

两波段微波辐射计遥感云天大气的 可降水和液态水

黄润恒* 邹寿祥

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文在薄大气近似下计算了1.35cm和8.5mm波段上云天大气辐射传输,建立了微波辐射亮度温度与云中液态水含量、大气衰减与水汽总量的经验关系,讨论了由两波段的辐射测量遥感云天条件下的水汽总量和云中含水量的方法,并进行了实验验证。在我们的实验条件下,微波遥感的云天水汽总量与探空值的相对偏差约为10%。

一、引 言

众所周知,被动微波遥感手段可以获得大气温度、湿度、云中含水量、降雨强度等多种气象要素。我们在1982—1984年期间用自行研制的单一波长的1.35cm辐射计进行了遥感晴空水汽的试验,得到了水汽总量、分层含量和垂直分布的有用结果^[1-3],它表明这台微波辐射计能够连续监测晴空水汽场的空间结构和时间演变。为了进一步扩大微波辐射计在气象研究和业务上以及在其他领域里的应用,更加需要的是能够提供有云条件下的水汽场信息和大气中液态水的含量。为此,我们又研制了一台工作在大气微波窗区的8.5mm辐射计。因为在微波窗区大气分子的吸收较弱,也比较稳定,而在mm波段上云的影响则比较突出,两个波段的辐射计联合观测有可能获得有云情况下的大气可降水量和云中含水量。

本文叙述联合遥感云天大气水汽总量和云中含水量的方法、试验情况、资料反演方法以及试验结果。

二、云的微波辐射传输模式

云天大气的微波辐射包括大气分子和云中液态水滴两部分的贡献。由于非降水云的云滴尺寸远小于微波波长,在讨论云的微波辐射传输时可以忽略云对微波的散射,而把云当作纯吸收介质处理。此时,可以用薄大气近似^[4]来计算非降水云的微波辐射。

若大气中有一层云底和云顶高度为 z_b , z_t 的平面平行云层,则它的向下发射亮度温度可写为:

1985年9月24日收到,1986年3月18日收到修改稿。

* 现在在国家海洋局海洋环境预报研究中心工作。

$$T_{Bc} = T_{Ba_1} + T_{Ba_2} + e^{-\tau_{a_1}} \int_{x_b}^{x_t} T_c(\alpha_a + \alpha_c) e^{-\int_{x_b}^x (\alpha_a + \alpha_c) \sec \theta ds'} \sec \theta dz \quad (1)$$

其中 T_{Ba_1} , T_{Ba_2} 为云下和云上大气的贡献, τ_{a_1} 为云下大气的总衰减, 它们可以利用晴空大气的微波吸收和传输方程加以计算. α_a , α_c 分别为气体分子和云的吸收系数, T_c 为云温, 在热力学平衡条件下可取环境温度, θ 为天顶角. 在微波波段, 云的吸收系数与云温以及云中液态水浓度 M 有关.

为了计算云天大气的微波辐射强度, 除了大气廓线以外, 还需要知道云底和云顶高度、云中液态水含量及其分布等这些宏观参数, 而这些量在常规的气象资料中是没有的, 因此必须事先作出假定.

我们选取 1976—1980 年 5、6 月份的探空资料, 以相对湿度大于或等于 85% 作为有云存在的判据, 挑选出 20 次有中、低云存在的个例(云底高度分别在 850, 700, 600hPa). 需要说明的是, 按照水汽凝结条件, 周围环境的水汽应处于饱和, 即相对湿度为 100%. 但是纵观全部资料样本, 即使相对湿度达到 90% 的情形也是不多的. 这或许是因为探空气球飞行路径上没有云, 或者是湿度感应元件在高温条件下不够灵敏. 为了保证有足够的云天样本, 只好相应放宽云存在的判据. 此外, 即使按此判据找出云的存在, 但仍然缺少云中含水量的实际数据. 根据中、低云含水量浓度的统计资料^[4], 我们取 $M = 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5$ 和 2.0 g/m^3 六个数值, 它们基本上代表了各类层状云和积云的情况. 同时, 我们还假定云中含水量在垂直方向均匀分布. 这样, 我们便得到了 120 个云的样本, 它们的积分含水量 L 的范围为 $100-5700 \text{ g/m}^2$ (或 $0.01-0.57 \text{ g/cm}^2$).

