利用地基多通道微波辐射计遥感反演华 北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究^{*}

郭丽君^{1,2} 郭学良¹ GUO Lijun^{1,2} GUO Xueliang¹

1. 中国气象科学研究院云雾物理环境重点实验室,北京,100081

2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京,210044

1. Key Laboratory for Cloud Physics, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, CMA Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation/Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2014-06-17 收稿, 2014-12-18 改回.

郭丽君,郭学良.2015.利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究. 气象学报,73 (2):368-381

Guo Lijun, Guo Xueliang. 2015. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events in northern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(2):368-381

Abstract The ground-based multi-channels microwave radiometer can provide high temporal resolution profiles of the atmospheric temperature, humidity and liquid water and has a potential application in investigating the formation and evolution of cloud and fog weather events. However, the verification studies of the data retrieved from the multi-channels microwave radiometer are few. In this paper, the reliability of the microwave radiometer was tested by contrasting the brightness temperature simulated by the MonoRTM with that observed by the instrument. The temperature (T), water vapor density (ρ) and relative humidity (RH) data retrieved from the Microwave Radiometer Profiles (MWRP) with 35 channels produced by the Radiometrics Corporation were examined by the radiosonde data of 170 times in which 30 times are in fog periods covering the 11 fog events during 2009 - 2013 in northern China. The tethered balloon sounding and CloudSat cloud radar data were also used to examine the temperature and humidity profiles derived from MWRP for some typical fog events. The comparison of MWRP's profiles with radiosonde soundings shows that the correlation between two observational methods in terms of temperature data was higher than 0.98, and that in water vapor density data reached more than 0.95. The correlation between these two relative humidity data was much lower, only about 0.67. In the error analysis of the overall samples, T retrieved from MWRP was lower about 3°C than that from radiosonde sounding, the mean root mean square error (E) of ρ was less than 1 g/m³, and RH from MWRP was larger than that from radiosonde sounding between the height of 1 and 7 km. The mean E of RH was 18% for overall samples and 23% for foggy samples. The comparison of profiles between the tethered balloon soundings and MWRP shows that the retrieved T from MWRP was also lower than that by tethered balloon, but both were in good agreement in indicating the development and evolution of fog events. The high RH at upper-levels retrieved from MWRP was relevant to the clouds as shown by the cloud radar data from CloudSat.

Key words Ground-based multi-channels microwave radiometer, Reliability verification, Fog events, Northern China

作者简介:郭丽君,主要从事云降水物理研究。E-mail: taojia992@163.com 通讯作者:郭学良,主要从事云降水物理研究。E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

^{*} 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806001)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0511)和中国气象科学 研究院基本科研业务专项(2011Z005)。

摘 要 地基多通道微波辐射计可提供高时间分辨率的大气温、湿度和液态水含量廓线遥感探测数据,为大气层结及云雾形成和演变特征研究提供了重要手段,但对其观测数据的可靠性检验研究很少。本研究在对比晴空 MonoRTM 模拟亮温和微波辐射计观测亮温的基础上,利用华北地区 2009—2013 年 11 个雾天气过程的 170 个时次(其中 30 个为雾发生时次)的探空数据,检验了美国 Radiometrics 35 通道 MP-3000A 型微波辐射计(Microwave Radiometer Profiles, MWRP)探测的温度、水汽密度和相对湿度数据,并结合系留气艇和 CloudSat 云雷达等观测资料,检验了典型雾个例的 MWRP 反演的温、湿度廓线数据。与探空数据的比较表明,两者的温度(T)数据的相关系数超过 0.98,水汽密度(ρ)的相关系数超过 0.95,但相对湿度(RH)的相关系数只有 0.67 左右。总样本误差分析中 MWRP 反演的 T 比探空偏低约 3℃,ρ 的均方根误差(E)在 1 g/m³ 以内,RH 在 1—7 km 高度偏大,总样本 RH 垂直平均 E 在 18% 左右,雾天时的 RH 垂直平均 E 在 23% 左右。与系留气艇观测数据比较表明,MWRP 反演的 T 也偏低,但两种探测方式的 T 和 RH 在指示雾的发展演变过程中具有很好的一致性。CloudSat 云雷达数据验证了 MWRP 反演显示中高层出现高 RH 区与云的存在有关。

关键词 地基多通道微波辐射计,可靠性检验,雾天气,华北地区 中图法分类号 P407.7

1 引 言

微波辐射计(the Microwave Radiometer Profiles, MWRP)通过被动遥感测量大气中氧气、水汽 和液态水的多通道微波辐射强度,可获取高达 10 km的大气温度、湿度和液态水含量廓线分布,分钟 级分辨率的数据可用于全天候实时监测天气过程的 演变,因此具有较高的应用价值。

随着微波辐射计技术的不断进步,最近几年多 通道微波辐射计观测数据已开始应用到雷暴、暴雨、 雾的预警预报和模式检验等方面,显示出良好的应 用前景。微波辐射计具有监测极端天气过程的热动 力天气条件(Knupp, et al, 2009)的能力。Madhulatha 等(2013)和 Chan(2009)、Chan 等(2011)利用 连续的可降水量、温湿度参数和推导的不稳定指数 研究雷暴、暴雨、强风和闪电等强对流天气的临近预 警。Campos 等(2014)和唐仁茂等(2012)利用可降 水量和柱含水量、温湿度和液态水含量廓线,以及推 导的水汽压等物理参数研究暴雪和冰雹等天气过程 中云内相态变化等微物理过程,识别了过冷水滴和 冰晶变化及贝吉隆过程。微波辐射计在遥感监测雾 的形成和发展过程方面更具优势,Ware 等(2003)在 研究 2001 年 2 月 16 日发生在科罗拉多州 Boulder 市的一次上坡雾过程中,对比了 MM5 模式预报和 微波辐射计探测的温、湿度和液态水廓线结构。结 果表明,微波辐射计可以清晰地反映雾的温、湿度结 构和液态水含量的垂直结构,而模式预报的却是云 过境的过程。Knupp 等(2009)在研究 Ware 等 (2003)同一个例中发现相对湿度和柱含水量的急剧

