

测量云液水柱含量的一个设想*

陈洪滨

P4 A

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘要 云液态水柱含量是一个重要的气象学和云雾物理参数。对于云液水柱含量测量已发展了多种技术, 但由于云在时空上变化很大, 目前地基、飞机以及卫星测量的全部资料, 都不能满足数值天气预报、人工增雨及气候变化研究等方面的工作需要。作者提出一种测云水的新方法, 即从卫星—地面的微波衰减来确定云水(斜)柱量, 并研究了此方法中的测量通道选择及测量方式问题, 进行了初步的误差分析研究。结果表明, 此方法在现有技术条件下可行, 云水的测量精度不难达到20%~30%的水平。与卫星被动微波遥感结合起来, 可获得精度更高的云水全球分布资料。

关键词: 云液水柱含量; 微波衰减; 卫星—地面路径

1 引言

云液态水柱含量[英文为液水路径: Liquid Water Path (LWP), 单位: g m^{-2} 或 mg cm^{-2} , 以下简记为 L]是一个重要的气象学和云雾物理参数^[1~3]。监测全球范围的云液水量分布及其变化, 对天气预报、环境预报以及人工增雨等工作有极大的帮助, 对气候变化研究也是必不可少的资料^[4~6]。

对于云液水柱含量测量已发展了多种技术, 例如: 地基毫米波测云雷达和微波辐射计, 地基和机载及球载的热线云水仪和云滴谱仪, 以及星载可见、红外和微波辐射计等等^[1,7~12]。虽然, 到目前为止已有了监测全球范围云水分布的技术(即ISCCP, 以美国DMSP卫星上的SSM/I和NOAA卫星上的AVHRR为主要探测器), 并有多种反演方法及算式产生出多年的全球云水分布资料^[12~15], 但是, 由于被动遥感反演的内在困难^[8,12,16], 从SSM/I等观测反演得到的云水资料精度是难以保证的; 又因为云在时空上变化大, 地基和飞机的测量资料不足以验证和标定卫星反演资料。

本文提出一种测云水的新方法。下一节较详细地介绍该方法, 第3节研究测量通道的选择及测量方式问题, 第4节进行初步的误差分析研究, 第5节给出几点初步结论。

2 测量云水柱量的新设想

在紫外、可见光及近红外波段, 通过测量太阳辐射的衰减量来遥感反演某些大气成分柱含量(例如: 臭氧、水汽、二氧化碳等, 包括气溶胶参数)是一种常用的测量技术。类似地, 通过测量卫星—地面路径上由云水造成的微波衰减, 就可给出云水(斜)

2000-09-11收到, 2000-10-27收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目001CB309403和中国航天微波遥感项目的联合支持

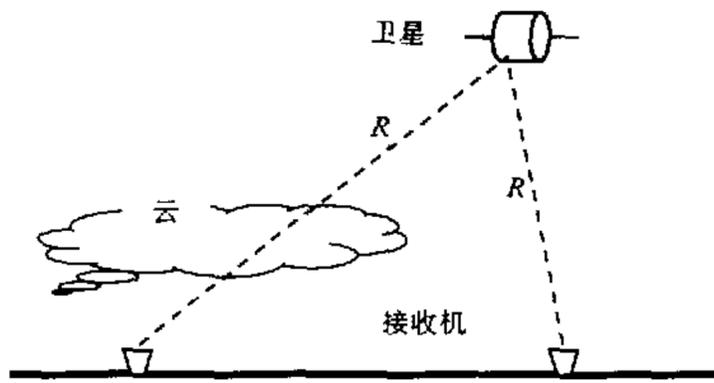


图1 从星—地微波衰减测云水的示意图

学厚度。

在有非降水云时， τ 是微波段气体和云贡献的和，即

$$\tau = \tau_{\text{gas}} + \tau_{\text{cloud}}, \quad \tau_{\text{gas}} = \int_0^R k_g ds, \quad \tau_{\text{cloud}} = \int_0^R k_c ds, \quad (2)$$

