

微波遥感低空大气温度层结的研究*

赵柏林 尹宏 胡成达 李慧心 杜金林 朱元竞

(北京大学地球物理系)

王义举 施庶民

(北京大华无线电厂)

提 要

根据大气噪音谱,用接收5 mm微波噪音,遥感低空大气温度层结。研制了5 mm微波辐射计(C型机 $\nu=54.4$ Gc)。在野外实验中与无线电探空仪对比,在3 km以下,温度层结偏差2—3°K。为了能够在云天情况下遥感大气温度层结,研制了8 mm微波辐射计,并进行了接收大气噪音的实验。

一、引 言

大气微波噪音谱在5 mm波段有一个氧分子的吸收带,接收大气5 mm波段氧分子的辐射,可以推断大气的温度层结。用5 mm微波辐射计A型机(52.9 Gc)和B型机(52.8 Gc),遥感10 km以下的大气温度层结见[1]中报告。本文讨论用5 mm微波辐射计C型机($\nu=54.4$ Gc),遥感3 km以下大气温度层结的原理与实验。按[1]地面接收到的大气辐射,表达为亮度温度 $T_b(\theta, \nu)$ 为

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

其中, θ 是天顶角, ν 是频率, $T(z)$ 是大气温度层结, T_{∞} 是宇宙太空的辐射(3°k), α 是吸收系数, z 是高度。通过压力高度公式将压力与高度联系起来,即

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

其中, p 是压力, p_0 是地面气压, g 是重力加速度, R 是空气气体常数。

通过观测得到(1)式左方一系列频率 ν 或一系列天顶角 θ 的亮度温度 $T_b(\theta, \nu)$,就可将(1)式右方中的温度层结 $T(z)$ 反演出来。

大气在微波段的吸收以氧和水汽为主,吸收系数 α 为

$$\alpha = \alpha_{O_2} + \alpha_{H_2O} \quad (3)$$

其中, α_{O_2} 是氧的吸收系数, α_{H_2O} 是水汽的吸收系数。它们的表达式见[1]。在5 mm波段, $\alpha_{O_2} \gg \alpha_{H_2O}$ 两者相差达几个量级。以北京平均资料计算, $\nu=54.5$ Gc, α_{O_2} 和 α_{H_2O} 随高度的分布有如图1。

* 本文于1980年2月29日收到,1980年5月31日收到修改稿。

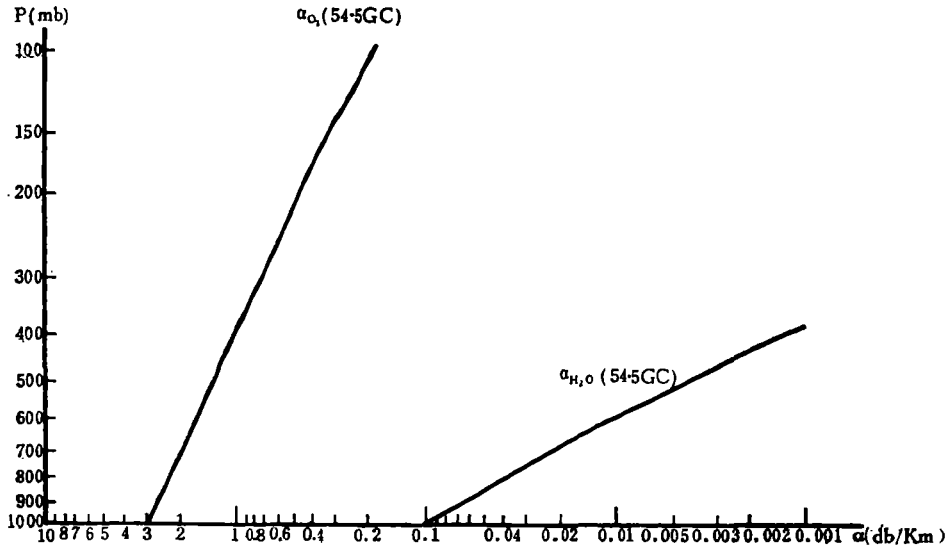


图 1 氧分子吸收系数与水汽吸收系数随高度的分布
($\nu = 54.5 \text{ Gc}$)

