

论 文

遥感大气温度层结中的反演问题

赵 柏 林
(北 京 大 学)

一、引 言

遥感大气层结的反演要解第一类 Fredholm 积分方程。为了能得到满意的结果,对于所要解决的问题必须作充分的物理分析,根据这些分析对于方程提出制约,由此得到有效的答案。本文讨论地面微波遥感测温的反演问题。首先分析作为遥感基础的大气噪音,进而讨论遥感大气温度层结的反演方法、测温实践结果以及存在的问题。

二、辐射传输方程

大气吸收谱中氧在5毫米波段有强烈的吸收,在这一波段内除去氧分子吸收外,还有微弱的水汽连续谱的吸收。氧在低空大气是混合平衡的,在空气之中,它的比例不变。根据氧的强烈吸收和比例不变的优点,在辐射中把温度的因子突出出来。利用微波辐射遥感大气温度层结,由理想已成为现实。

晴空水平分层大气的辐射传输方程是

$$T_b(\nu) = T_{\infty} e^{-\int_0^{\infty} \alpha \sec \theta dz} + \int_0^{\infty} T(z) \alpha e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} \sec \theta dz \quad (1)$$

其中, $T_b(\nu)$ 是地面接收的亮度温度, ν 是频率, α 是吸收系数, θ 是天顶角, $T(z)$ 是温度层结, z 是高度, T_{∞} 是宇宙太空的亮度温度, 为 3°K 。关于第一项可作为已知量事先扣除, (1) 式的反演问题集中在等式右方的第二项。则

$$T_b(\nu) = \int_0^{\infty} T(z) \alpha e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} \sec \theta dz \quad (2)$$

用压高公式 $p = p_0 e^{-\int_0^z \frac{g}{RT} dz}$, (g 是重力加速度, R 是空气气体常数, p, p_0 分别是气压和地面气压), 将(2)式高度坐标化为气压坐标, 即

$$T_b(\nu) = - \int_{p_0}^p T(z) \alpha e^{\int_p^{p_0} \alpha \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp} \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp \quad (3)$$

(2)、(3)式左方是观测值, 右方 $T(z)$ 是要反演的值,

$$W = \alpha c \int_0^{\Delta z} \alpha \sec \theta dx \sec \theta \Delta z = -\alpha c \int_p^{p_0} \alpha \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} \Delta p = W_0 \Delta p$$

是反演方程的核,

$$W_0 = -\alpha c \int_p^{p_0} \alpha \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p}$$

是 $\Delta p = 1 \text{ mb}$ 下的核。这是第一类 Fredholm 积分方程, 要解这个方程有三个问题, 即

1. 解的不稳定性: 方程对于观测误差有传递放大的现象, 以致在解中误差的比重增大, 使解无法使用^[1]。因此在求解时对于输入记录和输出结果进行光滑, 滤去高频振荡。求解方法上采用极大概率法和最佳相似法进行筛选, 以减少误差的干扰。2. 解的不唯一性: 解(2)、(3)式是由总和来求个体, 解答是不唯一而有多。3. 核的非线性: 核 W 中包含反演值温度 T 的复杂关系, 非线性给求解带来困难。要解决唯一解及核的线性化必须对于问题的物理性质进行分析, 从物理本质上给予制约。下面我们根据北京地区 1964—1969 年和 1970 年探空资料, 分析 5 毫米波段氧分子辐射及辐射方程的性质。

1. 温度层结变化是比较小的, 变化的均方差和本体量的比甚小, 求得的解都应距离平均值不太远, 同时平均值是一个良好的初值。

2. 大气对于高空辐射的下达是个阻挡, 就以高空辐射下最多的 53 Gc 为例, 在 300 mb 以上大气下达到地面的亮度不过 $10^\circ - 20^\circ \text{ K}$, 占总亮度 $\leq 1/10$, 所以从这样少的信息中分析 300 mb 以上大气温度变化, 必然是误差很大的, 从信息量上看, 愈是低空测温愈准, 误差随高度递增^[2]。

