

大气廓线综合探测系统及其应用技术

张 勇 王 欣 徐祥德 卞林根

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘要 介绍了大气廓线综合探测系统——风廓线仪与 RASS 雷达的工作原理,并以具体实例来说明这种探测技术在高空探测领域中的广泛应用。它可以被用来推算湿度廓线,探测锋的热动力结构与垂直风结构,诊断热带地区行星边界层和降雨云系统。通过对中日科技人员 2002 年夏季在安徽省肥西县进行的中尺度天气观测试验资料分析,阐述了用风廓线仪和 RASS 雷达资料反演 0.2~2.2 km 高度范围内湿度廓线的方法。

关键词 大气廓线仪 RASS 大气边界层 湿度廓线

引言

世界各地常规气象站测量高空风、温度、湿度一般都是通过释放探空气球作为大气流体的示踪物进行探测的。虽然这种探测的高度分辨率和探测的精度较好,但是探测的时间分辨率却只是在几小时的时间间隔内是最好的。为了提高探测的时间分辨率,一些国家从 20 世纪 70 年代末期开始相继研制开发出了新一代遥感探测系统——风廓线仪。到目前为止,美国、日本等国已在其国内大范围部署风廓线仪组成业务运行网,并与 RASS(声雷达)结合起来,对大气中的风、温度和湿度进行连续地监测,为气象预报、大气环境监测及大气探测的研究提供良好的保障。

我国近年来也在大气廓线仪的开发利用上作了一定的研究,1989 年中国气象科学研究院研制了 UHF 多普勒风廓线仪,并进行了业务试验。在实际业务试验中,大气廓线仪和 RASS 系统可以很好地捕捉到风、温、湿的细微变化,并反映出一些中小尺度系统的结构特征。本文就大气廓线仪综合探测系统的工作原理及实际应用作了简介,为进一步应用大气廓线仪资料提供参考。

1 大气廓线仪概述

1.1 风廓线仪

大气中存在着各种不同尺度随时间变化的湍流,它们能引起折射指数的不规则变化,对无线电波产生散射作用。风廓线仪向天空发射无线电波,并接收它的回波,这些回波是由于大气湍流在空中不同层面引起的电波折射而产生的,通过对回波的处理和分析就可以获得湍流的多普勒系数和强度系数,从而反演出湍流强度、运动方向和运动速度随高度的分布。大气湍流的运动是随背景风的运动而运动的,因此,如果获得了大气湍流的多普勒速度和方向,同时也就获得了风的多普勒速度和方向。

风廓线仪可以获取大气中高精度的各种常规物理量,它的探测高度在近地面到 6 km 的范围内,高度分辨率可以达到每层 50 m 左右,时间分辨率可以小到大约 3 min。

边界层风廓线仪一般由 4 个部分组成,以日本三菱公司出产的 WPRI 300 风廓线仪为例来说明:

- (1) 天线:天线阵分为 4 块,每块上各有 12×12 根外部用树脂管密封的细铜管排列构成。
- (2) 模块箱:内部有 24 个模块分别控制 24 组天线。
- (3) 收发装置:①向模块箱里的激励单元传送发射信号,并对各波束进行控制。②从模块箱接收观

“中日合作高原及周边地区水循环过程观测试验研究”项目(2003CB716806)资助

作者简介:张勇,男,1976 年生,硕士,主要从事暴雨过程大气结构的分析研究

收稿日期:2003 年 11 月 17 日;定稿日期:2003 年 12 月 15 日

测信号,并检测出信号的相位。相位信号经过模数转换、脉冲压缩、相干累积、FFT 处理、非相干累积等处理后,得到多普勒系数。通过多普勒系数计算出风速和风向系数。③在收发装置中还产生这个系统的时间信号,用于系统的时序控制。

