

茆佳佳,张雪芬,王志诚,等. 多型号地基微波辐射计亮温准确性比对. 应用气象学报,2018,29(6):724-736.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180608

多型号地基微波辐射计亮温准确性比对

茆佳佳¹⁾ 张雪芬^{1)*} 王志诚²⁾³⁾ 杨荣康¹⁾

潘旭光⁴⁾ 季承荔¹⁾ 郭 然¹⁾

¹⁾(中国气象局气象探测中心,北京 100081) ²⁾(成都信息工程大学,成都 610225)

³⁾(中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225)

⁴⁾(山东省烟台市气象局,烟台 264000)

摘 要

目前,国内外对于地基微波辐射计的探测能力多从温湿廓线等二级产品级进行考察,其误差包含反演算法和硬件系统两部分的贡献,不易区分。为直接考察硬件系统的观测性能,试验将评估对象前移,直接对一级亮温数据进行比对分析。利用 2016 年 1 月—2018 年 3 月中国气象局大气探测试验基地 4 台地基微波辐射计和业务探空的同址观测数据,以探空数据输入 MonoRTM 辐射传输模型得到的正演亮温为参考,考察不同天气、不同季节微波辐射计的探测准确性。结果表明:国产与进口设备观测亮温的准确性相当。4 台地基微波辐射计实测亮温与模拟亮温相关性较好,相关系数基本超过 0.9,均达到 0.001 显著性水平。晴空条件下,实测亮温较模拟亮温均方根误差平均为 2.08~3.75 K;德国辐射计亮温偏差最小,各通道平均偏差为 1.08 K,均方根误差平均为 2.08 K。亮温偏差在冬季最小,夏季达到最大。建议提高定标准确度并进行质量控制以确保亮温准确性,谨慎使用降水期间辐射计的观测数据。

关键词: 微波辐射计; 误差分析; 探空; 亮温; MonoRTM 模型

引 言

大气垂直温湿廓线数据在天气学研究、天气预报、人工影响天气、短期或临近灾害天气监测^[1-2]、辐射测量的大气修正^[3]等方面具有非常重要的意义。微波辐射计作为目前获取大气垂直热力廓线最为广泛的方式之一,其连续稳定的温度、湿度廓线探测,可以弥补常规探空因观测时间间隔较长获取大气信息不足的缺点,便于开展中小尺度灾害性天气过程的热力过程演变精细化研究。目前,国内外已研制出多种型号地基微波辐射计(以下简称辐射计),不同技术体制辐射计的性能如何,能否在业务系统广泛使用,是国内外科研机构和管理部門十分关注的问题。

近年来,国外学者通过外场试验对辐射计的探测性能进行了研究^[4-10]。结果表明:辐射计的温度、湿度廓线与探空相比,误差分别为 1.5 K 和 $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[4]。有云条件下,尤其是厚云和低云存在时,湿度廓线反演误差增大^[5]。Ware 等^[6]研究表明:降水时天线罩上附着的水会严重影响辐射计的反演精度。在多种型号辐射计联合比对方面,欧洲 COST ES1303 TOPROF 计划先后于 2014 年和 2015 年在德国开展辐射计的联合定标试验(J-CAL)^[10],参试设备包括美国 Radiometrics 公司 MP 系列和德国 HATPRO 系列的 RPG 设备等,试验评估了设备不确定性和不同设备间的差异。

国内学者在辐射计产品探测精度评估^[11-19]和数据质量评价方面^[20-24]开展了一些研究,结果表明:晴空条件下,辐射计能够较好地反映大气真实信息,有

2018-07-21 收到,2018-08-31 收到再改稿。

资助项目:国家重点研究发展计划(2017YFC1501700),中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(KLAS201701),中国气象局气象探测中心青年科技课题(TCQN201708),中国气象局气象探测中心自设项目(TCZS201707)

* 通信作者,邮箱: sophyxf@163.com

云、雨存在时,大气温湿廓线尤其是湿度反演误差较大,甚至失效^[18-19]。这些试验不足之处在于前者仅从产品级角度进行考察,无法区分误差是由硬件设备还是反演算法造成;后者仅针对单型号设备进行考察,对于多型号辐射计的联合比对试验仍比较欠缺。

为了直接考察辐射计硬件系统的观测性能,评估不同型号辐射计之间的差异,本试验将评估对象前移,利用辐射计的一级亮温数据对国内外不同技术体制的4台辐射计进行比对。利用中国气象局大气探测试验基地(北京)为期2年(2016年1月—2018年3月)的辐射计观测数据,以探空数据为参考标准,辅以毫米波测云仪、激光云高仪及全天空成像仪等同址观测的地基遥感设备进行综合比对,探讨不同天气情况和季节变换对辐射计测量精度的影响,为辐射计的设备改进、数据质量控制和产品应用等提供参考。

1 试验简介

1.1 试验设备

本次试验中,参试的4台辐射计中有两台分别引进自德国及美国,另外两台为国产。本文将德国产辐射计编号为MWR-G,美国产辐射计编号为MWR-A,国产辐射计编号为MWR-C1和MWR-

C2。在接收机技术体制方面,分为多路直接检波(MWR-G,MWR-C2)和超外差本振跳频(MWR-A,MWR-C1)两种。其中,多路直接检波体制,采用并行方式同时探测多通道的亮温,不同频点亮温数据时间一致且时间分辨率较高,亮温数据可达秒级;超外差本振跳频体制,通过依次改变接收机本振频率来实现多个频带亮温的测量,变频后检波辐射计接收通道可复用,该体制设备由于接收通道较少,接收机体积小,但变频串行测量周期稍长,亮温数据通常为分钟级。参试4台辐射计主要特性见表1。

1.2 数据

数据来源于2016年1月—2018年3月中国气象局大气探测试验基地开展的辐射计联合比对试验,4台辐射计同址观测,为了确保数据可靠性和准确性,设备安装时和试验期间每半年进行1次外部液氮定标,至少每半年更换1次天线罩。试验期间,天线罩定期清洁及更换、鼓风机过滤网及红外镜头定期清洁。

比对标准来源于中国气象局大气探测试验基地同址(北京市观象台,区站号54511)同期的探空数据(每日2~3次)。辅助数据(用于样本分类)来源于同址同期的毫米波测云仪、激光云高仪、雨滴谱仪和全天空成像仪等。