根据(1)式, 我们计算了上述 120 次云天大气两个波段上的微波辐射亮度温度. 计算中云的吸收系数采用改进的 Staelin 公式^[5]

$$\alpha_c = \frac{10^{[0.01124(291-T_c)^{-0.9418}]}}{\lambda^{1.968}} M \quad (2)$$

式中 λ 为微波波长(单位: cm)

主要结果如下:

(1) 8.5mm 天顶方向亮度温度与云中液态水含量的关系, 如图 1 所示, 随着云中含水量的增加, 8.5mm 亮度温度单调上升, 两者之间的统计关系可用一条二次曲线来表示

$$L = -59.13 + 2.61 T_{B_1} + 0.101 (T_{B_1})^2 \text{ g/cm}^2 \quad (3)$$

T_{B_1} 表示 8.5mm 亮度温度(此后, 下标 1, 2 分别代表 1.35cm 和 8.5mm 波段, 而上标 a , c 分别表示是空气和云的参数). 拟合的均方根偏差 $\sigma_L = 0.025 \text{ g/cm}^2$.

(2) 8.5mm 波段天顶方向云天大气微波衰减按定义

$$\tau_1 = \int_0^\infty (\alpha_a + \alpha_c) dz = \tau_1^a + \tau_1^c \quad (4)$$

由于 8.5mm 处于大气窗区, 大气分子的影响比较微弱, 也比较稳定, 因此总衰减的变化主要反映了云的贡献. 计算结果表明, 总衰减与云中含水量成正比(见图 2), 两者的关系可用一条回归直线表示, 即

$$\tau_1 = 0.112 + 2.535 L \quad (5)$$

实际上直线的截距代表了等效晴空分子大气衰减的统计平均值. 上式拟合的均方根偏差为 0.068.

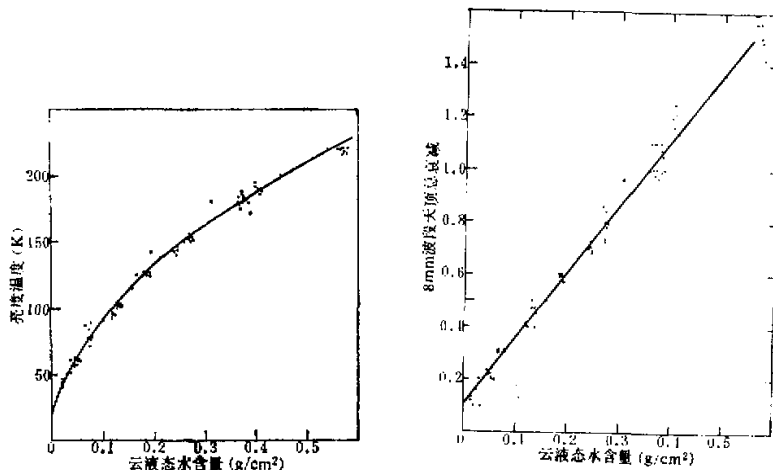


图 1 8.5mm 天顶亮度温度与云中含水量的关系 图 2 8.5mm 天顶衰减与云中含水量的关系

(3) 如图 3 所示, 1.35cm 波段晴空大气衰减与水汽总量之间具有很好的线性关系。计算表明, 两者的相关系数超过 99%, 线性回归方程为

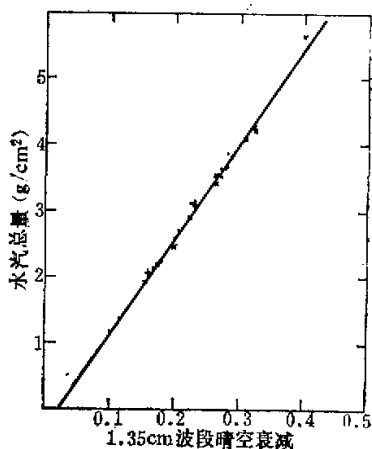


图 3 1.35cm 波段大气总衰减与水汽总量的关系

$$Q = -0.23 + 14.17\tau_1 \quad (6)$$

以上结果虽然是在假定的云参数下通过辐射传输模式计算得到的, 但是由于云的直接探测比较困难, 在缺少微波衰减和云参数同时测量的情况下, 采用模式计算建立两者之间的统计关系并用于遥感资料的反演, 仍不失是一种可用的方法。

