

边界层风廓线雷达测温系统设计

王 勇¹ 安建平¹ 卜祥元¹ 贾晓星²

(1. 北京理工大学电子工程系, 北京 100081; 2. 中国航天科工集团 23 所)

提 要: 风廓线雷达在气象领域的应用越来越广泛, 在风廓线雷达基础上增加电声测温系统 (RASS) 实现大气温度实时探测是一种经济有效的办法。文中介绍了已实现的某 RASS 系统设计, 讨论了 RASS 测温的原理, 针对 RASS 测温的精度、高度、影响因素等进行了性能分析, 论述了系统的实现方案, 最后给出了该 RASS 的实际测温结果和测温谱图, 验证了该设计满足系统要求, 能实现实时测温。

关键词: 风廓线雷达 无线电声探测系统 直接数字频率合成 系统设计

On the Radio-Acoustic Sounding System (RASS) of Boundary-layer Atmospheric Profiling Radar

Wang Yong¹ An Jianping¹ Bu Xiangyuan¹ Jia Xiaoxing²

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
2. Beijing Institute of Radio Measurement)

Abstract: The wind profiling radar has been developed more widely recently in the atmosphere. It is a very economic and effective method to measure atmospheric temperature by using a Radio-Acoustic Sounding System (RASS) based on the wind profiling radar. According to the RASS finished in 2004, the theory of RASS and characteristics which involve precision, height, and other factors concerned about it are all discussed. The scheme of the RASS is given in detail. At last, the real measurement result and temperature spectrum figure of the RASS are shown, and prove that the system has succeed in atmospheric temperature measurement in real time.

Key Words: wind profiling radar Radio-Acoustic Sounding System RASS system design

引 言

风廓线雷达是对大气中风向风速随高度分布连续观测的一种遥感设备,近年来,越来越受到各国气象部门的重视。风廓线雷达和声学探测技术相结合开发的 RASS 系统(Radio-Acoustic Sounding System) 遥感测温,已成为探测大气虚温的一个方便且经济的重要手段。美国空间实验室在 1987 年首次进行了利用 RASS 实现测温的试验,随后有越来越多研究人员加入到这方面的研究,如 NOAA 的 Strauch 等人先后利用频率 50、404 和 915MHz 的风廓线仪进行了 RASS 系统的试验,测温高度分别为 5~9km, 1.5~2.5km 和 0.6~1.5km。

本文介绍了在某边界层风廓线雷达中开发的 RASS 测温系统的设计原理及实现要点。此 RASS 系统由工控机与主控软件,音频信号发生器,系统定时和控制器,音频功放,声天线,中频数字接收卡和信号处理器组成。

1 探测原理

RASS 系统的探测原理是通过发射高功率声波使大气密度产生周期性变化,引起大气折射系数的周期性变化。当其变化的波长等于风廓线雷达波长的二分之一时,对雷达电磁波产生了强的反射并被雷达探测到,测量造成强反射信号的声波频率,可导出该处的声速,再根据声速和温度之间的关系反演出大气温度,从而得到温度廓线。在大气中,声速 $V_a = A\sqrt{T}$, 这里 T 为大气温度(单位 K), A 为温度比例系数, A 仅随空气分子摩尔质量而变,空气的相对湿度是影响空气分子摩尔质量的主要因素,在干空气条件下, $A \approx 20.053$ 。设大气为静止的,当

声波垂直向上发射时,用雷达测量其多普勒频移为 $f_d = 2V_a/\lambda_e$, λ_e 为雷达波长。所以只要测得声波波面产生的多普勒频移,就能求得声波的多普勒速度,进而获得声波所在高度的大气温度。

2 系统设计及性能分析

在设计声发射系统时,在满足 Bragg 匹配的条件下,即雷达电波波长与声波波长满足 $\lambda_e/\lambda_a = 2$ 时,系统能够接收到最强的回波信号。此时接收功率为^[2]:

$$P_r = 5.39 \times 10^{-16} \times N^2 G_t G_r G_a P_t P_a \times [1 - \cos\theta/2]^2 \times 10^{-LR/10} / R^2 \quad (1)$$

式中: N 为声波数, G_t 为雷达发射天线增益, G_r 为雷达接收天线增益, G_a 为声源喇叭发射增益, P_t 为雷达发射功率, P_a 为声源发射功率, L 为声波衰减系数。系统中 $N = 4$, $G_t = G_r = 29\text{dB}$, $G_a = 14\text{dB}$, $P_t = 1.5\text{kW}$, $P_a = 0.6\text{kW}$, $\theta = 4.5^\circ$, 设 $L = 10\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$, 则

$$\begin{aligned} P_r &= -71.5 - 10R - 20\log R \\ &= -101.5 - 10R - 20\log R \quad (2) \end{aligned}$$