式中 ds 为路径步长， k_g 和 k_c 分别是大气气体和云的衰减系数。

当气体的衰减量（或 τ_{gas} ）已知或较小时，测得云水产生的 τ_{cloud} 就可估算云水（斜）柱量。在微波段（厘米及毫米波段），云水的衰减量与云水含量 L （单位： g cm^{-3} ）成线性正比，即

$$k_c = k'_c L, \quad (3)$$

式中 k'_c 是单位液水含量的衰减系数（单位： $\text{km}^{-1} \text{g}^{-1} \text{m}^3$ ）。上式之所以成立，是因为对半径小于 $100 \mu\text{m}$ 的云水滴，在微波段 Rayleigh 近似完全成立，云滴的散射系数与吸收系数相比很小，可忽略。这样，云水的衰减系数就近似等于吸收系数，与云滴谱分布无关。

3 通道选择及相关问题

通道选择的原则是：在不使用通讯及其他用途（如天文观测和对地被动微波遥感）的频段前提下，应选择云水作用尽量大而大气气体影响尽可能小的频段。

图2给出标准大气整层及云水柱量为 150 g m^{-2} 的一层云的总光学厚度。大气水汽和氧气的吸收系数用 Liebe^[17]的模式计算；云水吸收系数由 Rayleigh 公式计算，云的平均温度设为 0°C 。

显然，首先要排除在 $1 \sim 300 \text{ GHz}$ 范围的2个水汽吸收线（ 22.235 GHz 和 183.75 GHz ）和二个氧气吸收带线（ $50 \sim 70 \text{ GHz}$ 和 118.3 GHz ）及其附近区域。 20 GHz 以下，云水的作用太弱，不可取。

25 GHz 以上有4个大气窗区（ 30 、 90 、 133 、 220 GHz 附近），似乎都可取。考虑到 100 GHz 以上频段，卷云和气体的影响都很大，另外高频接收发射机技术上难度要大得多，经费可能要高，所以目前尽量不要选取 100 GHz 以上的频段。但如果要测卷

柱含量。

图1给出这一测云水设想的示意图。现假设卫星上的微波发射系统作各向同性发射，发射功率是 P_t ；星—地距离为 R ，接收天线有效截面 A_e ；暂不考虑发射和接收天线的增益和损耗参数，则地面接收的功率为

$$P_r = \frac{P_t A_e}{4\pi R^2} e^{-\tau}, \quad (1)$$

式中 τ 是星—地路径上总的微波大气光

云的冰水含量可在 135 GHz 和 220 GHz 附近选一通道。

在 90 GHz 附近的窗区通道有着 100 GHz 以上高频同样的问题和优点,但在程度上都要少点。选 30 GHz 附近的通道,在技术上要相对成熟,因此也经济一些;对冰晶云几乎完全不敏感。然而,30 GHz 附近通道云水作用也较小,水汽的影响相对不小,这对云水的反演带来了另一方面的难度。

为了测量大气可降水量(即大气柱水汽总量)及水汽订正的需要,最好有一测水汽的通道,可选在 22.235 GHz 水汽吸收线附近(如 20.6 GHz 或 23.8 GHz)。

表 1 是通道选择的一览表,列出了几种组合及其可测量和相对的优缺点。

表 1 通道组合及可测大气参数

通道组合	可测量量	注释
单通道 35 GHz	云水(斜)柱量 降水(斜)柱量	技术完全成熟,较经济,不受冰云的影响,要进行水汽订正。
单通道 90 GHz	云水(斜)柱量	技术较成熟,可测冰云含水量,要进行水汽订正。
双通道 20.6 / 35 GHz 或 20.6 / 90 GHz	云水和水汽(斜)柱量	技术较成熟,可同时测云水和水汽总量。
三通道 20.6 / 35 / 90 GHz 20.6 / 90 / 220 GHz	云液水 水汽 冰水含量	技术不太成熟。

