

星载降水雷达机载校飞试验：地基多通道微波辐射计估算雷达路径积分衰减^{*}

郭 杨 商 建 杨 虎 吴 琼

GUO Yang SHANG Jian YANG Hu WU Qiong

中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京, 100081

Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration (LRCVES/CMA), National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

2010-12-13 收稿, 2011-09-05 改回.

Guo Yang, Shang Jian, Yang Hu, Wu Qiong. 2012. Airborne experiment of spaceborne rain radar: Attenuation estimation of the Ka-band radar with ground-based multi-channel microwave radiometers. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 887-891.

Abstract This paper focused on the research of attenuation correction method for weather radar observations. Based on the adiabatic liquid water content analyzing method and radiation transfer model (RTM), the total attenuation of atmosphere was estimated by combining the GPS radiosonde atmosphere profile and the brightness temperatures observed by a ground-based multi-channel microwave radiometer. Under clear sky conditions, the brightness temperatures are simulated at 12 channels of the ground-based multi-channel microwave radiometer using MWMOD. It is found that when the relative humidity was set to a reasonable value, the liquid water profile can be estimated by using the adiabatic liquid water content analyzing method, while the difference between the model-simulated brightness temperature and the radiometer observation reached a reasonable value. Based on the estimated liquid water content, the path-integrated attenuation (PIA) of the ground-base radar can be computed. The results show that the PIA computation method suggested in this paper is an effective method to estimate the attenuation of ground-based weather radar echoes.

Key words Attenuation correction, Ground-based multi-channel microwave radiometer, GPS radiosonde, Path-integrated attenuation (PIA), Adiabatic liquid water content analyzing

摘 要 介绍了在雷达观测降水试验中如何配合利用地基微波辐射计估算雷达路径积分衰减(PIA)的一种方法。所用的 GPS 高空探空资料和地基多通道微波辐射计的观测资料, 均为中国首次星载降水雷达机载校飞试验中获得的数据。由于常规探空资料中没有云水含量的直接信息, 因此, 通过绝热液态水含量分析方法, 从 GPS 探空数据中计算得到这些云参数值。用 MWMOD 进行亮温模拟并计算液态水含量。在晴空条件下, 用该模式模拟了地基多通道微波辐射计 12 个通道的下行辐射亮温。通过设置相对湿度阈值, 利用 MWMOD 模式自带的绝热液态水含量分析方法, 从探空廓线中分析出液态水廓线, 进而模拟出有云情况下的下行辐射亮温。辐射传输模式的模拟亮温和地基多通道微波辐射计观测亮温的对比表明, 进行云分析之后的模拟亮温值更接近于实测值。由此, 利用由辐射传输模式和地基微波辐射计, 从探空廓线中分析出液态水廓线, 计算出有云情况下的大气整层透过率, 进而得到路径积分衰减, 为降水雷达衰减订正提供一种有效手段。

关键词 衰减订正, 地基多通道微波辐射计, GPS 探空, 路径积分衰减, 绝热液态水含量分析

中图法分类号 P407.7

^{*} 资助课题: 星载降水测量雷达指标仿真研究(500036)。

作者简介: 郭杨, 从事微波大气探测研究。E-mail: guoyang@cma.gov.cn

1 引言

星载降水测量雷达是风云三号 02 批卫星观测星座中的重要仪器,该仪器的两个原理样机(Ka 波段(3 mm)和 Ku(8 mm)波段雷达)已经研制成功。中国国家卫星气象中心、航天科工集团第二研究院、中国气象科学研究院、兰州大学与天津气象局 5 家单位合作,于 2010 年 6—7 月在天津渤海湾开展了中国首次星载降水雷达校飞试验,获取了机载 Ka 波段雷达、车载 Ka 波段多普勒雷达(刘黎平等, 2009)和地面 S 波段多普勒雷达观测数据,地基多通道微波辐射计数据和 GPS 高空探空数据。此次雷达机-地同步降水观测试验的主要目的是验证机载 Ka 波段雷达性能指标和探测降水的能力。

