

## 微波遥感大气湿度层结的研究\*

赵柏林 尹宏 李慧心 胡成达 杜金林 朱元竞 景荣林

(北京大学地球物理系)

### 提 要

根据大气噪音谱,用接收 1.35 cm 微波噪音,遥感大气湿度层结。研制了 1.35 cm 微波辐射计 ( $\nu=22.235$  Gc)。用迭代法反演大气湿度层结,在野外实验中与无线电探空仪对比,比湿相差的百分比,均方根偏差在 700 mb 以下  $<20\%$ , 650 mb 以下  $<29\%$ ; 大气中水汽总含量的测量,两者相差为 3%。为了遥感雨中含水量,研制 3 cm 微波辐射计 ( $\nu=9.37$  Gc)。并测试了大气噪音。

### 一、引 言

大气微波噪音谱在  $\lambda=1.35$  cm 波段有一个水汽的吸收带。按 Kirchhoff 定律,物体在某波段有强烈的吸收,必然在该波段下有强烈的辐射。因此我们可在  $\lambda=1.35$  cm 波段收到大气较强的热辐射的信息。水汽的辐射强度和水汽的含量成正比。因此从水汽吸收带辐射和测量可以遥感大气水汽分布和水汽总含量。按辐射传输方程

$$T_b(\theta, \nu) = T_\infty e^{-\int_0^\infty \alpha \sec \theta dz} + \int_0^\infty T(z) \alpha e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz'} \sec \theta dz \quad (1)$$

其中,  $T_b(\theta, \nu)$  是地面观测到的亮度温度,  $\theta$  是天顶角,  $\nu$  是频率,  $T_\infty$  是宇宙太空的辐射 ( $\sim 3^\circ\text{K}$ ),  $\alpha$  是吸收系数,  $z$  是高度,  $T(z)$  是大气温度层结。用压高公式将高度和压力联系起来,即

$$p = p_0 e^{-\int_0^z \frac{g}{RT} dz} \quad (2)$$

其中,  $p$  为气压,  $p_0$  是地面气压,  $g$  是重力加速度,  $R$  是空气气体常数。吸收系数为

$$\alpha = \alpha_{\text{O}_2} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}}$$

其中,  $\alpha_{\text{O}_2}$  是氧分子吸收系数,  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$  是水汽的吸收系数。

氧分子光谱在微波段共有 46 根吸收线,氧分子的吸收系数为

$$\alpha_{\text{O}_2} = c_1 p T^{-3} \nu^2 \sum_N S_N \exp\left(-\frac{E_N}{kT}\right) \text{db/km}$$

$$N = 1, 3, 5, \dots, 45$$

其中,  $c_1 = 2.6742$ ,  $p$  为压力 (mmHg),  $T$  为温度 ( $^\circ\text{K}$ ),  $\nu$  为频率 (Gc),  $k$  为 Boltzman 常数,  $E_N$  为能级, 而  $\frac{E_N}{kT} = 2.06844 \frac{N(N+1)}{T}$ 。  $S_N$  是分子跃迁下平均偶极矩矩阵元

\* 本文于 1980 年 2 月 29 日收到, 1980 年 5 月 31 日收到修改稿。

量,  $S_N$  的表达式见[1]。

水汽吸收系数为<sup>[2]</sup>

$$\alpha_{H_2O} = 187.8e^{-\frac{644}{T}} \times \left[ \frac{\nu^2 \rho_w}{T^{3.125}} \right] \times \left[ 1 + 0.011 \frac{\rho_w T}{p} \right] \times \left[ \frac{1}{(\nu - 22.235)^2 + \Delta\nu^2} + \frac{1}{(\nu + 22.235)^2 + \Delta\nu^2} \right] + 1.11 \times 10^{-2} \frac{\rho_w \nu^2 \Delta\nu}{T^{3/2}} \text{ db/km} \quad (5)$$

其中,  $\Delta\nu = 2.61 \left( 1 + 0.011 \frac{\rho_w T}{p} \right) \left( \frac{p}{760} \right) \left( \frac{T}{315} \right)^{0.625}$ ,  $\rho_w$  为水汽密度( $\text{g/m}^3$ )。 (5)式 第一项是