三、实验装置

本实验使用了一台 1.35cm 辐射计和一台 8.5mm 辐射计。两台辐射计的设计相同,

都是脉冲噪声注入式零平衡 Dicke 式辐射计^[6]。8.5mm 辐射计的性能指标见表 1。

表 1 8.5mm 辐射计主要技术指标

中心频率	35.3GHz
天线系统	卡塞格伦式 主反射面直径 368mm 增益 $>85\text{dB}$ 主瓣波束 $\leq 1.5^\circ$ 旁瓣电平: -17dB
接收机系统	中频范围: 30—210MHz 整机噪声系数 $\approx 12\text{dB}$ 调制频率: 1kHz 参考负载温度: 48°C 注入脉冲宽度: $47\mu\text{s}$ 积分时间: 1s

1.35cm 辐射计天线能够电动扫描,而 8.5mm 辐射计天线靠手工操作。我们采用一台微机同时对两台辐射计顺次采样和处理,并控制 1.35cm 辐射计的天线作仰角扫描。观测时由人操纵 8.5mm 辐射计天线指向事先选定的角度,以与 1.35cm 辐射计同步,两个天线对准同一方向,以期做到观测同一目标。

为了对辐射计进行自然定标,在取得云天观测资料的同时,还取了一定数量的晴空观测资料,以与由同时刻探空资料所计算的两个波长上的大气亮度温度作比较。由于在云天条件下大气水平平均一的条件难于满足,以往在晴空条件下行之有效的多元回归标定方法^[4-2]不再适用。在这次实验中,我们采用辐射计输出电压与由探空计算的亮度温度一对一的标定方式。对于 1.35cm 辐射计的 T_b -V 关系基本上是一条直线,但数值比较离散,采用线性标定的均方根误差为 6.9K。而对于 8.5mm 辐射计,虽然在实验室的标定范围内(100—300K)具有很好的线性,但是在所涉及到的大气亮度温度范围内存在明显的非线性。因此,对 8.5mm 辐射计采用了二次曲线标定,标定误差为 3K。在以后的资料处理中我们将设法消除 1.35cm 辐射计的标定误差对晴空水汽测量的影响。

四、反演方法

国外在七十年代就已经进行过双频道(20.6, 31.65GHz)微波辐射计联合观测云中含水量和水汽总量的研究^[7],国内北京大学也于八十年代初进行了类似的实验^[8]。在国外的试验中采用了统计方法对测量资料进行了反演。所谓统计方法,是根据大量云天大气微波辐射正问题计算所得的两个波段上的亮度温度与两个气象参数进行统计回归,得到两个联立的线性回归方程。此法的优点是简便、直接,并且在建立回归方程时已将测量误差考虑进去。其局限性是线性回归方程不能反映诸如(3)式那样的非线性关系。后来他们又对统计方法作了改进,发展了一种自适应方法^[9],随云中含水量的大小来调整线性回归方程中的系数,从而使反演结果得到改善。我们这里所用的反演方法不是采用两参数统计回归方程,而是利用上节所得到的一系列统计关系,用 8.5mm 辐射计测量值所反映

的液态水含量对 1.35cm 测量值作云的订正。其基本思路如下:

1. 首先从(3)、(4)出发,由 8.5mm 的亮度温度推求云中含水量以及云引起的 8.5mm 波段的衰减。

2. 从云衰减的定义,建立两个波段上云衰减的关系。根据(2)式,我们有

$$\tau_1^c/\tau_2^c = (\lambda_2/\lambda_1)^{1.968} \quad (7)$$

(7)式是一个很稳定的关系,它只取决于(2)式所表示的云吸收系数与波长依赖关系的精度,与云的一些参数(诸如云温、云的几何位置以及云中液态水的分布等)无关,而这些参数在被动遥感中往往是难以确定的。

