

探测大气温湿廓线的 35 通道微波辐射计 设计原理与特点

卢建平¹ 黄建平² 郭学良³ 于子平⁴ 雷连发¹ 张北斗²

(1 西安电子工程研究所, 西安 710100; 2 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;

3 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要 总结了自主研制的 MWP967KV 型地基 35 通道微波辐射计系统设计原理和主要特点。系统将 K、V 双频段宽带天线及接收机、宽带调谐本振、温湿压计以及电源模块紧凑集成为一台整机设备。对各传感器的测量输出实时进行一体化综合处理, 采用 BP 神经网络实时反演大气温度、湿度廓线和汽、水总量。廓线的垂直覆盖范围为地表至顶空 10 km, 共划分为 58 层。辐射计样机于 2012 年秋冬季节在北京地区开展了为期 2 个月的观测试验, 利用这段时期内的 69 个探空资料样本对辐射计 2 个层次的实时观测输出都进行了对比检验, 计算了水汽、氧气通道亮温和反演所得大气温湿廓线的平均偏差、均方差以及相关性。结果表明该系统能够满足实时气象监测的需求, 达到国际先进水平。

关键词 地基遥感 辐射测量 辐射计技术 大气廓线观测

引言

地基多通道微波辐射计采用被动接收方式工作, 无需对外发射电磁信号即能实时获得高时间分辨率的大气温湿廓线, 在中小尺度天气实时监测、数值预报研究以及人工影响天气决策中具有独特价值^[1-2]。国外的辐射遥感技术研究起步较早, 至少从 20 世纪 60 年代就已得到应用^[3-4]。美国研究机构经过数十年持续的探索研究, 在 20 世纪末率先开发出 K-V 双频段集成地基微波辐射计的工程样机, 后续型号增加了通道数, 改善了温湿廓线的垂直分辨力, 从而具备了很高的技术水平和实用价值^[5]。

国内研制始于 20 世纪 70 年代: 北京大学赵柏林教授率领的课题组研制了我国第一台 5 mm 频段单通道狄克型地基微波辐射计, 开展了扫角方式遥感大气温度层结的试验研究^[6]; 中科院大气物理研究所从 1974 年开始了大气微波遥感研究, 随后研制出 3 cm 频段单通道狄克型地基微波辐射计, 用于区域降雨量的观测试验^[7]; 进入 21 世纪, 中科院长春地理研究所研制了 K 频段数字增益波动补偿辐射计^[8], 用于云液水和过冷水含量的机载观测试验^[9];

中电集团电波传播研究所研制了 K 频段双通道地基微波辐射计, 用于大气参数观测和电波传播研究^[10]。

微波辐射计遥感作为大气探测的一种重要手段, 已经得到国内外深刻认识和广泛重视。随着国外先进的地基多通道微波辐射计产品逐渐在我国气象观测活动中得到应用, 越来越多的研究和评估表明该仪器在大气精细结构的实时监测和实验研究方面发挥的作用非常显著^[11-13]。这些进口先进仪器能够有效增强我国中小尺度气象预报、监测能力和人工影响天气探测能力, 由此也对国内自主装备研制提出了更加迫切的要求。

本文系统介绍了国内新近自主研制的 MWP967KV 型地基 35 通道微波辐射计的系统原理、设计特点及试验验证情况。

1 大气辐射遥感的物理原理

大气辐射遥感的物理基础来自于近代量子理论: 宇宙中的一切物质, 只要处在绝对温度零度以上, 任何时刻都在向外辐射电磁波。德国物理学家普朗克提出了著名的黑体辐射公式, 即绝对温度为

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家公益性行业(气象)科研专项(项目编号 GYHY201006030)资助

作者简介: 卢建平, 男, 1972 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事雷达电子系统设计研究, Email: lujp72@163.com

收稿日期: 2013 年 3 月 15 日; 定稿日期: 2013 年 7 月 26 日

T 的黑体辐射谱密度 $B_f(T)$ 为:

$$B_f(T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{\exp[hf/(kT)] - 1} \quad (1)$$