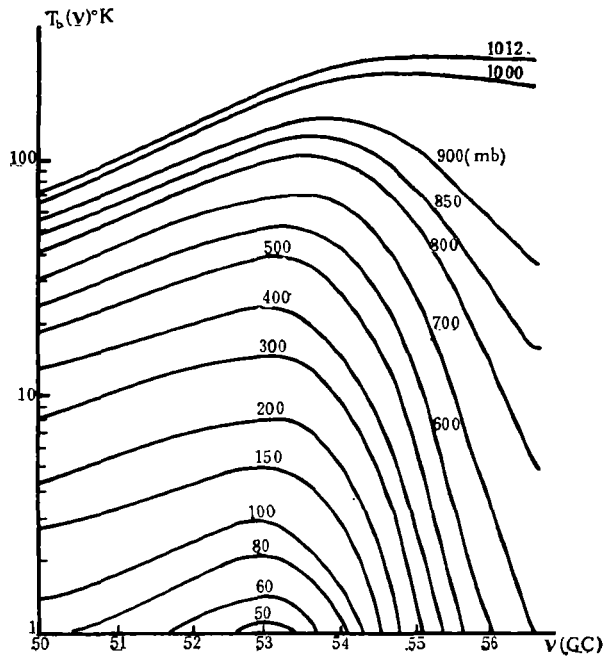


图 2 某等压面以上大气辐射对地面亮度温度 $T_b(0, \nu)$ 的贡献

大气对于辐射传输过程是吸收作用和辐射作用的总和。在地面上的亮度温度来自大气各层的贡献，在某等压面以上大气辐射对地面亮度温度的贡献见图 2^[2]。从图 2 中可见，为了能够探测高空大气(10 km 以下)，应选择频率在 53 Gc 附近；反之，要测低空大气(3 km 以下)则应选在 54.5 Gc 附近的频率，在此频率下低空信息量大，并避免了高空大气的干扰。因此我们用 54.4 Gc 频率大气噪音的接收遥感低空大气温度层结。

二、5mm微波辐射计(C型机, $\nu=54.4\text{ Gc}$)

继 5 mm 微波辐射计 A 型机 ($\nu=52.9\text{ Gc}$) 和 B 型机 ($\nu=52.8\text{ Gc}$)^[3] 之后, 研制了 5 mm 微波辐射计 C 型机 (54.4 Gc)。C 型机是补偿式迪克微波辐射计, 它是利用附加噪声源补偿讯号达到比较源的温度, 以保持接收机信号输出为零, 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。方框图见图 3。机器外形见图 4。

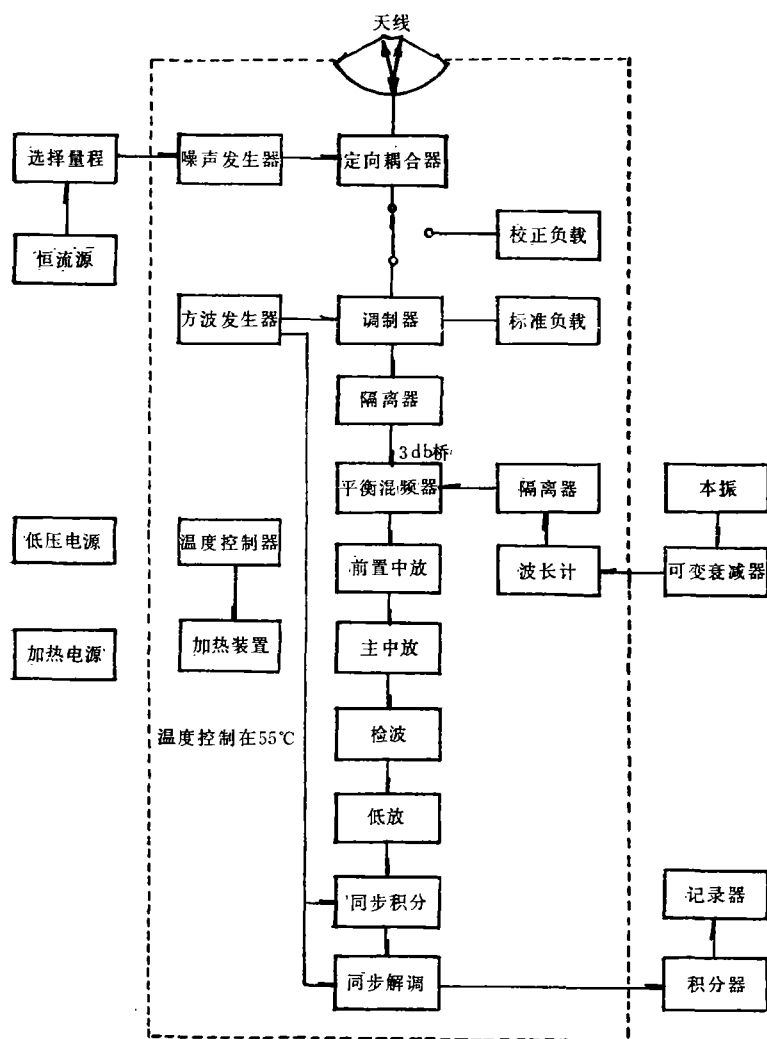


图 3 5 mm 微波辐射计(C型机, $\nu=54.4\text{ Gc}$)的方框图

天线是水平极化的卡塞格伦式(天线波束(35 db) $\leq 1.5^\circ$)。调制器是 30 周的方波电调环形器。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(反向衰减 $> 35\text{ db}$)进入 3 db 电桥。另一路是以甘氏振荡器为本振, 经衰减器调节输出功率, 波长计监视频率, 经过隔离器进入 3 db 电桥, 并与调制的讯号平衡混频。混频检波后的中