(4) 数据处理单元:主要是用计算机处理收发装置送来的数据,以图形方式将处理后的产品显示出来,同时保存数据文件。

1.2 无线电探声系统

风廓线仪上加装无线电探声系统(RASS)后,可以测量大气层的有效温度。RASS 雷达系统通常由 4 个声源组成,分布在廓线仪天线阵的每一边并垂直向上发射声波。廓线仪把声波作为目标接收并处理反向散射,同时测得传播速度。由于声速与大气温度有很好的对应关系,所以可以通过廓线仪测得的声速来得到有效温度廓线。

表 1 风廓线仪(WPR1300)与无线电探声系统(RASS)的主要技术参数^[1]

WPRI 300		RASS	
发射频率	1357.5 MHz	工作频率	2~3 kHz
脉冲宽度	0.67, 1.00, 1.33, 2.67 μ s	波束宽度	10°
脉冲重复频率	10, 20, 40 kHz	口径	48°(抛物面反射体),指向天顶
峰值功率	2 kW	SPL(口径面上)	140 dB
最大测量高度	3~6 km	谱分析点数	2048
最小测量高度	300 m 或更小	脉冲重复周期	20 μ s
风速测量范围	± 15 m/s 或更大(在波束方向上)	高度采样范围	100 m 至 1.5 km
最小可测风速	0.2 m/s	最低测量高度	100 m
		最高测量高度	1~2 km
		最小垂直分辨率	60 m
		测温精度	1 °C

2 大气廓线综合探测系统观测试验应用

大气中气象扰动的特性是由各种各样的参数决定的,比如风、温度和湿度,它们分别对动能、感热和潜热做出贡献。如果这些参数在时间和高度上能够得到精确的测量,对于中尺度天气现象的研究是非常重要的。而风廓线仪能够探测三维风速场,无线电探声系统(RASS)又能够获得有效温度廓线。通过 RASS 雷达获得的温度廓线可以连续地估算出湿度廓线,从而能够对对流层中水汽在大气运动中的作用进行更深入的研究。下面简要介绍风廓线仪在

实际中的应用。

2.1 湿度廓线推算

大多数水汽都集中在对流层,它们通过蒸发和凝结传输潜热,在大气热动力学方面扮演着重要的角色。然而到目前为止,在实际应用中能够对湿度廓线进行连续探测的遥感技术仍然没有得到普及。

湿度廓线常规上是用探空气球带动的无线电探空仪来测得。这种观测的高度分辨率和测量精度都很好,但是 Kley 等人指出它的时间分辨率最好只是几小时^[2]。风廓线仪探测到的扰动回波的音量反射率(η)与折射指数梯度(M)密切相关,而大多数情况下折射指数梯度在低层大气中依赖于比湿的高度梯度(dq/dz),从而 η 与 dq/dz 密切相关。1997 年 Hocking 和 Mu 通过对比风廓线仪与无线电探空仪的观测值研究了这种相关性^[3]。Furumoto 和 Tsuda 在 2001 年研究 RASS 雷达得到的高分辨率温度廓线时,也发现了 M 对 dq/dz 有很强的依赖性^[4]。Gossard 等人通过 M 和 dq/dz 之间的相关性,把雷达回波与风廓线仪的观测资料相结合估算出了 dq/dz 的高度结构,又在 1999 年通过把可降水的水汽(PWV)资料与 GPS 观测资料相结合在 0.5~2.0 km 高度上重新得到了 q 廓线^[5,6]。

Tsuda 等在使用 RASS 雷达进行湿度观测试验中把获取到的 q 廓线与同步无线电探空仪获得的湿度数据进行了比较。发现雷达得到的湿度廓线(q_r)的高度结构与无线电探空仪得到的湿度廓线(q_s)有很好的 consistency。在 1.5~7.5 km 范围内, q_r 与 q_s 的差为 1.0~3.0 g/kg。RASS 雷达导出的湿度有一个典型的 1~1.5 h 时间尺度的波动,而这种波动是探空仪所不能测得的。GPS 估测的 PWV 代表了 RASS 雷达周围区域的平均值,而 RASS 雷达只是在其上空小于 10°天顶角的狭长面积内观测 PWV。