表1 参试辐射计的主要性能

设备编号	产地	通道数	测量高度/km	接收机技术体制	测量周期
MWR-G	德国	14	0~10	多路直接检波	秒级
MWR-A	美国	22	0~10	超外差本振跳频	分钟级
MWR-C1	中国	22	0~10	超外差本振跳频	分钟级
MWR-C2	中国	16	0~10	多路直接检波	秒级

2 正演模型和评估方法

2.1 正演模型

本研究利用美国AER公司开发的MonoRTM辐射传输模型^[25]进行大气下行辐射亮温模拟,计算4台辐射计共有或接近的14个通道的亮温,中心频率详情见表2。先将探空数据按照MonoRTM模式要求进行处理,对于晴空条件下,输入处理过的探空

廓线后,直接得到对应该次探空的亮温数据。有云和降水条件下,需在有云的高度层输入该高度层的云中液态水含量,从而得到该廓线正演亮温。液态水含量估算参考前人的研究方法^[26],当高度层相对湿度小于85%时,液态水浓度取0;当相对湿度大于95%时,液态水浓度则取 $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;而相对湿度为85%~95%时,液态水浓度取值满足线性关系,同时假定云中含水量在垂直方向均匀分布。

表 2 模拟亮温通道中心频率

Table 2 The central frequency of the simulated bright channel

水汽通道序号	中心频率/GHz	氧气通道序号	中心频率/GHz
1	22.24	8	51.26
2	23.04	9	52.28
3	23.84	10	53.86
4	25.44	11	54.94
5	26.24	12	56.66
6	27.84	13	57.30
7	31.40	14	58.00

2.2 评估方法

本次试验通过分析 4 台设备的一致性、不同天气条件下实测亮温与模拟亮温的相关性、平均偏差及均方根误差,以及季节变化特征,对辐射计亮温准确性进行评价。以探空数据输入 MonoRTM 模型正演得到的模拟亮温作为参考标准。

3 数据预处理

3.1 质量控制

对辐射计进行比对分析前,需要检查并剔除各台辐射计亮温数据中的异常样本。亮温异常值的判别依据包括:①10 min 内亮温变化超过 3 K 的样本(给定时间范围内数据变化界限^[27]);②以 2011—2016 年模拟亮温作为参考,超过历史极大值与极小

值的样本(极值检查);③以 4 台辐射计亮温平均值为参考值,与参考值相差 10 K 以上的样本(即系统差值检查,阈值设定为均方根误差的 3 倍以上);④以模拟亮温为参考标准,实测亮温与模拟亮温差值的绝对值大于 10 K 的样本(辐射传输计算检查)。

由于 4 台辐射计亮温观测周期不同,MWR-G 和 MWR-C2 是秒级,MWR-A 和 MWR-C1 是分钟级,为了便于比对并避免数据冗余,对亮温数据进行固定 10 min 间隔的抽取。再利用以上判据对异常值进行剔除。4 台辐射计进场时间不同,样本量分别为 95639,59385,74456 和 44064。由表 3 异常值剔除情况可以看到,4 台辐射计的样本剔除率平均为 5.48%~7.96%,国产设备和进口设备的异常值剔除率较为接近。

表 3 亮温数据异常值剔除情况

Table 3 Abnormity elimination of brightness temperature data

通道序号	MWR-G		MWR-A		MWR-C1		MWR-C2	
	剔除样本量	剔除率/%	剔除样本量	剔除率/%	剔除样本量	剔除率/%	剔除样本量	剔除率/%
1	6922	7.24	17637	29.70	11812	15.86	4620	10.48
2	6805	7.12	5072	8.54	9745	13.09	5608	12.73
3	7591	7.94	5009	8.43	10577	14.21	4375	9.93
4	8139	8.51	5679	9.56	8872	11.92	5440	12.35
5	8702	9.10	8287	13.95	5185	6.96	4098	9.30
6	8579	8.97	3993	6.72	6085	8.17	3609	8.19
7	11159	11.67	9417	15.86	5847	7.85	5126	11.63
8	7227	7.56	3760	6.33	7610	10.22	79	0.18
9	6634	6.94	3204	5.40	5334	7.16	113	0.26
10	3680	3.85	1584	2.67	2808	3.77	124	0.28
11	508	0.53	396	0.67	7447	10.00	302	0.69
12	251	0.26	150	0.25	665	0.89	185	0.42
13	275	0.29	635	1.07	511	0.69	70	0.16
14	251	0.26	1037	1.75	450	0.60	41	0.09

3.2 样本分类

本文对试验样本进行严格的探空及地基遥感时空一致性检查^[19],将全部样本分为晴空、云天、降水

3 类,样本量分别为 619,437,70,以便分析不同技术体制下的辐射计在不同天气条件下的观测性能。

①晴空样本:探空、毫米波测云仪及激光云高仪

在探空对应时段均未观测到云。

②云天样本:探空入云高度、出云高度(采用周毓荃等^[28]的云体判别方法)与毫米波测云仪和激光云高仪在探空对应时段观测结果相一致,全天空成像仪总云量不小于 3 成。

③降水样本:以地面雨滴谱观测结果为依据,确定降水样本。

4 试验结果

4.1 影响因子

大气因其温度、湿度和液态水含量等要素在垂直方向分布上不断变化,在微波波段复杂的吸收和散射过程引起下行辐射亮温的不断变化。因此,确切了解大气要素变化对微波不同通道亮温的影响是定量分析辐射计观测亮温准确性的重要环节。试验通过 MonoRTM 模式对辐射计亮温影响因子进行敏感性分析。

4.1.1 温度廓线变化对模拟亮温的影响

由于辐射计主要利用氧气通道的吸收特性探测温度廓线,因此,试验模拟了氧气通道随温度廓线的变化规律。以 1976 年美国标准大气委员会所设定的标准大气作为模式输入参数,10 km 以下大气温度随高度降低,平均递减率为 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 。假设逆温是在 Z_r 附近叠加一个宽度为 ΔZ_r 的方波(图 1)。

模拟结果显示:模拟亮温仅对 2 km 以内的逆温层比较敏感,且不同氧气通道对逆温层高度的敏感性不同(图 2a)。各通道模拟亮温与逆温层的增温幅度呈线性变化(图 2b)。模拟亮温随逆温层厚度的增加有小幅增大(图 2c)。这说明,辐射计能够反映 2 km 左右以下的逆温结构,而对 2 km 以上逆温的反演多依赖于历史数据的统计。为了区分逆温层高度和逆温层厚度,辐射计氧气通道亮温的准确性应至少在 1 K 以内,这就对辐射计的高精度定标、质量控制算法和高运行稳定性提出了要求。

