

新型地基大气廓线微波探测仪及其参数反演

何杰颖^{1,2}, 张升伟¹

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:介绍的新型地基大气廓线微波探测仪样机,对进口并普遍使用的 MP3000 地基大气探测仪进行了结构创新,采用温度廓线测量的 V 波段(50~59 GHz)和湿度廓线测量的 K 波段(22~31 GHz),每个频段采用 7 个通道。与 MP3000 不同,采用独立反射面,而非共享反射面的形式。接收机采用直接检波方式,而不采用超外差检波方式,避免了接收机下变频部分,结构上更简单,空间分辨率更高,维修更容易。这种新型设备具有体积小、质量轻、空间分辨率高和非线性误差低的特点。利用辐射传输方程和已知探空资料相关数据,计算各通道加权函数,计算各通道亮温,采用神经网络算法进行大气温度廓线的反演,结果证明,此样机在结构改进的基础上完全满足地基大气廓线仪结构简单,对时间分辨率和空间分辨率,温度廓线反演结果达到预期要求。

关键词:地基;微波探测仪;直接检波;超外差;神经网络

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2010)02-0272-05

1 引言

大气温度和湿度廓线是重要的气象参数,二者与数值天气预测、农业、通信、交通、航空等密切相关。传统的探测方法为无线电探空和星载温湿度探测仪。但前者体积庞大,成本较高且安装和运行条件复杂,空间分辨率和时间分辨率较低,后者在高空具有理想的空间分辨率,但由于云的遮挡和强吸收以及大气对毫米波波段电磁波的不透明性,使其在低对流层只有较低的空间分辨率。地基大气廓线微波探测仪在国内多为进口美国的 MP3000 系列^[1]和德国的 RPG 设备^[2],全天候全天时工作,维护成本低,运行可靠,且在低对流层具有很高的空间分辨率。但其结构、体积、尺寸等方面仍有待改进。本文介绍的新型地基大气探测仪以二者为基础和参考,根据实际情况在保证整体性能的前提下,进行结构优化和改进。其后,选用有效的神经网络算法,来反演某地区大气温度的垂直分布情况。

2 仪器结构创新及特点

2.1 接收机形式的创新

超外差式接收机是常用的微波辐射计体制,技

术已经非常成熟,其系统框图如图 1 所示。除天线外,超外差式接收机通常由射频滤波器、低噪声射频放大器、本振、混频器、中频放大器、中频带通滤波器、平方律检波器、积分器和视频放大器等组成。

直接检波型微波辐射计,其接收机不采用超外差混频方式,而是经过滤波及射频放大后直接检波。本文的直接检波型微波辐射计(双极化)系统框图如图 2 所示。除天线及极化分离(OMT)以外,接收机主要由射频滤波器、低噪声射频放大器、主射频放大器、平方律检波器、积分器和视频放大器组成,天线接收到的目标信号不经过混频处理,而在射频频段上直接检波。与超外差式接收机相比,不需要本振及混频器,系统所需器部件较少,系统结构组成更加简单^[3]。

比较图 1 和图 2 可以看出,与超外差式接收机相比,直接检波型接收机具有以下优点:

