

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0165-07

# 星载微波辐射计遥感反演云水量的一个算式

陈洪滨

(中国科学院 大气物理研究所 LAGEO, 北京 100029)

**摘 要:** 云柱含水量(常称为云水路径,以下简称为  $L$ )是气象学中一个重要的物理参量。星载微波辐射计是目前监测全球范围云水路径分布和变化的最强有力的技术手段。已上天的微波辐射计(如 SSM/I)反演云水路径  $L$  的算式需要进一步改进发展;将要上天的仪器(如日本的 ADEOS II-AMSR)反演  $L$  的算式需要建立。采用物理-统计反演方法,建立了一个  $L$  反演算式。主要过程是,先根据辐射传输模式模拟得到的资料,建立云水量  $L$  与有云无云亮温差之间的关系式;无云时的亮温由低频通道(SSM/I 的 19 GHz)及通过 SSM/I 大量晴天的资料建立的关系式求得。算式反演结果的对比表明,尽管作为验证的资料量极少且本身有很大的不确定性,但总体来说,我们算式的反演结果是可信的。

**关键词:** 星载微波辐射计; 云水路径; 反演算式

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

云的液水含量(Liquid Water Content; LWC)是气象学中的一个重要的物理参数。监测全球范围的云液水量分布及其变化,不仅对天气预报有帮助,就是对气候变化研究也是很有价值的资料,因为云-辐射相互作用是气候变化研究中最不确定的因子。

相对于可见光和红外波段而言,微波对云层有很高的穿透能力。原则上讲,使用微波可以得到某些云参数(如云水量)更为可靠的测量。因此,目前已上天的微波辐射计大多有测云水量的通道,频率选在 31.6 GHz 或 37 GHz。美国国防气象系列卫星(DMSP)上的专用微波成像仪(SSM/I)已能提供十来年全球大洋上的云水、可降水量、降水量和洋面风速等产品<sup>[1]</sup>。但是生成这些产品当前使用的所谓业务反演算式,还有待进一步改进或为更好的替代,这是由卫星微波被动遥感大气和海地表参数的复杂性决定的,因为星载微波辐射计亮温信号不仅仅是大气或海表某一单参量的函数。另外,下一代要上天的微波辐射计(如日本 ADEOS-II 上的 AMSR),要发展其反演算式。

象卫星遥感反演其他大气参数一样,从微波亮温反演云柱水量(即 Liquid Water Path, 简称为  $L$ )的方法有 3 类:统计方法、物理-统计方法和物理反演方法<sup>[2-6]</sup>。这些反演算式的建立及验证,都受到实测  $L$  资料少的限制,因此它们的适用性和反演精度都有很大的局限。这已被一些卫星反演与飞机测量和地基微波辐射计测量的比较工作所揭示<sup>[6-8]</sup>。

本工作采用物理-统计反演方法,建立一个 SSM/I 云柱积分水量的反演算式,并与其他算式进行比较。

## 2 亮温模拟

与大气可降水量和地面降水量相比,云水量  $L$  反演算式的建立及验证遇到的另一个困难是  $L$  的实测资料太少。这里,我们采用微波辐射传输模式,通过模拟计算得到的“人工”资料样本寻求  $L$  与亮温  $T_B$  之间的关系。微波辐射传输模式采用 Chen<sup>[9]</sup>发展的,不过其中有两点改进。一是氧气和水汽吸收模型从原来 Ulaby 等的<sup>[10]</sup>改用 Liebe (1989)的<sup>[11]</sup>;二是海面比辐射率模型改用 Wentz (1983)的<sup>[12]</sup>,因

