

文章编号: 1007-5461(2001)01-0092-05

# 915 M 微波测风雷达原理及实验对比

翁宁泉, 肖黎明, 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 国家 863 计划大气光学重点实验室, 合肥 230031)

马大安

(北京爱尔达电子设备有限公司)

**摘 要** 本文讨论了一种用于探测晴空大气边界层的微波风廓线雷达, 这种雷达可以测量 100~3000 m 风的垂直廓线, 另外附加一套无线电声学探测装置, 还可以测量 100~1000 m 的温度廓线。首先介绍了雷达的测量原理和性能指标, 在此基础上讨论了影响测量的几个因素, 最后给出了若干对比实验的结果。

**关键词** 风廓线雷达; 大气边界层

**中图分类号**: P407.7; P412.25

**文献标识码**: A

## 1 引 言

在近几十年来, 雷达遥感在大气探测领域起了越来越重要的作用, 与传统的气球和无线电探测方法相比, 遥感手段具有方便、经济、实时性好和可以连续观测等优点。

在整个大气层中, 虽然大气边界层只占据了最下面的几公里, 但是它是其中最重要的一层, 人类的所有活动都发生在这一层中, 大气边界层中的各种各样的天气现象, 如风、云、雨、雾等对人类生活起着重要影响, 同时大气边界层中的各种运动也对其上的大气各个层次有较大影响, 因此, 探测研究大气边界层也成为大气科学和气象研究的一个重要的方面。

1988 年美国 NOAA 设计了用于边界层风廓线测量的雷达原型, 这种雷达与其他用于天气和气象测量的雷达相比, 造价较低, 系统结构较为简单, 机动性较好, 同时系统可以长年无人值守工作, 可以用于移动和组网自动观测。

雷达不但可以得到边界层风场三分量的廓线; 在测风雷达的基础上加上一套 RASS (Radio Acoustic Sounding System) 还可以用来测量温度的廓线; 同时由于雷达的回波强度与边界层湍流的强度有关, 还可以用来测量湍流强度的廓线, 因此这种雷达是大气边界层研究的一个非常有效的工具。

## 2 雷达系统概况

### 2.1 系统概况

系统的基本性能如表 1 所示。

平面微带天线可以向上发射 5 个方向的波束, 其中 1 个波束垂直向上, 其余 4 个分别与垂直波束倾斜 12 度指向东南西北四个方向。

### 2.2 工作原理

大气中总是充满了湍流涡旋, 雷达分别发射 5 个波束时, 由于湍流中的大气折射率不均匀分布, 产生了后向散射回波, 同时湍流随着风场的移动, 使得回波在频率域产生了多普勒频移, 因此通过对回波信号的频谱分析, 可以得到某一波束上的径向风速, 分别测量 5 个波束, 可以合成出风场的 3 分量。

基金项目: 国家高技术发展计划激光技术领域资助; 中科院大气物理所大气边界层和大气化学开放实验室开放课题提供部分资助。

收稿日期: 1999-12-15; 修改日期: 2000-01-17

与测风原理相似, 由于声波是一种疏密波, 也会对微波产生散射。当使用 RASS 系统向上垂直发射一组声波, 同时发射微波, 接收到的微波回波信号主要是声波的波阵面产生的回波, 通过对回波频谱多普勒效应分析, 可以得到声波向上传播的速度, 而大气中声波的传播速度主要与温度有关, 有  $V = kT^{1/2}$ , 因此就得到了温度的廓线。

由雷达方程可以知道, 后向散射的强度主要与大气湍流强度有关, 其中表征大气湍流强度的是折射率结构常数, 因此, 雷达可以作为测量折射率结构常数廓线的设备。

表 1 雷达系数基本性能

工作频率	915 MHz(微波), 2 KHz(声频)
功率	峰值 1000 W、平均 70 W
天线	2.45 m × 2.45 m、平面微带相控阵
探测高度	3500 m(风)、1000 m(温度)
高度分辨率	50 m、100 m
平均时间	>3 分钟
测量精度	<1 m/s(风速), <10 度(风向), 1 度(温度)