要说明的是,通道中心频率的选定要得到无线电管理机构的认可。在保证有足够的信噪比的前提下,通道的带宽应尽量窄,以免与其他工作互相干扰。

4 测量精度初步估计

为了进一步讨论此设想的可行性,有必要进行初步的误差分析。

为简单起见,先分析微波光学厚度 τ (或总衰减量) 测量的误差范围。从图 2 上可得,在 35 GHz 和 90 GHz, τ 分别约为 0.088 和 0.29。由 (1) 式得

$$\tau = \ln\left(\frac{A_e P_t}{4\pi R^2 P_r}\right), \quad (4)$$

其绝对误差为

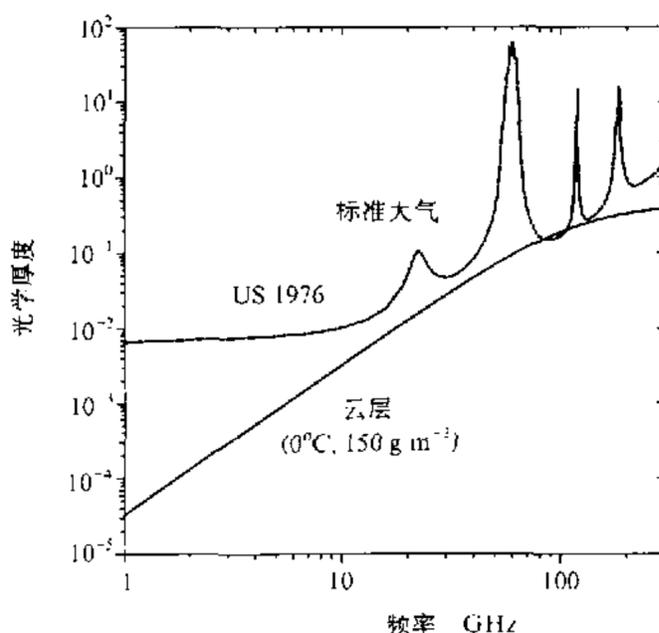


图 2 在 1~300 GHz, 标准大气和一层水云的微波光学厚度

$$\Delta\tau = \left| \frac{2\Delta R}{R} \right| + \left| \frac{\Delta A_e}{A_e} \right| + \left| \frac{\Delta P_t}{P_t} \right| + \left| \frac{\Delta P_r}{P_r} \right|.$$

由此式可见, τ 的测量误差主要来自于测距 (包括观测角)、天线有效截面、接收和发射功率的误差。

非常幸运的是, τ 的绝对误差由这些量的相对误差决定, 所以很容易较精确地测量 τ 。具体地说, 测距误差, 假设极轨卫星至地面的测距误差有 100 m, 卫星高度 800 km, 则产生的误差 2.5×10^{-4} , 比 τ 的信号小二个量级以上; 对地球静止卫星平台测距误差的影响同样也可忽略。天线有效截面随时间变化不会很大, 其造成的系统性偏差不难订正。这样, 从技术上讲, 测量衰减的精度就主要决定于发射机和接收机功率检测的精度水平。虽然笔者一时给不出具体的技术数据, 但从现有的微波雷达和辐射计水平来看, 使得接收和发射功率的检测误差或稳定性控制在 0.2% (对 90 GHz) 或 0.05% (对 35 GHz) 以下是不难实现的。

根据以上半理论半定性分析, 大气斜程微波光学厚度 τ 的测量精度可以达到 1%。以下按 τ 的精度为 1%、3%、10% 的水平, 再分析云液水量的可能测量精度。

结合 (2) 和 (3) 式, 并假设云和气体的质量衰减系数为“常数”, 不考虑斜程效应, 则云水柱量 L 的误差为

$$\Delta L \approx \left| \frac{\Delta k'_c}{k'_c} \right| L + \frac{1}{k'_c} |\Delta\tau| + \frac{1}{k'_c} [|k'_v \Delta V| + |\Delta k'_v V|]. \quad (5)$$

式中 k'_v 和 V 分别是单位水汽的吸收系数和大气可降水量。(5) 式中未包括大气氧气的影响, 因为氧气的质量吸收系数比水汽的小一个量级以上, 氧气的密度又可以很精确地给出。