其中: h 称为普朗克常数, k 是波尔兹曼常数, c 是真空中光速, f 是所研究的辐射频率, T 为热力学温度。

地球大气也是热噪声源,时时刻刻都在向各个方向辐射噪声能量。在热平衡状态下,大气在微波频段的辐射特性依赖于其对微波能量的吸收。而在对流层中,大气中的氧气、水汽和云雨等的吸收决定了大气的微波吸收特性。对于非散射大气,按照大气水平均匀分层原理,在局地热平衡情况下,从地面观测的微波频段大气辐射亮温可以采用如下简化公式计算^[14]:

$$T_B(\theta, f) = T_\infty \exp\left[-\int_0^\infty \alpha \sec\theta dz\right] + \int_0^\infty T(z) \alpha \sec\theta \exp\left[-\int_0^z \alpha \sec\theta dz\right] dz \quad (2)$$

上式称为大气中的微波辐射传输方程,其中: T_∞ 是宇宙背景的辐射亮温, θ 为天顶角, f 代表观测频率, $T(z)$ 是高度 z 处的大气温度, α 是大气吸收系数,是大气中各组分的吸收系数之和,即:

$$\alpha = \alpha_{\text{氧气}} + \alpha_{\text{水汽}} + \alpha_{\text{云液水}}$$

水汽的强烈辐射作用使得 22.235 GHz 频率附近呈现出一个亮温尖峰,而在 60 GHz 附近更大的亮温峰值则主要体现了氧气的辐射特性。这一系列频率点的大气吸收特性就可用于大气温湿廓线的反演^[7]。

2 辐射计系统设计

中国兵器工业集团从 2007 年启动了国产 MWP967KV 型地基 35 通道微波辐射计的研制工作。由兵器科学研究院组织开发管理,西安电子工程研究所负责总体设计及主要软硬件研制,兰州大学大气科学学院负责温湿廓线反演算法及相关软件设计,中国气象科学研究院负责系统验证和数据支持。该系统主机的组成框图及工作原理参见图 1。

为实现大气温湿分布参数的连续测量功能,该系统不但配备一套自主研发的双频段组合天线组件,还研制了两部对应频段的恒温接收机,分别用于测量水汽频段和氧气频段的大气下行辐射亮温。其中 0 号天线馈源及其接收机工作在 22~30 GHz 频段(水汽敏感频段),1 号天线馈源及其接收机工作

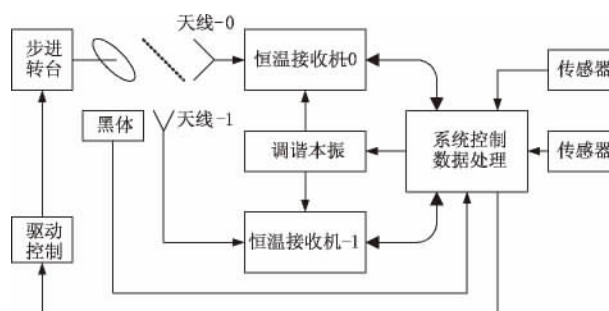


图1 主机系统组成框图

在 51~59 GHz 频段(氧气敏感频段)。

转台可以带动天线反射面在 360° 俯仰范围内步进转动,根据系统控制指令执行对空观测或标定动作。两个频段的天线馈源共用一套反射面,这不但有利于两个波束同时指向同一个目标区域,还能显著减小转动机构的复杂性,降低设备体积和重量。

为实现长期稳定、精确探测大气温湿特性,系统主机还内置了黑体辐射源及温、湿、压传感器,具有实时自动标定功能,并研制配套的外置式液氮制冷黑体辐射源,用于人工绝对标定。