$\lambda = 1.35 \text{ cm}$  水汽吸收线的作用, 第二项是微波高频及红外波段水汽吸收线的影响。

在  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  波段, 水汽吸收系数比氧的吸收系数大得多, 甚至两者数量级都有差异。用北京资料计算, 在  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  波段, 各高度上, 氧分子的吸收系数与水汽吸收系数见图 1。故而地面上接收的  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  波段的微波辐射能够反映大气中水汽含量的情况。

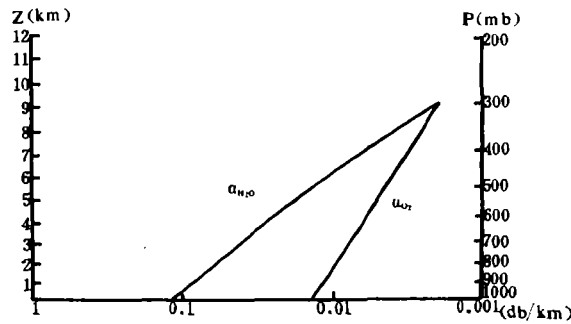


图 1  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  波段氧分子和水汽吸收系数随高度的分布

用扫角法观测亮度温度  $T_b(\theta)$  的一系列值, 从方程(1)出发, 将吸收系数中的水汽密度  $\rho_w$  反演出来, 这就是我们的目的。

## 二、1.35 cm 微波辐射计

为了遥感大气湿度层结, 我们研制了  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  波段的微波辐射计。它是补偿式迪克微波辐射计<sup>[1]</sup>。它是利用附加噪声源补偿讯号达到比较源的温度, 以保持接收机输出为零, 这样避免了放大器增益不稳定的影响。比较源的温度减去噪声源补偿的温度就是讯号的温度。它的方框图及外形, 见图 2 和图 3。

天线是水平极化的卡塞格伦式天线, 抛物面直径为  $1.2 \text{ m}$ , 天线主波瓣波束宽度约  $1^\circ$ 。调制器是 40 周方波的铁氧体调制器, 它使接收机交替地与天线和比较源相接。调制的讯号通过隔离器(正向  $0.8 \text{ db}$ , 反向  $40 \text{ db}$ )进入正交场混频器。另一路是以甘氏振荡器为本振, 本振讯号经衰减器调节输出功率, 波长计监视频率, 经过隔离器进入正交场混频器。平衡混频后检波得到的中频差频进入前置中放及主中放。中放带宽  $100 \text{ Mc}$  ( $20-120 \text{ Mc}$ ), 增益约  $80 \text{ db}$ , 噪声系数为  $1.7 \text{ db}$ 。经中频检波后的讯号由低放进一步