4.1.2 云对模拟亮温的影响

在 MonoRTM 辐射传输模型正演亮温过程中,云参量输入通过输入不同高度层的液态水含量实现。假设云层的相对湿度在 Z_h 附近增加一个宽度为 ΔZ_h 的方波(图 1),云层内相对湿度取 90%,云

层外取 30%,云中液态水含量取 $0.05\sim 0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[26]。模拟结果显示,随着云厚的增加,水汽和液态水通道的模拟亮温显著增大,云厚由 0.25 km 增至 8 km,其模拟亮温增大 200 K(图 3a);随云的增高,水汽和液水通道的模拟亮温呈先增大后减小趋势,最大增幅仅为 30 K 左右(图 3b);随着液态水含量的增加,模拟亮温呈线性增大的趋势,尤其是水汽和液态水通道,最大增幅达 90 K 左右(图 3c)。这说明,亮温对云厚和液态水含量的变化敏感,而对云高变化不敏感,因此,利用辐射计亮温数据反演湿度廓线时,能够准确反映云厚和液态水含量的变化,而较难定量确定云层的高度分布。这是辐射计有云情况下湿度反演结果不准确的主要原因之一,尝试借助云的观测手段(如云雷达)将有助于提高湿度反演的准确性。

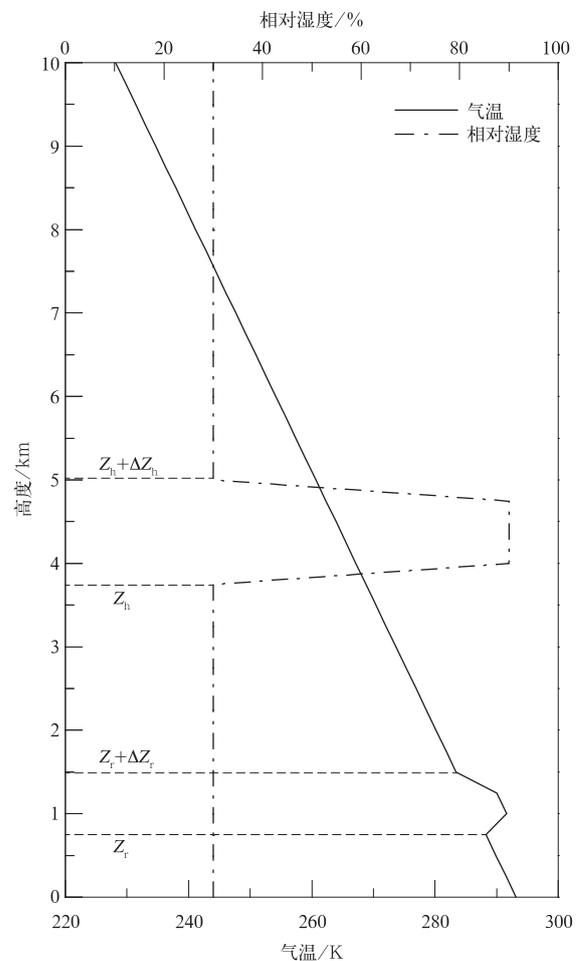


图 1 温湿廓线输入参数

Fig. 1 Input parameters of temperature and humidity profiles

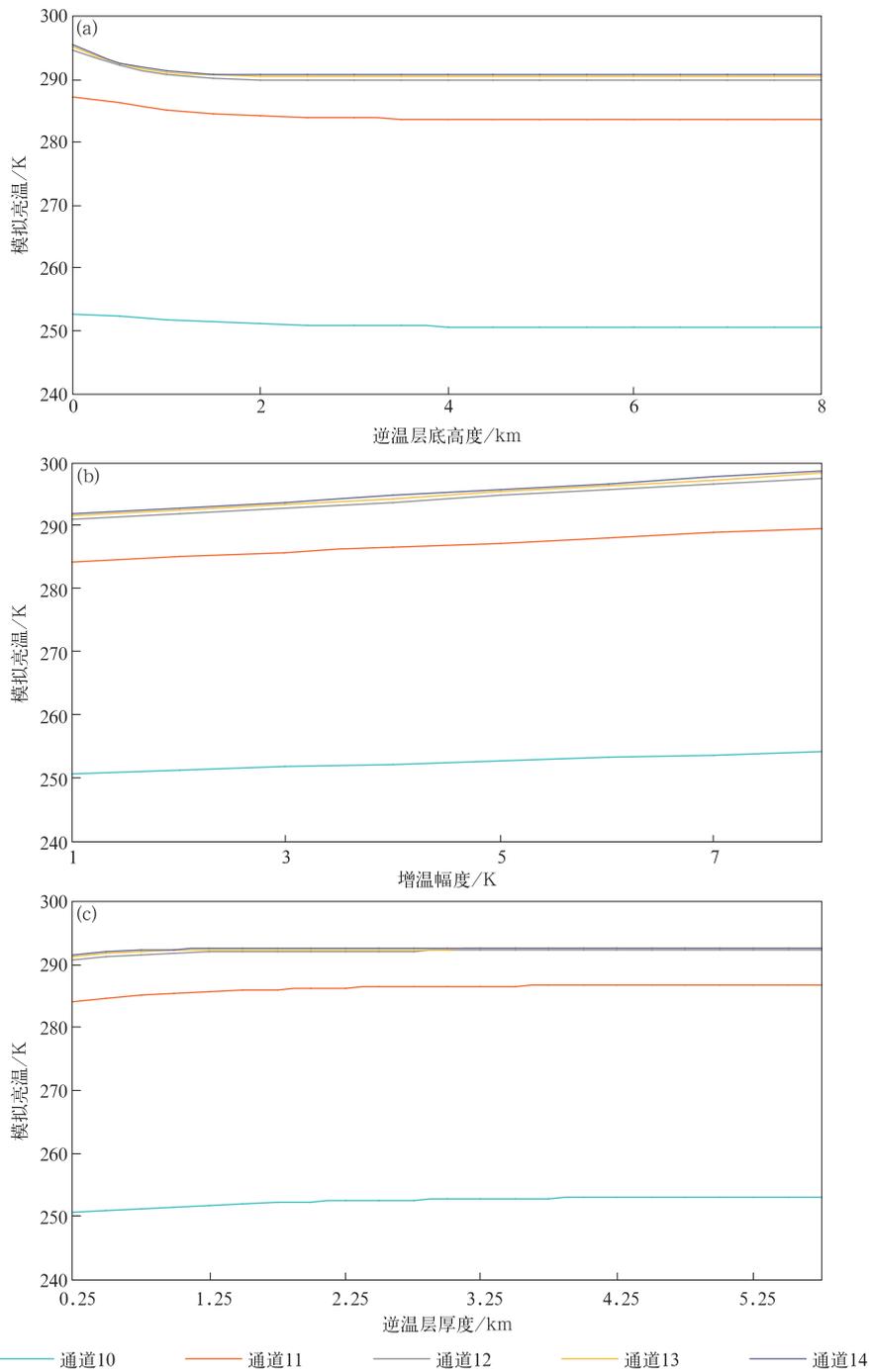


图2 逆温层高度、厚度及增温幅度变化对模拟亮温的影响
 (a)增温幅度 5 K,逆温层厚度 2 km,(b)逆温层底高度 0,逆温层厚度 2 km,
 (c)增温幅度 5 K,逆温层底高度 0.5 km

Fig. 2 Effects of height and thickness of inversion layer with temperature increasing range on simulated brightness temperature