在降水雷达的反演算法中,衰减订正至关重要(Fujita, et al, 1997; Bringi, et al, 2001;胡志群等,2008)。目前比较常用的衰减订正方法是结合使用 HB (Hitschfeld-Bordan)和 SRT (Surface Reference Technique)(Amayenc, et al, 1996; Iguchi, et al, 2000; TRMM Precipitation Radar Team, et al, 2005)。而本次校飞试验,由于观测时间和空间受限,难以利用 SRT 计算路径积分衰减(path-inte-

grated attenuation, PIA)。为此,提出一种基于 GPS 探空和地基微波辐射计估算路径积分衰减的方法。将 GPS 探空所得到的温湿度廓线作为微波辐射传输模式的输入,利用绝热液态水含量分析方法计算出云中液态水含量,通过对比云分析前后模式模拟得到的下行辐射亮温与地基多通道微波辐射计的观测亮温,验证云分析结果对亮温模拟精度的影响,进而通过微波辐射传输模式进行气体吸收和云衰减计算,最终得到雷达路径积分衰减,为分析星载雷达降水探测能力奠定基础。

2 数据和方法

2.1 GPS 高空探空数据

GPS 探空系统利用 GPS 接收模块将空间位置信息融合到探空数据流中,利用探空仪上的温度、湿度和气压传感器,获取高空气象数据。GPS 探空每 2 s 有一组数据,包括气压、温度、相对湿度、位势高度、风速、风向和露点。本文所用 GPS 探空资料时间为 2010 年 7 月 10 日,位势高度从 3.0 m(1006.5 hPa)到 32099.5 m(9.2 hPa),共计 2466 层探空数据。温度和相对湿度的探空廓线如图 1 所示。

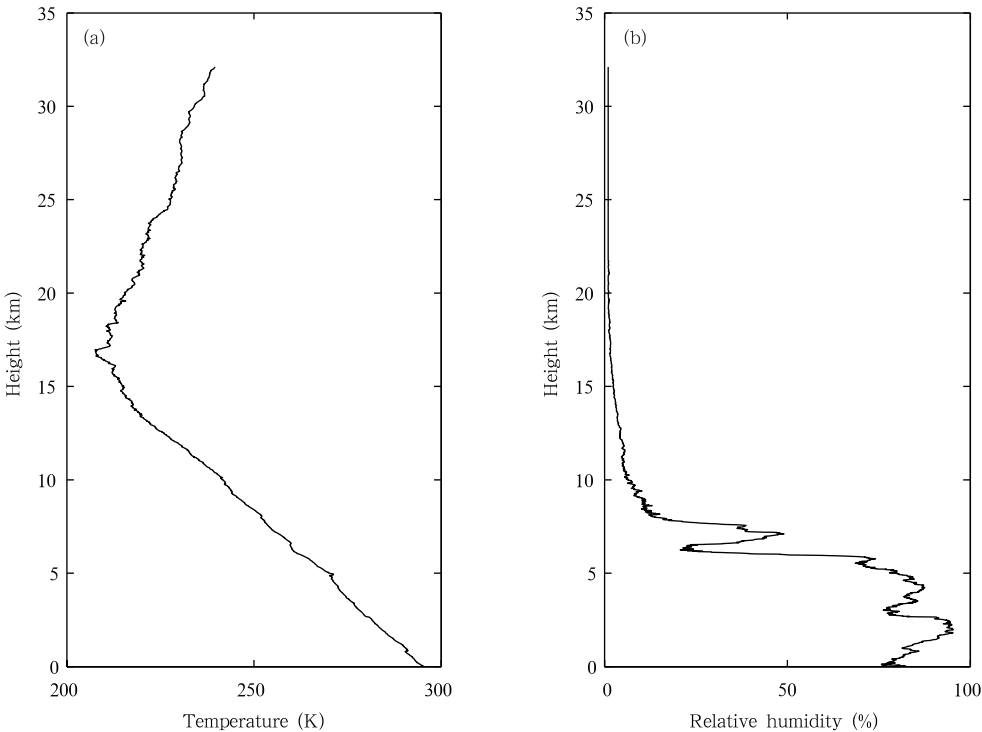


图 1 GPS 高空探空廓线 (a. 温度廓线, b. 相对湿度廓线)

Fig. 1 Profiles of the GPS radiosonde (a. temperature profile, and b. relative humidity profile)