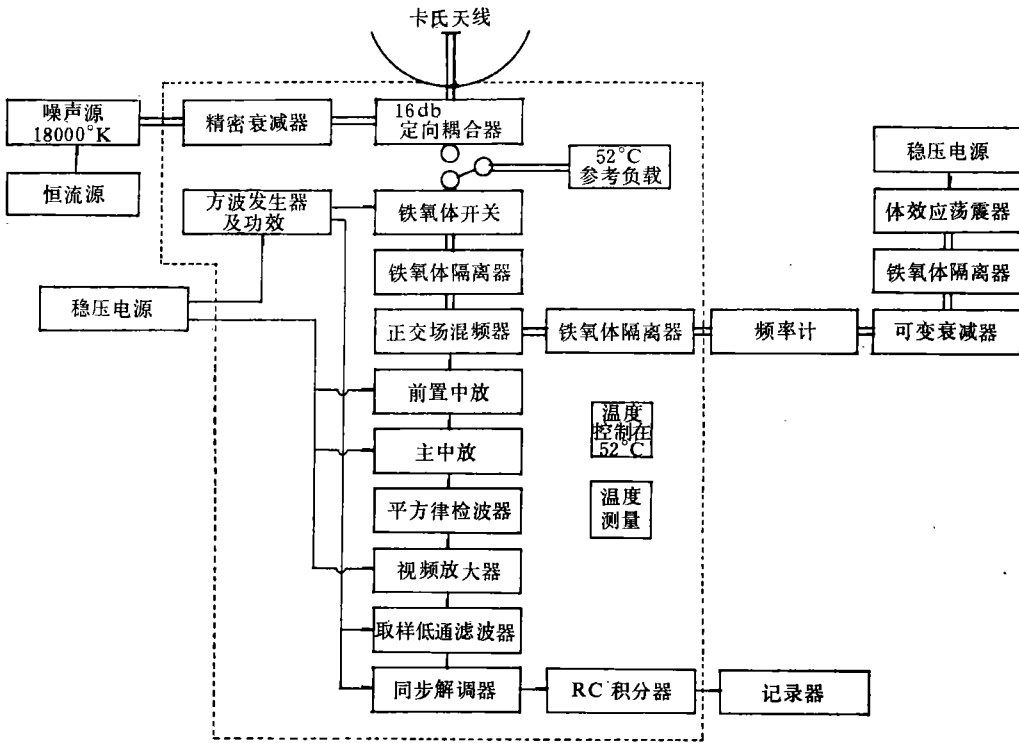


图 2  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  微波辐射计的方框图

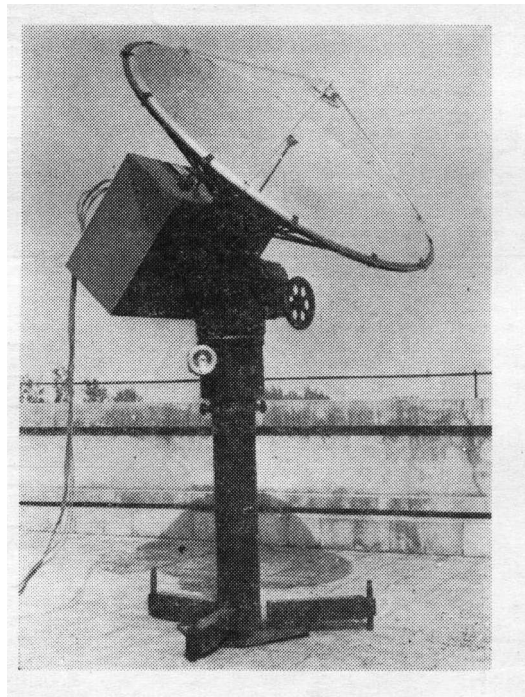


图 3  $\lambda = 1.35 \text{ cm}$  微波辐射计的外形

放大。低放采用窄带放大器，其放大倍数  $10^4$ 。讯号经低放后送入同步积分器。它是窄带滤波器，使方波调制讯号全部通过，其他干扰及噪声被滤掉。由同步积分器输出的方波讯号，加到同步解调器上。它是一个位相检波器。由方波发生器进行控制。在其输出端接有滤波积分器，使来自调制器的同步方波讯号变为直流讯号，用电子电位差计记录。方波发生器用以提供铁氧体调制器及相位检波器的方波信号。补偿支路是用定向耦合器与接收机连通。它包括噪声发生器(以恒流源供电)，隔离器及精密衰减器等部件。其补偿数值可通过改变精密衰减器的不同挡位来实现，它保持记录器读数为零或在零附近。波导开关作为测量和校零两种工作状态的变换装置。开关置于校准位置，则通过调制器交替地接入两个同温匹配负载，此时记录器为零，开关置于测量位置，则接收机接收大气噪音讯号。微波辐射计电子电位差计记录的电压要通过冷负载终端(液氮、干冰、冰)，热噪声源和自然观测进行检定，用探空记录进行标定。

1.35 cm 微波辐射计频率为 22.235 Gc，射频带宽 250 Mc，中放带宽  $B=100$  Mc，整机噪声系数 9.6 db，噪声温度  $T_R=2378^\circ\text{K}$ 。积分时间  $\tau=3.5$  sec。当调节噪声源使接收机输入功率  $T_A$  为  $374^\circ\text{K}$  时，感测温度为