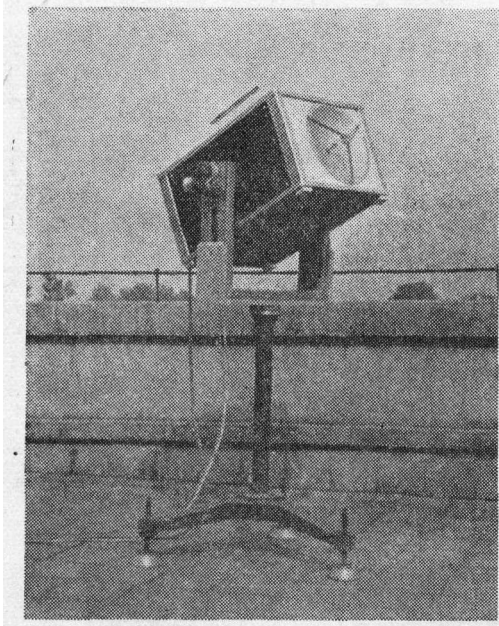


图 4 5 mm微波辐射计(C型机,
 $\nu=54.4$ Gc)的照片

频差频进入前置中放及主中放, 带宽 80 Mc (30—110 Mc), 增益约 63 db, 噪声系数小于 2 db。经中频检波后的讯号, 由低放进一步放大。低放采用运算放大器BG 305, 其放大倍数约 10^4 。低放放大后的讯号送入同步积分器, 它是窄带滤波器, 它使方波调制讯号全部通过, 滤掉其它干扰及噪音。由同步积分器输出的方波讯号再进行解调, 它是一个相位检波器, 由方波发生器进行控制。解调后的讯号经滤波积分器平滑, 用电子电位差计记录。

补偿支路用 20 db 定向耦合器耦合到接收机, 它包括噪声发生器(PIN 固态源), 恒流源, 隔离器及精密衰减器等部件。用精密衰减器调节补偿噪声的输出。

波导开关作为测量和校准两种工作状态的变换装置, 开关接校准位置, 环形器交替

地接两个同温度匹配负载, 此时记录器为零。开关接测量位置, 环形器入口接天线, 则接收机接收大气噪音讯号。

C型机工作频率为 54.4 Gc, 整机噪声 <14 db, 中放带宽 ≥ 80 Mc。若取样时间为 200 秒, 天线感阈温度为 $\leq 0.115^\circ\text{k}$ 。卡氏天线增益为 35 db, 波束宽度 $\leq 1.5^\circ$ 。机箱恒温 55°C , 温度起伏 $\leq 0.2^\circ\text{C}$ 。方位角范围 $0-360^\circ$ (精度 $\pm 0.5^\circ$), 仰角范围 $0-90^\circ$ (精度 $\pm 0.1^\circ$)。C型机电子电位差计记录的电压要通过冷负载终端, 热噪声源和自然观测进行检定和标定。

三、反演方法

观测采用扫角法, 因在(1)式左方有一系列不同天顶角 θ 的观测亮度温度 $T_b(\theta)$ 值, 用一组不同天顶角 θ 的(1)式方程, 将右方温度层结 $T(z)$ 反演出来。这里用两种方法反演, 即迭代法和经验正交函数法。

(1) 迭代法: 假设一个初值 $T^{(0)}(z)$ 代入(1)式求得 $T_{b\text{算}}^{(0)}(\theta)$, 用它来和亮度温度 $T_{b\text{观}}(\theta)$ 比较, 修正温度层结, 再以新的温度层结进行下一轮的迭代直至收敛为止。如用 n 次迭代之温度层结 $T^{(n)}(z)$ 进行 $n+1$ 次迭代, 即

$$T_{b\text{算}}^{(n)}(\theta) = \int_0^\infty T^{(n)}(z) \sec\theta \alpha^{(n)} e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec\theta dz'} dz + T_\infty e^{-\int_0^\infty \alpha^{(n)} \sec\theta dz} \quad (4)$$

