

# 对流层水汽和液态水的地基 微波遥感探测\*

赵从龙 蔡化庆 宋玉东

(国家气象局气象科学研究所)

林 滨

(北京无线电测量研究所)

## 提 要

本文论述了遥感对流层水汽和液态水的新型双通道微波辐射计的设计原理和结构特点,给出了不依赖无线电探空资料的系统定标方法。讨论了水汽总量和云中液态水含量的统计反演法以及水汽垂直分布的迭代反演法。最后给出了1989年夏季中尺度预实验观测中辐射计的部分观测结果及其与无线电探空仪的对比。

## 一、引 言

气象服务的改善特别是灾害性天气监测及超短期预报需要在时空尺度上提供更加密集的观测资料。新型数字化双频微波辐射计作为京、津、冀中小尺度天气实验研究基地的遥感探测工具,提供对流层水汽场及液态水的连续实时观测资料。原理上水汽变化容易从测量水汽1.35cm微波吸收线附近的大气热辐射中得出。在云天情况下,1cm微波吸收线附近大气窗区的辐射测量可用于计算云中液态水的微波辐射贡献<sup>[1]</sup>。

## 二、系统物理结构

双频数字化微波辐射计分为天馈、接收机、控制和预处理以及计算机等四个单元。图1为系统组成方框图,辐射计实物照片见图2。仪器上部为准光学偏置抛物面天馈单元及接收机,下部圆台状机箱内为系统电源。偏置抛物面天线没有口面遮挡,因此旁瓣低、效率高。二抛物面置于同一个方位转台上以实现天线波束的方位旋转,利用90°偏置的特点,俯仰扫描是通过两个抛物反射面绕馈源喇叭轴线同步旋转实现的。在作扫角观测时,高频机箱保持静止,因此有良好的机械稳定性。为便于绝对标定,天线可以垂直俯视水平放置的微波黑体源。由微处理器控制的步进电机用于驱动天线扫描系统。接收机箱底部装有半导体温控设备,它能使机箱在室外环境下保持恒温(32±2℃)。仪器长2.3m,高1.4m,