2.2 地基多通道微波辐射计数据

所用的观测亮温数据是由地基多通道微波辐射计 TP/WVP-3000 垂直观测得到的 12 个通道亮温。TP/WVP-3000 由美国 Radiometrics 公司研制,是一种新型的 12 通道微波辐射计,该辐射计在水汽敏感的 K 波段 (20—30 GHz) 设置了 5 个通道 (22.235、23.035、23.835、26.235、30 GHz),在温度敏感的 V 波段 (50—60 GHz) 设置了 7 个通道 (51.25、52.28、53.85、54.94、56.66、57.29、58.8 GHz),能够直接测量这 12 个通道的微波辐射亮温,其规格详见表 1(Radiometrics Corporation, 2005)。该辐射计还带有测量地面温度、湿度和气压的气象传感器,并且,使用了对准天顶的红外温度计测量云底温度。利用辐射计自带的反演软件可以连续得到从地面到 1 km 间隔 100 m、1 km 到高空 10 km 间隔 250 m 的温度、水汽密度以及液态水的垂直廓线。

表 1 TP/WVP-3000 型 12 通道微波辐射计规格详述
Table 1 The specifications for the TP/WVP-3000
12-Channel Microwave Radiometer

功能或参数	详述
校准亮温准确度	0.5 K
长期稳定性	<1.0 K/a
亮温范围	0—400 K
天线系统光学分辨率和旁瓣	
22—30 GHz	4.9°—6.3° - 24 dB
51—59 GHz	2.4°—2.5° - 27 dB
综合时间(用户选择 10 ms 增长)	0.01—2.5 s
通道频率范围	
水汽通道观测频率范围	22—30 GHz
氧气通道观测频率范围	51—59 GHz
标准通道	12
光谱分析模式	>40 通道
检波前通道带宽	300 MHz
地面传感器准确度	
温度(−50℃—50℃)	0.5℃(在 25℃时)
相对湿度(0%—100%)	2%
气压(800—1060 hPa)	0.3 hPa
数据文件格式	ASCII CSV

2.3 辐射传输模式

地基多通道微波辐射计观测的是大气的下行辐射亮温,模拟下行辐射亮温所用的微波辐射传输模式为 MWMOD(microwave model)。该模式由各独立模块组成,海洋下垫面上的大气辐射传输模拟由

德国基尔大学海洋科学研究所开发,模拟海冰的微波辐射部分由华盛顿大学的 Thomas 开发。各模块被集成到模型中来考虑海冰、开阔洋面和大气极化时的微波辐射(Rolf Fuhrhop, 1998)。

MWMOD 采用多次散射方法求解极化辐射传输方程(Rolf Fuhrhop, 1998),能够模拟 1—1000 GHz 内的微波辐射。模式根据 Liebe 提供的有关毫米波传输模型的相关代码计算水汽和氧气的吸收,用米散射理论计算云的吸收和散射系数,用 Tsang 等的微波传输理论计算极化相函数,用菲涅耳方程模拟洋面反射特性,采用 Hollinger 和 Stogryn 的经验关系模拟洋面风速的影响。

2.4 云水廓线分析

在降水观测试验中,常规探测方法无法对云中液态水含量进行直接测量,而液态水对雷达波的衰减又是计算路径积分衰减所必需考虑的,因此,有必要考虑用参数化方法计算液态水含量。本文利用 MWMOD 自带的绝热液态水含量分析方法,从 GPS 探空资料计算液态水廓线。

绝热液态水含量分析液态水廓线的方法需要先设定一个相对湿度的阈值,探空资料中相对湿度大于这一阈值的层有云出现。每层云中绝热液态水含量为(Karstens, et al, 1994)

$$C_{LW_ad}(h) = \int_{z_0}^h \rho(z) \frac{c_p}{L} (\Gamma_d - \Gamma_s) dz \quad (1)$$

其中, z_0 为云底高度(m), $\rho(z)$ 为空气密度(kg/m³), c_p 为空气定压比热(J/(kg·K)), L 为汽化潜热(J/kg), Γ_d 为干绝热递减率(K/m), Γ_s 为湿绝热递减率(K/m), C_{LW_ad} 为每层液态水含量的上限值(kg/m³)。考虑到夹卷、降水和凝结作用,对 C_{LW_ad} 进行修正得到每一层实际的云中液态水含量(Karstens, et al, 1994)为

$$C_{LW} = C_{LW_ad} (1.239 - 0.145 \ln \Delta h) \quad (2)$$

其中, Δh 为与云底的高度差(m), C_{LW} 是修正后的云中液态水含量(kg/m³)。

设置相对湿度阈值为 91%,根据 2010 年 7 月 10 日的 GPS 高空探空数据,MWMOD 分析出的液态水廓线如图 2 所示,图中虚线为用式(1)分析出的液态水廓线,实线为修正后的液态水廓线。可见大气夹卷、降水以及凝结作用使云中液态水含量明显降低。