其中, $\alpha^{(n)}$ 是 $T^{(n)}(z)$ 条件下的吸收系数, 于是第 $(n+1)$ 级修正值 $T_\theta^{(n+1)}(z)$ 为

$$T_\theta^{(n+1)}(z) = T^{(n)}(z) + \frac{T_{b\text{观}}(\theta) - T_{b\text{算}}^{(n)}(\theta)}{1 - e^{-\int_0^\infty \alpha^{(n)} \sec\theta dz}} \quad (5)$$

$(n+1)$ 次迭代后温度层结 $T^{(n+1)}(z)$ 为

$$T^{(n+1)}(z) = \frac{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{90^{\circ}} W^{(n)}(\theta) T_{\theta}^{(n+1)}(z)}{\sum_{\theta=0^{\circ}}^{90^{\circ}} W^{(n)}(\theta)} \quad (6)$$

其中, $W^{(n)}(\theta) = \alpha^{(n)} \sec \theta \Delta z e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta dz'}$ 。迭代至 $|T^{(n+1)}(z) - T^{(n)}(z)| < \delta$ 为止, $T^{(n+1)}(z)$ 就是我们的解, δ 是允许的误差, 取 $\delta = 0.03^{\circ}\text{k}$ 。

(2) 经验正交函数法: 从历史资料分析, 将大气温度层结展成经验正交函数, 即

$$T(z) = \sum_{j=1}^n C_j \Phi_j(z) \quad (7)$$

其中, $\Phi_j(z)$ 是经验正交函数, 它是从历史资料分析已知的量。 C_j 是系数, 它随实况而变化。由(1) 式有

$$T_b(\theta) = \sum_{j=1}^n C_j \int_0^{\infty} \phi_j(z) \alpha \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz'} dz + T_{\infty} e^{-\int_0^{\infty} \alpha \sec \theta dz} + \varepsilon \quad (8)$$

或

$$\mathbf{G} = \mathbf{C}\mathbf{A} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{G} = \{g_i\}, \quad g_i = T_b(\theta_i) - T_{\infty} e^{-\int_0^{\infty} \alpha \sec \theta_i dz};$$

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\}, \quad a_{ij} = \int_0^{\infty} \phi_j(z) \alpha \sec \theta_i e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta_i dz'} dz;$$

$$\mathbf{C} = \{C_j\}; \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_i\} \text{ 是误差。}$$

为了使得反演误差极小, 又使解答光滑掉噪音干扰, 有如[4,5]求得解答为

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \gamma \mathbf{H}) \mathbf{A}^T \mathbf{G} \quad (10)$$

其中, γ 为光滑系数, \mathbf{H} 为光滑矩阵。

(10) 式用迭代法求解。给定初值温度 $T^{(0)}$, 由(10)式有

$$\mathbf{C}^{(1)} = (\mathbf{A}^{T(0)} \mathbf{A}^{(0)} + \gamma \mathbf{H}) \mathbf{A}^{T(0)} \mathbf{G} \quad (11)$$

于是, 一次迭代之温度为

$$\mathbf{T}^{(1)} = \mathbf{C}^{(1)} \boldsymbol{\Phi} \quad (12)$$

其中, $\boldsymbol{\Phi}$ 为经验正交函数矩阵 ($=\{\phi_j\}$), 再以一次迭代温度 $T^{(1)}$ 为初值, 进行二次迭代。

依次 $(n+1)$ 次迭代, 以 (n) 次迭代温度 $T^{(n)}$ 为初值, 由(11)式有

$$\mathbf{C}^{(n+1)} = (\mathbf{A}^{T(n)} \mathbf{A}^{(n)} + \gamma \mathbf{H}) \mathbf{A}^{T(n)} \mathbf{G} \quad (13)$$

及

$$\mathbf{T}^{(n+1)} = \mathbf{C}^{(n+1)} \boldsymbol{\Phi} \quad (14)$$

直至 $|\mathbf{T}^{(n+1)} - \mathbf{T}^{(n)}| < \delta$ 为止。其中,

$$\mathbf{T}^{(n)} = \{T^{(n)}(z)\}, \quad \mathbf{A}^{(n)} = \{a_{ij}^{(n)}\}, \quad a_{ij}^{(n)} = \int_0^{\infty} \phi_j(z) \alpha^{(n)} \sec \theta_i e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta_i dz'} dz.$$