变化指示了雾的形成和发展。Gultepe 等(2007)在 对安大略湖南部一次暖雾的研究中,从微波辐射计 的相对湿度和液态水含量廓线变化中得出层云被抬 升至1 km 以上,1 km 以下雾的相对湿度接近 100%。Gultepe 等(2014)借助 MWRP MP-3000A 的反演数据识别了北极的一次冰雾过程。Guo 等 (2015)研究了中国华北一次持续性雾、霾天气,通过 相对湿度廓线的变化可以反映辐射雾向平流雾的转 化过程。

微波辐射计的测量原理是利用了大气对微波具 有选择吸收和透过性(大气窗)的特性(张培昌等, 1995)。由于在任意高度上的氧气发射辐射与该高 度的温度和氧气密度分布成正比,通过测量氧气在 60 GHz 及其附近的辐射强度(或亮温 T_B)可以得出 温度的垂直分布。同理,水汽发射辐射强度与水汽 密度和温度成正比,通过观测来自于 22 GHz 及其 附近的水汽线压力增宽的辐射强度、扫描光谱分布 和数学反演观测数据,可以得到水汽廓线。而反演 云液态水的廓线结合了以上两组波段——即 V 和 K 波段,微波波段云液态水发射的辐射与频率的平 方近似成正比。云液态水的吸收谱线呈斜线型,由 于不同频率对液态水的透过性不同,在已知云底高 度的情况下,通过测量云液态水对不同透明度大气 光谱的辐射贡献,获得有限分辨率的云液态水廓线。 可利用微波辐射计的红外测温仪(9.6—11.5 μm) 测量的红外温度对比大气温度廓线确定云底高度。

利用双通道反演可降水量和柱含水量的方法比 较成熟(Hogg, et al, 1983; Han, et al, 1995; Westwater, et al, 2001; 黄建平等, 2010), 其基本原理是 分别选择在 22.2 GHz 附近的水汽吸收线和 31.6 GHz附近的水汽窗两个通道,分别称为水汽通 道和液态水通道,用于遥感水汽总含量和液态水总 含量,通过亮温和光学厚度的对数转换,推导出光学 厚度与可降水量和柱含水量的线性关系。Wei 等 (1989)对比了物理方法和统计方法反演可降水量和 柱含水量的准确性。结果表明,统计方法的准确性 高于物理方法。

利用多通道微波辐射计观测的亮温反演温度 (T)、水汽密度(ρ)、相对湿度(RH)和液态水含量廓线 主要包括两个步骤,一是利用前向辐射传输模型计算 下行亮温,目前常用的前向辐射传输模式有 NOAA Wave Propagation Laboratory 开发的 Microwave Radiative Transfer Software (Schroeder, et al, 1991)和美 国大气环境研究室提供的 MonoRTM (the Monochromatic Radiative Transfer Model) (Clough, et al, 2005)。二是利用数学方法反演计算各参数的廓线。 目前常用数学方法包括物理迭代法、贝叶斯最大概率 估计算法、统计回归法、蒙特卡洛法和神经网络法等 (王振会, 1988; 薛永康等, 1981; Solheim, et al, 1998;陈洪滨等,2003)。Solheim 等(1998)对比了 牛顿迭代法、线性统计回归法、神经网络法和贝叶斯 最大概率估计算法反演温、湿度和液态水含量廓线 的效果,结果表明神经网络方法适用于不同地点的 3种廓线的反演,较其他方法更具有普适性。利用 前向辐射传输模式计算下行亮温时,需要输入历史 探空资料的温度、湿度(相对湿度和绝对湿度)、气压 廓线和地面气象要素。多年的历史探空数据具有局 地气候特征,数据样本越多,代表性越好,可以包括 各种极端历史天气的情况。但探空数据无法提供云 液态水信息,微波辐射计在反演云液态水廓线时需 要人为构造云液态水的初始廓线信息。Radiometrics公司生产的 35 通道 MP-3000A 型微波辐射计 利用了非降水云的厚度和云密度关系确定不同高度 的液态水含量(Decker, et al, 1978), 云的厚度由历 史探空资料中相对湿度阈值界定的云底和云高共同 确定。Radiometrics 公司的 TP/WVP-3000 型微波 辐射计使用了 NOAA 微波传输软件计算亮温 (Ware, et al, 2003), MP-3000A 使用 Radiometrics 公司的专利软件反演廓线数据(Cimini, et al, 2011;

Campos, et al, 2014), 其中辐射传输模式选用了 Rosenkranz98 气体吸收模式(Rosenkranz, 1998)。 可降水量、柱含水量和参数廓线的数学反演采用了 神经网络法,神经网络采用斯图加特神经网络模拟 器,标准后向传播用于训练亮温和各参数的关系,标 准前馈网络用于各参数的获取。

利用微波辐射计反演大气温度、湿度、液态水含 量廓线及其反演精度的研究一直受到广泛关注。 Han 等(1995)进行了双通道微波辐射计反演温度、 湿度和液态水含量廓线的研究。随着多通道微波辐 射计的发展,利用多通道辐射亮温值反演温度、湿度 和液态水含量廓线,并对不同反演方法的准确性和 适用性开展了研究(Solheim, et al, 1998; Tan, et al, 2011;王云等,2014)。刘红燕(2011)在分析和对比 亮温测量值和计算值差异的基础上,利用探空数据 对北京地区 TP/WVP3000 型微波辐射计观测 3 a 的温度廓线数据进行了精度检验研究,发现夏季测 量差异最小,晴天测量差异在 3.25 km 以下比非晴 无降水天小。Solheim 等(1998)利用 12 个微波通 道的亮温反演温、湿度和液态水含量廓线时,分析了 液态水含量廓线精度没有得到显著提高的原因,一 是反演参数随高度的变化很显著,尤其是在250 m 高度间隔的情况下,液态水含量在云边界处的变化 很剧烈,二是云边界有很大的不确定性。Ware 等 (2003)对比探空测量和 MWRP 反演的液态水含量 廓线,两者对云探测的一致性在 50% 左右。Crewell 等(2009)对比了厚云和薄云两种情况下,有云和无 云对亮温的影响程度、绝热和定常液态水含量的亮 温差异,以及不同液态水含量误差时信号的自由度, 结果表明微波辐射计不能精确提供液态水含量垂直 分布的信息。NCAR(Vivekanandan, et al, 2012)在 TP/WVP3000 型微波辐射计的报告中,对比了微波 辐射计和飞机穿云探测时的温度和云液态水含量廓 线,发现微波辐射计不具备反演双层云结构的能力, 反演参数会被训练成单层云的结构特征,其最主要 的原因是缺乏训练数据,因而 MWRP 只能反演单 层云的液态水含量廓线(Westwater, et al, 2005; Ware, et al, 2003)。结合主动和被动遥感方式可以 提高温、湿度和液态水含量廓线的精度,Löhnert等 (2004,2007)利用微波辐射计、云高仪和云雷达发展 并改进了 IPT(the integrated profile technique),其 中采用了 Issig 开发的云模式处理云的微物理过程。