2.2 锋面热、动力结构与垂直风结构探测

Benjamin、Simpson 和 Britter 等人分别在 1968 年和 1980 年研究了锋面与重力流的关系时发现,锋面是重力流的一种实例,大气中基本重力流动力学过程一般发生在范围很大的天气现象中,包括冷锋和海风^[7,8]。在早期对锋面运动结构和它与环境交互作用的研究中,科研人员使用了各种的探测技术,其中 Charba 和 Goff 分别在 1974 年和 1976 年使用观测塔数据进行了研究^[9,10], Wilson 和 Wakimoto 分别在 1986 年和 1982 年把多普勒雷达应用在这方

面进行研究^[11,12],同时期 Seitter 和 Droege meier 等人对这种重力流现象进行了数值模拟试验^[13,14]。在美国, Martner 等人的一项研究指出使用高时间分辨率的 X 波段雷达在垂直方向可以直接测得锋内的垂直风场^[15]。

阵风锋面动力结构的观测研究受观测塔高度、多普勒雷达和探空资料样本有限性的限制。May 等人在试验中使用多普勒雷达监测阵风锋面的同时,又通过风廓线仪与 RASS 雷达连续地监测温度和垂直速度。把获取的高时间分辨率(约为 23 s)和高度分辨率(约为 100 m)的有效温度、垂直运动与雷达反射率资料、地表面观测资料、多普勒雷达观测资料结合起来,对阵风锋面结构的温度结构、垂直速度场和运动学特征进行更深入地研究^[16]。

2.3 诊断热带地区行星边界层和降雨云系统

低层大气风廓线仪系统(LAWP)能够以高时间分辨率和高度分辨率对行星边界层(PBL)高度进行连续观测。为了详细地研究热带地区的风、扰动和降雨云系统,1997年8月日本和印度的科学家在印度的 Gadanki 地区使用 LAWP 进行了观测试验,同时又使用其它风廓线仪系统进行同步观测(两者的距离为 200 m),来检验 LAWP 得到的数据的可靠性和连贯性^[17]。在 1998 年又进行了为期 3 个月的边界层风廓线仪和声雷达风测量的对比试验^[18]。试验中充分显示了 LAWP 和 MST 雷达的重要性,LAWP 在 Gadanki 地区的使用,提高了对行星边界层的了解和对此区域的热带降雨云系统的诊断。Garratt 和 Clifford 等人分别在 1992 年和 1994 年通过 LAWP 获得的高时间和高度分辨率的三维风速矢量对 PBL 作出了更细致的描述^[19,20]。

UHF 风廓线仪主要是用来测量风,但是 Carter、Ecklund 和 Gage 等人在试验中使用 UHF 风廓线仪进行了降水测量^[21~23]。对亚洲季风来说,Deccan 高原是一个关键区。而高原上的 Gadanki 地区对于研究热带降水的分布是一个理想的区域。LAWP 风廓线仪/MST 雷达与雨滴测量器结合起来能提供降雨强度的分布特征。

LAWP 观测所获得的降雨云系统垂直结构可以直接识别光亮带和层状云降水。中尺度对流系统可以通过融化层上的扰动来识别,而 LAWP 能够清楚地分辨出是否有融化层的存在,同时它可对层状云降水和对流性降水加以区分。让 LAWP 风廓线

仪与 UHF 风廓线仪在试验中同时运行,把两种廓线仪的观测结果作对比,发现它们有很好的 consistency,而 LAWP 风廓线仪和 MST 雷达观测数据的对比中,风速的均方根误差大约为 1.5 m/s。

3 2002 年中日合作大气廓线探测现场试验

CEOP(协调加强观测期)计划的主要目标之一就是使用各种卫星和地面观测系统研究与亚洲季风有关的水循环问题。2002 年夏季,中国气象科学研究所和日本科研人员把低对流层雷达(LTR)安装在西藏那曲地区进行高原探测试验。