收稿日期: 1999-06-19; 修订日期: 1999-09-07

基金项目: 日本 NASDA AMSR 反演算式发展项目和中国航天技术有关微波遥感项目的资助。

作者简介: 陈洪滨(1960—),男,1982年毕业于南京气象学院大气物理系,1991年在法国里尔科技大学大气光学实验室(LOA)获博士学位。

研究领域是大气辐射传输、微波主被动遥感和大气物理。

这一模型比较简单。

云模式假定,云是水平均匀无限的,由云水滴组成。作者先前的工作表明<sup>[9]</sup>,在 SSM/I 的频段上,云的衰减系数  $k_e^c$  与吸收系数  $k_a^c$  近似相等,也就是说云水滴的散射作用可以忽略; $k_e^c$  和  $k_a^c$  与云水含量(LWC)成正比,而与云滴谱具体形式无关,即

$$k_e^c \approx k_a^c = \frac{k'}{\lambda} W \quad (1)$$

式中  $\lambda$  是波长,  $W$  是云中单位体积水含量,  $k'$  与波

长和温度有关。由(1)可见,  $k_a^c$  约与频率的一次方成反比。也就是说,在 Rayleigh 近似成立的微波波段,随着频率的增高,云水的作用越大。但是,同时微波对云层的穿透能力下降,水汽的作用也越来越大。所以,测云水的通道通常折衷地取 37 GHz 或 31.6 GHz。在亮温模拟计算中,取 SSM/I 和 AMSR 全部通道(表 1),从而比较研究它们对云水的敏感性。

表 1 SSM/I 和 AMSR 的通道及其视场大小(FOV)

(H 和 V 分别表示水平和垂直极化)

Table 1 Channels and their FOVs of the SSM/I and AMSR

SSM/I (7 通道)	频率/GHz	19.35 H, V	22.235 V	37 H, V	85.5 H, V					
	FOV/km	69×43	60×40	37×19	15×13					
AMSR (14 通道)	频率/GHz	6.9 H, V	10.65 H, V	18.7H, V	23.8 H, V	36.5 H, V	89 H, V	50.3 V	52.8 V	
	FOV/km	50	50	25	25	15	5	10	10	

大气温度、压力和湿度/廓线采用北京 1992 年全年的探空资料,覆盖了从冬到夏的变化范围。海拔高度(55 m)至海平面的廓线由外推得到;探空高度以上的廓线(一直至 50 km),借助中纬冬夏的大气模式添加。除了对 AMSR 的 52.8 GHz 测温通道外,对流层顶以上大气贡献很小,尤其是对低频通道。

云顶高、云厚及云含水量  $W$  在 10 种典型云的基础上作一定的变化。例如:

$$W = W_0 + W_0 \times (x - 0.5) \quad (2)$$

式中  $x$  为 0—1 均匀分布的伪随机数,  $W_0$  是典型云的含水量(如,高层云 0.41 g/m<sup>3</sup> 等等)<sup>[13]</sup>。

海表温度在其上气温±5°C 范围内变化,海面风速在 0—20 m/s 范围内变化。SSM/I 和 AMSR 观测角都接近 50°,所以亮温模拟计算中观测天顶角取 50°。

### 3 模拟计算结果和分析

图 1 和图 2 分别给出 SSM/I 7 通道模拟亮温  $T_B$  相对于云水路径  $L$  和大气可降水量  $O$  的散点图。从图 1, 2 可见,无论在哪个通道,即使在有云条件

下,水汽对  $T_B$  的贡献都比云水的大,图 1, 2 中水平极化亮温点更为发散,原因是亮温中还有相当一部分海表的贡献。

我们同时模拟计算了同样大气和海表条件下但未加云层的亮温  $T_{B0}$ 。图 3 是 SSM/I 7 通道和 AMSR 部分通道有云与无云时亮温差  $\Delta T_B (= T_B - T_{B0})$  相对于  $L$  的散点图。由图 3 可见,亮温差  $\Delta T_B$  与  $L$  有较好的关系,尤其是在测云水的 37 GHz 通道上,这是因为云天-晴天亮温差消去了大部分水汽及海表的贡献,从而突出了云(水)的信号。垂直极化通道与  $L$  的关系更好,原因是其受海表风速的影响很小。还有,50.3 GHz 是 AMSR 中用于反演温度时进行海(地)表订正的通道,其模拟的云天-晴天  $T_B$  差也与  $L$  有很好的关系。这是一个新结果,表明了此通道的上天对于云的检测和云水的定量反演将有很大的帮助。