四、观测与资料分析

1979年6—7月在北京西郊进行微波辐射计与无线电探空仪对比观测。微波辐射计遥感低空大气温度层结，示例有如图5，图6及图7。从11次对比观测看来，在3 km以下，微波辐射计遥感大气温度层结与无线电探空仪测温的均方根偏差为 $2-3^{\circ}\text{K}$ ，如图8中所示。由此可见，微波遥感低空大气层结是可行的。在观测时有11次是有云的，但受大气的阻挡作用，云的干扰对于54.4 Gc比52.8 Gc要弱得多[6]。为了提高测温精度应用云影响的订正。在反演中把湿度分布是作为已知量的，使用地面观测和历史资料的预期值。经验正交函数是用[7]中资料计算的。

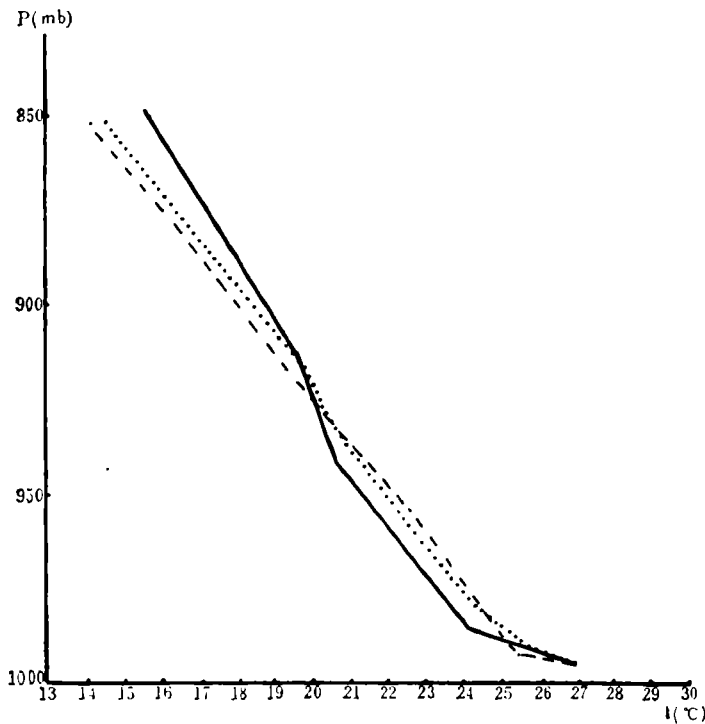


图5 微波遥感低空大气温度层结实例
(1979年6月28日09:00北京, 云量(5)Cifil Actra; ——探空资料, ---微波辐射计($\nu=54.4\text{ Gc}$)经验正交函数法反演,微波辐射计($\nu=54.4\text{ Gc}$)迭代法反演)

五、8 mm 微波辐射计

为了遥感大气温度层结，用5 mm微波辐射计(B型机， $\nu=52.8\text{ Gc}$ 及C型机， $\nu=54.4\text{ Gc}$)以反映高低空大气温度层结。用1.35 cm微波辐射计以反映大气水汽。用8 mm微波辐射计以反映云中含水量。用上述这几个波段的微波遥感相互迭代可以得到大气温度、湿度、压力层结和云中含水量的资料。在微波段氧、水汽和云吸收作用有如图9中所示。为了上述目的，研制了8 mm微波辐射计。它的方框图见图10，外形和内部见图11。

8 mm微波辐射计电路结构与§2相同。8 mm微波辐射计的特点如下：频率为35.3

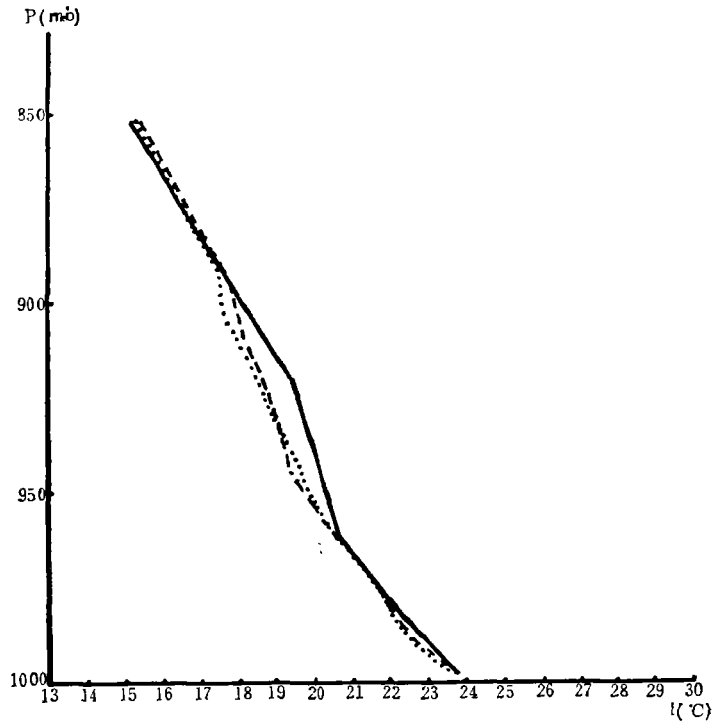


图 6 微波遥感低空大气温度层结实例
(1979年6月29日09:00北京, 云量(7)Cifil Actra; 其余说明同图5)