在探测试验阶段,在安徽肥西县(117.15°E, 31.7°N)也安装了 LTR-RASS 系统,从 2002 年 5 月 28 日 10:30(北京时间,下同)到 5 月 29 日 10:30, LTR 进行了连续观测。这个试验是 CEOP 计划的一部分。风廓线仪每隔 1.5 min 可以获取一次水平和垂直风速廓线、扰动回波强度和有效温度。为了避免对周围居民的噪声污染,5 月 28 日 21:30 到 5 月 29 日 9:30 降低了超声波的发射功率使仪器的工作效率大为降低,这段时间并没有获得 RASS 温度资料。在 LTR 雷达附近每隔 3 h 释放一个 GPS 探空仪(Vaisala RS80-15G),同时也通过 GPS 接收器监测可降水汽(PWV)。在 5 月 28 日 10:00~19:00 到 5 月 29 日 07:00~10:00 在 160 m 高度处放置了系留汽艇来监测温度、气压和湿度。但是由于每隔 1~2 h 就要把系留汽艇放下来换电池,所以数据没有连续记录。通过系留汽艇获取的数据作为边界条件可以从接收到的晴空大气回波强度中连续估算出 0.2~2.2 km 范围内的湿度廓线。

这种估算湿度廓线方法最早是 Tsuda 等在 MU 雷达上使用的^[24]。MU 雷达探测到的扰动回波反射率(η)与折射指数梯度(M)密切相关,而 M 在低层大气中依赖于 dq/dz ,从而 η 与 dq/dz 密切相关。Hocking 和 Mu 通过对比风廓线仪与无线电探空仪的观测结果研究了这种相关性^[25]。Furumoto 和 Tsuda 研究 RASS 雷达得到的高分辨率温度廓线时,发现了 M 对 dq/dz 有很强的依赖性^[26]。Gossard 等通过 M 和 dq/dz 的相关性把雷达回波与风廓线仪的观测资料相结合估算出了 dq/dz ,又在 1999 年通过把可降水汽(PWV)资料与 GPS 观测资料相结合在 0.5~2.0 km 高度上重新获取了湿度廓线^[27,28]。

为了使湿度廓线监测在任何气象条件下都能有较好的时间和高度分辨率,日本科研人员开发出了一种新的雷达遥感技术,它通过晴空大气回波的一些特性来连续地监测湿度廓线。Tsuda 等利用折射指数梯度(M)与 Brunt Vaisara 频率平方(N^2)之间的相关性,从 RASS 雷达的观测值中估算出了 1.5~10 km 上的 q 廓线^[24]。他们通过把 RASS 雷达数据与补充的观测资料(比如由 GPS 获得 PWV 和无线电探空仪廓线)结合起来,解 q 沿高度 z 方向的一阶微分方程可以推导出水汽混合比的廓线。再参考一些补充的测量手段,比如无线电探空仪数据和 GPS 无线电信号传播延迟描述的可降水汽(PWV)中获得的 q 廓线。

$$q(z) = \theta^2 \left| \int_{z_0}^z \theta^{-2} \left[1.65 \frac{T^2}{p} M + \frac{1}{7800} \cdot \left| \frac{dT}{dz} + \Gamma \right| dz + \frac{q_0}{\theta_0} \right] \right| \quad (1)$$

$$|M| = B\varepsilon^{-1/3} F^{1/2} \eta^{-1/2} N \quad (2)$$

$$\varepsilon = A^{-3/2} \sigma_{\text{turb}}^{3/2} N \quad (3)$$

$\Gamma = 9.8 \text{ K/km}$ 是干绝热温度递减率, θ 是位温,边

界条件为: $q(z_0) = q_0, \theta(z_0) = \theta_0$ 。

垂直风速和 RASS 温度是估算湿度廓线的主要参数。图 1 是试验期间 LTR-RASS 获得的有效温度廓线与对应探空数据的对比。从左图中可以看到 2002 年 5 月 28 日 16:21~16:51 期间 RASS 雷达获取的温度廓线与 16:36 发射的探空仪观测结果的对比,右图可以看出两者有效温度差在 0.5℃ 范围内。探空仪与 LTR-RASS 的另外 5 个对比试验中平均偏差也小于 1.0℃,仪器探测温度的高度范围在 0.2~1.5 km。