根据模拟计算所得资料,可以建立  $L$  与亮温差  $\Delta T_B$  之间简单的线性回归关系,即

$$L = a + b\Delta T_B$$

$$\Delta T_B = T_B - T_{B0} \quad (3)$$

回归统计结果列于表 2 中。  
©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

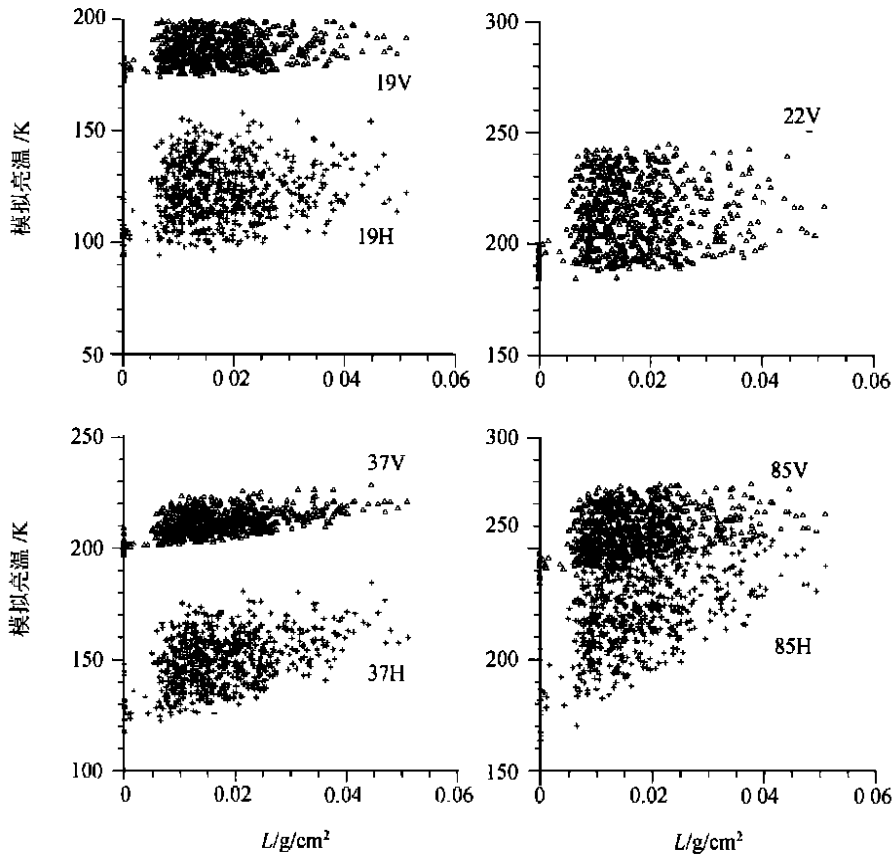


图1 模拟亮温  $T_B$  相对于云水路径  $L$  的散点图

Fig. 1 Scatter plots of simulated brightness temperature versus liquid water path

表2 云水路径  $L$  与亮温差  $\Delta T_B$  的回归统计结果 ( $L$  均值  $0.0174 \text{ g/cm}^2$ )

Table 2 Regression results for the relationships between  $L$  and  $\Delta T_B$

通道/GHz	$a(\times 10^{-3})$	$b(\times 10^{-3})$	相关系数/%	残差( $\times 10^{-3}$ )
19H	5.438	3.819	88.4	4.32
19V	4.973	6.807	89.8	4.06
22V	7.032	5.935	82.7	5.19
37H	3.501	1.522	92.0	3.63
37V	2.290	3.150	95.0	2.89
85H	4.261	8.103	82.1	5.27
85V	2.143	2.460	86.2	4.68
10H	3.993	11.51	82.1	9.66
10V	3.979	18.73	82.1	9.64
24H	5.982	3.114	66.1	18.3
24V	5.413	5.774	69.4	16.5
50V	0.278	4.424	92.6	4.00