先估计水汽影响产生的误差。在 35 和 90 GHz 及温度 0°C 时, k'_c 分别约为 0.25 和 $1.1 \text{ km}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ m}^3$; 水汽的等效吸收系数 k'_v 在对流层低层在 35 GHz 和 90 GHz 分别约为 1.5×10^{-3} 和 $8.0 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1} \text{ g}^{-1} \text{ m}^3$, 其误差设为 10%; 大气可降水量 V 变化很大 ($0.5 \sim 7 \text{ g cm}^{-2}$), 取 4.0 g cm^{-2} , 其相对误差取 10%, 则 $\Delta V = 0.4 \text{ g cm}^{-2}$ 。由水汽量及水汽吸收系数不确定性产生的 L 测量误差约为: 48 g m^{-2} (35 GHz) 和 58 g m^{-2} (90 GHz)。

当光学厚度的测量水平分别为 1%、5%、10%, 对应云水柱的误差约为: 3.52、17.6、35.2 g m^{-2} (35 GHz) 及 2.64、13.2、26.4 g m^{-2} (90 GHz)。

最后, 估计一下由云水衰减系数 k'_c 不确定产生的误差。云水质量衰减系数 k'_c 是波长和温度的函数。不计中心 (或等效) 波长的不确定性, 云的平均 (或等效) 温度 $t_{c,m}$ 估计误差分别是 2°C 和 5°C 时, $\Delta k'_c$ 随温度的变化在图 3 中给出。由图可见, 在 $t_{c,m}$ 估计误差控制在 2°C 以下时, 由云水衰减系数造成的云水相对误差不大于 5%。 $t_{c,m}$ 估计误差达 5°C 时, 在 35 GHz 云水 L 的相对误差约为 11%, 而在 90 GHz, L 的相对误差一般仍小于 5%。从图 2 中也可看出, 在 95 GHz 附近, 云水衰减系数随温度的变化较小。对于波长的依赖关系也开始变弱。从减少 k'_c 的不确定性方面考虑, 云水测量通道应更倾向于选 90 GHz 附近的频道。

综上所述, 由水汽吸收系数、水汽量、云水和吸收系数及大气光学厚度(或透过率)测量不确定性所产生的云水柱量误差在量级上相当; 水汽量 V 不确定产生的误差稍大。假设, 云水柱量 L 为 150 g m^{-2} (层状云云水的均值), 各项不确定因子产生的云水相对误差总结在表 2 中。

由表 2 可见, 水汽误差占有相当大的份额。采用单通道时要做好水汽订正; 采用多通道时, 如果水汽误差再减少至表中的 $1/3$, 则云水柱量测量精度不难达到 20%。

需说明的是, 表 2 给出的是根据 (4) 和 (5) 式在平均状况下估计的最大误差; 实际测量时, 有些误差可能会相互抵消一部分。

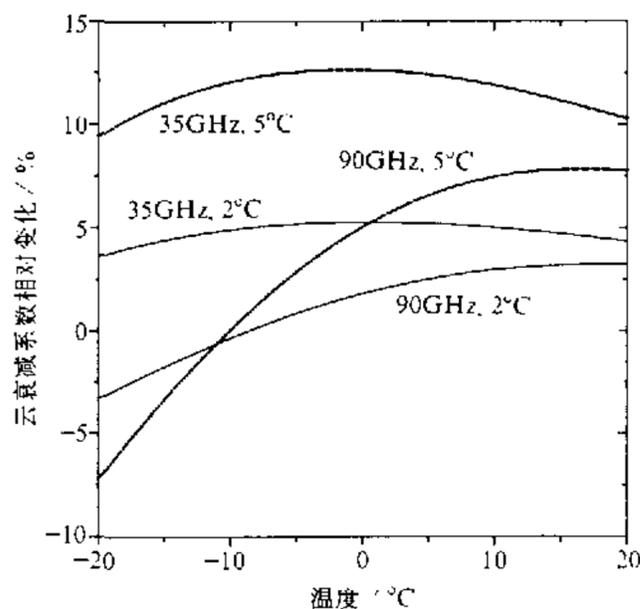


图 3 云的平均温度估计误差分别是 2°C 和 5°C 时, 云水衰减系数不确定性随温度的变化

表 2 云水测量相对误差估计表 (%) (设 $\bar{L} = 150 \text{ g m}^{-2}$)