(1)所用器部件数量少,结构更加紧凑、简单。

(2)不需要本振和混频部分,系统功耗有较大幅度的降低。

(3)避免了本振在振幅和频率上的漂移对系统的影响,增强了稳定性。

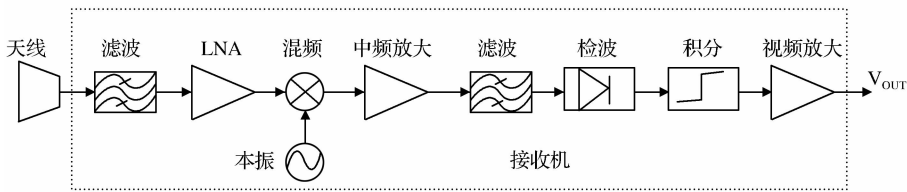


图 1 超外差式接收机框图

Fig. 1 The schematic of superheterodyne receiver

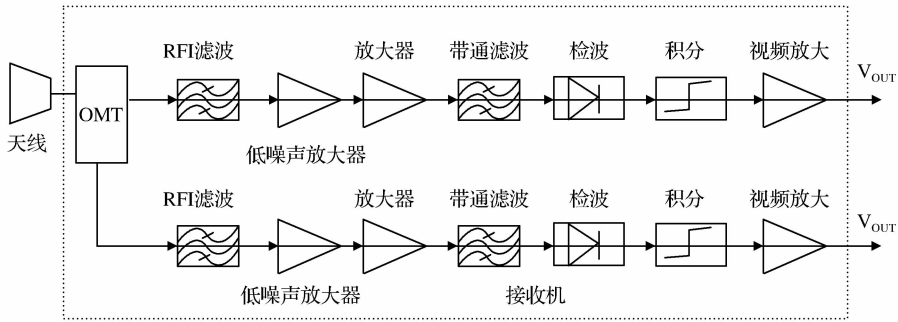


图 2 直接检波型双极化接收机框图

Fig. 2 The schematic of direct detect dual-polarized receiver

(4)避免了高频向中频转换的过程,有利于提高系统灵敏度及稳定性。

2.2 频率配置的创新

双频辐射计的两个频率的配置可以采用两种方式:

一是 Radiometrics 设备所采用的双频共用反射面的方式(图 3);二是双频分别采用独立的反射面的方式(图 4)。

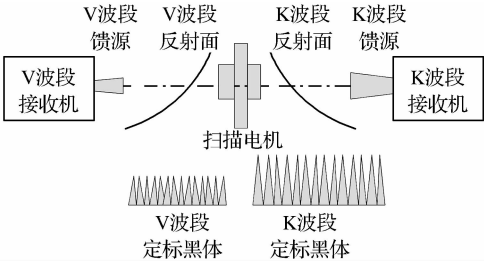


图 3 双频独立反射面系统配置

Fig. 3 The configuration of dual-frequency independent reflectors

采用双频共用反射面的方案的主要优点是系统的横向体积较小,但如果考虑到增加一个极化分离栅网后需要一定安装空间等要求,实际横向尺寸缩小的程度有限。采用双频独立反射面的方案,可以对每个频率的天线进行独立的优化和设计,也可以尽量减小天线的轴向(横向)尺寸,在一定程度上弥补由于增加一个天线所带来的体积的增加。另外,考虑到极化栅网加工的难度及其所带来的成本增加和引入的系统损耗,对于陆基观测系统,双频独立反射面的方案具有一定的优势。

因此,本设计不采用 MP 系列等普遍采用的双频共用反射面的配置方式,而在试验验证的基础上采用双频独立反射面的配置,在结构、尺寸、加工难易程度、系统损耗等方面都进行了一定程度的优化。

3 大气吸收理论

大气温度和湿度微波探测的原理是测量由气压效应而展宽的大气分子(氧气和水汽分子)转动吸收谱线及其两翼,从而实现温度和湿度的廓线的反演。其中 50~60 GHz 和 118.75 GHz 附近的氧气分子吸收谱被用于温度廓线的探测及反演,20~30 GHz 和 183 GHz 附近的水分子吸收谱用于湿度廓线的探测反演。

氧气分子和水汽分子是大气吸收和衰减最主要的影响因素,因此氧气和水汽吸收系数的模型精确与

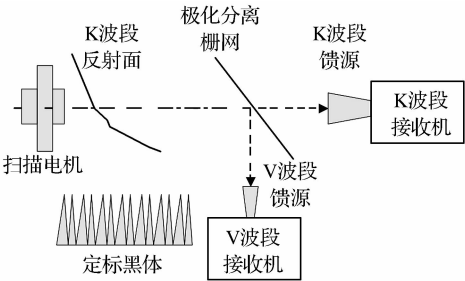


图 4 双频共用反射面系统配置

Fig. 4 The configuration of dual-frequency sharing reflector

否对温度廓线加权函数和亮温的计算产生直接影响。

这里,采用乌拉比一书中讲述的大气氧气和水汽吸收系数公式进行计算^[4](见图 5),并与 MPM93 模型(见图 6)的大气吸收系数进行比较,选取适合的吸收模型,在晴空无云的情况下对北京地区进行温度廓线的反演工作。

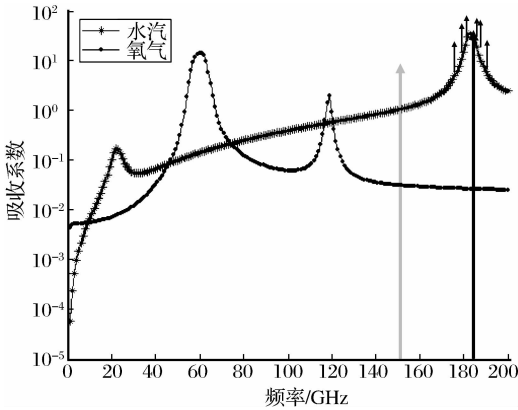


图 5 大气的不透明度谱

Fig. 5 The opacity of atmosphere(calculate)