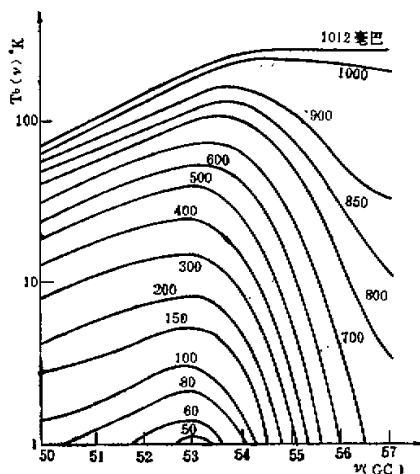


图 1 不同等压面高度以上大气对于地面亮度温度 $T_0(\nu)$ 之贡献

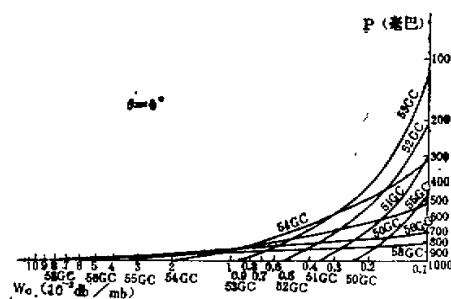


图 2 各频率下权重函数随高度上的分布 ($\theta = 0^\circ$)

3. 核函数或权重函数随频率和角度的变化见图 2、3。权重函数随高度递减, 频率愈高仰角愈低衰减愈快。低仰角或高频率可反映低空温度层结, 高仰角或低频率能获得高空温度层结。权重函数随温度的变化是很小的, 每变化 1°C 引起核函数只有千分之几的变化, 它可以作为迭代的核。但是它的变化不考虑还是不行。以 53 Gc 垂直观测为例, 计

算结果见图 4。它的变化在低空可以和温度变化率相比拟,在高空 500 mb 以上,甚至比温度变化率还要大,这就给迭代高空温度层结带来误差。

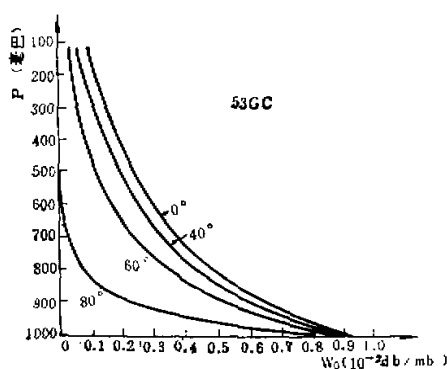


图 3 各角度下权重函数随高度的分布 (53 Gc)

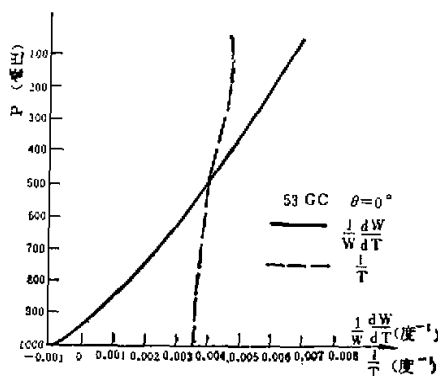


图 4 53 Gc 频率下权重函数随温度变化率与温度变化率之比较

(2) 式分部积分变成下面形式

$$T_b(\nu) = T_0 + \int_0^\infty \frac{\partial T}{\partial z} e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} dz \quad (4)$$

或

$$T_b(\nu) = T_0 - \int_0^{p_0} \frac{\partial T}{\partial z} e^{\int_p^{p_0} \alpha \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp} \frac{\partial z}{\partial p} dp \quad (5)$$

其中, T_0 是地面温度, (4)、(5) 式反演值为 $\partial T / \partial z$,

$$W^* = e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} \Delta Z = -e^{\int_p^{p_0} \alpha \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp} \frac{\partial z}{\partial p} \Delta p = W_0^* \Delta p,$$

是反演方程的核, $W_0^* = -e^{\int_p^{p_0} \alpha \sec \theta \frac{\partial z}{\partial p} dp} \frac{\partial z}{\partial p}$ 是 $\Delta p = 1$ mb 下的核。核 W_0^* 随高度衰减比 W_0 缓慢。 W^* 亦有随温度变化迟钝的性质, 用北京地区 1970 年 7 月 11—25 日 07 时探空资料, 以 53 Gc 垂直观测为例, 核函数的变化率 $\frac{\Delta W^*}{W^*} = \frac{1}{W^*} \frac{dW^*}{dT} \sigma_T$, (σ_T 是温度变化的均方根) 及减温率 $\frac{\sigma_T}{\gamma}$, (σ_T 是减温率变化的均方根, $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$) 两者相比较, 核函数的变化率比减温率变化率小一个量级 ($\frac{\Delta W^*}{W^*} = 0.017$, $\frac{\sigma_T}{\gamma} = 0.30$), 所以核函数 W^* 可作为迭代的核。