### 3 信号处理

作为晴空大气探测的雷达, 它与其他意义上的雷达有一个根本的区别, 它没有一个硬目标(如飞行器、雨滴等)提供反射回波, 它探测的信号在其他雷达中被作为“噪声”或信号的起伏量, 因此不但在雷达的硬件设计上要求有较高的接收灵敏度, 还要求在软件的信号处理上用较复杂的方法, 来把真正晴空大气的回波信号提取出来, 其信号处理主要必须通过以下几个步骤。

#### 3.1 信号接收和高度确定

用相关接收的方法同时接收回波矢量的两个正交分量, 通过高速 A/D 转换后由雷达机采样, 接收的时间延迟代表了不同的径向距离, 有  $R = ct_r/2$ , 其中  $R$  是径向距离,  $c$  是光速,  $t_r$  是延迟时间, 对于垂直波束,  $R$  就是高度。

#### 3.2 相关积分

相关积分在一定意义上是时间的平均, 接收数据中包含了回波信号和噪声(仪器的和大气中的), 由于信号是相关的而噪声是不相关的, 通过  $n_c$  个样本点的平均, 可以提高信噪比  $n_c$  倍, 当然样本数也会减少到  $1/n_c$ 。

虽然相关积分可以有效地提高信噪比, 但相关积分点数必须谨慎选择, 相关积分的时间尺度不能大于大气湍流的特征时间尺度, 否则会减小信号的强度。

#### 3.3 频谱分析

相关积分后的时间序列信号, 通过快速傅立叶变换(FFT), 可以得到信号的谱, 直流分量被滤掉, 它主要是地杂波和附近的障碍物如建筑物和高大的树木等造成的, 谱的峰值就代表了最大功率的地方, 也就是湍流造成的谱的峰值, 它与基频的偏移就是多普勒效应造成的, 因此也就可以得到了湍流运动的径向速度, 有:  $v_r = \lambda f_D/2$ 。用  $n_f$  个点的样本点可以通过 FFT 得到谱,  $n_f$  必须是 2 的幂次, 一般而言, 增加 FFT 的点数  $n_f$  可以再见谱的分辨率, 但同样也不能大于大气湍流的特征时间尺度。

#### 3.4 谱平均

经过以上几个步骤, 虽然得到了回波的谱, 但信噪比还是较低, 还需要经过谱平均, 或称为不相关平均, 由于噪声的谱是不相关的, 而信号的谱是相关的, 经过  $n_s$  个谱的平均, 可以增加雷达的探测能力。

#### 3.5 雷达的运行周期

雷达的一个波束的运行周期包括采样时间和以上的几个处理步骤, 为  $t_D = n_c n_f n_s IPP + t_p$ , 其中  $IPP$  为雷达的脉冲宽度, 一般为  $25 \mu s$ ,  $t_p$  为处理时间, 一般为  $0.5 s$ , 在典型情况下,  $n_c=320$ ,  $n_f=64$ ,  $n_s=30$ ,  $t_D$  约为

16 s. 5 个波束一个周期, 约为 80 s, 这是雷达测风的一个采样周期。

## 4 实验结果与对比研究

### 4.1 测风结果和对比

图 1 是一个典型的风廓线测量结果, 可以看到, 一直到 3500 m 的高度, 所测量的风廓线都有较好的一致性, 同时也能够反映不同高度和时间风场的变化。

为了检验雷达测量的结果, 用小球测风和雷达进行了一些对比观测, 图 2 是其中一次的比较。图中曲线是雷达测量结果, 带小点的是小球测量结果。小球测量的结果只达到了 1500 m, 二者的偏差较小, 几乎都在 1 m/s 以内。这证明了雷达测量的可靠性。