因子	τ 的测量精度			水汽不确定性		k'_c 不确定性		总计	
	1%	5%	10%	$5\%k'_v$	$10\%V$	2°C	5°C	较差	较好
35 GHz	2.3	11.7	23.5	8	16	< 5	~ 11	~ 60	~ 30
90 GHz	1.8	8.8	17.6	9.7	19.3	< 5	< 5	~ 50	35

5 小结与讨论

像在紫外、可见光和近红外波段通过测量太阳辐射的衰减量来反演大气成分柱含量一样, 本文提出一种测量星—地微波衰减量来估算云水柱含量的新设想。这一新设想还类似于利用地基 GPS 反演大气可降水量的方法。差别在于, 从 GPS 信号中的总大气路径延迟量导出大气可降水量, 需要很复杂的程序来实现总路径延迟量的计算及电离层和干空气贡献的扣除, 而我们提出的测云水方法的关键在于微波衰减量的测量及水汽量的订正。

我们进行了通道选择初步研究, 有单、双和三通道三个方案可供选择。单通道方案在技术上容易实现, 而双和三通道方案可以同时测云水和水汽总量甚至冰云冰水含量。

对此方法反演云水的误差进行了半定量分析。结果表明: 水汽不确定性将产生较大的云水误差, 所以采用单通道时要做好水汽的订正; 云水的测量精度不难达到 20%~30% 的水平。

为了获得全球范围的云水分布资料, 此方法所需的微波发射机应同时搭载于地球静止和极轨(气象)卫星上。对于静止卫星, 接收方向固定, 天线的方向性问题易于克服, 可以进行时间上连续的测量。为了得到高纬和极地地区的云水测量, 自然也需要上

极轨(气象)卫星。

像密集地基 GPS 站点可以测量反演大气水汽廓线那样,采用多星多地基微波接收站点也可进行云水的层析(tomography)反演。另外,此方法如与现有的星载微波被动遥感结合起来,可以获得更高精度的全球范围的云水分布资料。

本文仅是在原理上论证了新方法的可行性,尚未涉及具体的技术问题,例如,要求多高的发射功率、接收灵敏度、发射和接收机的稳定性等等。这些技术参数的确定,须与有关技术部门共同讨论。另外,本文也没有涉及具体的云水反演和水汽订正算式以及如何从斜柱量转换为垂直柱量,这些都是下一步要做的工作。

这一方法的可行性,已为 Snider 等人^[18,19]的工作所证明。他们用一套微波接收机—辐射计联合系统,进行了云水测量的比对研究,表明两种方法所测的云水量相关性很好。他们利用的是 COMSTAR-3 号卫星上 28 GHz 的通讯频道。可惜的是,他们仅是将衰减测量方法作为微波辐射计方法的一种验证手段,而没有认识到这是一种测量全球范围云水量较佳的方案。