$$\Delta T_A = \frac{\alpha^*(T_A + T_R)}{\sqrt{B\tau}} = 0.3^\circ\text{K}$$

其中， $\alpha^*=2$ 。

用 1.35 cm 微波辐射计(22.235 Gc)观测不同仰角上的大气噪音见图 4。

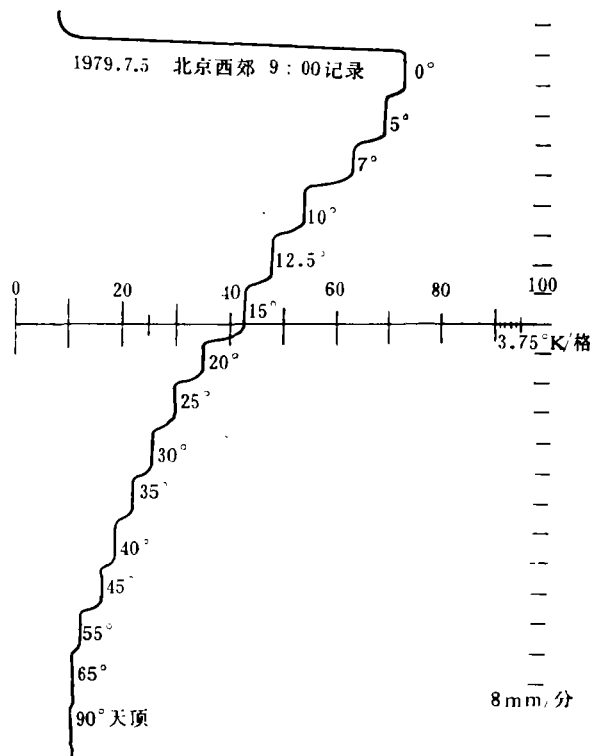


图 4 1.35 cm 微波辐射计(22.235 Gc)接收不同仰角上的大气噪音

### 三、反演方法

用 1.35 cm 微波辐射计扫角法观测得到一系列不同角度上的亮度温度  $T_b(\theta)$ , 用  $T_b(\theta)$  通过 (1) 式将吸收系数  $\alpha$  中的水汽密度反演出来。(1) 式经分部积分后可近似地表达为下式<sup>[4]</sup>

$$T_b(\theta) = T_0 + \int_0^\infty \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz'} dz \quad (6)$$

其中,  $T_0$  为地面温度,  $\alpha$  是吸收系数, 而  $\alpha = \alpha_{\text{O}_2} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ , 如 (4), (5) 式。又  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} \doteq Aq$ , 这里  $q$  是比湿,  $A$  是温度、压力和频率的函数。设  $u = \int_0^z \alpha dz$  及  $\Delta u = \frac{\Delta q}{q} \int_0^z Aq dz$ , 于是

$$\begin{aligned} \Delta T_b &= - \int_0^\infty \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta u \sec \theta e^{-u \sec \theta} dz \\ &= - \frac{\Delta q}{q} \int_0^\infty \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \sec \theta \left( \int_0^z Aq dz' \right) e^{-u \sec \theta} dz \end{aligned} \quad (7)$$

用第  $n$  次迭代之  $q^{(n)}$ , 由 (6) 式得到

$$T_{b_i \#}^{(n)} = T_0 + \int_0^\infty \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^z (\alpha_{\text{O}_2} + Aq^{(n)}) \sec \theta_i dz'} dz \quad (8)$$

于是

$$T_{b_i \#} - T_{b_i \#}^{(n)} = - \frac{q_i^{(n+1)} - q^{(n)}}{q^{(n)}} \int_0^\infty \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^z (\alpha_{\text{O}_2} + Aq^{(n)}) \sec \theta_i dz'} \sec \theta_i \left( \int_0^z Aq^{(n)} dz' \right) dz \quad (9)$$

$$\text{则 } q_i^{(n+1)} = q^{(n)} \left[ 1 - \frac{T_{b_i \#} - T_{b_i \#}^{(n)}}{S_i^{(n)}} \right] \quad (10)$$

其中, 
$$S_i^{(n)} = \int_0^\infty \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^z (\alpha_{\text{O}_2} + Aq^{(n)}) \sec \theta_i dz'} \sec \theta_i \left( \int_0^z Aq^{(n)} dz' \right) dz$$

而

$$q^{(n+1)} = \frac{\sum_{i=1}^m q_i^{(n+1)} V_{ij}}{\sum_{i=1}^m V_{ij}} \quad (11)$$

其中, 
$$V_{ij} = e^{-\int_0^{z_j} (\alpha_{\text{O}_2} + Aq^{(n)}) \sec \theta_i dz'} \sec \theta_i \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta z_j$$

迭代至  $|T_{b_i \#}^{(n+1)} - T_{b_i \#}^{(n)}| < \delta$  为止,  $\delta$  是允许的误差。此时  $q^{(n+1)}$  为反演的比湿。取  $\delta = 0.01^\circ \text{K}$ 。