本文1990年2月21日收到,8月25日收到修改稿。

\* “七五”国家科技攻关项目75-09-02-18子课题。

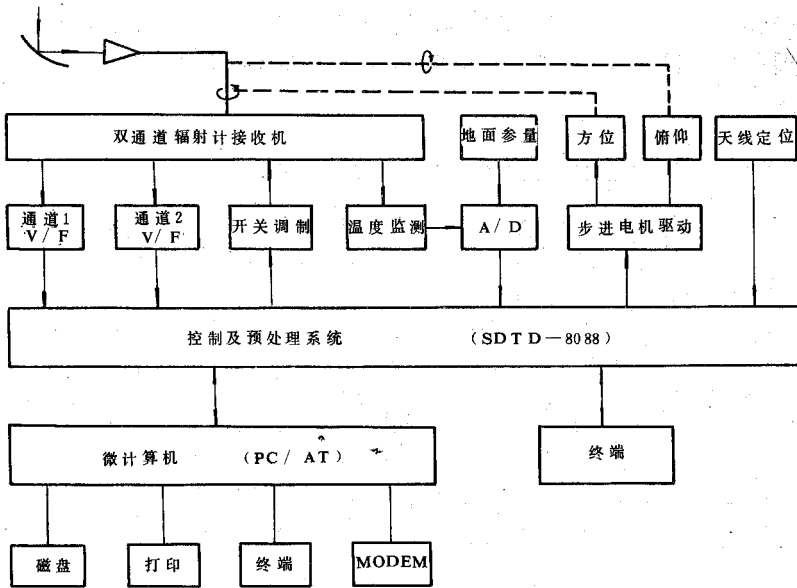


图 1 双频微波辐射计系统组成方框图

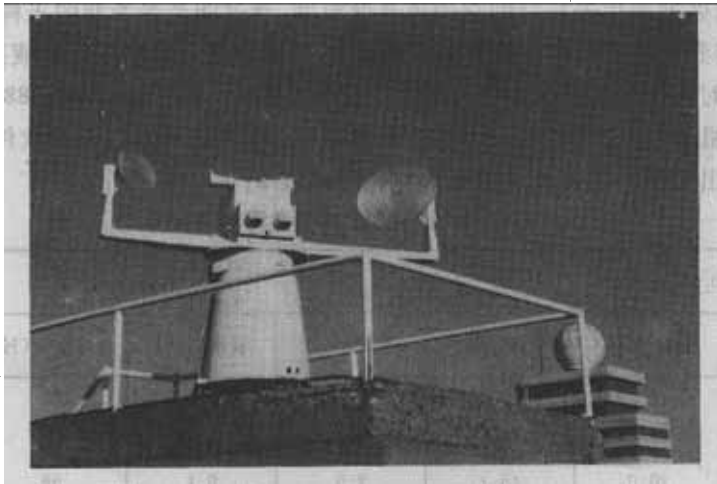


图 2 安装在探测楼顶层平台的双频微波辐射计

重约 120kg。为便于运输,系统可以分解成天线、机箱和底座三部分。

### 三、数字化辐射计系统

双频微波辐射计接收原理见图 3。两个通道线路结构相同。调制开关为三端铁氧体环行器,调制信号为可编程数字脉冲信号。天线接收到的大气热辐射经过定向耦合器主波导馈入环行器的天线端口,参考负载与环行器开关封闭在机箱内的一个恒温槽中。第二参考源采用噪声二极管而不是通常的波导负载,从而简化了微波电路。输出视频信号经 V/F 转换后作为数字信号送入微处理器。在每一个调制周期内,微处理器得到三种不同的数字

输入,它们分别对应于天空、参考负载和第二参考热噪声。程控数字调制信号可使环形器开关在一个周期内只接通天线,或以任意时间比接通天线和参考,从而就能够组成不同类型的接收系统。

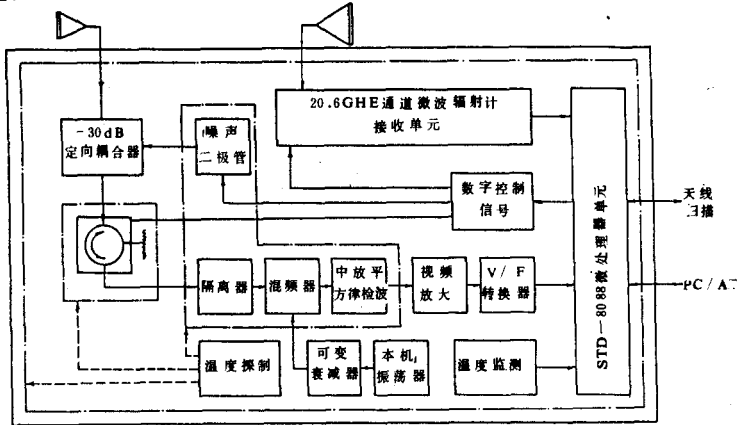


图3 双通道接收机原理框图

内部数字接口采用STD总线<sup>[2]</sup>。辐射计的全功率数字输出由STD-8088微处理器实时处理。初始预处理产生未标定的双通道亮度温度,通过两个参考源的采样数值计算出标定因子,从而得到双通道订正亮温。最后由订正亮温计算出水汽总量和液态水含量,每分钟在终端上实时显示一次。原始资料每5分钟存入磁盘一次。与STD-8088微处理器联机通信的主计算机为PC/AT,主机通常用于资料存贮、反演、绘图、打印及软件开发等。表1为终端数据输出实例。辐射计的主要性能指标见表2。

表1 双频微波辐射计终端数据输出实例

文件名:VF 021610.15

| 时间    | 亮温 1(K) | 亮温 2(K) | 水汽(mm) | 云水(mm) | 相对湿度(%) | 地面温度(℃) |
|-------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|
| 10:16 | 19.5    | 15.6    | 3.3    | 0.1    | 98      | 0.5     |
| 10:17 | 19.2    | 15.1    | 2.9    | 0.1    | 99      | 0.5     |
| 10:18 | 20.0    | 15.1    | 2.5    | 0.1    | 99      | 0.5     |
| 10:19 | 19.7    | 15.1    | 2.6    | 0.1    | 98      | 0.5     |
| 10:20 | 19.8    | 15.4    | 2.9    | 0.1    | 99      | 0.6     |
| 10:21 | 19.9    | 15.2    | 2.7    | 0.1    | 98      | 0.5     |