Ebell 等(2010)从先验信息、探测和前向模式3个方 面检验和评价了利用微波辐射亮温与云雷达反演云 液态水含量廓线的准确性,发现可靠的先验信息对 提高云液态水含量廓线的精度至关重要。

可降水量和柱含水量的反演技术已经有 30 多年的历史,可降水量的均方根误差大致在 1 mm 以内(Westwater, et al, 2005)。刘红燕等(2009)对比了微波辐射计与探空和 GPS 测量水汽的差异, MWRP 反演可降水量与探空和 GPS 的平均偏差分别为 0.281 和 0.322 cm,并分析了北京地区水汽在四个季节中的日变化特征。而柱含水量的验证由于缺乏对云水的外场观测很难确定(Westwater, et al, 2005)。

权重函数可以表示大气廓线对辐射的响应情况,Westwater等(2005)给出了Radiometrics公司 生产的微波辐射计不同频率的权重函数,包括K波 段的5个频率的权重函数,V波段的7个频率的温 度权重函数,以及K₁₋₅(K波段第1—5个频率)和 V₁₋₃(V波段第1—3个频率)的8个液态水含量权 重函数。从温度的权重函数可以看出,2km以下的 权重函数差异较大,说明亮温对大气廓线的响应差 异明显,而2km以上各频率的权重函数值相似,对 高度的响应差异不明显。从水汽的权重函数的特征 可以看出,亮温的测量只能粗略获取水汽密度的垂 直廓线。同样,亮温的测量可以用于粗略反演低分 辨率的液态水含量廓线,而且需要通过其他方式获 取云底和云顶的信息。

最近几年,多通道微波辐射计在中国气象业务 中的应用呈现显著增加趋势,但很少开展对这种新 型设备探测精度的检验研究。本研究在对比和分析 晴空时 MonoRTM 模拟与微波辐射计观测亮温的 基础上,检验了仪器本身的观测精度和可靠性。利 用 2009—2013 年气象行业专项"京津地区低能见度 雾霾天气监测与预报研究"外场观测试验中两台 35 通道 Radiometrics 微波辐射计的观测数据,对比检 验了 170 个时次(其中 30 个为雾发生时次)的探空 数据,并结合系留气艇和 CloudSat 云雷达等资料, 检验了典型雾个例的温、湿度廓线情况,探讨了该微 波辐射计遥感探测大气温、湿度廓线的可靠性。

2 仪器精度及可靠性检验

微波辐射计的探测精度主要取决于探测辐射量

的准确性和灵敏度。微波辐射计接收来自宇宙背景 和大气发射、反射和散射的微波辐射引起电压的变 化,通过仪器标定转化成亮温。微波辐射计 K 波段 (22—30 GHz)通过 Tipping 方式标定亮温, Tipping 定标即在晴空条件下天线扫描不同仰角时获 取电压和亮温的关系(Han, et al, 2000)。液氮定标 主要被用于 V 波段(51—59 GHz),通过两个已知温 度源获得输出电压和亮温的关系。周围黑体温度源 提供了一个已知温度源,而液氮由于其沸点较低,利 用装满液氮的靶鞍罩在天线罩上作为低温冷靶提供 第 2 个温度源。观测过程中两台微波辐射计均定期 地进行 Tipping 定标和液氮定标。

微波辐射计观测的亮温(T_{EO})可以通过辐射传 输模式进行检验,本研究利用 AER 开发的 MonoRTM v5.0 计算了 17 个晴空个例的 22 通道 的辐射亮温(T_{ES})。MonoRTM 中具有 7 种不同情 况的计算方式(黄兴友等, 2013),选择"用户自定义 大气"方式计算下行辐射亮温,输入参数文件 MONORTM. IN_NOSCALE_IATM1_dn 中,设置 模拟的最大高度为 30 km,分层气压、大气温度和湿 度均来自北京南郊观象台的探空数据和地面气象观 测数据,其中湿度参量选用露点温度,20 km 以上的 水汽含量采用模式的默认值。

图 1 对比了 8 个水汽通道和 14 个氧气通道的 计算亮温和测量亮温。在水汽通道处,两者的相关 系数在 0.86 以上, 计算亮温高于测量亮温, 8 个通 道的平均标准差(D)为1.88 K。但是个别通道的离 散程度较大,尤其在 22.234 GHz 水汽吸收中心处 $T_{\rm RS}$ 的偏大程度达到最大,这主要是由于水汽吸收 峰值处的亮温对水汽含量非常敏感,而输入的探空 数据中在高层具有较大的探测误差,所以在20 km 以上采用模式默认的水汽含量值降低水汽含量误差 的影响。随着频率远离吸收中心处,其计算亮温的 偏大程度逐渐减小。在氧气通道处,两者的线性相 关性较高,相关系数超过0.99,平均标准差为2.3 K,高于水汽通道。不同的辐射传输模式计算本身 也存在差异(Cimini, et al, 2004), 刘红燕(2011)在 检验北京 MWRP 温度廓线精度的分析中,用 LBL (line by line)模式检验了 MWRP 的7个氧气通道 的测量亮温,最大标准差为3.8K,其余6个通道均 小于1.8 K,7 个通道的平均标准差为1.9 K,与本 研究的检验结果基本一致。