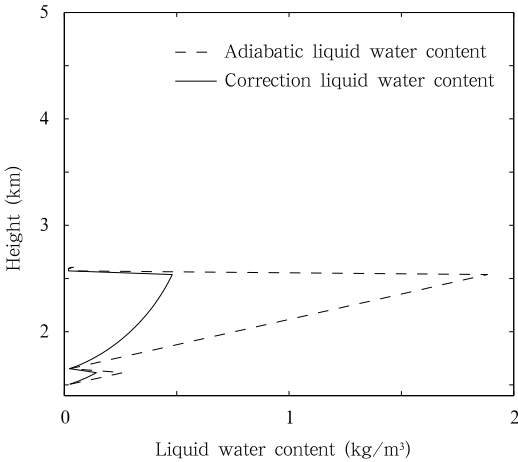


图2 MWMOD分析出的云水廓线结构
Fig.2 Profiles of C_{LW_ad} and C_{LW} analyzed from the MWMOD

3 结果和分析

3.1 云分析对辐射计观测亮温模拟精度的影响

利用GPS探空廓线,分两种情况用MWMOD模拟地基多通道微波辐射计观测频点的下行辐射亮温:(1)云分析前的情况;(2)云分析后的情况。云分析前模拟得到的辐射亮温如图3中虚线所示。设置相对湿度阈值为91%,利用模式分析出的云水廓线进行亮温模拟计算,所得亮温曲线如图3中实线。由图2可见,云出现的高度在1.5—2.6 km,根据探空记录的时间,辐射计在此时段内观测亮温的平均值由图3中星号标出。由于当天的天气实况为多云,在没有考虑云中液态水吸收及发射作用的情况下,和辐射计观测相比,模拟亮温明显偏低;分析出液态水廓线后的模拟亮温则与辐射计实测亮温非常接近。

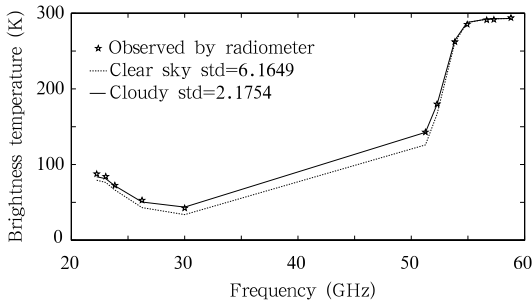


图3 云分析前后模拟亮温与辐射计观测亮温对比
Fig.3 Comparison of the brightness temperatures simulated from the MWMOD (with and without cloud analysis) with those observed by radiometer

对模拟亮温和辐射计观测亮温进行误差标准差分析,得到云分析前误差标准差为6.1649,云分析以后误差标准差为2.1754,可见进行云水廓线分析以后模式模拟结果的准确性明显提高。

地基多通道微波辐射计12个通道云分析前后模拟亮温和辐射计测量亮温的值如表2所示。可见,进行云分析以后,亮温的模拟结果更接近于实测值,特别是在51.25和52.28 GHz这两个探测通道,云分析后的亮温改进更为明显。这是因为这两个通道的探测高度较低,低层云的出现对它们的影响更大。

表2 12个通道的模拟亮温与观测亮温
Table 2 The simulated and observed brightness temperatures in the 12 channels

频点 (GHz)	云分析前模拟 亮温(K)	云分析后模拟 亮温(K)	辐射计观测 亮温(K)
22.235	79.27842	83.85124	87.592
23.035	76.25482	81.22402	84.260
23.835	66.37020	71.92840	72.436
26.235	43.05033	50.44209	52.742
30.000	33.80443	43.70712	42.434
51.250	125.90956	142.53735	142.840
52.280	166.74619	179.59070	179.910
53.850	261.40295	264.37738	262.208
54.940	287.66211	287.91486	285.278
56.660	292.22714	292.23489	291.112
57.290	292.65479	292.65802	291.558
58.800	293.07376	293.07477	293.936

3.2 Ka波段雷达衰减计算分析

由3.1节分析表明,通过MWMOD分析得到云水廓线,进而模拟出的亮温结果与辐射计的观测值吻合较好。因此,对于降水雷达衰减订正而言,可以通过辐射传输模式和地基微波辐射计从探空廓线中分析出液态水廓线,计算出大气整层透过率,进而得到路径积分衰减(P_{IA})。