参照 Snider 等^[18]的工作,目前即可利用现有的通讯或气象卫星的合适微波通道,进行云水测量反演试验工作。

致谢: 吕达仁、邱金桓和王普才研究员对本工作提出了一些宝贵的建议,作者向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Mason, B. J., *The Physics of Clouds*, Second Edition, Clarendon Press, Oxford, 1971.
- 2 Pruppacher, H. R. and J. D. Klett, *Microphysics of Cloud and Precipitation*, D. Reidel Pub. Company, 1980.
- 3 顾震潮, 云雾降水物理基础, 北京: 科学出版社, 1980.
- 4 Slingo, A., Sensitivity of the Earth's radiation budget to changes in low clouds, *Nature*, 1990, **343**, 49~51.
- 5 Wielicki, B. A., R. D. Cess, M. D. King, D. A. Randell, and F. Harrison, Mission to planet earth: role of clouds and radiation in climate, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, **76**, 2125~2153.
- 6 Del Genio, A. D., M. S. Yao, W. Kovari, K. K. W. Lo, A prognostic cloud water parameterization for global climate model, *J. Climate*, 1996, **9**, 270~304.
- 7 周秀骥等, 大气微波辐射及遥感原理, 北京: 科学出版社, 1982.
- 8 Ulaby, F. T., R. K. Moore, A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: active and passive. Vol.3: From Theory to Application*, Addison-Wesley Publ. Company, 1986.
- 9 Clothiaux, E. E., M. A. Miller, B. A. Albrecht, T. P. Ackerman, J. Verlinde, D. M. Babb, R. M. Peters, and W. J. Syrett, An evaluation of a 94 GHz radar for remote sensing of cloud properties, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, **12**, 201~229.
- 10 White, A. B., C. W. Fairall, and J. B. Snider, Surface-based remote sensing of marine boundary-layer cloud properties, *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**, 2827~2838.
- 11 Cober, S. G., A. Tremblay, G. A. Isaac, Comparisons of SSM/I liquid water path with aircraft measurements, *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**, 503~519.
- 12 Lin, B., P. Minnis, B. Wielicki, D. R. Doelling, R. Palikonda, D. F. Young, T. Uttal, Estimation of water cloud properties from satellite microwave, infrared, and visible measurements in oceanic environments. Part II: Results, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D4), 3887~3905.
- 13 Greenwald, T. J., G. L. Stephens, T. H. Vonder Haar, D. L. Jackson, A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using SSM/I observations, *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D10), 18471~18488.

- 14 Weng, F., N. C. Grody, Ferraro, R. R., A. Basist, D. Forsyth, Cloud liquid water climatology from the Special Sensor Microwave / Imager, *J. Climate*, 1997, **10**, 1086~1096.
- 15 Chen, H. B., A retrieval algorithm for deriving liquid water path from space-borne microwave radiometric measurements, *J. Remote Sensing (Chinese)*, 2000, **4**, 165~171.
- 16 Prigent, C., W. R. Rossow, Retrieval of surface and atmospheric parameters over land from SSM / I: potential and limitations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**, 2379~2400.
- 17 Liebe, H. J., MPM—an atmospheric millimeter-wave propagation model, *Int. Infrared and millimeter Waves*, 1989, **10**(6), 631~650.
- 18 Snider, J. B., F. O. Guiraud, D. C. Hogg, Comparison of cloud liquid content measured by two independent ground-based systems, *J. Appl. Meteor.*, 1980, **19**(5), 577~579.
- 19 Snider, J. B., H. M. Burdick, and D. C. Hogg, Cloud liquid measurement with a ground-based microwave instrument, *Radio Sci.*, 1980, **15**, 683~693.

A Concept for Measuring Liquid Water Path from Microwave Attenuation along Satellite-Earth Path

Chen Hongbin

*(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

Abstract To measure cloud liquid water path (LWP) which is an important parameter in the cloud physics and meteorology, various techniques have been developed. However, because of the observational difficulties related to high variability of clouds in space and time, all measurement techniques cannot yield global datasets of LWP to meet the needs in numerical weather prediction, precipitation enhancement, and climate change studies. The author presents a concept to determine LWP from cloud microwave attenuation along the satellite-earth surface path. An investigation has been conducted on the optimal choice of channels and mode of observations. Analysis of errors relevant to the method has also been done. The results show that (a) in principle, the proposed method can provide LWP measurements with much higher accuracy than the available (passive) satellite remote sensing; (b) the method with dual- or triple-channel combination can simultaneously observe atmospheric precipitable water (PW), LWP, and ice water path (IWP); and (c) if combined with the available satellite remote sensing techniques, it will more efficiently yield global datasets of LWP, PW, and IWP.

Key words: liquid water path; cloud microwave attenuation; satellite-earth path