### 四、观测与资料分析

1979 年 6 月—7 月在北京西郊进行微波辐射计与无线电探空仪的对比观测。湿度用

两种方式表达：比湿和水汽总含量。

1. 比湿  $q$ ：微波辐射计遥感比湿与无线电探空仪测量比湿，两者对比示例如图 5、图 6。根据 9 次对比观测，两者均方根偏差  $\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{rms}$  随高度分布见图 7 中所示。在 700 mb 以下， $\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{rms} < 20\%$ ，在 650 mb 以下， $\left(\frac{\Delta q}{q}\right)_{rms} < 29\%$ 。因此，1.35 cm 微波辐射计遥感大气湿度层结是可行的。绝对值  $\Delta q$  随高度是递减的，在高空比湿很小，使得高空相对偏差很大。

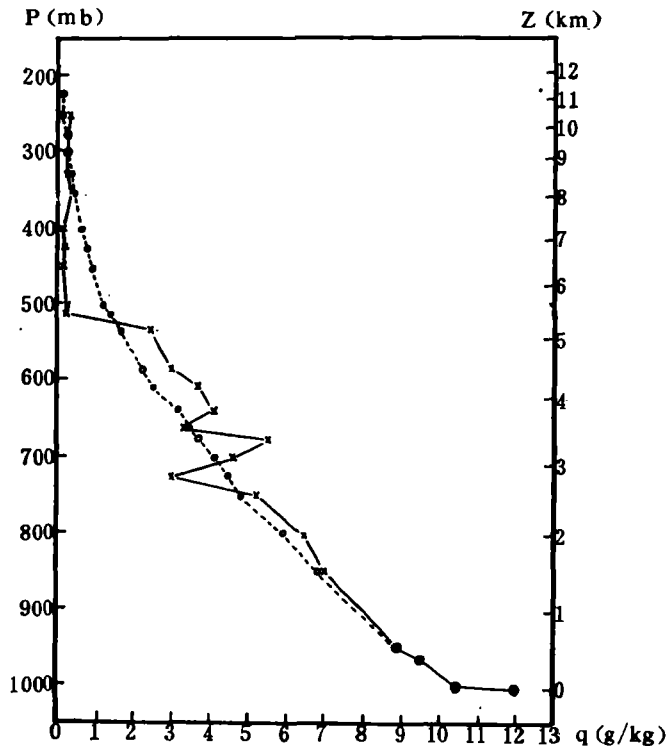


图 5 微波遥感比湿的实例

(1979年6月28日09:00北京, 云量(7)Cifil Actra, ——x——探空资料, ---o---微波辐射计)

2. 水汽总含量  $Q$ ：微波辐射计遥感大气水汽总含量与无线电探空仪测量大气水汽总含量对比观测资料，见图 8 中所示。9 次资料平均的结果，均方根偏差  $(\Delta Q)_{rms} = 0.102 \text{ g/cm}^2$ ，占水汽总含量的比例  $\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)_{rms} = 3.18\%$ 。因此，用微波遥感大气水汽总含量的结果是好的。微波遥感大气湿度的反演中，把大气温度是作为已知量的，用地面观测和历史资料的预期值。

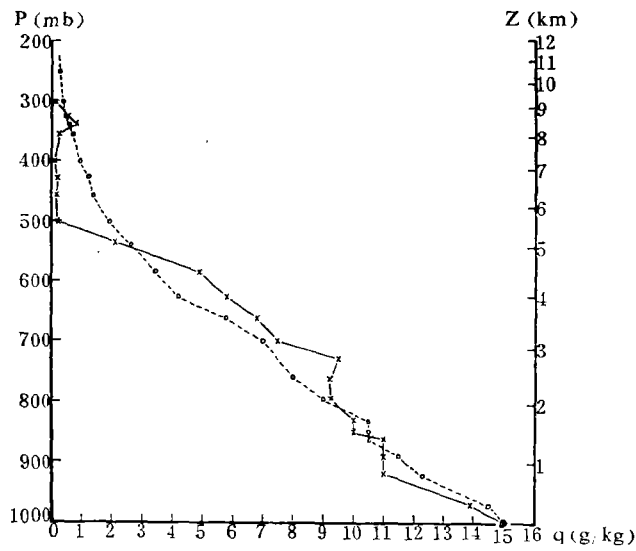


图 6 微波遥感比湿的实例  
(1979年7月11日09:00北京, 云量(5)Cu hum Fc; 其余说明同图5)