三、反演方法

当前大气遥感温度的方法很多, 有线性方程组法^[3], 经验正交函数展开法^[4-7], 控制最

小二乘法^[8,9]和光滑法^[10-12],最佳外延法^[13-15];估计值理论方法^[16-19];统计回归法^[20-23];人造核函数法^[24,25]以及迭代法^[26-28]。比较这些现有方法,迭代法的优点是可表现出异常的变化,又不受有无历史资料的限制,使用简单。逐次迭代温度,使之亮度温度收敛,由此推断温度层结的分布。我们主要采用了迭代法反演大气温度分布,我们有一系列亮度温度 T_{bi} 的观测值,给定初值温度层结 $T^{(0)}(z)$ 代入(2)式,有

$$T_{bi}^{(0)} = \int_0^\infty T^{(0)}(z) \alpha^{(0)} \sec \theta_i e^{-\int_0^z \alpha^{(0)} \sec \theta_i dz} dz \quad (6)$$

按观测值 T_{bi} 应为

$$T_{bi\text{真}} = \int_0^\infty T(z) \alpha \sec \theta_i e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta_i dz} dz \quad (7)$$

由第二节讨论得知(2)式的核函数对于温度变化反映不灵敏。(6)~(7)式

$$T_{bi\text{真}} - T_{bi}^{(0)} = \Delta T_i^{(0)} \left[1 - e^{-\int_0^\infty \alpha^{(0)} \sec \theta_i dz} \right] \quad (8)$$

或

$$\Delta T_i^{(0)} = \frac{T_{bi\text{真}} - T_{bi}^{(0)}}{1 - \exp\left(-\int_0^\infty \alpha^{(0)} \sec \theta_i dz\right)} \quad (9)$$

由(9)式有

$$\Delta T^{(0)}(z_i) = \frac{\sum_{i=1}^m W_{ij}^{(0)} \Delta T_i^{(0)}}{\sum_{i=1}^m W_{ij}^{(0)}} \quad (10)$$

于是

$$T^{(1)}(z_i) = T^{(0)}(z_i) + \Delta T^{(0)}(z_i) \quad (11)$$

再以 $T^{(1)}(z)$ 进行迭代直至收敛为止。第 n 次

$$T_{bi}^{(n)} = \int_0^\infty T^{(n)}(z) \alpha^{(n)} \sec \theta_i e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta_i dz} dz \quad (12)$$

$$\Delta T_i^{(n)} = \frac{T_{bi\text{真}} - T_{bi}^{(n)}}{1 - \exp\left(-\int_0^\infty \alpha^{(n)} \sec \theta_i dz\right)} \quad (13)$$

$$\Delta T^{(n)}(z_i) = \frac{\sum_{i=1}^m W_{ij}^{(n)} \Delta T_i^{(n)}}{\sum_{i=1}^m W_{ij}^{(n)}} \quad (14)$$

$$T^{(n+1)}(z_i) = T^{(n)}(z_i) + \Delta T^{(n)}(z_i) \quad (15)$$

其中, $W_{ij}^{(n)} = \alpha^{(n)} \sec \theta_i e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta_i dz} \Delta z_i^{(n)}$ 。迭代至 $|T_{bi}^{(n+1)} - T_{bi}^{(n)}| < \delta$, δ 一般取

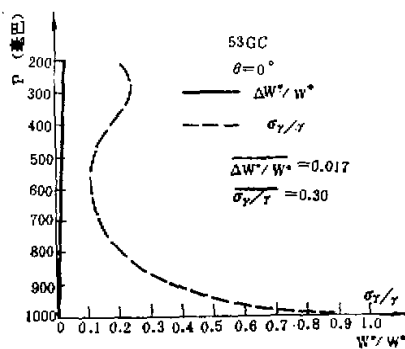


图5 53 GC 频率下权重函数随温度的变化率与温度变化率之比较

0.05—0.15℃.