表2 双频微波辐射计性能指标

| 项 目  | 指 标           |
|------|---------------|
| 工作频率 | 20.6/31.65GHz |
| 中放带宽 | 50~550MHz     |
| 整机噪声 | 5.5dB         |
| 积分时间 | 软件可调          |
| 天线波束 | 2.5°          |
| 天线副瓣 | <-26dB        |

#### 四、系统标定

标定的目的是要确定辐射计的数字输出与天线温度间的线性关系。原理上对于理想辐射计只需选取二个校准点,准确知道了输入的物理温度及辐射计的输出,就能得到标定关系。在辐射计的一个调制周期中,可以得到天线、参考源及噪声源的总功率输出采样值(依次记为  $N_a$ ,  $N_r$  及  $N_n$ )。如果已知参考源物理温度  $T_r$  及噪声源物理温度  $T_n$ ,则天线温度  $T_a$  为:

$$T_a = T_r - \left(\frac{T_n}{N_n}\right)(N_r - N_a) \quad (1)$$

其中  $T_n/N_n$  称为相对增益。由于天线温度  $T_a$  通常比参考温度和噪声源温度小很多,故用外推法求天空亮温时,参考及噪声源温度的微小误差都将被放大,对于非理想状况下的各种误差通过引入噪声源温度的修正值  $\Delta T_n$  来订正,即

$$T_a = T_r - \left(\frac{T_n + \Delta T_n}{N_n}\right)(N_r - N_a) \quad (2)$$

另一方面,天线接收到的大气辐射为

$$T_b = T_c e^{-\tau} + T_m (1 - e^{-\tau}) \quad (3)$$

其中,  $T_c = 2.9 \text{ K}$  为宇宙背景辐射,  $T_m$  为大气平均辐射亮温,在一定季节可视为常数<sup>[1]</sup>,  $\tau$  为光学厚度。在晴空条件下,大气满足平面平行大气的假设,所以

$$\tau = \tau_0 (AM) \quad (4)$$

其中  $\tau_0$  为天顶光学厚度,  $AM = 1/\sin\theta$  为大气质量<sup>[3]</sup>,  $\theta$  为仰角。在俯仰扫角观测时,对于不同的仰角  $\theta_i (AM_i)$ ,可得到不同的观测值  $N_i (N_i = \frac{N_r - N_{ai}}{N_n})$ ,综合(1),(2),(3)和(4)式,注意到  $T_a = T_b$ <sup>[4]</sup>,则得

$$N_i = \frac{T_r - T_m - (T_c - T_m)e^{-\tau_0 AM_i}}{T_n + \Delta T_n} \quad (5)$$

(5)式表明观测值  $N_i$  为独立变量  $AM_i$  的函数,  $\Delta T_n$  和  $\tau_0$  为参数。用最小二乘法容易求得  $\Delta T_n$  和  $\tau_0$ ,从而就确定了辐射计输出与天线温度的线性关系。典型的展示晴空大气吸收和大气质量关系的扫角标定曲线如图4所示,图中(1)使用的工作频率为  $20.6 \text{ GHz}$ ,线性相关系数  $R_1 = 0.9994$ ;图中(2)使用的频率为  $31.65 \text{ GHz}$ ,相关系数为  $R_2 = 0.9996$ 。噪声源温度修正值  $\Delta T_n$  的变化约  $2 \sim 3 \text{ K}$ 。