3. 引进 1.35cm 波段上大气的等效辐射温度 T_m ,从而根据 1.35cm 辐射计测得的大气亮度温度推算出该波段上大气的总衰减,其计算公式如下:

$$\tau_1 = -\ln\left(\frac{T_m - T_{B_1}}{T_m - T_g}\right) \quad (8)$$

其中 T_g 为宇宙背景的微波辐射,一般取作 3K。

4. 从 τ_1 中扣除云衰减 τ_1^c ,得到等效的晴空衰减 τ_1^s ,再由(6)式求出水汽总量。

从我们这次 120 个云天样本的计算结果看, 1.35cm 波段上大气的等效辐射温度 T_m 与云中含水量的关系不敏感,在 $M = 0.5-1.5\text{g/m}^3$ 的范围内, T_m 变化 3—4K。考虑到亮度温度的测量误差(主要来自线性标定误差),可用某一固定的 T_m 值来代替。其次,根据以前的分析,1.35cm 波长上的 T_m 与地面温度存在着一定的相关(我们分析了全国 51 个台站的平均资料以及 1984 年 6—7 月北京站探空的计算结果,发现由地面温度推算 T_m 的均方根偏差为 1.6K)。因此,在引进地面温度这一附加信息求出 T_m 以后,从(8)式可以得到 1.35cm 波段上的总衰减。

综上所述,本文所用的反演方法虽然明确地基于各辐射物理量之间的联系,但这种联系是建立在辐射传输计算所得的统计关系基础上,因而本质上仍然是一种统计方法。

五、试验结果和误差分析

我们于 1985 年 5—6 月份作了持续 20 天两波段辐射计联合观测,取得了两类大气微波辐射资料,其中可与同时刻探空相比较的晴空 20 份,它们主要用于对辐射计定标。对于云天的资料,运用上述方法进行了反演。第二节所建立的(3)、(5)和(6)式原则上也可用于非天顶方向。但是在实际资料的处理中,发现由于云并非水平均一,上述方法用到天顶角大于 30° 情况下的误差较大,因此只对天顶角和仰角 60° 两个方向上的资料作了处理。图 4 所示辐射计测量的云天大气水汽总量与同时刻探空总量的比较,两者的均方根偏差为 0.357g/cm^2 , 相对误差约为 10%; 对应的云中液态水含量的范围为 $0.005-0.012\text{g/cm}^3$ 。根据目测,这些云多为透光和蔽光高层云和高积云,个别情况是层积云。由于缺少其他手段测量云厚和云中含水量,8.5mm 辐射计所感应的云中含水量的大小只能靠由它推算出的水汽总量的合理性来间接检验。

其次,对于晴空情形直接运用 1.35cm 辐射计测量和等效辐射温度确定的衰减,再从(6)式得出水汽总量,结果见图 5。图上的圆圈表示未对辐射计定标作订正的结果,与探空

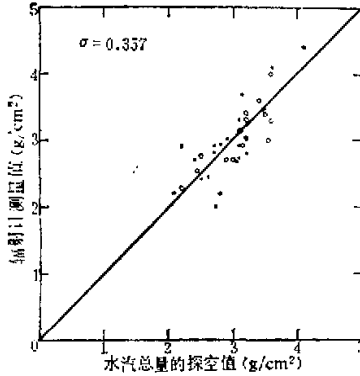


图 4 两波段辐射计联合观测云天气水汽总量的结果

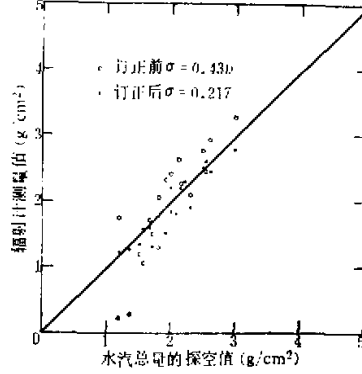


图 5 1.35cm 辐射计所测得的晴空水汽总量

相比,两者的均方根偏差为 $0.430\text{g}/\text{cm}^2$ 。这种大的偏差主要是 6.9K 的定标误差引起的。

为了减小标定误差的影响,我们考察了全部晴空样本中不同仰角方向上晴空大气衰减随角度的变化关系。在大气衰减与相对大气质量的关系图上我们发现两者存在着较好的线性关系。但是对应于那些反演误差较大的个例,直线延伸偏离坐标原点。从物理上讲,在大气质量为零时,晴空大气衰减也应为零,所有的直线延伸应该通过原点。据此,我们可以用由最小二乘法所确定的直线的截距对各角度上的大气衰减进行校正,由校正后的衰减推算水汽总量,结果大为改善。图 5 上的黑圈表示校正后的水汽总量,与探空相比,两者的均方根偏差下降到 $0.217\text{g}/\text{cm}^2$ 。我们认为这种校正方法对于减小标定误差的影响是有意义的。