由(4)式类似的方法用 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 为变量迭代之, 第 n 次迭代以 $T^{(n)}(z)$ 为初值有

$$T_{bi}^{(n)} = T_0 + \int_0^\infty \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^{(n)} e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta_j dz} dz \quad (16)$$

$$\Delta \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_i^{(n)} = \frac{T_{bi}^{(n)} - T_{bi}^{(n-1)}}{\int_0^\infty e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta_j dz} dz} \quad (17)$$

$$\Delta \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_i^{(n)} = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_j^{(n)} W_{ij}^{*(n)}}{\sum_{j=1}^m W_{ij}^{*(n)}} \quad (18)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^{(n+1)} = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^{(n)} + \Delta \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_i^{(n)} \quad (19)$$

$$T^{(n+1)}(z) = T_0 + \int_0^z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^{(n+1)} dz \quad (20)$$

其中, $W_{ij}^{*(n)} = e^{-\int_0^z \alpha^{(n)} \sec \theta_j dz} \Delta z_j^{(n)}$. 迭代至 $|T_{bi}^{(n+1)} - T_{bi}^{(n)}| < \delta$ 为止.

我们根据北京 1964—1969 年平均探空进行模拟计算. 在模拟计算中, 有如^[3,4]只考虑氧的吸收来研究迭代法收敛的速度. 在 50—60 GC 选取 18 个频段用扫频法进行反演. 初值为标准大式模式

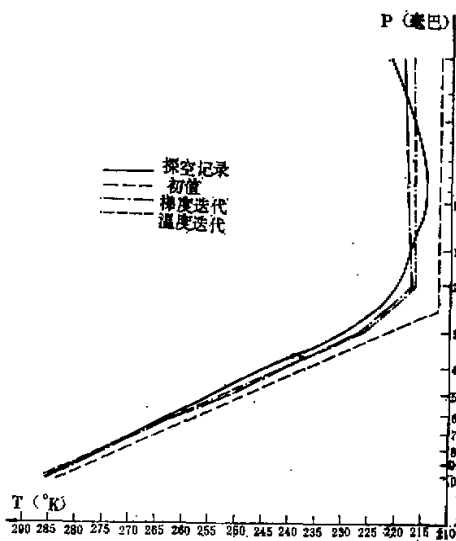


图 6 扫频法迭代法反演北京温度层结 (三次迭代) 的结果

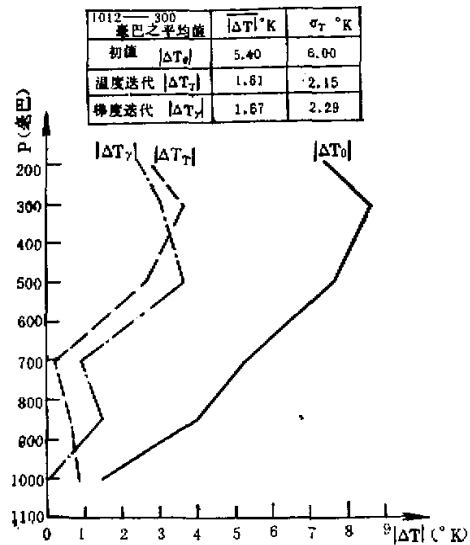


图 7 迭代法反演(三次迭代) 的误差

$$\begin{cases} T(z) = T_0 - \gamma z & z \leq 11.0 \text{ km} \\ T(z) = \text{常数} & z \geq 11.0 \text{ km} \end{cases} \quad \gamma = 0.65^\circ\text{C}/100 \text{ m} \quad (21)$$

用(7)–(11)式及(16)–(19)式两种方法迭代反演, 迭代三次后结果见图 6、7。从图 6、7 中可见反演收敛是很快的, 最终误差也不大。这两种计算反演水平相差不多。

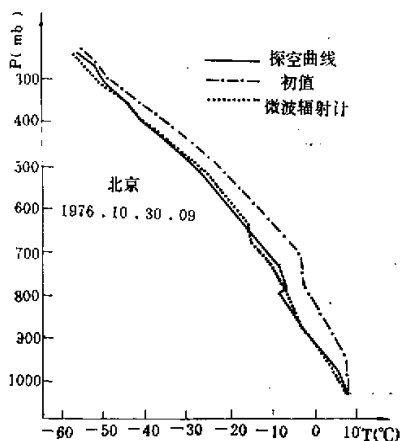


图 8 扫角法微波遥感测温实例(52.8 Gc)