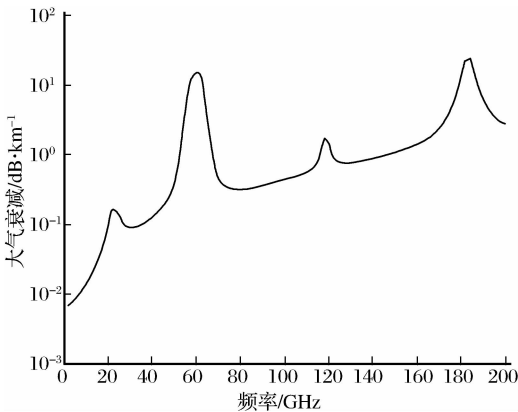


图 6 大气的不透明度谱(MPM93)

Fig. 6 The opacity of atmosphere(MPM93)

4 人工神经网络反演算法

神经网络算法在地球物理参数反演中获得越来越多的应用^[5],本文着重运用此方法,采用 3 层神经网络,输入层、隐层、输出层的神经元个数分别为 26、50、19。通过对探空数据进行学习和训练,即神经网络各层的传输函数和输入输出,得到各神经元间最适当的加权函数,从而建立一个非线性的数值模型。代价函数是检验经过训练的神经网络模型是否满足仿真的标准之一,给定代价函数,就可以验证所建立的神经网络是否能用于未知参数的仿真,还是要继续训练,或增加神经元的个数,或增加神经网络的层数和神经元维数。

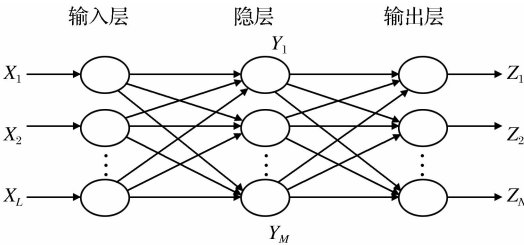


图 7 神经网络原理示意图

Fig. 7 The diagram of neural network method

对应于隐层的第 i 个节点,可以表示为:

$$Y_j = S(\sum_{i=1}^L w_{ij} x_j + b_j) \tag{1}$$

其中: w_{ij} 是连接第 i 个输入神经元和第 j 个隐层神经元的权重, b_j 是计算值和测量之间的偏差。

这里 S 是 Sigmoid 函数^[6],表述如下:

$$S(\alpha) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha)} \tag{2}$$

对于地基探测数据,选用合适时间和区域的探空数据。本文采用 BP (Back-Propagation) 神经网络,它适用于非线性模型,在反复训练过程中,加权函数得以确定,从而减小实际训练的输出向量与测量的输出向量的偏差。相邻层间神经元完全连接,输入元素输入到输入层,经过隐层,传输到输出层,前者采用 Sigmoid 函数,后者采用 Pureline 函数。输入层有 10 个神经元,分别为 7 个通道的亮温(添加随机噪声变量),对流层顶的压强、温度、高度,输出层的每个神经元都产生一个输出,本文采用 30 个输出神经元,分别对应 30 个高度值(0~35 km),也即压强值(1 000~100 mba)。由于输入输出函数的范围都在[0 1]之间,因此要合理地输出输出数据进行归一化,为了减少 0 和 1 两个数值的出现,也可将输出函数的规范值定义在[0,0.9]。

5 物理参数反演结果

地基大气微波廓线探测仪的数据共分 3 个等级:

0 级数据产品:未经定标的微波辐射计电压采样值、观测角度原始信息、辅助传感器(包括温度、气压、相对湿度、降雨标识等)的原始采样值和时间标识等。

1 级数据产品:经过多点非线性校正定标处理的亮度温度数据和观测角度、观测时间等匹配数据。

2 级数据产品:经过反演得到的大气水气廓线、大气温度廓线、大气水汽通量、水汽延迟、液态水总量等数据。

本文以温度廓线反演为例,利用地基大气探测仪获得的 1 级数据以及某时间和区域的探空数据,可以利用大气辐射传输方程建立亮温正演模型。

辐射传输方程如式 1:

$$T_b = \int_0^\infty T'(s)\alpha(s)e^{-\tau(0,s)}ds + T_{b0}e^{-\tau(0,\infty)} \tag{3}$$

$$T'(s) = T(s)/R[T(s)] \tag{4}$$

$$R(T) = \frac{kT}{hv}(e^{hv/kT} - 1) \tag{5}$$

光学厚度可定义为:

$$\tau(s_1,s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \alpha(s')ds' \tag{6}$$