 (a)increasing range is 5 K,inversion layer thickness is 2 km,
 (b)inversion layer bottom height is 0,inversion layer thickness is 2 km,(c)temperature increasing range is 5 K, inversion layer bottom height is 0.5 km

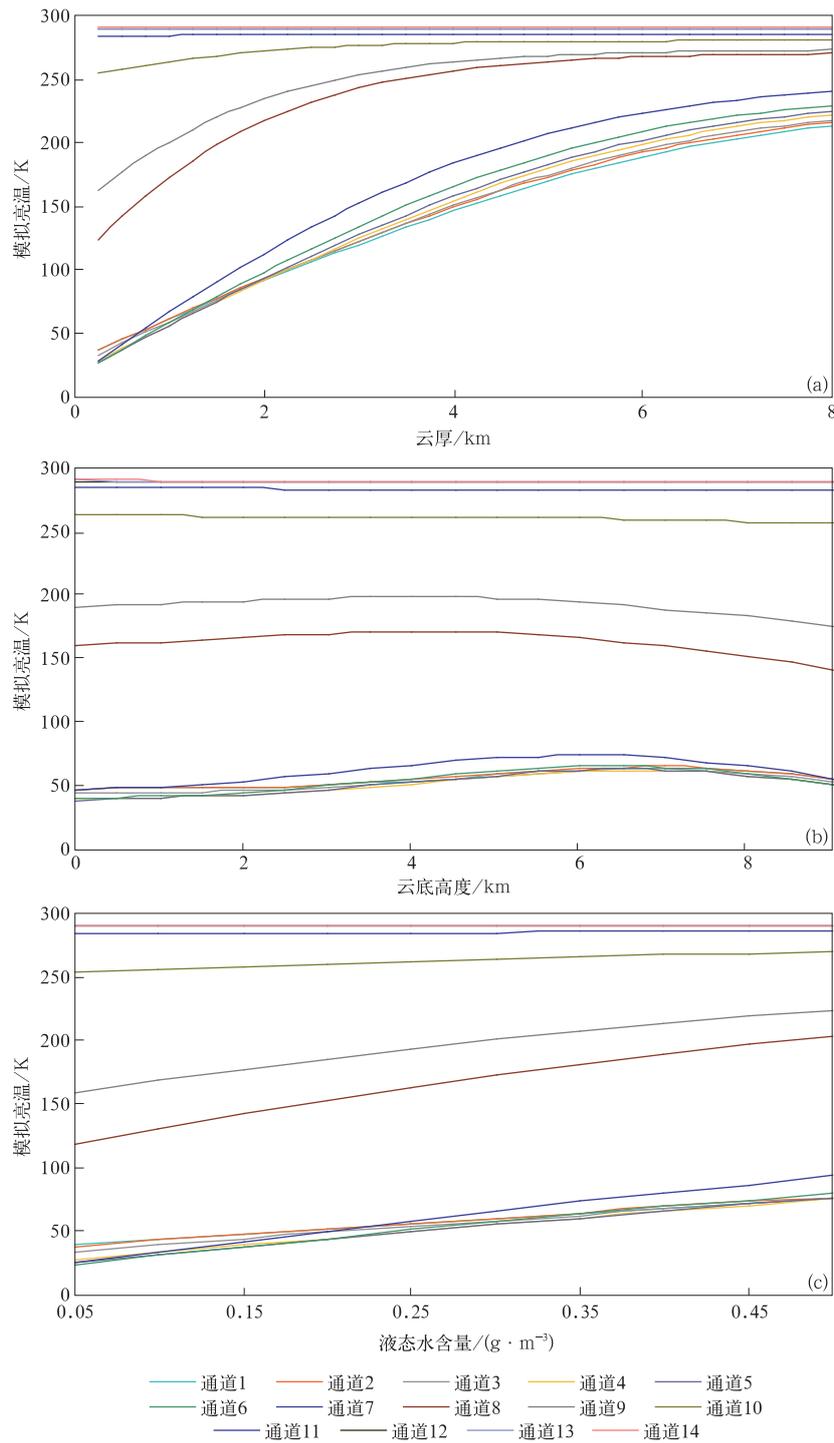


图 3 云厚、云高、液态水含量变化对模拟亮温结果的影响

(a)云高 2 km,液态水含量 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, (b)云厚 1 km, 液态水含量 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, (c)云厚 1 km,云底高度 2 km

Fig. 3 Effects of cloud thickness, cloud height and liquid water content on simulated brightness temperature

(a)cloud height is 2 km,liquid water content is $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,
 (b)cloud thickness is 1 km,liquid water content is $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,
 (c)cloud thickness is 1 km,cloud bottom height is 2 km