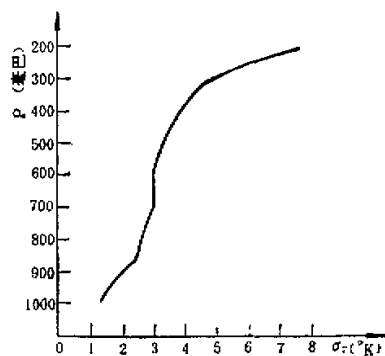


图 9 扫角法微波遥感测温误差 52.8 Gc, 1976 年 10—11 月北京 33 次实验

这里借用北京大学、上海气象仪器厂, 北京 768 厂以 52.9 Gc 微波辐射计地面遥感大气温度层结资料来说明迭代法反演实践的结果。反演方法用(7)–(11)式, 水汽的影响是用地面湿度和气候资料予期它的分布, 估计它的影响, 反演时将它作为已知量代入方程。用扫角法观测实例有如图 8。在测温实践中, 它能反映低空逆温层, 高空收敛常依赖于初值的选取。因为气象变化有连续性, 若用近期观测资料作为初值收敛就会好些。误差随高度的变化, 见图 9。从图 9 中可见, 微波遥感测温误差是随高度增大的。

四、论 论

要准确地遥感大气温度层结应考虑湿度和云层的影响才行。虽然湿度和云层在 5 毫米波段都是小量, 但是不容忽视。增加 1.35 厘米测湿波段及 8 毫米测云波段, 不但能得到湿度和云中水分的资料还能提高测温精度。

1. 湿度的影响 用 1.35 厘米波段扫角法观测, 它的亮度温度如(4)式

$$T_b(\theta) = T_0 + \int_0^\infty \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} dz \quad (4)$$

吸收系数 $\alpha = \alpha_{\text{O}_2} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}}$, α_{O_2} 是氧的吸收系数, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水汽的吸收系数。而 $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = Aq$, 这里 q 是比湿, A 是温、压、频率的函数。令 $u = \int_0^z \alpha dz$ 及 $\Delta u = \frac{\Delta q}{q} \int_0^z Aq dz$, 于是

$$\Delta T_b = - \int_0^\infty \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta u \sec \theta e^{-u \sec \theta} dz = - \frac{\Delta q}{q} \int_0^\infty \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \sec \theta \left(\int_0^z Aq dz \right) e^{-u \sec \theta} dz \quad (22)$$

用第 n 次迭代之 $q^{(n)}$ 用(4)式得到

$$T_{bi\#}^{(n)} = T_0 + \int_0^s \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^s (\alpha_{O_2} + A q^{(n)}) \sec \theta_i dx} dz \quad (23)$$

于是

$$T_{bi\#} - T_{bi\#}^{(n)} = - \frac{q_i^{(n+1)} - q^{(n)}}{q^{(n)}} \int_0^s \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^s (\alpha_{O_2} + A q^{(n)}) \sec \theta_i dx} \times \sec \theta_i \left(\int_0^s A q^{(n)} dz \right) dz \quad (24)$$

则

$$q_i^{(n+1)} = q^{(n)} \left[1 - \frac{T_{bi\#} - T_{bi\#}^{(n)}}{S_i^{(n)}} \right] \quad (25)$$

其中,

$$S_i^{(n)} = \int_0^s \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) e^{-\int_0^s (\alpha_{O_2} + A q^{(n)}) \sec \theta_i dx} \times \sec \theta_i \left(\int_0^s A q^{(n)} dz \right) dz.$$

而

$$q^{(n+1)} = \frac{\sum_{i=1}^m q_i^{(n+1)} V_{ij}}{\sum_{i=1}^m V_{ij}} \quad (26)$$

其中,

$$V_{ij} = e^{-\int_0^{z_j} (\alpha_{O_2} + A q^{(n)}) \sec \theta_i dx} \times \sec \theta_i \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Delta z_j.$$