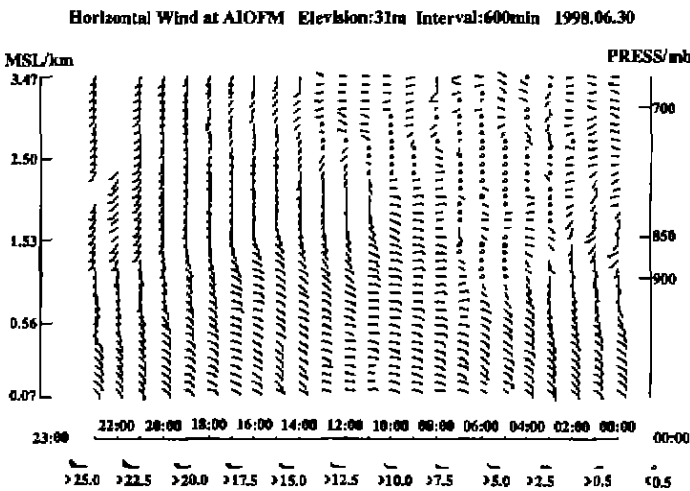


Fig.1 The measurement results of wind profile

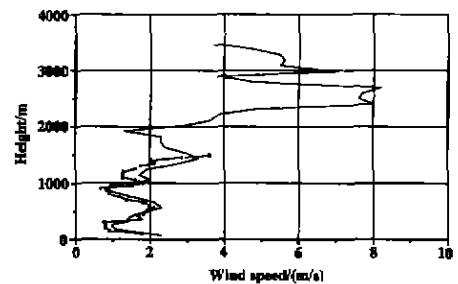


Fig.2 The comparison measurements of wind profile

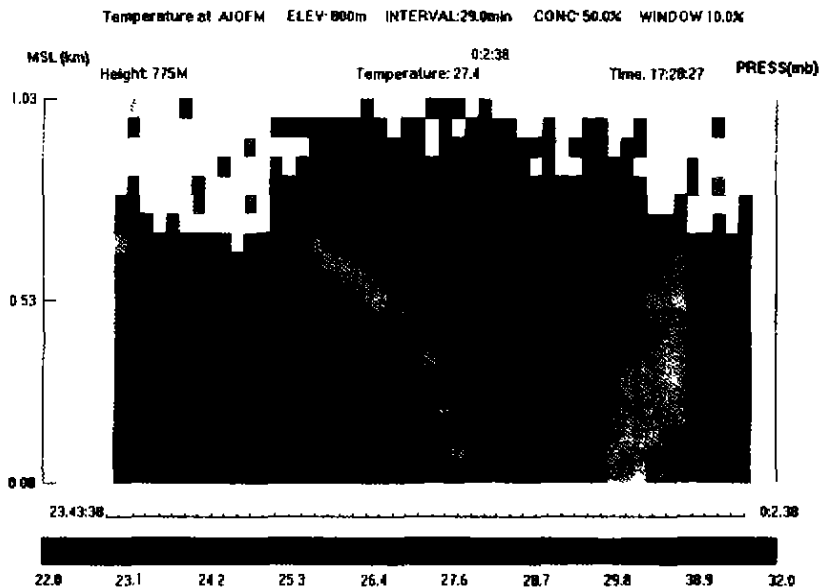


Fig.3 The measurement of temperature profile

### 4.2 测温结果和对比

图 3 是雷达测量的 24 小时温度廓线, 不同的颜色表示不同的温度, 可以看到温度随时间和高度的变化。

测量高度在 700~1000 m。

为了验证雷达测量温度的可靠性,用气象探空仪来进行对比,结果见图 4。可以看到二者在趋势上符合得较好,但在 200 m 左右高度上,探空测量有一较强的逆温层,但雷达测量的逆温层较弱,这主要由于雷达测量的是一个体积的平均,而且在时间平均尺度也较长,因此一些时间变化较快和尺度较小的变化被滤掉了,可以通过雷达参数的选择来使平均时间缩短。

#### 4.3 湍流测量结果

雷达可以得到连续不断的折射率结构常数廓线资料,反映了其日变化的特点,测量结果见图 5。但在我们的对比实验中,与以往实验手段的测量结果有一定的偏差,这主要是以下几个方面造成的:首先,以往的实验手段主要是研究光波波段的折射率结构常数,而在光波波段,大气折射率中水汽的影响很小,而微波波段水汽影响较大;在雷达回波信号中,不可避免地存在噪声的影响,特别是在低层,地杂波的影响不可忽略;两种测量方法的平均时间不同,会导致影响结果的湍流的尺度有差别。但是用雷达遥感的方法测量大气湍流从原理上是可行的,可以通过对二者的偏差作定量化的研究而得到改善。