4.2 晴空条件

辐射计作为高灵敏度探测大气的设备,准确的亮温测量是保证辐射计反演结果准确性的关键。以晴空条件下的探空数据计算的模拟亮温为参考,对辐射计实测亮温进行准确性评估。

4.2.1 相关性

试验统计了4台辐射计14个共有通道实测亮温与模拟亮温的相关系数。结果表明:除了MWR-A和MWR-C1中间几个通道(27.84 GHz, 31.40 GHz与51.26 GHz)相关性较低,4台辐射计14个通道实测亮温与模拟亮温的相关系数基本超过0.9,本文相关分析均达到0.001显著性水平,相关性较好。整体来讲,MWR-G观测亮温与模拟亮温的相关性最高(相关系数为0.9911),MWR-C1和MWR-C2次之(相关系数为0.9759,0.9723),MWR-A相关系数为0.9600。

4.2.2 亮温准确性

由辐射计的观测亮温偏差统计结果(表4)可知:①4台辐射计实测亮温较模拟亮温14个共有通道的平均均方根误差为2.08~3.75 K,氧气通道实测亮温与模拟亮温的均方根误差比水汽通道小,这是温度廓线产品误差小于湿度廓线误差的原因之

一。因此,国产设备与进口设备准确性相当。辐射计定标误差是亮温测量的误差来源之一。参试设备均以充满液氮的简易定标靶作为冷源,与设备内置的常温黑体定标源构成两点法定标,其中,常温定标源测温准确性高,而低温定标源受液氮挥发、表面沸腾和雾化以及周围环境温度的影响,准确性较低。51~59 GHz氧气通道观测值更接近常温源,与22~30 GHz水汽通道相比,氧气通道定标误差更小。建议采用高精度冷热源定标系统对辐射计接收机进行定标及校准,以保证辐射计准确测量。②通道8、通道9(中心频率为51.26 GHz,52.28 GHz)误差比其余几个氧气通道明显偏大。其原因主要是这两个通道离氧气吸收峰较远,其观测亮温受高层影响较大,而探空数据受气球漂移影响,探测空间的不一致导致二者偏差较大。③4台辐射计中,MWR-G误差最小,各通道平均偏差为1.08 K,均方根误差平均为2.08 K,MWR-A多数通道亮温呈负偏差,且均方根误差较大。该结果与王志诚等^[19]的多型号辐射计产品比对分析相一致,解释了晴空条件下MWR-G温度和湿度廓线产品误差最小,以及MWR-A产品存在系统负偏差,且均方根误差较大的原因(该结果并不代表所有产品结果)。

表4 晴空样本实测亮温与模拟亮温偏差情况(单位:K)

Table 4 Deviation of observed and simulated brightness temperature in clear sky(unit:K)

中心频率/GHz	MWR-G		MWR-A		MWR-C1		MWR-C2	
	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差
22.24	1.16	3.12	-1.92	4.74	3.63	5.19	2.77	5.24
23.04	1.35	3.04	-0.87	4.82	0.79	2.95	2.30	5.19
23.84	1.05	2.69	-1.61	4.34	1.60	3.32	1.97	4.24
25.44	0.74	1.91	-0.08	2.90	2.82	3.84	1.96	4.26
26.24	0.65	1.76	-1.93	4.15	1.30	1.91	1.83	3.70
27.84	0.49	1.63	-2.21	4.89	1.10	1.64	1.58	3.42
31.40	0.50	1.40	-1.47	3.61	0.70	1.52	1.60	3.18
51.26	4.09	4.36	4.66	4.87	2.89	5.39	4.01	5.13
52.28	2.99	3.38	4.02	4.17	4.90	5.64	3.87	4.68
53.86	3.38	3.50	1.48	1.71	4.48	4.60	2.81	3.73
54.94	0.10	0.44	-0.35	0.70	1.61	2.31	-0.27	2.43
56.66	-0.48	0.66	-0.89	1.07	1.14	1.54	-1.33	2.47
57.30	-0.46	0.67	-0.96	1.24	1.16	1.58	-1.42	2.44
58.00	-0.42	0.64	-1.02	1.27	1.15	1.59	-1.55	2.43

4.2.3 季节变化特征

按照气象上常用的季节划分方式,将3—5月、6—8月、9—11月、12月—次年2月划分为春、夏、秋、冬4个季节,统计不同季节亮温数据偏差分布

(图4)。由图4可知,冬季4台辐射计观测亮温与模拟亮温的平均偏差和均方根误差均最小;除了靠近氧气吸收峰的几个通道外,4台辐射计观测亮温的偏差均在夏季达到最大,春季次之。其主要原因