图 1 MonoRTM 模拟的亮温(T_{BS})与 MWRP MP-3069A 测量的亮温(T_{BO})对比 (a.8 个水汽通道处,b.14 个氧气通道处)

Fig. 1 Comparison between the brightness temperature simulated by MonoRTM T_{BS} and

the brightness temperature observed by MWRP MP-3069A $T_{\mbox{\scriptsize BO}}$

(a. at 8 water vapor frequencies, b. at 14 oxygen frequencies)

3 观测数据及检验

3.1 数据说明及处理

本研究使用的 Radiometrics 公司生产的两台 多通道微波辐射计廓线仪型号均为 MP-3000A 型, 分别为 MP-3055A 和 MP-3069A(分别简称为 3055 和 3069),具有 35 个通道,包括 K 波段(22— 30 GHz)的 21 个通道和 V 波段(51—59 GHz)的 14 个通道,实际探测和反演中只用到了其中的 22 个通 道。利用神经网络算法反演大气温、湿度和液态水 含量的廓线信息,两台 MWRP 的软件采用相同的 反演算法。MWRP 的反演产品包括:可降水量、柱 含水量,以及温度(T)、水汽密度(ρ)、相对湿度 (*RH*)和液态水含量的垂直廓线。

MP-3055A 2009年4月至2010年10月在中国 气象局北京大院观测,2010年11月至2012年7月 在河北涿州气象局观测,3069从2010年5月至 2013年12月在北京长期观测。两台微波辐射计 2009—2013年共监测到11次雾天气,具体雾生、消 的起始时间见表1。雾发生的过程中常伴有降水发 生,强降水时微波辐射计天线罩上液态水会影响观 测的亮温,对廓线数据的反演会造成较大的影响 (Ware, et al, 2013; Xu, et al, 2014),因此,本研究中 剔除了因强降水导致的反演异常的时次数据。

北京南郊观象台的气象探空数据用于检验微波 辐射计探测的温、湿度廓线。L 波段常规探空使用 10个标准层和若干个特性层的数据资料,其中标准 层包括:1000、925、850、700、500、400、300、250、200 和 100 hPa。微波辐射计的廓线数据(温度、水汽密 度和相对湿度)有 58 个高度层,0.5 km 以下、0.5— 2 km 和 2—10 km 的分辨率分别是 50、100 和 250 m,每隔 3—4 min 一组廓线数据。为了使北京 的气象探空数据和 MWRP 廓线数据具有可比性, 选择位于北京的 3069 数据,对 MWRP 廓线数据在 08 时(北京时,下同)和 20 时整点前后 1 小时做平均 处理,并对探空数据插值处理成与 MWRP 的 58 个高 度层一致的数据。由于气象探空数据中没有水汽密

表 1 11 次雾过程发生、持续时间及对应 的微波辐射计观测型号

Table 1 The date and time of fog occurrence and duration and the corresponding MWRP models with 3055 marked by * and 3069 for all the

other	for	the	11	foggy	processes
-------	-----	-----	----	-------	-----------

编号	开始时间	持续时间(h)
1	2011年12月1日22时*	134
2	2010年9月15日17时	24
3	2011年10月30日06时	48
4	2012年10月26日02时	31
5	2012年12月12日00时	120
6	2012年12月20日14时	13
7	2012年12月28日01时	13
8	2013年1月11日00时	110
9	2013年1月19日19时	35
10	2013年1月22日22时	17
11	2013 年 1 月 27 日 18 时	78

*注:仪器型号为3055,其余均为3069

度,所以利用温度 $T(\mathbb{C})$ 、气压 p(hPa)和水汽混合 比 r(g/kg)计算了水汽密度 $\rho(g/m^3)$ (盛裴轩等, 2006)。

为检验微波辐射计对雾、霾发生期间的大气边 界层温、湿度结构的探测能力,对比研究了 2011 年 12月1—7日典型雾、霾观测试验期间系留气艇和 微波辐射计探测资料。系留气艇 XLS-II 的探测时 间主要集中在 12月3—5日,在3、4和5日,系留气 艇分别间隔3—5、1—3和2—3h 探测一次,共计24 次探空数据,最大探测高度为 500—1000 m 不等, 数据的垂直分辨率为 1—2 m。选择系留气艇升空 过程中经历整点时间对应的微波辐射计数据并与其 进行相关性和误差分析,将系留气艇数据处理插值 成具有微波辐射计高度层结的数据。

为检验微波辐射计对垂直层云雾分布的探测能 力,利用了 2012 年 12 月 28 日过境华北地区的 CloudSat 2B-GEOPROF 中的等效雷达反射率因子 和 CPR_Cloud_Mask 云检测数据来检验微波辐射 计反演的高相对湿度区与 CloudSat 云雷达探测结 果的一致性。此外,还利用了 FY-2E 红外 1 通道的 红外云图和地面气象观测数据。

3.2 数据相关性与误差分析

考虑到微波辐射计廓线数据和探空数据的特点,对 MWRP 数据总样本和雾个例样本中的温度、 水汽密度和相对湿度廓线数据分别做相关性与误差 分析,评价参数为相关系数(*R*)、偏差(*B*)和均方根 误差(*E*)。第*i*个高度上的偏差(*B_i*)和均方根误差 (*E_i*)分别为

$$B_{i} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{f}_{ik} - f_{ik})$$
(1)

$$E_{i} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} (\tilde{f}_{ik} - f_{ik})^{2}}$$
(2)

式中, f_* 为第k个样本、第i个高度(i=1,...,n)上的探空值(当作物理量真值),K为样本容量,最大高度层结数 $n=58, f_*$ 为MWRP反演值。

由于 11 次雾天气个例的持续时间不同,选择雾 过程前后的某一段时间内 MWRP 观测的所有 08 和 20 时小时平均数据构成总样本(不包括降水样 本),总样本的数据包括晴空、有云和雾 3 种情况。 同时挑选出发生在 08 和 20 时的雾时次数据构成雾 个例样本,样本情况详见表 2。