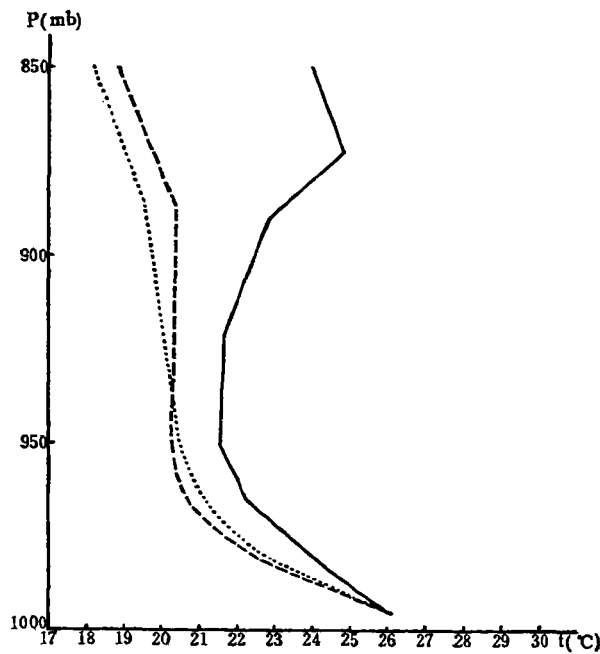


图 7 微波遥感低空大气温度层结实例
(1979年7月11日09:00北京, 云量(10)Cu hum Fc; 其余说明同图5)

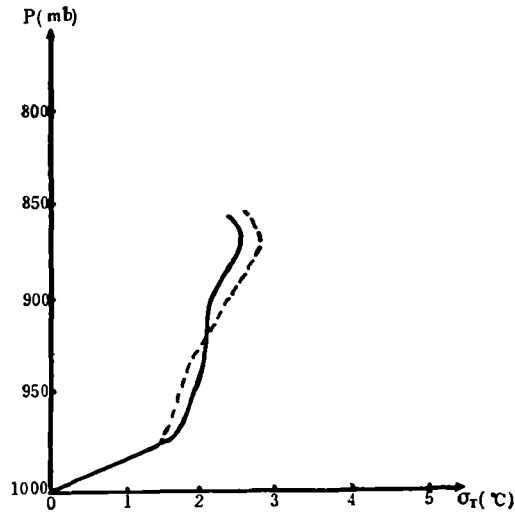


图 8 微波遥感大气温度与探空测温的均方根偏差
(——经验正交函数展开法反演,迭代法反演)

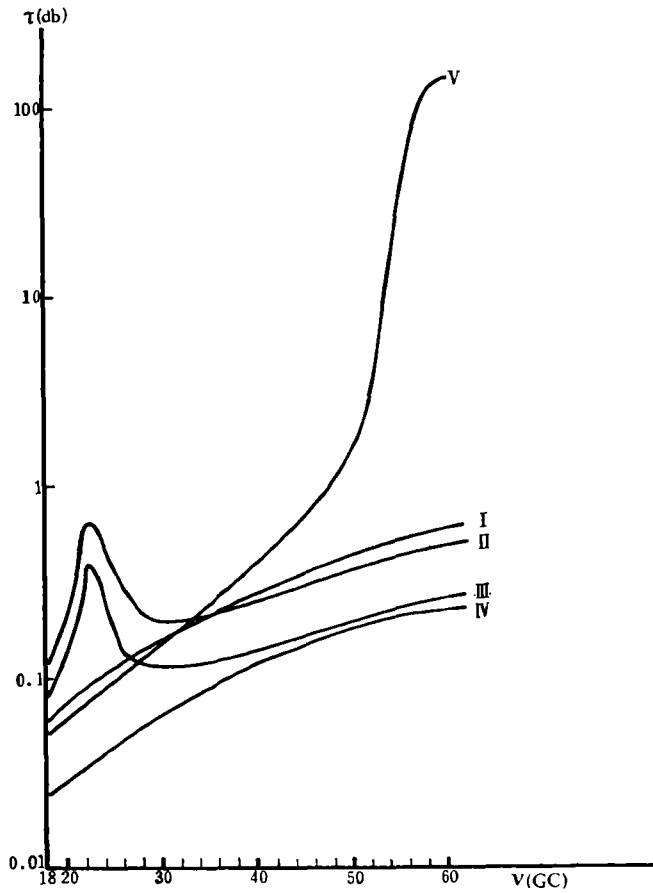


图 9 大气中氧、水汽、云层的吸收谱

(I τ_{O_2} 云高 850mb $Q=0.25 \text{ kg/m}^2$ (云厚 500 m, $\rho_L=0.5 \text{ gm/m}^3$), II $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ (阴天), III $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ (晴天), IV τ_{O_2} 云高 850 mb $Q=0.1 \text{ kg/m}^2$ (云厚 500 m, $\rho_L=0.2 \text{ gm/m}^3$), V τ_{O_2})

