见和建议。

本文的研究和得出的结论是初步的,还需要做大量深入细致的工作。文章希望通过对上述内容的介绍能够使大家加深对边界层风廓线仪和其频谱资料的理解,并且开展进一步的应用研究与相关的技术讨论和交流。相信这对今后拓展和加强边界层风廓线仪资料在气象业务上的应用会有所帮助。

参考文献

[1] 吴志根. GMS 展宽云图流水线实时处理系统设计[J]. 大气科学研究与应用,1995, 5: 87-95.

[2] Pamela L Heinselman, David L Priegnitz, Kevin L Manross, et al. Rapid sampling of severe storms by the national weather radar testbed phased array radar[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23:808-824.

[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[J]. 应用气象学报,2002,13(3): 330-338.

[4] 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.

[5] 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]. Bullitin of the American Meteorological Society,1995,76(10):1717-1739.

[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[J]. 应用气象学报,2009, 20(4): 465-470.

[7] 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.

[8] Hildebrand P H, Sekhon R S. Objective determination of the noise level in Doppler spectra[J]. J Appl Meteor,1974, 13: 808-811.

[9] Ralph F M, Mazaudier C, Crochet M. Doppler sodar and radar wind profiler observations of gravity wave activity associated with a gravity current[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 444-463.

[10] David A Merritt. A statistical averaging method for wind profiler doppler spectra[J]. Atmos & Oceanic Tech, 1995,12:985-995.

[11] Strauch R G, Merrit D At, Moran K P, et al. The Colorado wind-profiling network. [J]. Atmos & Oceanic Tech, 1984, 1: 37-49.

[12] 吴志根,宋声平. 多普勒天气信号和频谱的计算机模拟试验[J]. 大气科学研究与应用,1993, (4): 50-56.

[13] Vaisala Oyj. Software Manual LAP-XM Rev. 2. 3. 0. 0.

[14] Vaisala Oyj. Vaisala Wind Profiler LAP-3000 User's Guide. April 2005.

[15] 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.

[16] Gossard E E, Strauch R G. Developments in Atmospheric Science——Radar Observation of Clear Air and Clouds[M]. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc, 52: 153.

[17] 吴志根,杨礼敏,王勤典,等. 移动 X 波段双线偏振气象雷达及其关键技术分析[J]. 气象,2010,36(8):126-133.

[18] 万蓉,郑国光,王斌,等. 利用多普勒雷达速度资料检验三维中小尺度模式流场[J]. 气象,2009,35(1):3-8.

[19] 张志强,刘黎平,王红燕,等. 华北区域四部雷达探测强度与定位一致性分析[J]. 气象,2008,34(9):22-27.

[20] Mercedes M Huaman, Ben B Balsley. Long-term average vertical motions observed by VHF wind profilers: The effect of slight antenna-pointing Inaccuracies[J]. Atmos & Oceanic Tech, 1996, 13: 560-569.

[21] 吴志根,沈利峰. 边界层风廓线仪应用中存在的若干问题[J]. 高原气象,2010,29(3):801-809.

[22] Srinivasa Rao 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.

[23] 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.