该系统的终端系统是基于通用型计算机开发的,组成框图及工作原理参见图 2。

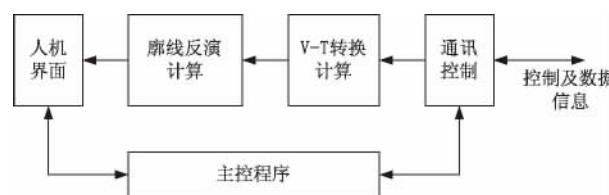


图2 终端系统组成框图

在利用大气辐射亮温反演温湿廓线方面,国内外曾对多种计算方法进行了广泛研究。神经网络反演算法有很多传统算法不具备的特点,其中最大的一个优点即为理论上可以逼近任意复杂的非线性关系,不需要专门设计特别复杂的反演算法,并且不依赖于物理正向模型,再加上并行运算的特点可以获得高速的信号处理算法,因此是比较理想的反演工具^[15-16]。

该系统的大气廓线反演算法采用 BP 神经网络类型,3 层节点通过权重函数连接。基于大量无线电探空资料,构造 BP 神经网络训练样本集,以大气辐射模式计算出的微波辐射亮温值作为输入参数,以对应的温湿廓线和模式分析获得云水廓线作为输

出,循环进行神经网络训练,最终获得一组能够反演该区域大气温廓线的神经网络参数;对空观测时,采用标准前向反馈网格法实时计算观测现场的大气温湿廓线数据。

该系统终端采用了图形化窗口界面,将大气温湿廓线测量结果以曲线图的形式描绘在计算机屏幕上,并连续实时更新。为保证长期观测的测量精度,每隔一定观测周期还自动进行相对标定。

3 验证试验情况

为检验 MWP967KV 型地基 35 通道微波辐射计的工作性能,样机于 2012 年秋末冬初时节在北京地区开展了观测试验,与进口地基多通道微波辐射计同场地连续对空观测,并利用北京南郊探空站每日发布的无线电探空结果作为试验检验标准(探空气球施放地点与辐射计试验场的直线距离约 17 km)。在这段时间内,北京地区的天气变化较为活跃,非降雨天气条件下的无线电探空样本共有 69 个。利用这 69 个探空样本对系统两个层次的实时观测输出都进行对比检验,统计两个频段的大气辐射亮温以及反演所得大气温湿廓线的平均偏差、均方差以及相关性。

辐射计在对空连续观测状态下,每 2 min 就输出一一次实时观测结果,与进口仪器基本同步,而探空站是在北京时间早 08:00 和晚 20:00 各进行一次气球探空作业。气球从地表上升至 10 km 高空大约需要 30 min,因此我们截取每次探空起始时刻 30 min 时段内的辐射计输出数据,取平均后构成一个输出样本,与探空样本进行对比检验。

3.1 大气辐射亮温观测

对应于 MWP967KV 型辐射计的水汽和氧气敏感频段,将大气辐射亮温分为 K 频段和 V 频段两段数据进行检验。探空气球直接测量得到的是大气温湿廓线,利用 MonoRTM 模式计算得出对应频点的大气辐射亮温模拟值,而辐射计输出的大气辐射亮温是直接的观测数据。

以 69 个无线电探空样本作为检验标准, MWP967KV 型辐射计样机的大气亮温观测输出在水汽频段的平均偏差基本都小于 1 K,氧气频段的误差相对于水汽波段略大,但平均相对偏差都小于 2.5 %,相对仍然较小;而与同场地工作的进口辐射计仪器对比,则水汽频段和氧气频段的平均亮温误

差均小于 0.5 K。

3.2 大气温湿度廓线观测

MWP967KV 型辐射计对空观测输出的大气温湿度廓线,在顶空 0~10 km 空域垂直划分为 58 层,地表至 500 m 范围的高程分辨率为 50 m,500 m~2 km 范围的高程分辨率为 100 m,2~10 km 范围的高程分辨率为 250 m。以 69 个无线电探空样本作为检验标准,辐射计大气温湿度廓线测量误差统计见图 3 和图 4。