当系统灵敏度为 -130dBm , 测温的高度大于 1.5km 。

如果大气出现水平运动时,将会对测风的高度造成影响。在声波向上传播的过程中,受水平风的影响将向下风方向偏移,偏移的结果导致雷达波束部分或全部不能与声波波面交汇,使得接收信号减弱,导致测温高度下降。设大气水平风速为 V , 声波的水平偏移为 $S = V \times t$, 经推导得接收功率修正公式:

$$P_r \approx -112 - 10R - 20\log R + 10\log(13.3 - V) \quad (3)$$

进而推导出测温高度与水平风速的关系:

$$\begin{aligned} -130(\text{dBm}) &\approx -112 - 10R - 20\log R + \\ &10\log(13.3 - V) \quad (4) \end{aligned}$$

得:

$\log(13.3 - V) = -1.8 + R - 2\log R$ (5)
 通过公式和 Matlab 仿真 (见图 1), 都可以看出当水平风速大于 $13.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 测温高度将急剧下降, 因此在七级以上的强风天气下测温结果将会非常不理想。

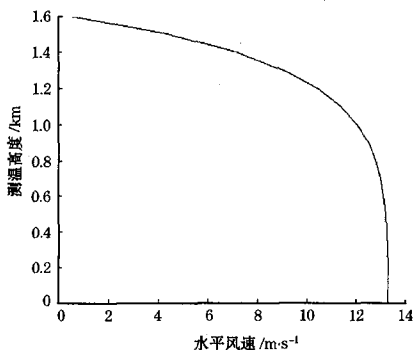


图 1 测温仿真图

根据 RASS 的测温原理, 其测温精度依赖于测速的精度。由于

$$f_d = 2V_a/\lambda_e = 2A\sqrt{T}/\lambda_e$$

设频率灵敏度为 Δf , 则

$$\Delta f = 2A(\sqrt{T + \Delta T} - \sqrt{T})/\lambda_e$$

所以,

$$\Delta T = \lambda_e T \Delta f / V_a$$

系统中,

$$\lambda_e = C/f = 3.0 \times 10^8 / 1320 \times 10^6 = 0.227$$

$$\Delta f = 1 \text{ Hz}$$

设 $T=290\text{K}$, $V_a=340\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则该 RASS 测温精度 $\Delta T \approx 0.2\text{K}$ 。对于实际的大气, 不满足静止的假设条件, 于是存在由大气运动引入的误差

$$\begin{aligned} \Delta T &= V_a [(V_m - W)/A]^2 - [V_m/A]^2 \\ &= -V_m W (2 - W/V_m)/A^2 \end{aligned}$$

所以,

$$\Delta T = -2V_m W/A^2$$

式中 W 为大气的垂直运动速度。由于系统是在风廓线雷达的基础上设计的测温系统, 故可以通过风廓线测到的大气垂直风速对测到声速进行修正, 从而将垂直气流的影响大大降低。除了垂直风对测温精度有影响外, 空气的湿度也会引起误差。对于实际空气, $A = \alpha \times 20.053$, α 值随相对湿度的变化在 $0.9994 \sim 1.0033$ 之间, 则由变化量 $\Delta\alpha$ 引起的测温误差 $\Delta T \approx -2T(\Delta\alpha/\alpha^3)$, 取 $\alpha = 1.0000$, $T = 290\text{K}$, 则 $-1.9\text{K} \leq \Delta T \leq 0.3\text{K}$, 因此必须要合理的选择 α 才能减少由空气湿度引起的误差。

3 系统组成

RASS 系统由工控机与主控软件, 音频信号发生器, 系统定时和控制器, 音频功放, 声天线, 中频数字接收卡和信号处理器组成, 系统组成框图见图 2。

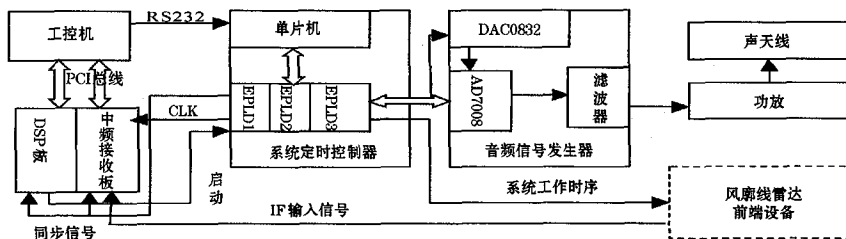


图 2 系统组成图

3.1 工控机与主控软件

工控机无人值守, 通过 Internet 网络接收来自远端控制中心的指令, 是整个 RASS 系统的控制核心。在系统启动后工控机内的系统主控软件将完成 DSP 信号处理板, 中频数字采集卡, 系统定时控制器的初始化; 在系统工作过程中, 完成将中频接收卡采集到的实时高速数据流传送到 DSP 信号处理板的作用, 并将信号处理板运算结果通过 PCI 总线传送到主机缓冲器中, 从而为以后的进一步数据处理做好准备, 此外还实时监测汇总来自各分系统的监测信息, 产生实时系统运行记录, 分系统异常时可以及时报警并做出相应的处理; 在系统结束时, 将严格按照系统的退出要求完成相应操作, 避免系统退出异常。