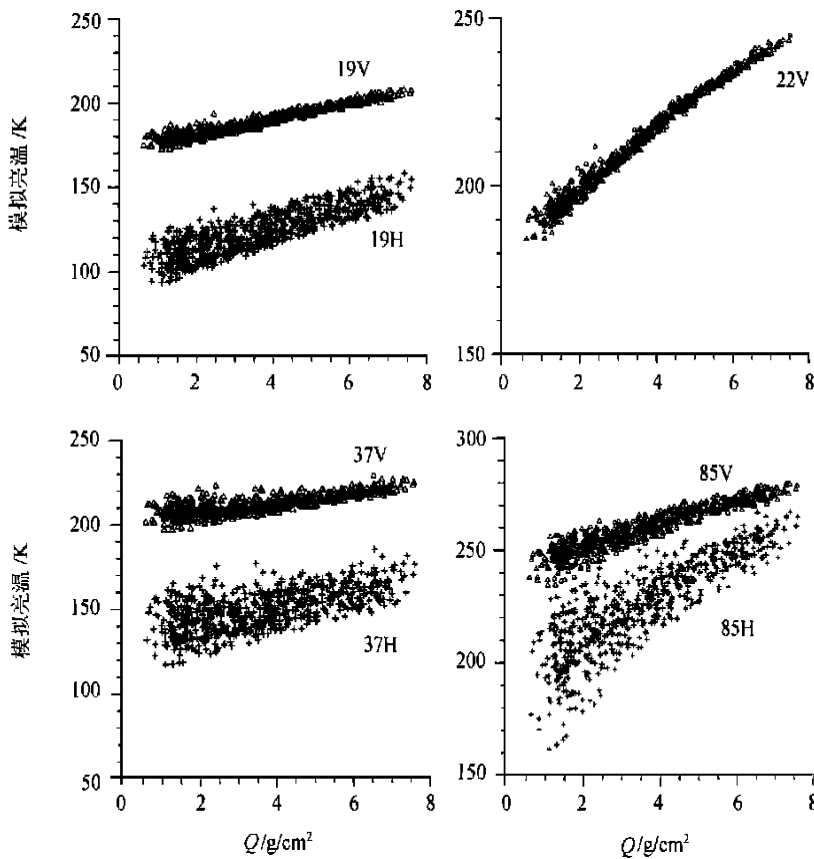


图 2 模拟亮温  $T_B$  相对于大气可降水量  $Q$  的散点图

Fig. 2 Scatter plots of simulated brightness temperatures versus atmospheric precipitable water

#### 4 云水反演算式的建立和验证

基于  $L$  与 37 GHz 通道的云天-晴天亮温差的关系式,我们建立 SSM/I 的  $L$  反演算式。实际卫星观测不可能同时给出有云和无云时的亮温,这样在我们的反演方案中,问题就归结到获取相对应观测点无云时的亮温值。我们可能有以下几种途径来获取亮温差。一是通过时间序列 SSM/I 图像,计算有云-无云亮温差。但这一途径似乎不可取,原因是在两次观测之间,海表和大气状况可能差别很大,所得的亮温差包含了太多的海表和无云大气的变化信息。第二个途径是,在 SSM/I 同一幅图像上用最邻近的晴空区的亮温作为云区对应的无云亮温,这一途径似乎可取,只要图像上无云有云的点(pixels)相邻,我们可以认为在大多数情况下它们的海表和大气(除云外)状况相近。问题是,在某些 SSM/I 图像资料中很难找到合适的相邻晴空点。以上两种途径到目前为止我们还没有尝试,原因是我们没有既适于建立反演算式又可验证的卫星和云水相配合的资料。

这里我们采用另外一种途径。通过  $L-\Delta T_B$  关系可见,在垂直极化低频通道,云水产生的  $\Delta T_B$  值较小。在假定一个平均的  $L$  值后,可计算得无云的亮温(对 SSM/I 就是  $T_{B0}(19V)$ )。在晴天 SSM/I 的观测资料显示,各通道亮温之间有一定的相关。图 4 给出 37V 和 19V 亮温之间的散点图。资料点 2 万多个,来自于一年中不同时刻和不同纬度( $50^\circ S-50^\circ N$ )。由此资料我们得到了回归关系式:

$$T_{B0}(37V) = 273 - 1.26 T_{B0}(19V) + 0.0048 T_{B0}(19V)^2 \quad (4)$$

此式的均方根差约 4 K。如果是用某区域的 SSM/I 资料,回归关系是线性的,均方根差还可大大减小。

因为由辐射传输模式模拟亮温与 SSM/I 实测亮温之间有偏差(系统偏差加随机偏差),所以在将由实测资料得到的(4)式代入由模拟得到的(3)式进行反演  $L$  计算时,要加修正系数。修正系数根据反演结果调整确定后,我们的物理-统计反演  $L$  的算式就建立了。实际反演时,要进行二次迭代过程。