加权函数可近似简化为:

$$W_T(s) = \alpha(s) \cdot \exp[-\int_0^s \alpha(s')ds'] \tag{7}$$

首先,采用美国标准大气的数据资料,得到的加权函数和亮度温度结果见图 8 和图 9。

正演模型建立后,可根据探空数据求解估计的亮度温度,与实际的亮温进行对比,即可计算正演模型的有效性和误差。

利用计算出的亮温数据和探空数据,运用神经网络算法反演具体时间和区域的温度廓线,并与探空数据对比,计算算法的有效性和误差。随机选取 45 组北京地区 2008 年 9 月份的探空数据进行训练测试及反演分析,结果如图 10、图 11。

6 方差及均方差

偏差及均方差是验证反演结果是否满足要求的两个主要考察因素。表达式可分别表述为:

$$E_{bias} = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (T_{retr}^i - T_{radio}^i) \tag{8}$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q (T_{retr}^i - T_{radio}^i)^2} \tag{9}$$

其中:Q 表示大气分层数,即反演出的温度廓线的数值的个数。偏差和均方差的数值越小,反演结果也好,误差越小,越能更好地反映某地区实际的大气温度廓线。本论文即是采用这两个公式,对反演出的大气温度廓线与实际探空资料进行对比,对若

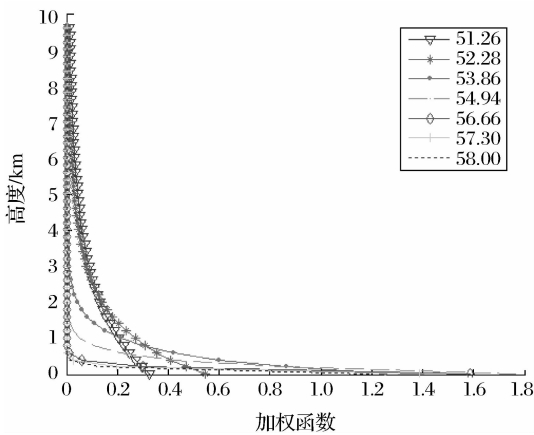


图 8 温度加权函数

Fig. 8 Temperature weighting functions

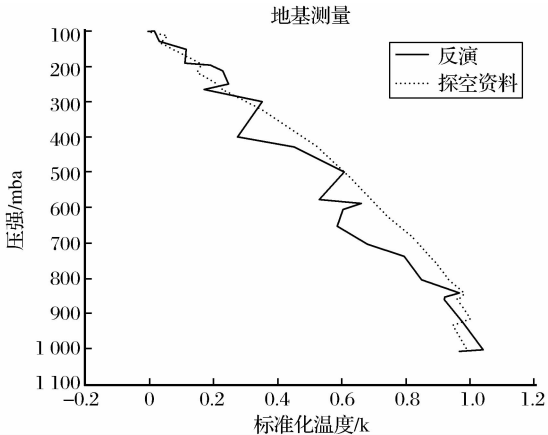


图 10 反演温度廓线与真实温度廓线的对比

Fig. 10 Comparison of retrieval and radiosoned profiles

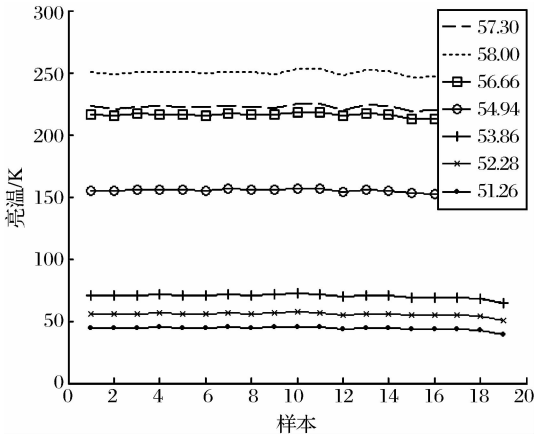


图 9 不同样本下的亮度温度

Fig. 9 Brightness temperatures of different datasets

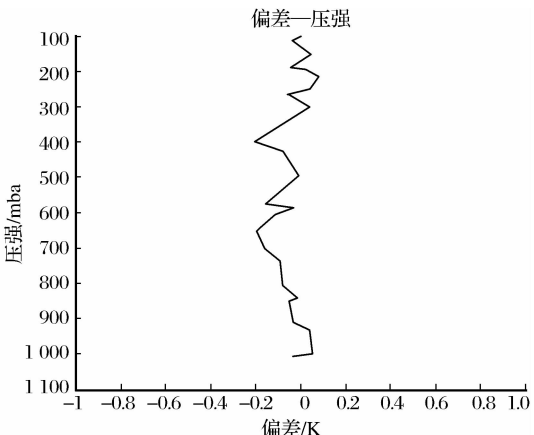


图 11 反演偏差

Fig. 11 Retrieval biases

干组反演数据取最佳值,结果见上述诸图。

7 误差来源

由上述结果,可明显看出正演和反演过程存在一定程度的误差,误差来源主要应考虑以下几方面:

(1)大气吸收模型导致的误差。由于氧气吸收系数采用了近似公式,从而导致大气吸收系数与实际存在误差。

(2)加权函数导致的误差。加权函数利用了温度加权函数的简化公式。

(3)辐射传输方程导致的误差。本文用的辐射传输方程利用了简化方式。

(4)探空资料数组选取导致的误差。探空资料的数量和时间区域等都很大程度地影响反演结果。

(5)神经网络反演算法导致的误差。训练数据和测试数据具有不规则性和偶然性,随机采用不同组训练和测试数据,以及采取不同数量的训练和测试数据,都导致反演误差的出现。

(6)在对地基大气探测仪测得的亮温进行反演时,还存在探测仪器自身由于设备器件不精确而导致的误差,由于定标等引起的人为误差等等。

8 结 语

本文介绍的新型地基大气廓线探测仪与普遍使用的国外地基大气廓线探测仪相比,具有结构简单、体积小、质量轻、安装运行简单的特点,由反演结果

可知,虽有不可避免的误差,但探测结果具有可靠性和有效性,特别是在低对流层,具有很高的空间分辨率和时间分辨率。如果在数据的选取上进行完善,利用新型地基大气廓线仪对物理参数的反演优势将更明显。本文今后将着手这方面的工作。

参考文献:

- [1] MP-Series Microwave Profilers, Radiometrics Corporation[EB/OL]. http://www.radiometrics.com/MP_Specifications_7-3-07.pdf.
- [2] Rose Th, Czekala H. Operating Manual for RPG-150-90/RPG-DP150-90 High Sensitivity LWP Radiometers[EB/OL]. <http://www.radiometer-physics.com>.