是夏季大气水汽含量较高,使 22~31 GHz 水汽通道亮温观测值误差偏大;同时,参试设备均在每年冬季和夏季进行液氮定标,而夏季高温高湿的环境,容

易造成标定过程中液氮挥发过快,标定靶表面凝结,影响定标效果,从而带来亮温观测误差。

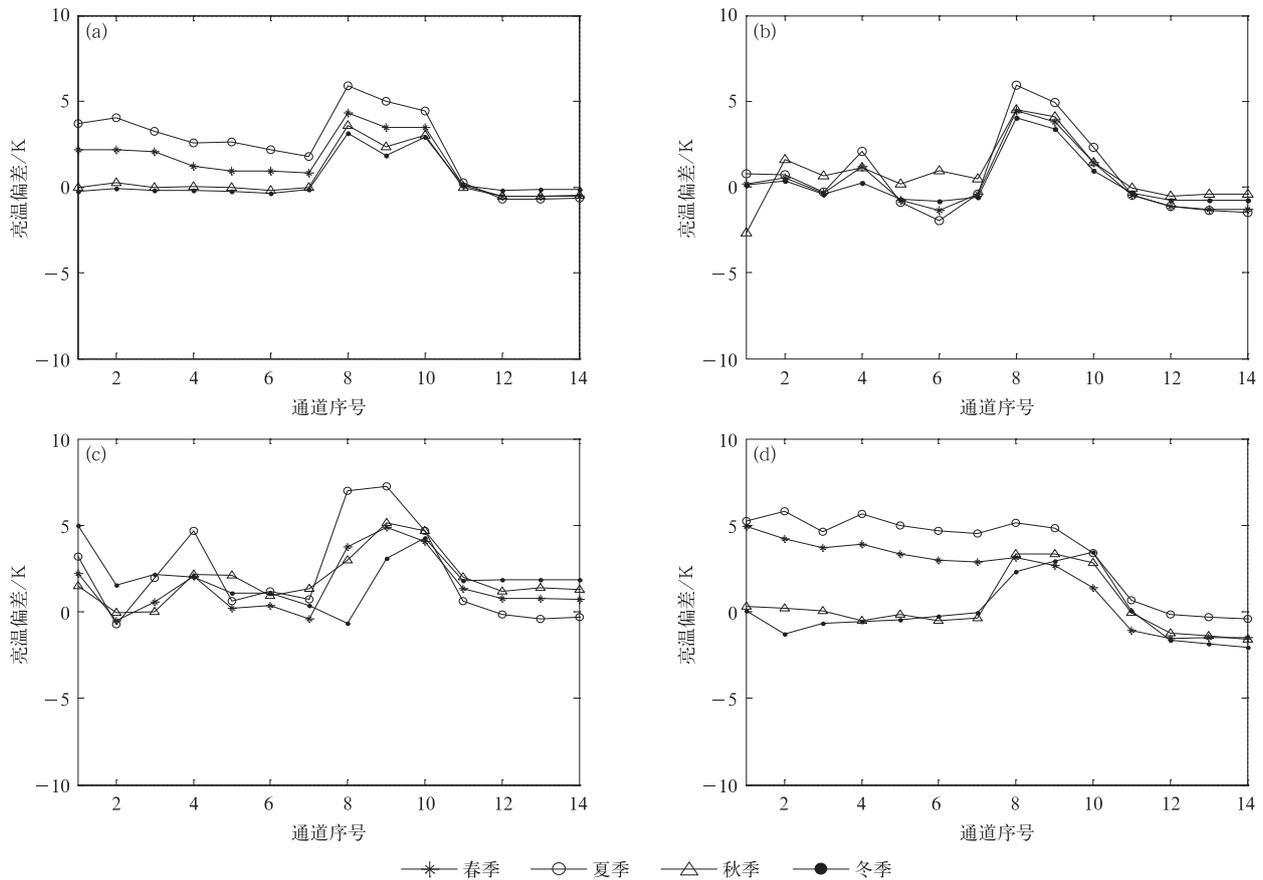


图 4 不同季节辐射计亮温偏差

(a)MWR-G,(b)MWR-A,(c)MWR-C1,(d)MWR-C2

Fig. 4 Brightness temperature error of radiometers in different seasons

(a)MWR-G,(b)MWR-A,(c)MWR-C1,(d)MWR-C2

4.3 有云条件

云的存在及其垂直结构上的不确定性使云中的水汽和液态水在空间分布上存在很大不同,造成辐射计所接收到的亮温数据产生明显变化。在 MonoRTM 辐射传输模型正演亮温的过程中,云参量输入通过输入不同高度层的液态水含量实现。由于探空数据没有液态水含量的直接探测量,在输入液态水含量时需通过相对湿度设置阈值进行估算,这就使正演亮温数据准确性有所降低,因此,有云样本比对结果仅作为参考(表 5)。

有云条件下,4 台辐射计 14 个通道实测亮温较模拟亮温均方根误差为 2.85~3.95 K,较晴空条件下偏高。通道 8、通道 9、通道 10(中心频率为 51.26 GHz,52.28 GHz,53.86 GHz)误差比其余几

个氧气通道明显偏大,最大偏差达到 3.88 K,均方根误差最大达到 5.98 K。总之,有云条件下,辐射计观测亮温绝对误差增加会直接导致温湿廓线等产品误差增大。这与王志诚等^[19]比对结果中,有云条件下各型号辐射计的温度和湿度产品误差增大的结果相一致。

4.4 降水条件

在 MonoRTM 辐射传输模型正演亮温的过程中,降水参量的输入通过输入探空数据估算的不同高度层液态水含量实现。降水条件下(表 6),4 台辐射计实测亮温较模拟亮温 14 通道的平均偏差为 -55.66~-28.3 K,均方根误差为 44.7~64.5 K,各项指标较晴空和有云条件下显著偏高。分析其原因,辐射计天线罩附着水层或水滴以及大气中降水

表 5 有云样本实测亮温与模拟亮温偏差情况(单位:K)

Table 5 Deviation of observed and simulated brightness temperature in cloud samples(unit:K)

中心频率/GHz	MWR-G		MWR-A		MWR-C1		MWR-C2	
	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差
22.24	0.56	3.43	-1.85	4.59	3.07	5.01	3.17	5.75
23.04	0.72	3.40	-0.03	4.06	0.42	3.53	2.25	5.38
23.84	0.30	3.26	-1.16	3.54	1.14	3.74	1.72	4.43
25.44	-0.18	3.09	-0.03	3.28	2.25	4.06	1.55	4.39
26.24	-0.35	3.17	-1.81	3.99	0.51	3.39	1.27	4.04
27.84	-0.69	3.48	-2.04	4.57	0.22	3.57	0.94	3.87
31.40	-0.93	4.08	-1.89	4.54	-0.46	4.17	0.86	4.16
51.26	2.27	5.85	3.02	5.98	-0.02	6.18	2.23	5.92
52.28	1.56	4.57	2.86	4.98	2.71	5.37	2.50	4.89
53.86	3.06	3.35	1.33	1.86	3.88	4.12	2.58	3.49
54.94	0.14	0.45	-0.31	0.67	2.04	2.65	-0.16	2.24
56.66	-0.43	0.57	-0.72	0.93	1.12	1.45	-1.21	2.26
57.30	-0.42	0.59	-0.74	0.92	1.16	1.48	-1.31	2.23
58.00	-0.38	0.55	-0.99	1.23	1.27	1.63	-1.49	2.21

表 6 降水样本实测亮温与模拟亮温偏差情况(单位:K)

Table 6 Deviation of observed and simulated brightness temperature in precipitation samples(unit:K)

中心频率/GHz	MWR-G		MWR-A		MWR-C1		MWR-C2	
	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差
22.24	-35.68	70.45	-62.92	76.12	-19.72	51.28	-38.66	58.00
23.04	-39.56	73.98	-66.91	80.20	-25.85	55.73	-41.13	60.97
23.84	-45.00	80.25	-74.45	88.00	-29.19	59.55	-49.26	69.02
25.44	-55.83	91.23	-84.45	98.81	-39.39	66.81	-59.42	80.78
26.24	-60.28	95.69	-92.33	107.09	-44.63	71.42	-66.89	87.45
27.84	-67.74	103.12	-101.39	116.55	-53.34	78.35	-73.29	94.98
31.40	-81.37	115.12	-116.45	131.08	-69.85	91.08	-85.66	107.72
51.26	-71.06	91.68	-90.02	101.08	-63.13	76.34	-154.44	155.22
52.28	-53.67	69.76	-68.09	76.72	-46.22	56.42	-117.24	117.81
53.86	-10.62	16.10	-17.04	19.54	-8.96	12.20	-27.17	27.35
54.94	-0.19	3.37	-2.41	3.26	0.53	2.16	-2.56	3.43
56.66	0.70	2.22	-0.90	1.50	1.06	1.37	0.07	2.05
57.30	0.73	2.18	-0.89	1.60	1.28	1.60	-0.10	1.89
58.00	0.79	2.14	-1.03	1.52	1.15	1.45	-0.11	2.02