通过对 SSM/I 实际资料的反演与 ISCCP(国际卫星气候计划)提供的云水路径  $L$  相比较,算式(4)

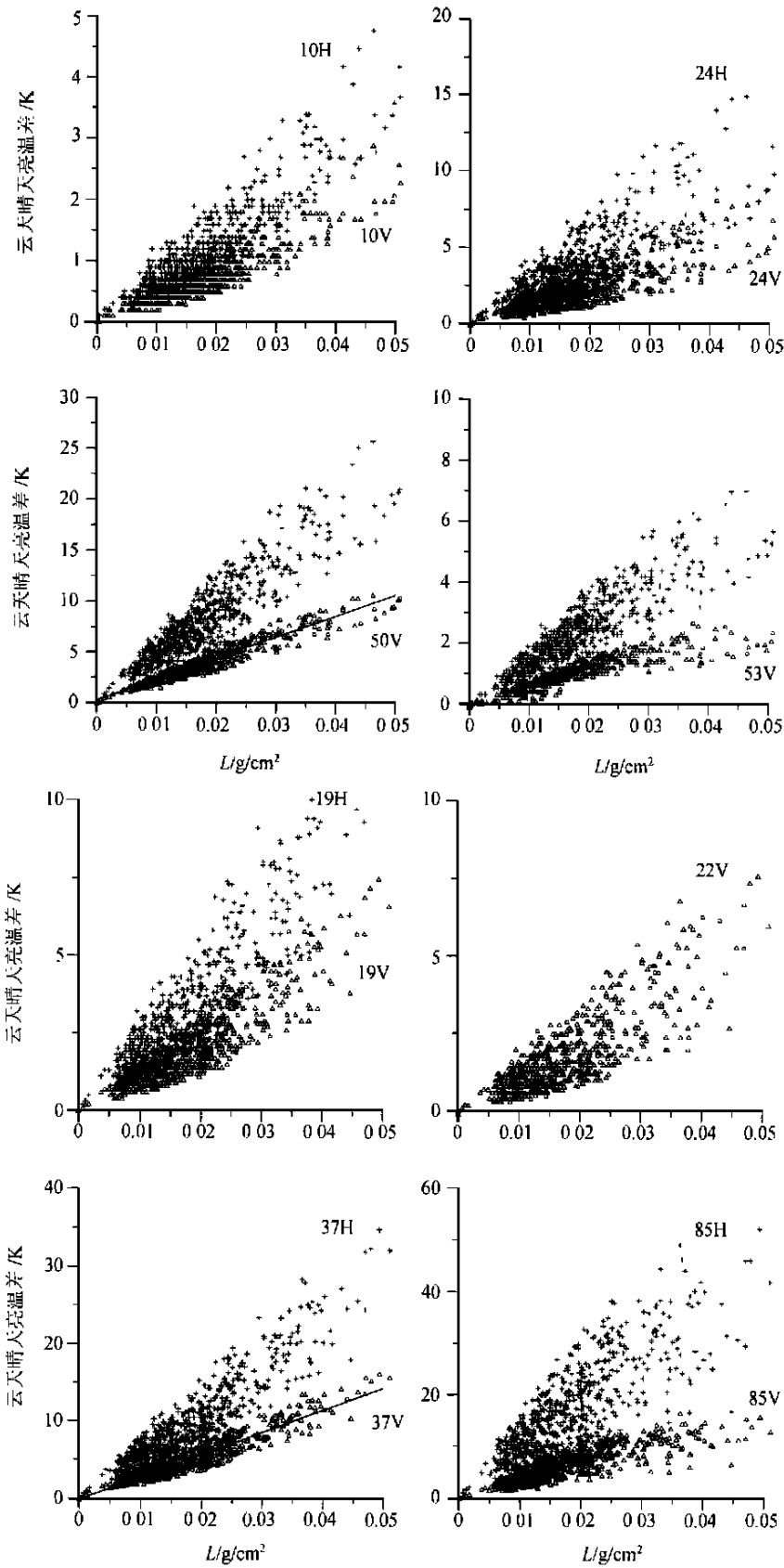


图 3 模拟的云-晴天亮温差相对于云水路径  $L$  的散点图  
Fig. 3 Scatter plots of brightness temperature differences between cloudy and clear atmospheres versus liquid water path

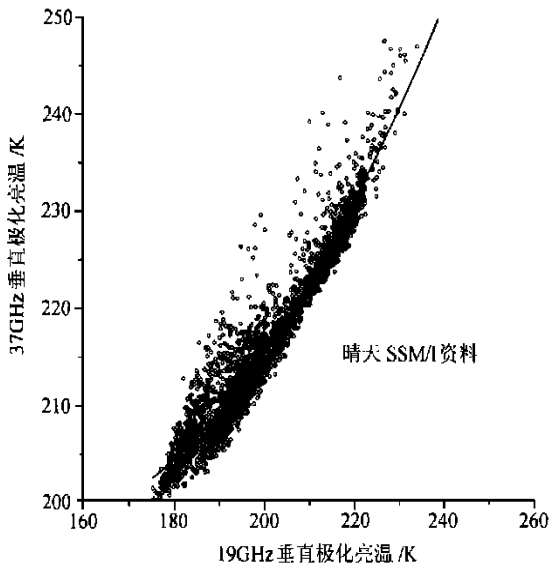


图 4 由 SSM/I 观测的晴天 37V 通道相对于 19V 的亮温散点图

Fig. 4 Scatter plots of brightness temperatures at 37V versus at 19 V from SSM/I Measurements in clear atmospheres

得到了初步验证。同时我们还选用 Alishouse 等<sup>[3]</sup>和 Weng 等<sup>[5]</sup>两个算式进行了  $L$  反演。比较结果见表 3。可见,本工作算式的结果与 ISCCP 值之间的相关系数没有显著提高,但反演的平均值接近较合理的 ISCCP 值;而其他两个算式的反演结果系统性偏高。