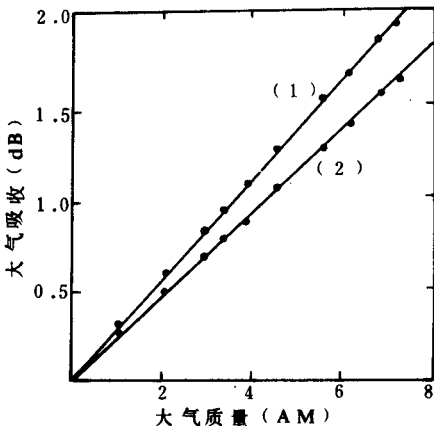


图4 北京1989年4月30日晴空大气的吸收测量(天顶  $AM=1$ )

### 五、实验观测

#### 1. 水汽总量的对比观测实验

从1988年10月开始,新型双频微波辐射计与无线电探空仪进行了对比实验观测。采用线性统计反演方法<sup>[6]</sup>,实时计算水汽总量和云中液态水含量。如果大气在频率  $\nu$  的吸收由  $e^{-\tau}$  表示,那么光学厚度  $\tau(\nu)$  为:

$$\tau(\nu) = \ln\left(\frac{T_m(\nu) - T_c}{T_m(\nu) - T_b(\nu)}\right) \tag{6}$$

式中,  $T_c$ 、 $T_m$  定义同前,  $T_b(\nu)$  为辐射计观测的亮度温度。水汽  $V$  和液态水  $L$  的路径积分总量按以下统计公式实时计算:

$$V = a_0 + a_1\tau(20.6) + a_2\tau(31.6) \tag{7}$$

$$L = b_0 + b_1\tau(20.6) + b_2\tau(31.6) \tag{8}$$

其中系数  $a_i, b_i$  由历史探空资料回归得到。表3为使用北京探空站1983、1984、1985三年探空资料共2190份样本回归统计所得的反演系数。

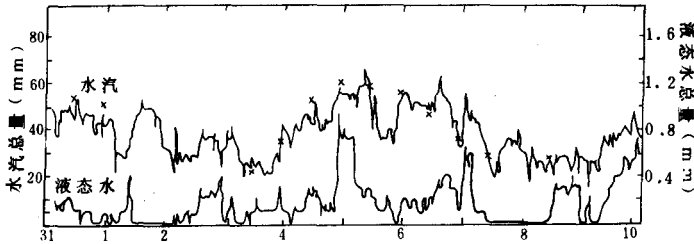


图5 辐射计连续观测的水汽和液态水含量曲线

(×为探空仪测值)

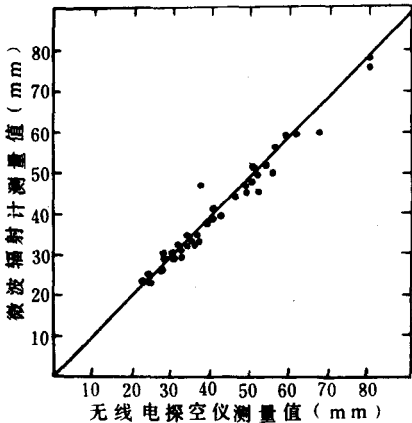


图6 北京1989年7—8月辐射计与无线电探空仪的观测值对比

(均方根误差为2.6mm (6.4%))

微波辐射计可提供连续的水汽总量和液态水含量观测资料。图5为北京1989年夏季中尺度天气预试验研究观测中,连续观测的水汽总量和液态水含量的时间序列曲线,其中8月4日到5日的降水过程在图中明显反映出来。从图中可以看出,在降雨前的短时间内,水汽总量约增加23%,液态水增加约1.5倍。图6为辐射计与无线电探空仪观测的水汽总量对比散点图。可比样本共40份,二者均方根偏差为2.6mm (6.4%)。

表3 北京地区按季统计反演水汽总量和云中液态水含量的回归系数[单位:V, L(mm)]

|   | $a_0$   | $a_1$   | $a_2$    | $b_0$   | $b_1$   | $b_2$  |
|---|---------|---------|----------|---------|---------|--------|
| 春 | -0.5545 | 309.923 | -138.208 | -0.0859 | -0.4168 | 2.7054 |
| 夏 | -0.8280 | 326.968 | -147.323 | -0.1354 | -1.0910 | 3.6482 |
| 秋 | -0.6458 | 308.975 | -132.430 | -0.0845 | -1.0917 | 3.2382 |
| 冬 | -1.0989 | 309.696 | -133.649 | -0.0740 | -0.3579 | 2.5818 |