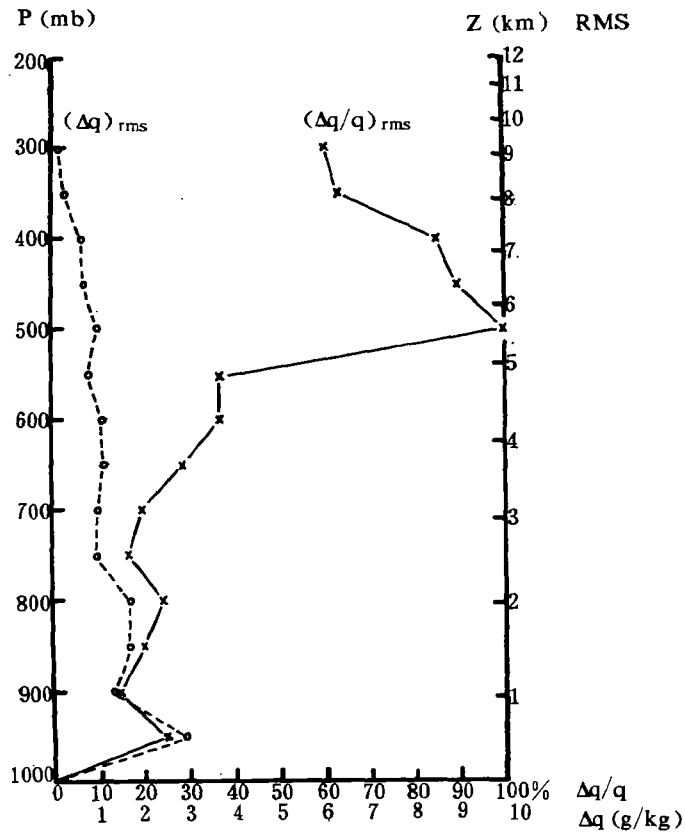


图 7 微波遥感比湿与探空资料的均方根偏差

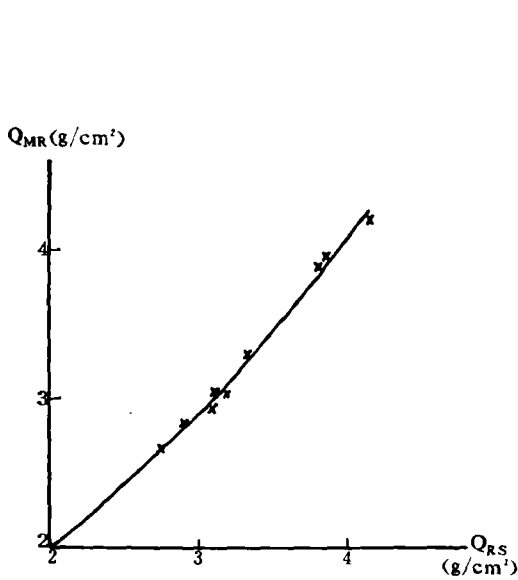


图 8 微波遥感大气水汽总含量  $Q_{MR}$  与无线电探空仪测量大气水汽总含量  $Q_{RS}$  的对比

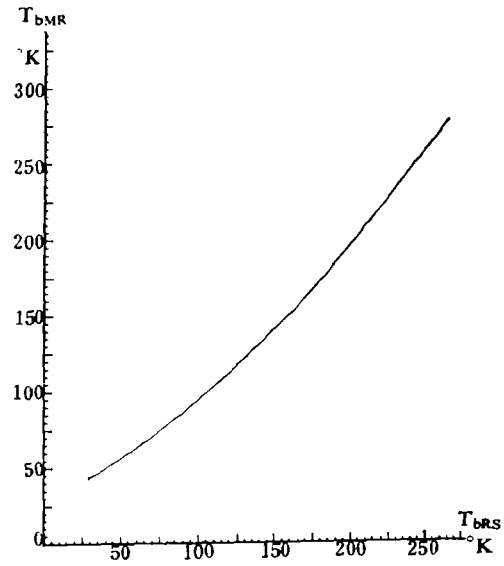


图 9 微波辐射计测量各角度上的亮度温度  $T_{bMR}$  与探空资料计算亮度温度  $T_{bRS}$  (1.35 cm,  $T_{bRS} \sim T_{bRM}$ ; 北京 1979.6.27→7.19)