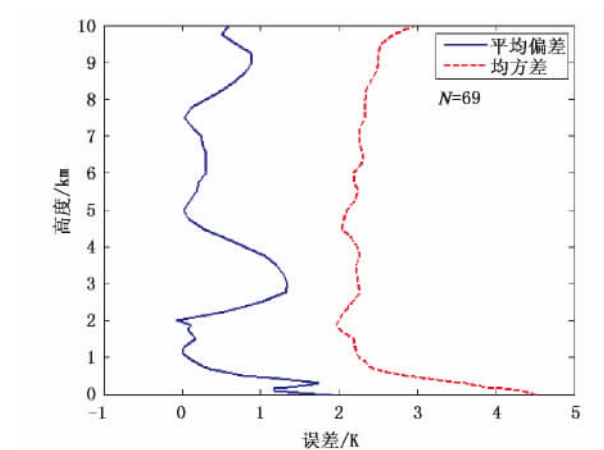


图3 温度廓线测量误差

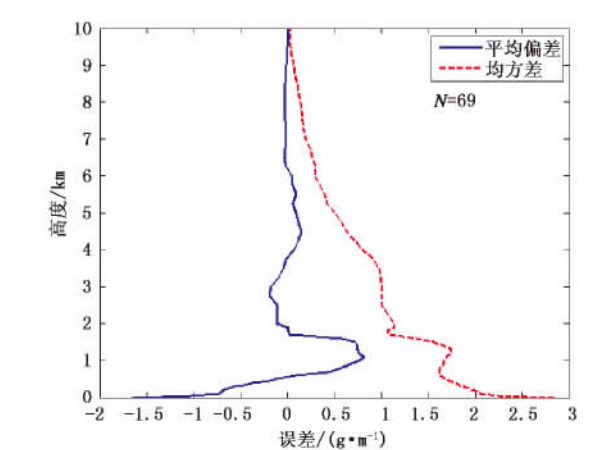


图4 水汽廓线测量误差

从统计结果来看,辐射计温度廓线测量结果与无线电探空资料的相关性达到 0.99,拟合直线斜率为 0.99、截距为 1.76;水汽廓线相关性为 0.92,拟合直线斜率为 0.98、截距为 0.06。由上图可见,辐射计温湿度廓线反演结果在低空的误差比较大,但是随着高程的增加,各项误差迅速减小。

4 结论

MWP967KV 型地基 35 通道微波辐射计系统的研制立足于国内技术及工业基础,凭借参研单位在各自领域数十年的技术积累和人才资源,完全基于自主技术攻克了双频段组合低副瓣毫米波天线、双频段宽带毫米波接收机、高稳定固态噪声源、多传感器集成一体化设计、大气温湿廓线实时反演算法、遥感数据结构设计等关键技术,系统具备了实时遥感大气温湿廓线的能力,整机国产化率超过 90%。

2012 年秋冬季节在北京开展的观测试验, MWP967KV 辐射计样机加电工作时间逾千小时,并且经历了雨雪等多种气象条件的考验,系统运行始终稳定正常。虽然辐射计试验场与无线电探空气球施放地点的直线距离并不太远,但市区与城郊之间的低空大气条件存在差别,因此会对检验结果产生一定的不利影响。但从试验过程和数据统计对比结果来看,辐射计样机测量大气辐射亮温及温湿廓线结果仍与无线电探空数据具有较好的一致性。可以预期,若辐射计工作场地靠近探空气球施放点,各项误差必将进一步减小(特别是低空数据),与同场地进口辐射计仪器的对比结果也为这一论断提供了有力的佐证。综上表明,该系统能够满足实时监测大气温湿度廓线的业务需求,达到国际同类设备的先进水平。

致谢:朱磊、吴皓、王彬彬等人参与了观测试验和数据分析工作,北京大学毛节泰教授在算法设计以及检验方法上提供了重要的指导,中国气象科学研究院苏正军博士为试验工作提供了帮助,在此一并感谢!