以下给出简单的误差分析,由(6)式可知

$$\Delta Q = 14.17 \Delta \tau_1$$

而

$$\Delta \tau_1 = \sqrt{(\Delta \tau_1)^2 + (\Delta \tau_1')^2}$$

$$\Delta \tau_1 = - \frac{\Delta T_{B_1}}{T_m - T_{B_1}}$$

$$\Delta \tau_1' = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{1.968} \Delta \tau_2' = 2.535 \left(\frac{0.85}{1.35} \right)^{1.968} \cdot (2.61 + 2 \times 0.101 T_{B_2}) \Delta T_{B_2}$$

取 $T_m = 280\text{K}$, $T_{B_1} = 40\text{K}$, $T_{B_2} = 50\text{K}$, $\Delta T_{B_1} = 6\text{K}$, $\Delta T_{B_2} = 3\text{K}$, 代入上述各式得 $\Delta Q = 0.355\text{g}/\text{cm}^2$, 它在数值上与实验值相当。比较引起 $\Delta \tau_1'$ 两部分贡献的大小表明, ΔQ 主要来源于 1.35cm 辐射计的误差,因此提高辐射测量精度是获得精确的水汽反演值的关键环节。

六、结 论

从以上关于云的微波辐射计算和两波段辐射计联合观测,有两点主要结论:

1. 云天 8.5mm 波段的亮度温度对云的液态水含量比较敏感,而受大气廓线的影响较

小。用该波段辐射计可测量云中含水量,并用它来对 1.35cm 辐射计测水汽作云的订正。按此思路,我们提出一种基于各辐射物理量之间统计关系的反演方法,并用于实际资料的反演。在我们的实验条件下,两波段联合测量云天大气水汽总量的精度约为 10%。

2. 在晴空条件下用 1.35cm 波段上的大气衰减与相对大气质量的直线关系对云顶方向大气衰减作订正,可以减小辐射计标定误差的影响,使水汽总量的反演精度得到改善。

作者曾多次与魏重同志作了有益的讨论,并吸收了她的一些建议,在此致以热忱的感谢。还有,陈英参加了这项工作。南京气象学院 85 届毕业生许民哲、柯勇辉作了云天微波辐射的计算和观测工作。

参 考 文 献

- [1] 魏重等, 1984, 用 1.35cm 波长地面微波辐射计探测大气中水汽总量及分布, 大气科学, 第 8 卷第 4 期, 417—426.
- [2] Huang Runheng and Wei Chong, 1986, Experimental investigation on real-time sensing of layered atmospheric precipitable by a ground-based radiometer of 1.35 cm wavelength, *Advances in Atmospheric Sciences*, 3, 86—93.
- [3] Paris, J. F., 1971, Transfer of thermal microwave in the atmosphere, NASA Grant NGR 44-001-098.
- [4] 顾展潮著, 1980, 云雾降水物理基础, 科学出版社.
- [5] 周秀骥等编著, 1982, 大气微波辐射及遥感原理, 科学出版社.
- [6] 赵从龙等, 1983, 遥感大气湿度 1.35cm 微波辐射计, 中国科学, B 辑第 8 期, 759—768.
- [7] Westwater, E. R., 1978, The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual frequency ground-based microwave radiometry, *Radio Sci.*, 13, 677—685.
- [8] 赵柏林等, 1984, 大气微波辐射与水汽的遥感, 科学通报, 第 29 卷第 4 期.
- [9] Westwater, E. R., F. O. Guiraud, 1980, Ground-based microwave radiometric retrieval of precipitable water vapor in the presence of cloud with high liquid content, *Radio Sci.*, 15, 947—957.

REMOTE SENSING OF TOTAL WATER VAPOR AND LIQUID CONTENT OF CLOUDY ATMOSPHERE BY TWO-WAVELENGTH MICROWAVE RADIOMETRY

Huang Runheng Zou Shouxiong

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The empirical relationships between the atmospheric microwave brightness temperature and the liquid water content in the cloud, the atmospheric attenuation and the total precipitable water vapor are developed in this paper by the microwave radiative transfer calculations of 1.35 cm and 8.5 mm wavelengths on the basis of "thin atmosphere" approximation. Discussed is the remote sensing technique of cloudy atmospheric parameters by two-wavelength ground-based microwave radiometry. The experimental verification is conducted. The relative deviation of the total precipitable water of cloudy atmosphere between the radiometric measurements and the radiosondes is about 10% in our experimental condition.