粒子散射、折射作用的影响都是造成辐射计在雨天探测失真的主要因素。当然,降水粒子的密度、形状、滴谱和介电特性等的因素均会对衰减系数产生影响,情况较为复杂,模拟亮温往往与实际差别较大,因此,降水条件的比对结果仅供参考。

为了考察降水时基于辐射计的亮温观测反演得到的温湿廓线产品是否有效,本试验分别统计了降水和有云的非降水条件下,辐射计各通道观测亮温与探空温度的相关性(图 5)和与水汽密度廓线的相关性(图 6)。

有云非降水条件下,各通道亮温与探空温度数据在 10 km 探测范围以内具有较强的相关性,氧气通道的相关性大于水汽通道(图 5a)。因此,辐射计

可主要依靠氧气通道的亮温遥感 0~10 km 的温度廓线。有云非降水条件下,各通道亮温与探空水汽密度在约 4 km 以下具有较强的相关性,水汽通道的相关性大于氧气通道(图 6a)。因此,辐射计主要依靠水汽通道的观测亮温遥感 4 km 以下的水汽密度廓线,而 4 km 以上的反演结果多依赖于历史数据的训练统计,精度较低,这一结果与侯叶叶等^[14]、王志诚等^[19]研究结果一致。而降水情况下,各通道亮温与探空温度和水汽密度廓线的相关性明显减小,尤其是水汽通道的相关性大部分不足 0.5,甚至更低(图 5b、图 6b)。因此,降水时辐射计在垂直顶空观测模式下的探测性能大大降低,其亮温数据和温度、湿度廓线等产品建议谨慎使用。

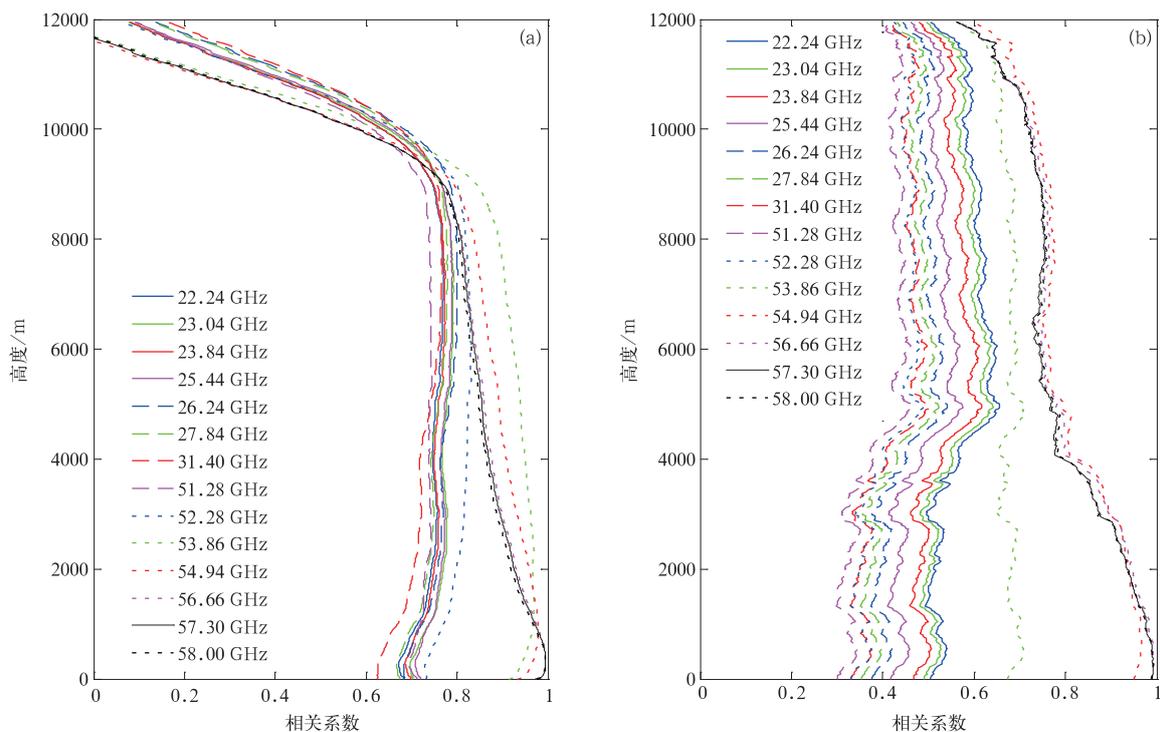


图 5 MWR-C1 辐射计亮温与探空温度廓线相关系数 (a)非降水条件,(b)降水条件

Fig. 5 Correlation between brightness temperature of MWR-C1 and sounding temperature profile (a) non-precipitation, (b) precipitation