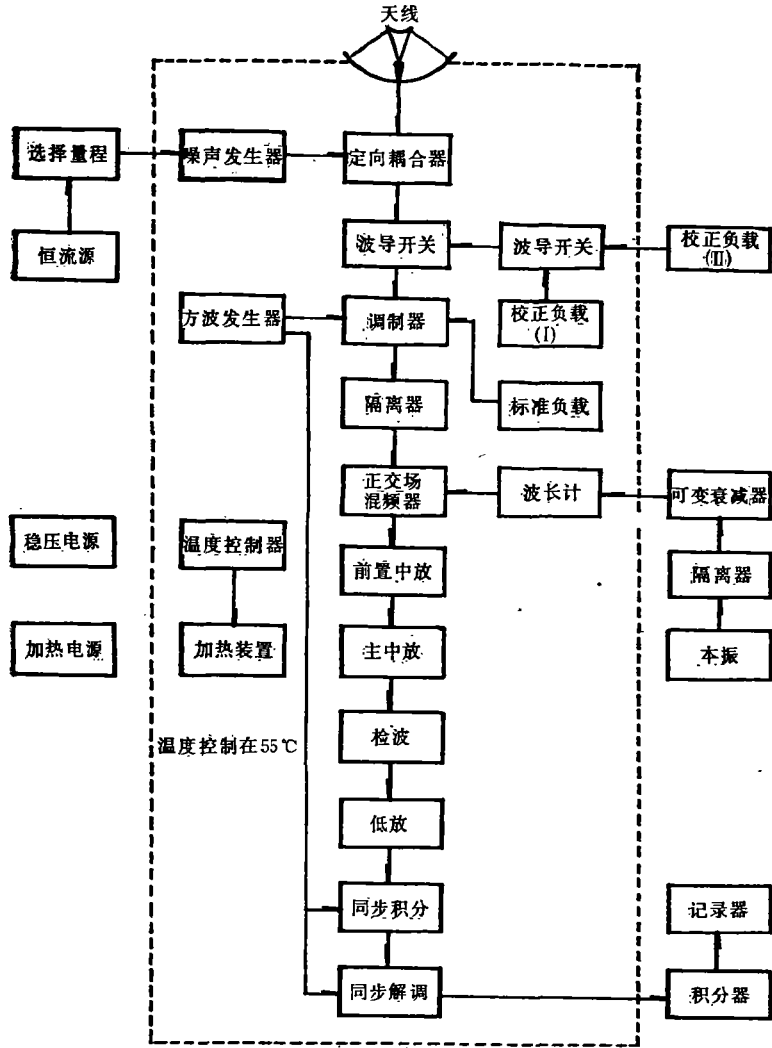


图 10 8mm 微波辐射计方框图

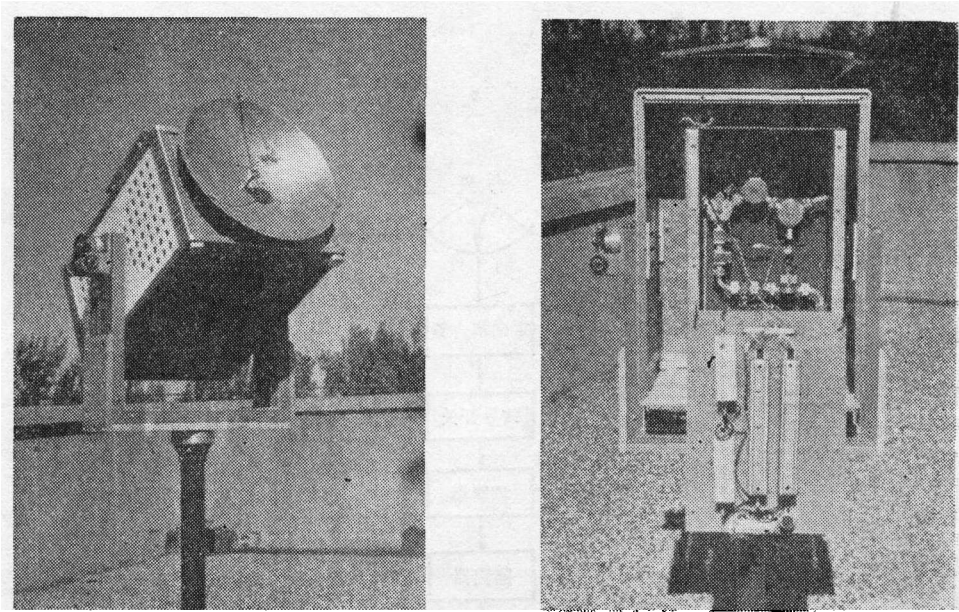


图 11 8 mm 微波辐射计外形(a)与内部(b)

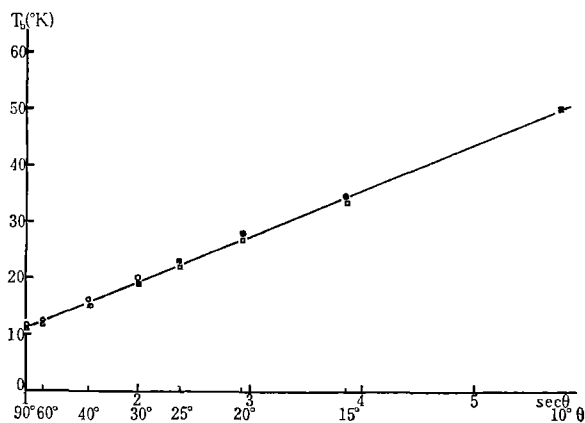


图 12 8 mm 微波辐射计观测大气亮度温度随天顶角的分布
(1980 年 1 月 14—16 日 13:00 北京)

G_c , 噪声系数 < 12 db, 天线为卡塞格伦式, 抛物面口径为 37 cm, 主波瓣波束带宽约 1.5° 。微波辐射计有两个检定负载, 一个在机箱以内, 它与比较源温度相同, 用以校正零点; 另一个在机箱外部用以校准增益。补偿支路采用固态噪声源, 用恒流源为电源供给。本振用甘氏振荡器, 混频器用正交场混频器。中放带宽 80 Mc。机箱温度为 53°C , 温度起伏 $\leq 0.2^\circ\text{C}$, 方位角范围 $0-360^\circ$ (精度 $\pm 0.5^\circ$), 仰角范围 $0-90^\circ$ (精度 $\pm 0.1^\circ$)。

用 8 mm 微波辐射计观测大气亮度温度随天顶角的分布, 见图 12, 正割(sec)律是一个很好的近似。

致谢: 承蒙中央气象局梁奇先副所长, 张奎林、陈一龙和樊启恭工程师帮助无线电探空观测, 作者深致谢意。

参 考 文 献

- [1] 赵柏林、杜金林、刘式达、尹宏、胡成达、李慧心、王义举、施庶民、邵根金、邹丽珍，微波遥感大气温度层结的原理和试验，*大气科学* 2, 323—331, 1978。
- [2] 赵柏林，微波遥感大气温度、压力层结原理，*北京大学学报（自然科学）* No. 2, 1—9, 1978。
- [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] Twomey S., The application of numerical filtering to solution of integral encountered in indirect sensing measurements, *Journal of the Franklin Institute* 279, 95, 1965。