试验中还发现有效扰动回波的最大高度有时会超过 2.2 km,而温度值在湿度估算中又是必须的,所以为了估算更高高度的湿度廓线,使用与 LTR-RASS 同步观测的探空仪温度值结果来构造出 2.2 km 以上的温度廓线。

在估算湿度廓线时,要把 200 m 高度上的水汽混合比(q)作为低边界值,而通过系留汽艇只能获得 160 m 处的 q 。可以假定两个高度之间的 q 变化不大,这样就可以把 160 m 高度处系留汽艇的值看作 200 m 处的 q 值。

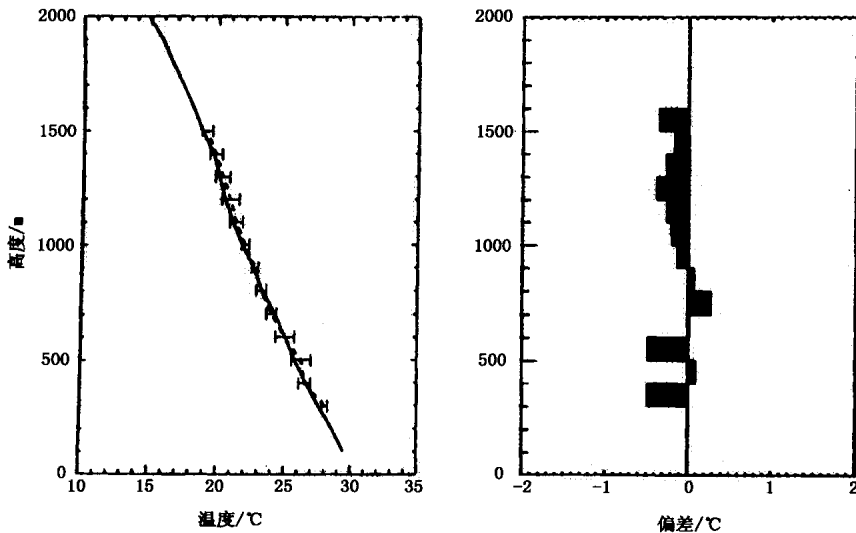


图 1 LTR-RASS 获得的有效温度廓线与对应探空数据的对比(左)及其偏差(右)
(左图中实线代表 RASS 获得的温度廓线,虚线代表探空温度廓线,短折线代表两者的偏差)

图 2 是估算的 2002 年 5 月 28 日 16:21~16:51 湿度廓线与 16:36 发射的探空仪观测结果的对比。两条廓线总体上是一致的,在 0.4~1.0 km 上比湿