## 2. 水汽密度的垂直分布观测

为了获得水汽密度在对流层中的分布,我们利用扫角辐射亮温资料,采用非线性迭代法反演水汽廓线<sup>[6]</sup>。

考虑地对空大气遥感方程:

$$T_b(\nu, \theta) = T_c \cdot \exp\left(-\int_0^{\infty} \alpha(z, \nu) \sec\theta dz\right) + \int_0^{\infty} T(z) \alpha(z, \nu) \sec\theta \cdot \exp\left(-\int_0^z \alpha(z, \nu) \sec\theta dz\right) \cdot dz \quad (9)$$

式中  $T(z)$  代表大气温度层结,  $\alpha$  为大气吸收系数,  $\theta$  为天顶角,  $T_c$  表示宇宙背景亮温。利用辐射计水汽通道扫角观测值  $T_b(\nu, \theta)$  通过解方程(9)可获得晴空大气的水汽廓线。

用迭代法求解方程(9), 迭代公式为<sup>[6]</sup>:

$$T_{bi2}^{(n)} = T_0 + \int_0^{\infty} \frac{\partial T}{\partial z} \cdot e^{-\int_0^z (\alpha_{o_2} + A \cdot \rho^{(n)}) \cdot \sec\theta \cdot dz} \cdot dz$$

$$\rho_i^{(n+1)} = \rho_i^{(n)} \cdot [1 - (T_{bi1} - T_{bi2}^{(n)}) / S_i^{(n)}]$$

$$\rho^{(n+1)} = \sum_{i=1}^m \rho_i^{(n+1)} \cdot V_i^{(n)} / \sum_{i=1}^m V_i^{(n)}$$

其中,

$$V_i^{(n)} = \exp\left(-\int_0^z (\alpha_{o_2} + A \cdot \rho^{(n)}) \sec\theta_i \cdot dz\right) \cdot \sec\theta_i \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \Delta z$$

$$S_i^{(n)} = \int_0^{\infty} \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \exp\left(-\int_0^z (\alpha_{o_2} + A \cdot \rho^{(n)}) \cdot \sec\theta_i dz\right) \sec\theta_i \cdot \left(\int_0^z A \cdot \rho^{(n)} dz\right) \cdot dz$$

$T_0$  表示地面温度,  $T_{bi1}$  为观测亮温,  $T_{bi2}$  为计算亮温,  $i$  为扫角数,  $\rho$  为水汽密度。

从大量的探空资料可以看出,水汽廓线随高度呈指数下降趋势,地面湿度参量对水汽廓线具有一定的制约作用,因此,在迭代模式中加入地面参量限制条件:

$$|\rho_s - \rho_s^{(n)}| < \gamma \cdot \rho_s$$

其中  $\rho_s$  为地面水汽密度,  $\rho_s^{(n)}$  为第  $n$  次水汽迭代值,  $\gamma$  为限制常数。

在数值计算中,将大气从地面到40hPa 分成25层,其中地面为第一层,从960hPa 开始到40hPa 均分成24层,间隔为40hPa。一次扫角观测加上反演水汽廓线约需5分钟时间,程控扫角以2.5°/s。速率从仰角7.5°向天顶方向扫描观测,观测值经预处理后自动送入主机,

然后代入模式反演水汽分布,结果以图形方式输出.图7是得到的低层强逆湿水汽分布的例子.图8是双频辐射计与探空仪观测的水汽廓线相对偏差分布,在中低层相对偏差为20~30%,在高层由于水汽密度很低,相对偏差约50%。