以dB为单位的双程路径积分衰减可以用透过率来表示

$$P_{IA} = 10\lg\left(\frac{1}{e^{-2\tau}}\right) \tag{3}$$

其中, P_{IA} 为雷达双程路径积分衰减量, $e^{-2\tau}$ 为大气双程透过率。

Ka波段雷达扫描角度范围 $\pm 18^\circ$,步长 0.9° 。计算云分析前后的 P_{IA} 如图4所示,可见进行云分析后,衰减量约增加了0.5 dB。计算星下点观测时,每个高度层上的路径衰减如图5。云分析后的

衰减量随高度升高而明显增加。

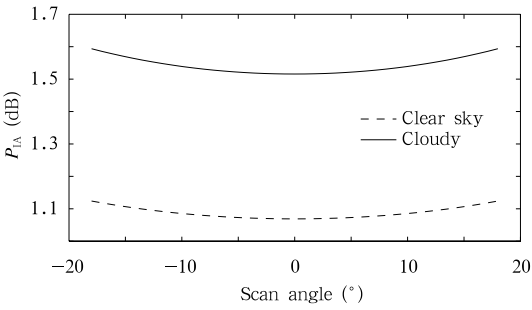


图 4 Ka 波段雷达双程路径积分
衰减量随扫描角度的变化
Fig. 4 Variation of the Ka-band
radar path-integrated
attenuation P_{IA} with scan angle

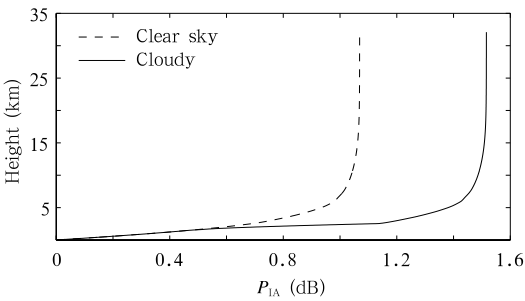


图 5 Ka 波段星下点观测时
路径衰减随高度的变化
Fig. 5 Variation of the Ka-band
radar path-integrated
attenuation P_{IA} at nadir with height

4 结论和讨论

利用 GPS 探空数据,结合微波辐射传输模式 MWMOD,通过绝热液态水含量分析方法构造出云水廓线并进行辐射亮温模拟。模式模拟亮温和地基多通道微波辐射计观测亮温的对比结果表明,进行云水廓线分析以后,模式模拟亮温与辐射计实测亮温非常接近。由此计算出大气整层透过率,进而得到Ka波

段雷达双程路径积分衰减量,为雷达反射率因子衰减订正中估计 P_{IA} 提供了一种有效手段。

大气整层透过率计算的精度与模式模拟亮温的准确性密切相关,而云中液态水含量的估算对模拟亮温的影响很大。文中对云水廓线的分析主要依赖于设定合适的相对湿度阈值,它受天气实况以及云层实际厚度的影响设定存在一定的局限性。

致谢:地基辐射计数据由兰州大学张北斗老师提供,在此深表感谢。

参考文献

胡志群, 刘黎平, 楚荣忠等. 2008. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. 气象学报, 66(2): 251-261

刘黎平, 仲凌志, 江源等. 2009. 毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析. 气象科技, 37(5): 567-571

Amayenc P, Diguët J P, Marzoug M, et al. 1996. A class of single- and dual-frequency algorithms for rain-rate profiling from a spaceborne radar. Part II: Tests from airborne radar measurements. J Atmos Ocean Technol, 13(1): 142-164

Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V. 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 39(9): 1906-1915

Fujita M, Satake M. 1997. Rainfall rate profiling with attenuating-frequency radar using nonlinear LMS technique under a constraint on path-integrated rainfall rate. Int J Remote Sens, 18(5): 1137-1147

Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, et al. 2000. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. J Appl Meteor, 39(12): 2038-2052

Karstens U, Simmer C, Ruprecht E. 1994. Remote sensing of cloud liquid water. Meteorol Atmos Phys, 54(1-4): 157-171

Radiometrics Corporation. 2005. TP-WVP3000 users manual. <http://radiometrics.com>

Rolf Fuhrhop. 1998. MWMOD user manual. Version 1.12

TRMM Precipitation Radar Team, JAXA, NASA. 2005. Tropical rainfall measuring mission (TRMM) precipitation radar algorithm instruction manual for version 6. <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>