由于 ISCCP 的  $L$  是从可见光和近红外云图导出的光学厚度估算的,精度也不高,不能看作为“真值”,另外资料点也少(仅 160 个),所以现算式还需要更多更好的资料(如卫星和飞机同步观测)做进一步的验证及改进。

表 3 SSM/I 反演与 ISCCP 提供的  $L$  比较

Table 3 Comparisons of SSM/I derived liquid water path to ISCCP's

模式	相关系数/%	均值/ $g/m^2$
ISCCP	100.0	107.0
Alishouse et al. <sup>[3]</sup>	85.7	239.0
Weng et al. <sup>[5]</sup>	72.0	326.0
本工作	85.4	128.4

## 5 结 论

(1) 在缺少卫星和实测同步资料时,可借助于微波辐射传输模式,研究亮温信号相对于地球物理

参数的敏感性,帮助确定最佳通道及建立反演算式。

(2) 模拟计算表明, AMSR 用做温度反演地面订正的通道 50.3 GHz 也是测量云水可用的通道。这一点还有待仪器上天后进一步验证。

(3) 我们反演云柱水量的算式主要基于  $L = a + b[T_B - T_{B0}]$  这一关系基础上。采用云天“晴天”的亮温差是为了突出云(水)的信号,而减少其他因子(主要是水汽及海表)的影响。测云水通道的“晴天”亮温由低频亮温从晴天实测关系式算出。