下降,1.0~1.7 km 上又上升,1.7~2.2 km 再一次下降。右图说明雷达获取的湿度结果与探空结果之间的偏差小于 2 g/kg。

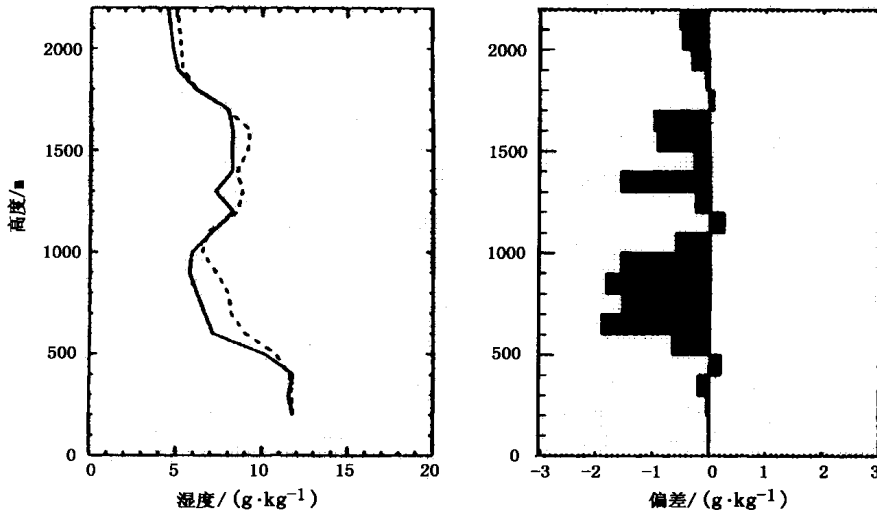


图 2 LTR-RASS 获得的湿度廓线与对应探空数据的对比(左)及其偏差(右)
(左图实线代表 RASS 湿度廓线,虚线代表探空湿度廓线)

通过 LTR-RASS 系统获取到的 2 km 以下的风速、温度和湿度值,可以进一步估算出动能、感热和潜热。这对中尺度天气现象的研究是非常重要的。把 MU 雷达和 LTR 雷达相结合,可以连续地监测到 0.2 ~ 7.5 km 上的风速、温度和湿度廓线,通过 Raman 激光雷达又可以验证观测结果的精确性。

4 结语

通过上述分析,可以看出大气廓线仪在实际应用中具有很高价值,它能够用来连续地监测湿度,探测锋面热、动力结构和垂直风结构,诊断热带地区行星边界层和降雨云系统,还能够对超雷暴单体中的风结构进行探测。通过 WPR1300/RASS 系统在我国的实际观测应用,对其获取的资料与雷达、系留汽艇和探空仪等资料进行了同步对比,估算出湿度廓线,可以看到温度偏差不超过 1℃,湿度误差小于 2 g/kg。

高分辨率大气廓线仪等新一代雷达遥感技术在大气研究领域中的广泛应用,必将极大地推动中尺度大气热动力学的研究进展。使人们能够对中纬度和热带地区的各类天气现象进行更加深入的研究。

参考文献

1 孙宪章. 大气遥感探测系统——风廓线雷达. 现代雷达, 1994, 16(1): 21 - 30
2 Kley D, Smith H G J, Vomel H, et al. Tropospheric water vapor

and ozone cross-sections in a zonal plane over the central equatorial Pacific ocean. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1997, 123: 2009 - 2040
3 Hocking W K, Mu P K L. Upper and middle tropospheric kinetic energy dissipation rates from measurements of C_n²—review of theories, in-situ investigations, and experimental studies using the Buckland Park atmospheric radar in Australia. J. Atmos. Terr. Phys., 1997, 59: 1799 - 1803
4 Furumoto J, Tsuda T. Characteristics of energy dissipation rate and effect of humidity on turbulence echo power revealed by MU radar-RASS measurements. J. Atmos. Solar Terr. Phys., 2001
5 Gossard E E, Wolfe D E, Moran K P, et al. Measurements of clear-air gradients and turbulence properties with radar wind profilers. J. Atmos. Ocean. Technol., 1998, 15: 321 - 342
6 Gossard E E, Gutman S, Stankov B B, et al. Profile of radio refractive index and humidity derived from radar wind profilers and the Global Positioning System. Radio Sci., 1999, 34: 371 - 383
7 Benjamin T B. Gravity currents and related phenomena. J. Fluid Mech., 1968, 31: 209 - 248
8 Simpson J E, Britter R E. A laboratory model of an atmospheric mesofront. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1980, 106: 485 - 500
9 Charba J. Application of gravity current model to analysis of squall-line gust front. Mon. Wea. Rev., 1974, 102: 140 - 156
10 Goff R C. Vertical structure of thunderstorm outflows. Mon. Wea. Rev., 1976, 104: 1429 - 1440
11 Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms at radar observed boundary-layer convergence lines. Mon. Wea. Rev., 1986, 114: 2516 - 2536
12 Wakimoto R M. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rainsonde data. Mon. Wea. Rev.,