参考文献

- [1] 张瑞生,刘煜南. 主被动微波遥感联合探测系统[J]. 气象科技, 1983, (6): 74-75.
- [2] Askne Jan I H, Westwater E R. A review of ground-based remote sensing of temperature and moisture by passive microwave radiometers [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, 24 (3): 340-352.
- [3] 赵柏林. 大气遥感探测的现状 & 展望[J]. 气象科技, 1983, (6): 1-6.
- [4] Westwater E R, Susanne C, Christian M, et al. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere [J]. Quaderni Della Societa Italiana Di Elettromagnetismo, 2005, 1 (3): 50-90.
- [5] Domenico C, Edwin C, Randolph W, et al. Thermodynamic atmospheric profiling during the 2010 Winter Olympics using ground-based microwave radiometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (12): 4959-4969.
- [6] 赵柏林,杜金林,刘式达,等. 微波遥感大气温度层结的原理和试验[J]. 大气科学, 1978, 2 (4): 323-331.
- [7] 周秀骥,吕达仁,黄润恒,等. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京:科学出版社, 1982. 46-61.
- [8] 栾卉,赵凯. 数字增益自动补偿微波辐射计环境温度变化修正方法[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27 (2): 143-146.
- [9] 雷恒池,金德镇,魏重,等. 机载对空微波辐射计及云液态水含量的测量[J]. 科学通报, 2003, 48 (增刊 2): 44-48.
- [10] 程显海,王宁,曹培培. 微波辐射计在大气遥感和电波传播中的应用[C]//全国微波毫米波会议论文集. 北京:电子工业出版社, 2011. 1754-1757.
- [11] 刘红燕,李炬,曹晓彦,等. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22 (2): 222-229.
- [12] 黄建平,何敏,阎虹如,等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 548-558.
- [13] 刘建忠,何晖,张蕾. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估[J]. 气象科技, 2012, 40(3): 332-339.
- [14] 朱元竟,胡成达,甄进明,等. 微波辐射计在人工影响天气研究中的应用[J]. 北京大学学报:自然科学版, 1994, 30 (5): 597-606.
- [15] Cadeddu Maria P, David T D, Liljegren James C. A neural network for real-time retrievals of PWV and LWP from Arctic millimeter-wave ground-based observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (7): 1887-1900.
- [16] 刘亚亚,毛节泰,刘钧,等. 地基微波辐射计遥感大气廓线的 BP 神经网络反演方法研究[J]. 高原气象, 2010, 29 (6): 1514-1523.

A 35-channel Microwave Radiometer for Profiling Atmospheric Temperature and Humidity

Lu Jianping¹ Huang Jianping² Guo Xueliang³ Yu Ziping⁴

Lei Lianfa¹ Zhang Beidou²

(1 Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100; 2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000; 3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

4 Ordnance Science Institute of China, Beijing 100089)

Abstract : The design principles and main characteristics of the MWP967KV ground-based 35-channel microwave profiling radiometer are presented. The prototype radiometer is a compact integration of dual-band (K-band and V-band) broadband radiometry antennas, two receivers, a synthesizer local oscillator, a surface meteorological sensor, and a power supply in a cabinet. It has the capability of detecting downwelling atmospheric thermal emission continuously on a minute time scale. Several levels of observed data are composed and regulated. By using BP artificial neural network retrieval algorithms, the radiometer is capable of retrieving the vertical distributions (profiles) of atmospheric temperature, water vapor, relative humidity, and other variables in real time. The retrieved profiles range from the surface up to 10 km. The radiometer was used in atmospheric observation in Beijing in autumn to winter of 2012 for about two months. The data of 69 radiosonde cases are gathered to evaluate the radiometer's performance. The accuracies of dual-band atmospheric bright temperature values are analyzed. The retrieved temperature and humidity profiles are analyzed as well, and the mean difference, root-mean-square difference, and correlation are calculated. The statistical results indicate that the radiometer has the ability to support real time weather surveillance.

Key words : ground-based remote sensing, radiometry, radiometer technology, atmospheric profiling