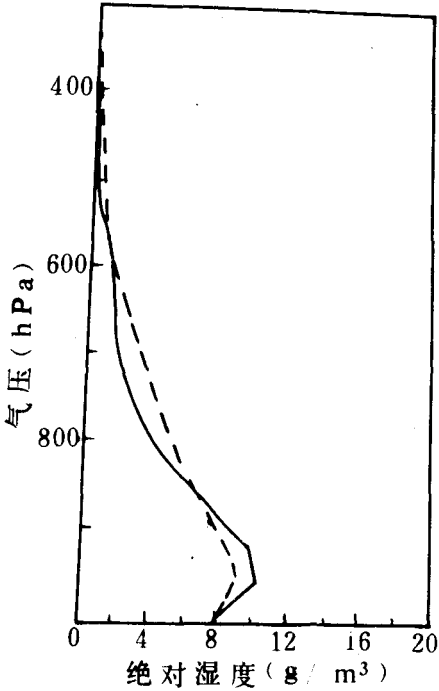


图7 北京1988年10月25日7:15使用辐射计实测值反演水汽廓线的实例  
(实线为探空仪测值、虚线为辐射计测值)

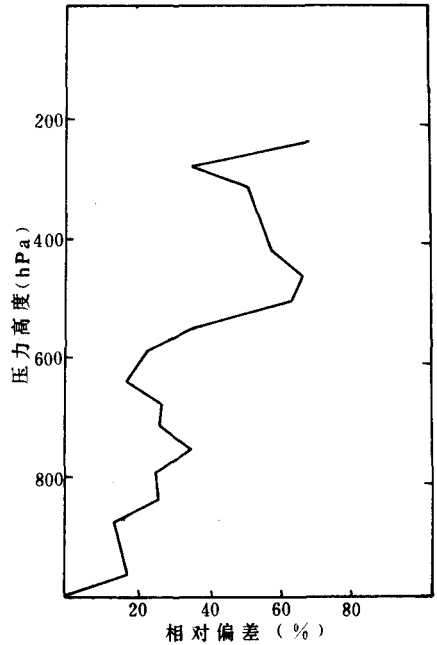


图8 辐射计观测的水汽廓线与无线电探空对比偏差

### 六、结 论

新型数字化双频微波辐射计具有稳定性好,测量精度高、组态灵活等特点。通过一年多的观测实验,表明了该系统能够连续、无人职守地对水汽和液态水含量进行遥感探测。和无线电探空仪对比,水汽总量的探测偏差为6~10%,水汽廓线探测偏差为20~50%(低空~高空)。除了可直接用于中小尺度天气实验研究外,该系统还可应用于云物理,人工影响天气工程以及航空航天等领域。系统设计的准光学偏置抛物面微波天线、数字调制解调技术以及低温微波黑体校准测量等方法,也适用于任何高精度热辐射噪声的测量研究。

### 参 考 文 献

[1] Hogg, D. C. , et al. , *J. Appl. Meteorol.* , 22, 789-806, 1983.  
 [2] 赵从龙, *气象*, 14, 6, 49—51, 1988.  
 [3] Guiraud, F. O. et al. , *IEEE Trans.* , GE-17, 129—136, 1979.

- [4] 赵从龙等,中国科学,B辑,8,759—768,1983.  
[5] Westwater, E. R. et al., *Radio Science*, 15, 947—957, 1980.  
[6] 赵柏林等,中国科学,B辑,11,1059—1066,1984.

**MEASUREMENT OF WATER VAPOR AND CLOUD LIQUID  
WATER CONTENT IN THE TROPOSPHERE BY GROUND  
-BASED MICROWAVE REMOTE SENSING**

Zhao Conglong Cai Huaqing Song Yudong

(*Academy of Meteorological Science, SMA*)

Lin Bin

(*Beijing Research Institute of Radio Measurement*)

**Abstract**

The design principal and structure features of a new type dual-channel ground-based microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid water in the troposphere are discussed. A method independent of radiosonde data is employed for the absolute system calibration. A statistical method for retrieving the total water vapor and cloud liquid water content and a non-linear iterative algorithm for retrieving the water vapor profiles in the troposphere are discussed. Some experimental results of the Operational Experiment on Mesoscale Meteorology conducted in the summer of 1989 are presented, and the profiles have been compared with the radiosonde data. The results are satisfied.