表 2 总样本和雾个例样本日期及时次

Table 2 The date and time of the overall samples and foggy samples				
总样本时次(每天 08 时和 20 时两次)	雾个例样本时次			
2010年9月11—16日除16日20时	2010年9月15日20时、16日8时			
2011年10月21—31日除23日08时、31日08时	2011年10月30日08时、30日20时、31日20时			
2012年10月21—31日除21日20时	2012年10月26日08时、26日20时、27日08时			
2012年12月1-31日除12日08时、	2012年12月12日20时、13日08时、13日20时、15日08时、			
14 日 08 时、14 日 20 时、16 日 08 时	15 日 20 时、16 日 20 时、20 日 20 时、28 日 08 时			
	2013年1月11日08时、13日08时、14日20时、			
2013年1月1—31日除31日08和20时	15 日 08 时、20 日 08 时、20 日 20 时、22 日 20 时、23 日 08 时、27 日 20 时、			
	28 目 08 时、29 目 08 时、29 目 20 时、30 目 08 时、30 目 20 时			
共计 170 个时次	共计 30 个时次			

Table 2. The date and time of the everall complex and forget compl

图 2a、b 对比了总样本和雾个例样本的温度相 关,相关系数超过 0.98,雾个例样本的相关略低于 总样本的相关。图 2c、d 对比了两种情况下的水汽 密度,相关系数超过 0.95,且雾个例样本的水汽密 度相关系数更大。通过温度和水汽密度的相关可以 看出,MWRP的温度和水汽密度数据具有较高的可 靠性。而图 2e、f 显示的相对湿度的相关较差,说明 MWRP 对相对湿度的反演精度较差。雾天时的相 对湿度较大,且变化幅度较大,所以雾天时的相对湿 度相关系数较总样本小。 偏差为正表示 MWRP 数据较探空数据偏大, 为负则说明 MWRP 数据偏小。均方根误差的值代 表 MWRP 数据偏离探空数据的程度。由图 3a、b 可知, MWRP 温度在近地面的观测误差最小,随着 高度的升高偏差由负变正,偏差主要为负,说明 MWRP 观测的温度较探空偏小,最大偏小程度约 4℃,特别在雾天时2 km 以上均方根误差几乎均维 持在 3.5℃左右。对比图 3c、d,总样本水汽密度的 均方根误差在1 g/m³ 以内,雾天时的水汽密度的偏 差和均方根误差均比总样本的大,在1—5 km高度



偏差为正说明 MWRP 反演的水汽密度偏大,均方 根误差在 1.5 km 高度处达到最大。从图 3e、f 可 知,总样本的相对湿度在近地面至 1 km、1-7 km 和 7 km 以上的偏差分别为负、正和负,1—7 km 高 度 MWRP 反演的相对湿度偏大。同样对于雾天样 本,1.5 km 以下偏差在 0 附近变化,2—5 km 高度 偏差为正,5 km 以上基本为负偏差。总样本相对湿度的垂直平均均方根误差约为 18%,雾天时的垂直 平均均方根误差约为 23%,这与刘亚亚等(2010)分 析春、夏、秋、冬不同季节时微波辐射计反演相对湿度的垂直平均均方根误差分别为 22%、20%、24% 和 21%比较一致。





综合以上相关和误差分析可以看到,MWRP和 探空观测的温度和水汽密度的相关均较强,但 MWRP反演的温度较探空偏小 3℃左右,雾天时 MWRP反演的水汽密度偏大,而相对湿度的相关较 差且误差较大。其原因比较复杂,一方面利用微波 辐射计反演大气参数存在误差,MWRP反演的误差 来自微波辐射计接收的亮温精度、反演过程中前向 模式的计算精度和反演算法的可靠性,以及神经网 络算法中训练数据对历史探空数据的依赖性。另一 方面,气象探空和 MWRP 被动遥感本身存在探测 方式的差别。气象探空属于直接探测方式,测量探 空气球上升轨迹的大气状态,持续时间在1h左右, 其探测仪器本身也存在测量误差。而微波辐射计测量的是大气辐射特征,其资料代表的是天线方向波束内的大气状态,是具有一定厚度(体积)气层的物理状态的平均值,数据分辨率是分钟级。另外,探空和微波辐射计探测位置的差异也会影响评价MWRP数据的准确性。

3.3 微波辐射计和系留气艇观测数据的对比

2011年12月1-7日发生在河北涿州的一次 持续7d的雾、霾天气先后经历了3次雾、霾过程 (Guo, et al, 2015), 12月3日上午冷锋过境结束了 第一次平流雾过程,从12月3日傍晚开始近地面形 成强逆温,夜晚辐射雾逐渐形成并发展,雾顶高度不





(a. 系留气艇探测的 *T*, b. 系留气艇探测的 *RH*, c. MWRP 探测的 *T*, d. MWRP 探测的 *RH*)
Fig. 4 Comparisons between the tethered balloon and radiometric soundings profiles.
(a) and (b) are temporal variations of *T* and *RH* from the tethered balloon sounding, respectively.
(c) and (d) are those of *T* and *RH* derived from MWRP, respectively

断升高,12月4日午后雾有减弱的趋势,但是没有 消散,直到5日凌晨辐射雾转化为平流雾,即第2次 雾过程。

从温度廓线随时间演变(图 4a、c)的情况来看, 系留气艇和 MWRP 的数据具有比较一致的变化趋势, MWRP 反演的温度比系留气艇偏低, 这与 3.2 节常规探空的检验结果一致。MWRP 反演出了 3 日傍晚的近地面逆温, 但是逆温强度偏弱。从相对 湿度的变化趋势(图 4b、d)来看, 3 日上午的冷锋使 雾消散, 相对湿度急剧下降, 而 MWRP 却在 3 日中 午出现相对湿度的波动, 但是从 3 日 18 时以后近地 面开始出现高相对湿度, 两种不同仪器探测的相对 湿度廓线变化趋于一致。从 5 日开始受冷平流的影 响, 辐射雾转化为平流雾, 雾顶高度跃升到 1 km 以 上,在 0.2—1 km高度温度较 4 日偏低。受仪器精 度限制,系留气艇在雾期间探测的最大相对湿度为 92%,而 MWRP 可以反演出相对湿度达到 100%的 情况。微波辐射计是被动的遥感方式,反演出的相 对湿度的垂直变化具有层结性,但其演变特征与系 留气艇数据具有很强的一致性。Ware 等(2013)对 冬季奥林匹克期间 Whistler 地区的探空(间隔 6 h) 和 MWRP 数据进行了对比,两者在指示海洋湿气 团爬坡上升的凝结过程具有很强的一致性。