3.2 系统定时和控制器

系统定时和控制器完成产生系统工作时所需要的时序和对音频信号的控制等功能, 主要由单片机和 EPLD 组成。工控机将 DDS、DAC 及系统时序控制所需的参数通过 RS232 传过去, 定时控制器中的单片机接收到时序控制指令和参数后, 保存到 RAM 中, 再根据工作时不同的模式选择将相应的工作参数送到 EPLD, 并通过 EPLD 将部分数据送到 DDS 和 DAC 芯片, 在接到系统开始启动的指令后, EPLD 会产生风廓线雷达测温时所必须的工作时序, 并参与系统工作在线故障监测。由于系统需要产生的时序和控制比较多, 在设计中采用了 3 片由 Altera 公司出品的 EPM7192 芯片, 系统工作时将由单片机产生控制命令, 通过 EPLD 产生相应的操作, 从而产生系统工作的时序和 AD7008 输出幅度和频率的控制。

3.3 中频数字接收卡和信号处理器

中频数字接收卡完成雷达回波中频信号的采集和数字下变频的功能, 并通过 PCI 总线将数据传送给主机。主机缓冲并完成时域积累后, 将数据传送到信号处理板, 信号处理板完成 FFT 运算和谱平均等功能, 并将最终运算结果通过 PCI 总线回传给主机, 主机得到运算结果后保存并进行后续处理。中频数字接收卡主要由模数转换 AD6644, 下变频芯片 GC4016, FIFO 和 PCI 接口芯片 PLX9080 构成。信号处理器采用 TI 公司的 TMS320C6701 浮点运算 DSP 芯片完成。由于风廓线雷达工作的实时性高, 数据量大, 并克服 Windows 系统为非实时操作系统的缺陷, 数据传输必须先经 FIFO 缓冲, 并以 DMA 的方式通过 PCI 总线传输, 同时保证主控软件中数据传输的子线程的优先级要尽量高。主机完成的时域积累运算可以大大减少向 DSP 传送的数据量, 从而保证系统可靠实时的工作, 避免丢失数据。DSP 完成本次测温数据运算后, 以 HPI 消息的方式通知主机, 主机在查询到此消息后, 通过 TI 公司提供的 HPI 函数将相应数据读取到主机缓冲进行后续处理。

3.4 音频信号发生器

音频信号发生器由 DDS 芯片, DAC 和滤波器组成。采用 DDS 芯片 AD7008 实现的可控信号源, 可生产正弦波、调频波、调幅波及方波等, 并且其信号的频率和幅度可由微机来精确控制, 调节非常方便。AD7008 内部包括可编程 DDS 系统、高性能 10 位 DAC、与微机的串行和并行接口以及控制电路等, 能实现全数字编程控制的频率合成和时钟发生器。工作时, 根据单片机

输出的控制字，DDS 芯片改变输出的信号频率，输出的信号幅度随 ADC0832 的改变而变化。为了保证信号的输出带宽在 5kHz 之内，DDS 输出的信号通过设计的有源滤波器之后再输出到音频功放。

3.5 音频功放和声天线

DDS 输出的音频信号经过滤波和放大之后，输入到音频功放，音频功放采用商业产品。音频功放将信号放大后输出至扬声器。声天线由四个功率为 150W 的扬声器组成天线阵。其摆放位置为以雷达发射天线的垂直波束方向为圆心构成的矩形。在工作时，四个扬声器发出的声音在空间叠加，形成所需要的声波波束。

4 结束语

RASS 系统已经成功应用于某机场的测温过程中，图 3 是本系统的实景照片及测温的温谱图。经过一年多的实际使用证明，该 RASS 设计合理，可靠性高，满足大气温度实时测量的需求。但同时也显示出 RASS 系统在大气温度测量的一些特点和缺点，如：在晴空探测明显比阴天和降雨时要好得多，此外还易受到环境噪声、地物杂波、声波在不同环境下的衰减等因素影响，这些都有待于进一步作理论和实践上的探讨。

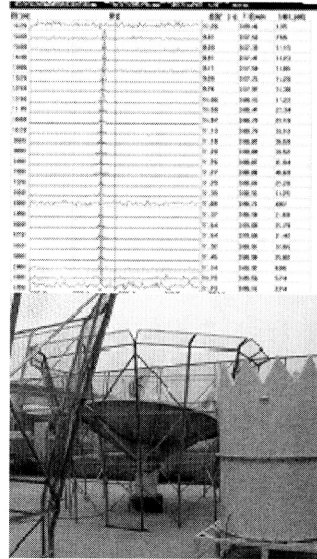


图 3 温谱与系统实景图

参考文献

- 1 谭剑波, 彭扬. 风廓线雷达 RASS 声发射系统设计 [J]. 现代雷达, 2002, 24 (5): 58-63.
- 2 田亚龙. 利用 UHF 风廓线雷达进行 RASS 探测的研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 1990: 5-30.
- 3 Li Xintian, Tian Wenbin, Bu Xiangyuan. Wind-Profiling Radar and Radio-Acoustic Sounding System (RASS) [J]. Radar, 1996. Proceedings, CIE International Conference of, 8-10 Oct. 1996: 64-67
- 4 王凡. 无线电声学探测系统的声源信号形式与性能限制因素 [J]. 现代电子, 1999, 69 (4): 1-5.