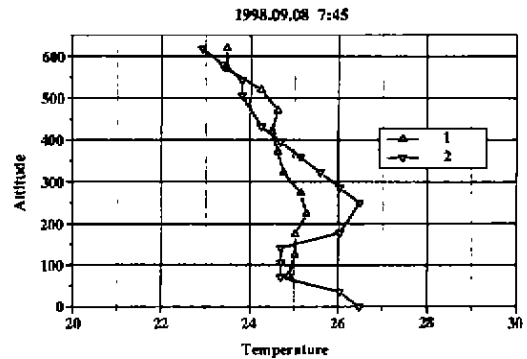


Fig.4 The comparison measurements of temperature profile

- 1 Temperature measurement by radar
- 2 Temperature measurement by sounding

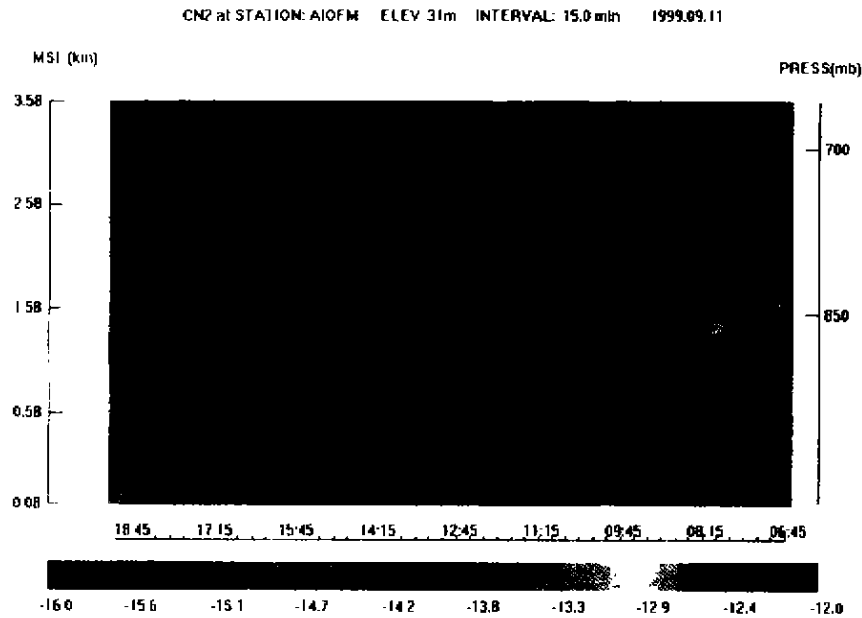


Fig.5 The measurement of  $C_n^2$  profile

## 5 结语和讨论

边界层微波风廓线雷达可以连续不断地得到较高精度的边界层风、温和湍流的廓线,可以应用在以下的领域

- \* 大气边界层研究;
- \* 大气污染研究;

- \* 中尺度预报;
- \* 机场气象条件监测.

雷达测风和测温可靠性已经通过对比实验和雷达长期的运行得到了验证,但在测量折射率结构常数方面,由于和光波波段的常规测量手段在测量原理和方法上有一定区别,还需要进一步的实验和理论研究.

### 参 考 文 献

- 1 Ecklund W L, Carter D A, Balsley B B. A UHF wind profile for the boundary layer: brief description and initial results [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1988, 6: 432~441
- 2 Rogers R R, Ecklund W L, Carter D A *et al.* Research applications of a boundary-layer wind profile [J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1993, 74(4)
- 3 Allen B W. Radar remote sensing of scalar and velocity micro-turbulence in the convective boundary layer [J]. *ETL, NOAA* 1997
- 4 爱尔兰电子有限公司. 《Airda 3000 使用操作手册》

## The Theory and Experimental Verification of 915 M Microwave Radar

Weng Ningquan, Xiao Liming, Gong Zhiben

( Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Science, Hefei 230031 )

Ma Da'an

( Beijing Airda Electronic Equipment Co. )

**Abstract** In this paper, a kind of 915 M microwave radar was discussed. It can be used to get the wind profile and the  $C_n^2$  profile from 100 m to 3000 m in the atmospheric boundary layer. It also can get the temperature profile from 100 m to 1000 m while the RASS component was added. The theory and signal process of the radar were introduced and then some experimental verifications were given.

**Key words** wind profiler radar; atmospheric boundary layer

翁宁泉 男, 33岁, 助理研究员, 在职博士生. 1989年毕业于中国科技大学大气物理专业, 现在中国科学院安徽光学精密机械研究所从事大气光学研究工作.