图 5 给出了系留气艇和微波辐射计数据的相关 和误差分析。图 5a 中两种数据的温度相关系数为 0.67,远小于常规探空与 MWRP 数据的相关(相关 系数 0.98 以上)。同样,系留气艇与 MWRP 数据 对比时的相对湿度相关系数为0.60,小于雾天时常



图 5 系留气艇和微波辐射计数据相关和误差分析 (a. T的相关,b. RH的相关,c. T的偏差B(实线)和均方根误差E(虚线), d. RH的偏差B(实线)和均方根误差E(虚线)

Fig. 5 Correlation and error analysis between the tethered balloon and radiometric soundings. (a) and (b) are the correlation of T and RH, respectively. (c) is bias B (soild) and root mean square error E (dashed) of T; and, (d) is bias B (soild) and root mean square error E (dashed) of RH

规探空与 MWRP 对比的相关系数(0.67)。造成相 关较弱的可能原因,一是数据样本偏少。相关分析 中的数据量只有313对,不足以代表整个零、霾过程 中的气象要素的变化情况。二是两种数据资料的垂 直分辨率差异较大。系留气艇数据的垂直分辨率比 较高,为1-2m,能反映气象要素在垂直高度上的 细微变化特征。而 MWRP 数据在 0.5 km 以下和 0.5-1.0 km 的垂直分辨率分别为 50 和 100 m,比 系留气艇垂直分辨率低。虽然将系留气艇数据插值 到 MWRP 的高度层结,但也存在部分数据在对应 高度上变化趋势相异的情况。所以相关只能在某种 程度上说明系留气艇和 MWRP 数据的一致性问 题,结合误差分析可以看出温度的偏差为-1-1℃, 均方根误差为1℃左右。从相对湿度的误差分析可 以看出,700 m 以下偏差为正,700-800 m 为负,均 方根误差为10%-20%,和雾天时 MWRP 与常规 探空对比时的结果一致。

3.4 利用 CloudSat 云雷达数据检验 MWRP 的高 层相对湿度廓线

由于 MWRP 液态水含量垂直廓线反演精度的 限制,而且仅具有获得最低一层云雾的液态水含量 的能力(Westwater, et al, 2005; Ware, et al, 2003), 对于存在多层结构的云雾天气,特别是雾上部覆盖 云的情况,很难获得雾上部云的液态水含量。但从 微波辐射计观测的相对湿度廓线看,中高层经常出 现高相对湿度区,这是否意味着有云的存在呢?为 回答这一问题,选择了有 CloudSat 卫星观测数据的 2012 年 12 月 28 日的雾个例进行检验。 2012 年 12 月 28 日来自西南方向的云系影响 华北地区,北京海淀区的天气现象由雾转雪。选择 CloudSat 过境华北地区的 2B-GEOPROF 产品中的 等效 雷达反射率因子(Z_e)和云检测产品检验 MWRP 反演的高相对湿度代表的云信息。

图 6 是 3069 反演的相对湿度廓线的时间变化, 可以看出,高相对湿度主要呈现为3个层次,近地面 的高相对湿度是产生雾所必需的水汽条件,3-5 km是高相对湿度层,7 km 附近存在小的高相对 湿度区,中间的云层相对湿度已经达到了100%,表 示水汽达到饱和,但 MWRP 反演的液态水含量廓 线在此高度却没有对应的液态水含量信息。图 7 是 CloudSat 过境轨迹上云雷达探测的 Z_e 剖面,横坐 标为过境轨迹的时间和经纬度,图中0km附近高 度处的强回波带是地物回波。虽然图 7 中没有精确 对应观测地点(39.95°N,116.33°E)的经纬度,但是 这次云系移动覆盖了整个华北地区,可以从邻近的 地点推测云系结构。图 7 中的等值线代表了云检测 值,标出了值为30和40的等值线,该值大于20则 说明探测到了云,值越高说明检测到云的可靠性越 高。由东南到西北向轨迹上的云系变化中,与 MWRP 观测地点具有相同纬度(39.95°N)邻近的 云发展最旺盛,回波高度达到10km,并与地物相 连。由此判断, MWRP 反演的相对湿度廓线所代表 的云信息具有参考价值,弥补了 MWRP 只能反演 单层云的液态水含量的缺点。从 FY-2E 红外 IR1 通道(10.3—11.3 µm)的云图上也可以看出有云存 在(图8)。





图 7 2012 年 12 月 28 日 CloudSat 云雷达过境轨迹上等效雷达反射率因子 Z_e 的时-空剖面 (颜色填充代表 Z_e,等值线代表云检测值 30(黑色)和 40(红色))

Fig. 7 Time-height distributions of the equivalent radar reflectivity factor Z_{e} and the cloud mask

value along the track of CloudSat equipped with the cloud radar on 28 December 2012 (The levels of color are for Z_e , and the isolines of cloud mask are from 30

(black line) to 40 (red line) in the interval of 10)



通道红外云图(绿色直线代表 CloudSat 过境轨迹, 绿色圆点代表 MWRP 的观测地点)

Fig. 8 Infrared cloud image from FY-2E IR1 channel at 13:00 BT on 28 December 2012 (The green line is the track of CloudSat, and the green dot is the observation site of MWRP)

4 结论与讨论

微波辐射计的高时间分辨率的温、湿度和液态 水含量廓线数据,可以有效弥补常规探空时间分辨 率低的问题,对于了解云雾天气形成和发展演变具 有十分重要的作用。最近几年,多通道微波辐射计 的应用呈现显著增加趋势,但很少开展对这种新型 设备探测精度的检验研究。本研究在检验仪器可信 度的基础上,利用 2009—2013 年气象行业专项"京 津地区低能见度雾霾天气监测与预报研究"观测试 验期间的美国 Radiometrics 公司生产的两台同型 号 35 通道微波辐射计观测数据,对比检验了华北地 区秋冬季的 11 个持续性雾天气过程的 170 个时次 (其中 30 个为雾发生时次)的微波辐射计与常规探 空数据,并结合观测试验期间的系留气艇和 Cloud-Sat 云雷达等资料,检验了典型雾个例的温、湿度廓 线和云覆盖状况。主要结论如下:

(1) MonoRTM 模拟的晴空亮温和微波辐射计 观测亮温的相关较强,水汽通道的相关系数超过 0. 86,平均标准差为 1.88 K。氧气通道的相关系数超 过 0.99,但氧气通道的平均标准差为 2.3 K,高于水 汽通道。微波辐射计与常规探空观测数据的对比分 析表明,总样本和雾天样本时两种观测方式获得的 温度的观测数据的相关系数均在 0.98 以上,水汽密 度的相关系数在 0.95 以上,但相对湿度的相关性较 差。在总样本误差分析中,微波辐射计反演的温度 偏低 3℃左右,水汽密度的均方根误差在 1 g/m³ 以 内,相对湿度在 1—7 km 高度偏大,雾天时的均方 根误差比总样本时略差。

(2) 系留气艇和微波辐射计廓线数据对比显示,微波辐射计反演的温度也偏低,均方根误差在 1℃左右,700 m以下 MWRP 的相对湿度反演值比系 留气艇高,700—800 m低,相对湿度的均方根误差在 10%—20%,但是两种探测方式的温度和相对湿度在 指示雾的发展演变过程中具有很强的一致性。

(3) Cloudsat 云雷达数据验证了微波辐射计反 演的高空存在的高相对湿度水汽饱和区与云的存在 有关,在一定程度上证明了 Radiometrics 微波辐射 计不能获得多层云雾同时存在时的液态水含量分布 问题,该微波辐射计只能探测到最低一层云的液态 水含量垂直分布状况。

从以上比较可以看到,Radiometrics 多通道微 波辐射计在温度、水汽密度廓线探测方面具有较高 的可靠性。相对湿度廓线的比较表明,微波辐射计 与常规探空获取的相对湿度数据的相关系数仅为 0.67 左右,具有较大的不确定性。由于常规探空在 相对湿度探测方面也存在较大的误差,因此对两者 差别原因的分析变得更加困难。液态水含量廓线由 于缺少直接的数据观测,本研究没有开展较深入的 检验研究。Radiometrics 35 通道 MP-3000A 型微 波辐射计在遥感探测具有多层云(雾)结构的液态水 含量廓线时,由于缺乏初始液态水含量廓线训练数 据,反演参数会被训练成单层云(雾)的结构特征。 尽管多通道微波辐射计在定量获取相对湿度和液态 水含量廓线时存在较大的误差,但在反映这些参量 的高时间分辨率的演变趋势方面仍然具有很好的指 示意义,这一点具有重要的应用价值。随着微波辐 射计遥感反演技术的不断提高,其应用价值会变得 更大。

参考文献

- 陈洪滨,林龙福. 2003. 从 118.75 GHz 附近六通道亮温反演大气温 度廓线的数值模拟研究. 大气科学, 27(5): 894-900. Chen H B, Lin L F. 2003. Numerical simulation of temperature profile retrievals from the brightness temperatures in 6 channels near 118.75 GHz. Chinese J Atmos Sci, 27(5): 894-900 (in Chinese)
- 黄建平,何敏,阎虹如等. 2010. 利用地基微波辐射计反演兰州地 区液态云水路径和可降水量的初步研究. 大气科学, 34(3): 548-558. Huang J P, He M, Yan H R, et al. 2010. A study of liquid water path and precipitable water vapor in Lanzhou area using ground-based microwave radiometer. Chinese J Atmos Sci, 34(3): 548-558 (in Chinese)
- 黄兴友,张曦,冷亮等. 2013. 基于 MonoRTM 模型的微波辐射计 反演方法研究. 气象科学, 33(2): 138-145. Huang X Y, Zhang X, Leng L, et al. 2013. Study on retrieval methods with MonoRTM for microwave radiometer measurements. J Meteor Sci, 33(2): 138-145 (in Chinese)
- 刘红燕,王迎春,王京丽等. 2009. 由地基微波辐射计测量得到的 北京地区水汽特性的初步分析. 大气科学,33(2): 388-396. Liu H Y, Wang Y C, Wang J L, et al. 2009. Preliminary analysis of the characteristics of precipitable water vapor measured

Acta Meteorologica Sinica 气象学报 2015,73(2)

by the ground-based 12-channel microwave radiometer in Beijing. Chinese J Atmos Sci, 33(2): 388-396 (in Chinese)

- 刘红燕. 2011. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. 气 象学报, 69(4): 719-728. Liu H Y. 2011. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years. Acta Meteor Sinica, 69(4): 719-728 (in Chinese)
- 刘亚亚,毛节泰,刘钧等. 2010. 地基微波辐射计遥感大气廓线的 BP 神经网络反演方法研究. 高原气象,29(6):1514-1523. Liu Y Y, Mao J T, Liu J, et al. 2010. Research of BP neural network for microwave radiometer remote sensing retrieval of temperature, relative humidity, cloud liquid water profiles. Plateau Meteor, 29(6): 1514-1523 (in Chinese)
- 盛裴轩,毛节泰,李建国等. 2006. 大气物理学. 北京:北京大学出版社,19-20. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. 2006. Atmospheric Physics. Beijing: Peking University Press, 19-20 (in Chinese)
- 唐仁茂,李德俊,向玉春等. 2012. 地基微波辐射计对咸宁一次冰 雹天气过程的监测分析. 气象学报,70(4): 806-813. Tang R
 M, Li D J, Xiang Y C, et al. 2012. Analysis of a hailstorm event in the middle Yangtze River basin using ground microwave radiometers. Acta Meteor Sinica, 70(4): 806-813 (in Chinese)
- 王云,王振会,李青等. 2014. 基于一维变分算法的地基微波辐射 计遥感大气温湿廓线研究. 气象学报,72(3): 570-582. Wang Y, Wang Z H, Li Q, et al. 2014. Research of the one-dimensional variational algorithm for retrieving temperature and humidity profiles from the ground-microwave radiometer. Acta Meteor Sinica, 72(3): 570-582 (in Chinese)
- 王振会. 1998. 大气温度分布的地面微波遥感数值实验. 南京气象 学院学报,11(3): 346-355. Wang Z H. 1998. A numerical experiment of atmospheric temperature profile remote sensing with ground-based microwave radiance measurements. J Nanjing Inst Meteor, 11(3): 346-355 (in Chinese)
- 薛永康,黄润恒,周秀骥. 1981. 蒙特卡洛法在微波遥感水汽垂直 廓线上的应用. 中国科学 A 辑, 24(11): 1367-1375. Xue Y K, Huang R H, Zhou X J. 1981. The application on Monte Carlo method in microwave remote sensing water vapor vertical profiles. Sci China Math, 24(11): 1367-1375 (in Chinese)
- 张培昌,王振会. 1995. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 304-329. Zhang P C, Wang Z H. 1995. Basis of Atmospheric Microwave Remote Sensing. Beijing: China Meteorological Press, 304-329 (in Chinese)
- Campos E F, Ware R, Joe P, et al. 2014. Monitoring water phase dynamics in winter clouds. Atmos Res, 147-148: 86-100
- Chan P W. 2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather. Meteor Z, 18(3): 253-265
- Chan P W, Hon K K. 2011. Application of ground-based, multichannel microwave radiometer in the nowcasting of intense convective weather through instability indices of the atmosphere.