- [3] Guan Fuhong, Wang Chuang, Tian Weizhong, et al. The System of Direct Detect Millimeter Receiver[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(2): 125-128. [关福宏, 王闯, 田为中, 等. 直接检波式毫米波接收机研制[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(2): 125-128.]
- [4] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing (I) [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- [5] Shi Lei. Retrieval of Atmospheric Temperature Profiles from AMSU-A Measurement Using Neural Network Approach[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(3): 340-347. [石磊. 应用神经网络算法对 AMSU-A 测量数据反演大气温度廓线[J]. 大气和海洋技术, 2001, 18(3): 340-347.]
- [6] Churnside J H, Stermitz T A, Judith A. Schroeder, Temperature Profiling with Neural Network Inversion of Microwave Radiometer Data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(1): 105-109.

The Advanced Design of Ground-based Atmospheric Microwave Sounder and Retrieval of Physical Parameters

HE Jie-ying^{1,2}, ZHANG Sheng-wei¹

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The new design of improved ground-based atmospheric microwave sounder was presented. It has 7 channels in v-band (50~59 GHz) to retrieve temperature profiles and 7 channels in k-band (22~31 GHz) to retrieve humidity profiles. Different from MP3000, it adopts independent reflectors and direct-detect type, so it has simple structure, high spatial resolution, and low maintenance cost and small size. According to the radiometric transfer equation and radiosonde datasets, the weighting functions and brightness temperatures have been derived. Using back-propagation neural network, it can retrieve atmospheric temperature profiles. The results show that the prototype of ground-based atmospheric microwave sounder satisfies the requirements of spatial and temporal resolution and has a simple structure. Also, it meets the acquirements of high resolution and low error of temperature profiles.

Key words: Ground-based; Microwave sounder; Direct-detect; Superheterodyne; Neural network