- 1982, 110: 1060 - 1082
- 13 Setter K L. A numerical study of atmospheric density current motion including the effect of condensation. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43: 3068 - 3076
- 14 Droegemeier K K, Wilhelmson R B. Three-dimensional numerical modeling of convection produced by interacting thunderstorm outflows. Part I: Control simulation and low level moisture variations. *J. Atmos. Sci.*, 1985, 42: 2381 - 2403
- 15 Martner B E. Vertical velocities in a thunderstorm gust front and outflow. *J. Appl. Meteor.*, 1997, 36: 615 - 622
- 16 May P T, Strauch R G, Moran K P, et al. Temperature sounding by RASS with wind profiler radars: A Preliminary study. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1990, 28: 19 - 28
- 17 Reddy K K, Kozu T, Nakamura K, et al. Lower atmospheric wind profiler at Gadanki, Tropical India: Initial results. *Meteorologische Zeitschrift*, 2001, 10(7): 457 - 468
- 18 Beyrich C F, Gorsdorf U, Neisser J, et al. Results from a three-month intercomparison of boundary layer wind profiler and sodar wind measurements at Lindenberg, Germany. *Meteor. Z.*, 1998, 7: 220 - 225
- 19 Garratt J R. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press, 1992. 316
- 20 Clifford S F, Kaimal J C, Lataitis R J, et al. Ground based remote profiling in atmospheric studies: an overview. *IEEE Proc.*, 1994, 32: 313 - 355
- 21 Carter D A, Gage K S, Ecklund W L, et al. Developments in UHF lower tropospheric wind profiling at NOAA's Aeronomy Laboratory. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, 30: 997 - 1001
- 22 Ecklund W L, Gage K S, Williams C R. Tropical precipitation studies using a 915 MHz wind profiler. *Radio Sci.* 1995, 30: 1055 - 1064
- 23 Gage K S, Williams C R, Ecklund W L. Application of the 915 MHz for diagnosing and classifying tropical precipitation cloud systems. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1996, 59: 141 - 151
- 24 Tsuda T, Adachi T, Masuda Y, et al. Observations of the cloudy winter atmosphere using combined remote sensors. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1995, 12: 488 - 510
- 25 Hocking W K, Mu P K L. Upper and middle tropospheric kinetic energy dissipation rates from measurements of C_n^2 —review of theories, in-situ investigations, and experimental studies using the Buckland Park atmospheric radar in Australia. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1997, 59: 1799 - 1803
- 26 Furumoto J, Tsuda T. Characteristics of energy dissipation rate and effect of humidity on turbulence echo power revealed by MU radar-RASS measurements. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, 63(2-3): 285 - 294
- 27 Gossard E E, Wolfe D E, Moran K P, et al. Measurements of clear-air gradients and turbulence properties with radar wind profilers. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1998, 15: 321 - 342
- 28 Gossard E E, Gutman S, Stankov B B, et al. Profile of radio refractive index and humidity derived from radar wind profilers and the Global Positioning System. *Radio Sci.*, 1999, 34: 371 - 383

Atmospheric Profile Synthesis Detecting System and Its Application

Zhang Yong Wang Xin Xu Xiangde Bian Lingen
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The work principles of the atmosphere profile synthesis detecting system (the wind profiler and RASS radar) are introduced. The application of the detecting technology in the upper air abroad is discussed by giving some examples. The system can be used to calculate humidity profiles, detect heat and dynamical structures of fronts and vertical wind structure, and diagnose the planetary boundary layer and rainfall cloud systems in tropic regions. The methods are proposed for calculating humidity profiles in the range of 0.2 km to 2.2 km in altitude by means of the wind profile/RASS data from the Feixi observing experiment site in Anhui Province in Summer 2002.

Key words: atmosphere profiler, RASS, atmosphere boundary layer, humidity profile