- [5] 曾庆存，大气红外遥测原理，科学出版社，53—70, 1974。
- [6] 赵柏林、秦瑜，微波遥感云天大气层结，*北京大学学报（自然科学）* No. 4, 26—36, 1978。
- [7] Lettau, H. H., B. Davidon, Exploring the atmospheric first miles, V. II, Pergamon Press, London, 578, 1957。

**STUDIES ON THE GROUND-BASED MICROWAVE
RADIOMETER AND ITS MEASUREMENTS
OF THE LOWER ATMOSPHERIC
TEMPERATURE PROFILES**

Zhao Bo-lin (Chao Bo-lin) Yin Hong Hu Ceng-da
Li Hui-xin Du Jin-lin Zhu Yuan-jing

(Department of Geophysics, Peking University)

Wang Yi-ju Shi Shu-min

(Factory Da Hung in Peking)

Abstract

We constructed 5 mm-radiometer (C-type 54.4 Gc). Using the reception of 5 mm atmospheric noise, the temperature profile in the lower atmosphere was obtained. In the field test, as compared with radiosonde, the mean temperature deviation was 2—3 K below 3 km. For the remote sensing temperature profile in cloudy sky, we constructed 8 mm radiometer (35.3 Gc) and it was used in measurement of atmospheric noise.