迭代至 $|T_{bi\#}^{(n+1)} - T_{bi\#}^{(n)}| < \delta$ 为止。

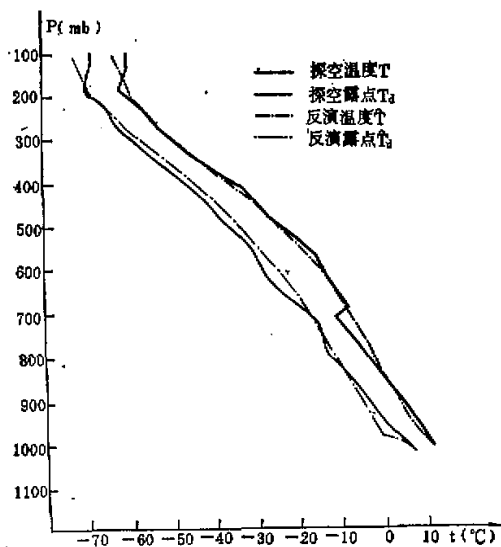


图 10 用 5 毫米及 1.35 厘米微波遥感大气温度及湿度层结的模拟计算

用 5 毫米和 1.35 厘米两频率微波辐射计遥感温度、湿度层结, 用 (7) — (15) 式及 (23) — (26) 式, 温、湿相迭代直至收敛为止, 这样可反演出大气温度及湿度层结。在工作^[29]中进行了模拟计算, 示例有如图 10。用 5 毫米和 1.35 厘米两波段遥感大气温度、湿度层结, 常常能得到较为准确的结果。

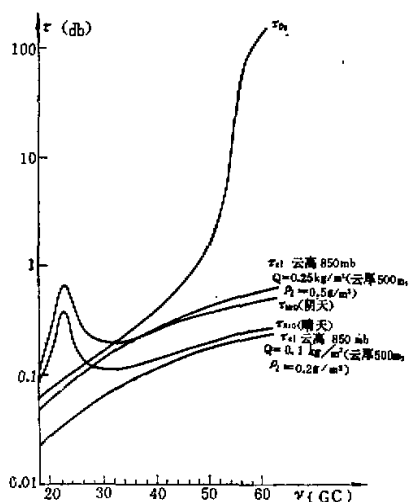


图 11 大气中氧、水汽、云的吸收随频率的分布

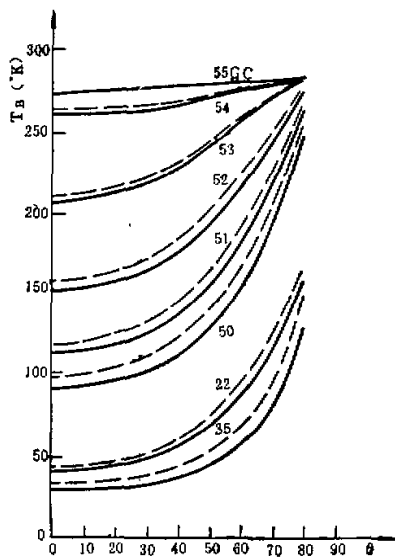


图 12 云层对亮度温度的影响(云高 850 mb, 云厚 500 米, 含水量 0.2 克/米³)
—— 不包括云层的影响 —— 包括云层的影响

2. 云层的影响 非降水性云层的影响在 5 毫米和 1.35 厘米波段都是小量, 但是在遥感大气层结中是不容忽视的量。(见图 11)。对于非降水性云层, 云的影响频率在 53 Gc 以下影响较大, 在 53 Gc 以上影响较小, 这是由于在高频范围大气衰减作用大, 云的影响受到阻挡。(见图 12)。由于云层在测温 (5 毫米) 及测湿 (1.35 厘米) 的作用, 表现在亮度温度上是小量, 故而可用 8 毫米的遥感来订正云的影响。关于水汽的吸收和对于亮度的贡献, 1.35 厘米波段要比 8 毫米波段大近于 3 倍; 云的吸收和对于亮度的贡献, 8 毫米波段要比 1.35 厘米波段大两倍半。用 8 毫米和 1.35 厘米遥感可将大气的温度及云中水量反映出来; 用此可以作为 5 毫米波段遥感大气温度层结云层影响订正之用。用 8 毫米、1.35 厘米和 5 毫米波段遥感可以获得大气温度、湿度、压力及云中水分之资料^[30]。微波遥感大气层结有机动灵活和连续取得资料的优点, 宜于在低层探空方面推广使用。