Meteor Z, 20(4): 431-440

- Cimini C, Marzano F S, Ciotti P, et al. 2004. Atmospheric microwave radiative models study based on ground-based multichannel radiometer observations in the 20-60 GHz band // Fourteenth ARM Science Team Meeting Proceedings. Albuquerque, New Mexico: 1-10
- Cimini D, Campos E, Ware R, et al. 2011. Thermodynamic atmospheric profiling during the 2010 Winter Olympics using groundbased microwave radiometry. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 49(12): 4959-4969
- Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. 2005. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. J Quant Spectrosc Radiat Transfer, 91(2): 233-244
- Crewell S, Ebell K, Löhnert U, et al. 2009. Can liquid water profiles be retrieved from passive microwave zenith observations?. Geophys Res Lett, 36(6): L06803
- Decker M T, Westwater E R, Guiraud F O. 1978. Experimental evaluation of ground-based microwave radiometric sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles. J Appl Meteor, 17(12): 1788-1795
- Ebell K, Löhnert U, Crewell S, et al. 2010. On characterizing the error in a remotely sensed liquid water content profile. Atmos Res, 98(1): 57-68
- Gultepe I, Milbrandt J A. 2007. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project. Pure Appl Geophys, 164: 1161-1178
- Gultepe I, Kuhn T, Pavolonis M, et al. 2014. Ice fog in Arctic during FRAM-ice fog project: Aviation and nowcasting applications. Bull Amer Meteor Soc, 95(2): 211-226
- Guo L J, Guo X L, Fang C G, et al. 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a longlasting severe fog and haze episode in North China. Sci China Earth Sci, 58(3):329-344
- Han Y, Westwater E R. 1995. Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors. J Atmos Ocean Technol, 12(5): 1050-1059
- Han Y, Westwater E R. 2000. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 38(3): 1260-1276
- Hogg D C, Guiraud F O, Snider J B, et al. 1983. A steerable dualchannel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere. J Climate Appl Meteor, 22(5): 789-806
- Knupp K R, Ware R, Cimini D, et al. 2009. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions. J Atmos Ocean Technol, 26(6): 1057-1073
- Löhnert U, Crewell S, Simmer C. 2004. An integrated approach toward retrieving physically consistent profiles of temperature, humidity, and cloud liquid water. J Appl Meteor, 43(9): 1295-

1307

- Löhnert U, van Meijgaard E, Baltink H K, et al. 2007. Accuracy assessment of an integrated profiling technique for operationally deriving profiles of temperature, humidity, and cloud liquid water. J Geophys Res: Atmos, 112(D4): D04205, doi:10.1029/ 2006JD007379
- Madhulatha A, Rajeevan M, Venkat Ratnam M, et al. 2013. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations. J Geophys Res: Atmos, 118(1): 1-13
- Rosenkranz P W. 1998. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models. Radio Sci, 33 (4): 919-928
- Schroeder J, Westwater E. 1991. User's guide to WPL microwave radiative transfer software. NOAA Tech. Memo. ERL WPL-213, Natl Oceanic and Atmos Admin, Silver Spring, Md
- Solheim F, Godwin J R, Westwater E R, et al. 1998. Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. Radio Sci, 33(2): 393-404
- Tan H B, Mao J T, Chen H H, et al. 2011. A study of a retrieval method for temperature and humidity profiles from microwave radiometer observations based on principal component analysis and stepwise regression. J Atmos Ocean Technol, 28(3): 378-389
- Vivekanandan J, Zhang G, Politovich M K. 2012. Radiative transfer studies in support of improvements to radiometrics, Inc. model TP/ WVP-3000 retrievals. Final Report, QSS Group, Inc. Contract 010043. National Center for Atmospheric Research
- Ware R, Carpenter R, Güldner J, et al. 2003. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. Radio Sci, 38(4):8079, doi:10.1029/2002RS002856
- Ware R, Cimini D, Campos E, et al. 2013. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. Atmos Res, 132-133: 278-290
- Wei C, Leighton H G, Rogers R R. 1989. A comparison of several radiometric methods of deducing path-integrated cloud liquid water. J Atmos Ocean Technol, 6(6): 1001-1012
- Westwater E R, Han Y, Shupe M D, et al. 2001. Analysis of integrated cloud liquid and precipitable water vapor retrievals from microwave radiometers during the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean project. J Geophys Res: Atmos, 106(D23): 32019-32030
- Westwater E R, Crewell S, Mätzler C, et al. 2005. Principles of surface-based microwave and millimeter wave radiometric remote sensing of the troposphere. Quaderni Dell Societa Italiana di Elettromagnetismo, 1(3): 50-90
- Xu G R, Ware R, Zhang W G, et al. 2014. Effect of off-zenith observations on reducing the impact of precipitation on groundbased microwave radiometer measurement accuracy. Atmos Res, 140-141: 85-94