### 五、讨 论

将探空资料中的水汽分布代入(1)式计算出仰角上的亮度温度  $T_{bRS}$ ，同时用  $\lambda = 1.35$  cm 微波辐射计测量各仰角上的大气亮度温度  $T_{bMR}$ ，将两者绘制成图 9。从图 9 可见  $T_{bRS}$  与  $T_{bMR}$  的线性关系只是近似而已。它们之间有弯曲的特性。 $T_{bRS}$  是反映了大气水汽含量，而  $T_{bMR}$  是大气中水汽含量二次幂的性质。在图 9 中也有此现象。按 [5]，在有多分子水汽( $H_2O$ )<sub>n</sub> 吸收时，水汽吸收系数要增添一个与水汽密度平方成正比的小项。

### 六、3 cm 微波辐射计

为了微波遥感雨中含水量，我们研制了 3 cm 微波辐射计，它的电理结构和 § 2 是一

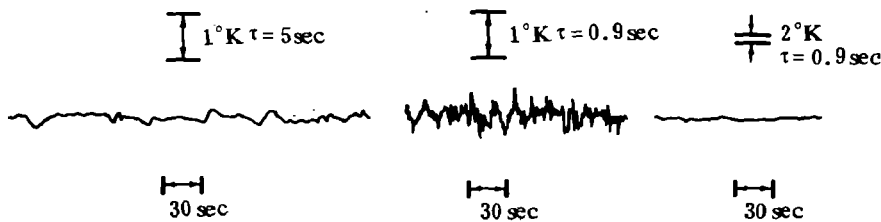


图 10 3 cm 微波辐射计(9.37Gc)接收大气噪音记录 (1980年1月9日14:00时仰角30°北京,  $\theta = 60^\circ$ ,  $T_b = 8.2^\circ K$ ,  $\tau$ : 积分时间)



样的，3 cm 微波辐射计是迪克型的，频率为 9.37 Gc，调制频率为 145 Hz，中放带宽 100 Mc(20—120 Mc)，整机噪声系数为 7.2 db。用直径为 1.2 m 的抛物面天线，仰角 30°接收大气噪音记录有如图 10 中所示。

致谢：承蒙中央气象局梁奇先副所长、张奎林、陈一龙和樊启恭同志帮助无线电探空仪观测，作者谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 赵柏林，微波遥感大气温度层结原理，北京大学学报(自然科学)，No. 2, 1—9, 1978。  
 [2] Barrett, A. H., V. R. Chung, A method for the determination of high altitude water vapour abundance from ground based microwave observation, *J. Geophys. Res.* 67, 2459—2466, 1962.  
 [3] 赵柏林、杜金林、刘式达、尹宏、胡成达、王义举、施庶民、邵根金、邹丽珍，遥感大气温度层结的微波辐射计之特点，北京大学学报(自然科学)No. 1, 89—98, 1978。  
 [4] 赵柏林，遥感大气温度层结中的反演问题，大气科学，3 期 270—279, 1979。  
 [5] Жевакин, С. А., А. Л. Наумов, Распространение сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн в земной атмосфере, Изв. Вузov. «Радиофизика», 10, 1213, 1967.

## STUDIES ON THE GROUND-BASED MICROWAVE RADIOMETRY AND ITS MEASUREMENTS OF THE ATMOSPHERIC HUMIDITY PROFILE AND TOTAL WATER VAPOUR CONTENT

Zhao Bo-lin (Chao Bo-lin) Yin Hong Li Hui-xin  
 Hu Geng-da Du Jin-lin Zhu Yuan-jing Jing Rong-lin  
 (Department of Geophysics, Peking University)

### Abstract

We constructed 1.35 cm-radiometry (22.235 Gc). Using the reception of 1.35 cm atmospheric noise, the humidity profile and total vapour content in the atmosphere were obtained. In field test, as compared with radiosonde, the rms deviation of total vapour content was 3%, the rms deviations of specific humidity were 17.2% below 3 km, and 22.4% below 5 km.