参 考 资 料

- [1] C. D. Rodger, Review of Geophysics and Space Sciences, 14, 609—624, 1976.
- [2] 赵柏林, 北京大学学报(自然科学), No. 2, 1978.
- [3] M. D. Pearson, Kraiss, Ground based microwave for recovery of average temperature profile of the atmosphere, AD682051, 1968.
- [4] E. R. Westwater, *J. of Research*, NBS 69D, 1201, 1965.
- [5] J. C. Alishouse, L. J. Crane, H. E. Fleming, F. V. Van Cleef, D. Q. Wark; *Tellus* 19, 477—482, 1967.
- [6] D. C. Rodger, *J. Quart. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 11, 767—777, 1971.
- [7] M. Walk, F. van Cleef, *Monthly Weayher Review*, 95, 463—467, 1967.
- [8] M. Foster, *J. Society Indust. Applied Mathematics*, 9, 387—392, 1961.
- [9] D. W. Marquard, *J. Society Indust. Applied Mathematics*, 11, 431—441, 1963.
- [10] D. L. Phillip, *J. Association of Computing Machinery*, 9, 84—97, 1962.
- [11] S. Twomey, *J. Franklin Institute*, 279, 95, 1965.
- [12] J. Y. Wang, C. R. Claymath, M. Griggs, *J. Applied Meteorology*, 14 308, 1975.
- [13] E. R. Westwater, O. N. Strand, Inversion techniques. Remote Sensing of the Troposphere, ed. V. E. Derr, 1972.
- [14] G. Miner, D. D. Thornton, W. J. Welch, *J. of Geophysical Research*, 77 975—991, 1972.
- [15] E. R. Westwater, O. N. Strand, *J. Atmospheric Sciences*, 25, 750, 1968.
- [16] B. Deutch, *Estimation Theory*, 290 pp, Prentice Hall, Inc., 1965.
- [17] E. R. Westwater, *Monthly Weather Review*, 100, 15—18, 1972.
- [18] E. R. Westwater, J. B. Snider, A. V. Carlson, J. R. Yoder, Experimental determination of temperature profiles by ground based radiometry, AD779531, 1974.
- [19] E. R. Westwater, J. B. Snider, A. V. Carlson, *J. Applied Meteorology*, 14, 524—539, 1975.
- [20] В. Ф. Турчин, В. З. Нозик, *Изв. АН СССР ФАО*, 5, 29—38, 1969.
- [21] В. Ф. Турчин, М. С. Малкевич, И. А. Горчаков, *Изв АН СССР ФАО*, 5, 449—456, 1969.
- [22] А. Т. Ершов, А. П. Наумов, *Изв. Вузов: Радиофизика*, 17, 1600—1625, 1974.
- [23] В. И. Алашкин, А. П. Наумов, В. М. Плечков, м. и. Сумин, А. В. Троицкий, *Изв. Вузов, Радиофизика*, 20, 198—211, 1977.
- [24] B. J. J. Conrath, *Atmospheric Sciences*, 29, 1262—1271, 1972.
- [25] Meteorological application passive microwave radiometry, Samsco-TR-73-206, AD915570, 1973.
- [26] W. L. Smith, *Applied Optics*, 9, 1933, 1970.
- [27] P. Y. Deschamps, G. Brogniez, *J. de Recherches Atmospheriques*, 6, 117—132, 1972.
- [28] 赵柏林, 尹宏, 社金林, 刘式达, 胡成达, 李慧心, 王义举, 施庶民, 邵根金, 邹丽珍, 大气科学, No. 4, 1978.
- [29] 尹宏, 张淑君, 微波遥测大气湿度廓线(尚未发表), 1977.
- [30] 赵柏林, 秦瑜, 微波云天遥感大气层结中的问题, No. 1, 1979.

RETERIEVAL OF ATMOSPHERIC TEMPERATURE FROM REMOTE SENSING OF THERMAL RADIATION

Zhao Bai-lin

(*Peking University*)

ABSTRACT

In this paper, detailed discussion are given of ground-based microwave radiation transfer equation and atmospheric microwave noise. Reviews the principles which may be used to estimate the distribution of atmospheric temperature from measurements of emitted thermal radiation such as are made by remote sensing on ground-based. An evaluation of some methods of estimating the atmospheric temperature profile from inversion thermal radiation in practice and some prospects in future are given.