(4) 通过与他人算式及光学段反演的  $L$  比较,说明我们算式反演的结果更合理一点。这一算式还需更多的实测资料进一步验证及改进。

**致谢:** 吕达仁研究员对本工作提出过一些宝贵的意见,王善才研究员和孙海冰博士处理部分资料,陈英女士打印初稿,作者向他们表示衷心地感谢。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Ferraro, R. R., F. Weng, N. C. Grody, A. Basist. An eight year (1987—1994) time series of rainfall, clouds, water vapor, snow cover, and sea ice derived from SSM/I measurements [J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1996, **77**(5): 891—905.
- [2] Ulaby, F. T., R. K. Moore, A. K. Fung. *Microwave Remote Sensing: active and passive. Vol. 3: From Theory to Application* [M]. Addison-Wesley Publ. Company, 1986.
- [3] Alishouse, J. C., S. Snider, E. R. Westwater et al. Determination of cloud liquid water content using the SSM/I [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sen.*, 1990, **28**(5): 817—822.
- [4] Greenwald, T. J., G. L. Stephens, T. H. Vonder Harr, D. L. Jackson. A physical retrieval of cloud liquid water over the global oceans using SSM/I observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D10): 18471—18488.
- [5] Weng, F., N. C. Grody, R. R. Ferraro, A. Basist, D. Forsyth. Cloud liquid water climatology from the Special Sensor Microwave/Imager [J]. *J. Climate*, 1997, **10**: 1086—1098.
- [6] Prigent, C., A. Sand, C. Klapisz, Y. Lemaitre. Physical retrieval of liquid water contents in a North Atlantic cyclone using SSM/I data [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1994, **120**: 1179—1207.
- [7] Lin, B., W. B. Rossow. Observations of cloud liquid water path over oceans: optical and microwave remote sensing method [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D10): 20907—20927.
- [8] Cober, S. G., A. Tremblay, G. A. Isaac. Comparisons of SSM/I liquid water paths with aircraft measurements [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1996, **35**: 503—519.
- [9] Chen, H. B. Simulation d'observation satellitaire passive en micro-onde. These Universite de Lille I, France, No. 537, 1991 (in French).
- [10] Ulaby, F. T., R. K. Moore, A. K. Fung. *Microwave Remote Sensing: active and passive. Vol. 1: Microwave Remote Sensing Funda-*

- mentals and Radiometry [M]. Addison-Wesley Publ. Company, 1981.
- [11] Liebe, H. J., MPW-an atmospheric millimeter-wave propagation model [J]. *Int. J. Infrared and mm Waves*, 1989, **10**(6): 631—650.
- [12] Wentz, F. J. A model function for ocean microwave brightness temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**: 1892—1907.
- [13] Falcone, V. J. Atmospheric Attenuation of Millimeter and Sub-Millimeter Waves: Models and Computer Code. AFGL Report Tr-79-0253, 76p, 1979.

## A Retrieval Algorithm for Deriving Liquid Water Path from Space-borne Microwave Radiometric Measurements

CHEN Hong-bin

(LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Cloud liquid water path ( $L$ ) (i.e. vertically-integrated cloud liquid water) is an important parameter in meteorology and in the study on cloud-radiation interaction. It has already been demonstrated that the space-borne microwave radiometer is a powerful tool for monitoring the distribution and variation of  $L$  on global scale. However, the  $L$  retrieval algorithm for on-orbit SSM/I still has to be improved or renewed, and in parallel the algorithm is being developed for AMSR on-board the ADEOS-II which will be launched in the near future. The aim of this work is to develop an algorithm for determining over-ocean cloud  $L$  using the physico-statistical method. A simple relationship is obtained between liquid water path and the difference of brightness temperatures ( $\Delta T_B$ ) in cloudy and clear atmospheres from the simulation data with a radiative transfer model. In the algorithm, only the relationship  $L-\Delta T_B$  in channel of vertically polarized 37 GHz (37 V) is used because it has smaller rms error. The  $T_B$  at 37 V in 'clear' atmosphere is derived through a relationship with  $T_B$  at 19.35 V obtained by regression of SSM/I observation data in really clear atmospheres. The  $L$  results retrieved from SSM/I measurements by the present algorithm and two other algorithms are compared to the ISCCP  $L$  data. It is shown that the present  $L$  retrieval algorithm yields quite reliable retrievals of cloud liquid water path.

**Key words:** space-borne microwave radiometer; cloud liquid water path; retrieval algorithm development