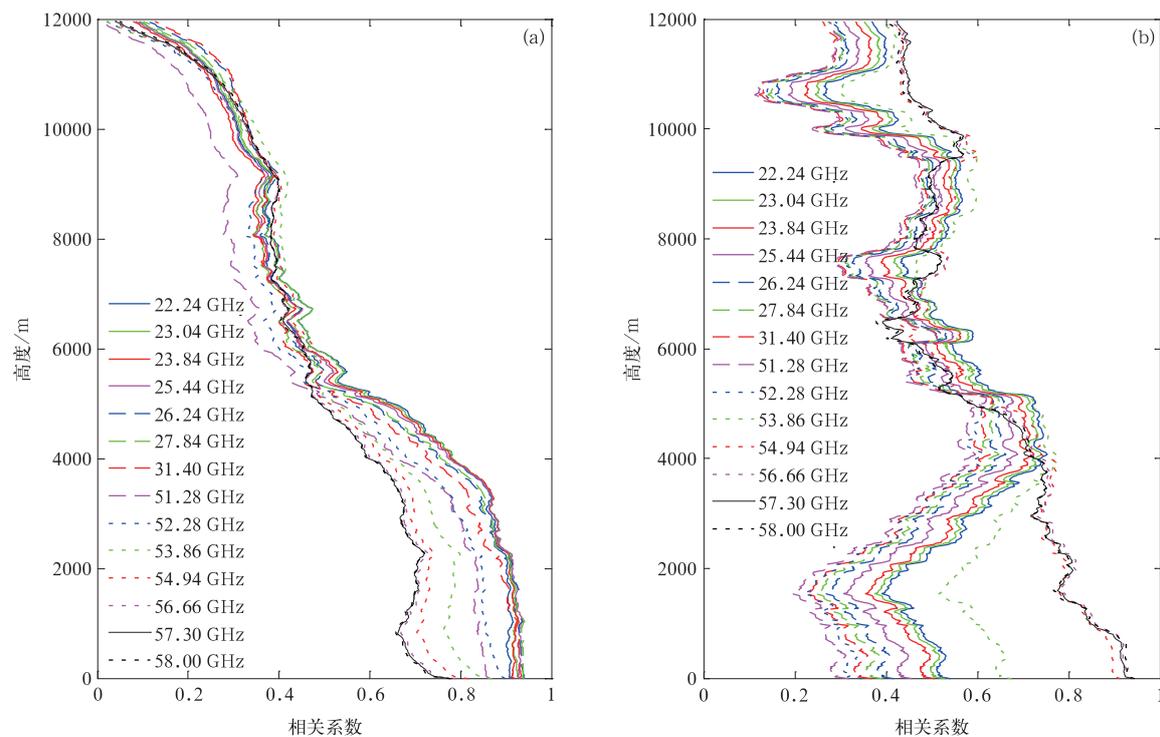


图 6 MWR-C1 辐射计亮温与探空水汽密度廓线相关系数 (a)非降水条件,(b)降水条件

Fig. 6 Correlation between brightness temperature of MWR-C1 and sounding water vapor density profile (a) non-precipitation, (b) precipitation

5 结 论

利用中国气象局大气探测试验基地 2016 年 1 月—2018 年 3 月国内外 4 台辐射计的同址观测数据,以探空数据正演模拟亮温为参考,考察了不同辐射计的探测性能,得到以下主要结论:

1) 4 台辐射计各通道亮温随时间的变化趋势一致,实测亮温与模拟亮温的相关性较好,相关系数基本超过 0.9,均达到 0.001 显著性水平。

2) 辐射计能够反映 2 km 以下逆温结构,2 km 以上温度结果多依赖于历史数据的统计。辐射计能够反映云厚和液态水含量的变化,而较难反映云层高度分布。可借助适当的辅助观测手段(如云雷达)提高湿度反演算法的准确性。

3) 晴空条件下,国产辐射计与进口辐射计观测亮温的准确性相当,4 台辐射计实测亮温较模拟亮温均方根误差平均为 2.08~3.75 K;MWR-G 亮温误差最小,各通道平均偏差为 1.08 K,均方根误差平均为 2.08 K。4 台辐射计观测亮温的误差均在冬季最小,夏季达到最大,春季次之。有云条件下,亮温误差略增大。

4) 降水条件下,4 台辐射计各通道亮温与探空温度和水汽密度廓线的相关性明显减小,尤其是水汽通道的相关性更低。因此,降水期间的辐射计数据谨慎使用。

本试验从设备级亮温进行比对分析,评估了辐射计硬件系统的探测性能,为辐射计的设备改进、数据质量控制,以及产品在不同场景的有效应用等方面提供了参考依据。提升设备质量、开展亮温数据质量控制是提高辐射计探测能力的根本,改进有云条件下的反演算法也将是提升辐射计温湿廓线精度的有效方法。由于业务探空数据自身也存在一定误差,辐射传输模型正演亮温的误差也较难完全避免。建议采用高精度冷热源定标系统用于对辐射计接收机进行高精度定标及校准,以保证辐射计的准确测量;降水期间辐射计的最优观测模式,以及天线罩的选材、更换和维护等问题尚需深入测试和验证,制定相关规范和标准,拓展辐射计的有效探测区间。

参 考 文 献

- [1] Yao Zhigang, Lin Longfu, Chen Hongbin, et al. A scheme for estimating tropical cyclone intensity using AMSU-A data. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25(1): 96-106.
- [2] Gao Y, Duan M. Preliminary comparisons of the typical polarized radiative transfer models; Precision and efficiency. *J Remote Sens*, 2010, 14(5): 839-851.
- [3] 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理. 北京: 气象出版社, 1982.
- [4] Cimini D, Campos E, Ware R, et al. Thermodynamic atmospheric profiling during the 2010 Winter Olympics using ground-based microwave radiometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49(12): 4959-4969.
- [5] Crewell S, Ebell K, Löhnert U. Can liquid water profiles be retrieved from passive microwave zenith observations. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(6): L06803.
- [6] Ware R, Cimini D, Herzegh P, et al. Ground-based Microwave Radiometer Measurements During Precipitation// 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry, 2004.
- [7] Crewell S, Löhnert U. Accuracy of boundary layer temperature profiles retrieved with multi-frequency, multi-angle microwave radiometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 2195-2201.
- [8] Ware R, Carpenter R, Güldner J, et al. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Science*, 2016, 38(4): 44-1-44-13.
- [9] Ware R, Cimini D, Campos E, et al. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. *Atmos Res*, 2013, 132-133(10): 278-290.
- [10] Pospichal B, Küchler N, Löhnert U, et al. Calibration of Ground-based Microwave Radiometers-Accuracy Assessment and Recommendations for Network Users. EGU General Assembly Conference, 2016: 14776.
- [11] 刘思波, 何文英, 刘红燕, 等. 地基微波辐射计探测大气边界层高度方法. *应用气象学报*, 2015, 26(5): 626-635.
- [12] 姚雯, 马颖, 高丽娜. L 波段与 59-701 探空系统相对湿度对比分析. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 218-226.
- [13] 刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. *气象学报*, 2011, 69(4): 719-728.
- [14] 侯叶叶, 刘红燕, 鲍艳松. 地基微波辐射计反演水汽密度廓线精度分析. *气象科技*, 2016, 44(5): 702-709.
- [15] 魏重, 雷恒池, 沈志来. 地基微波辐射计的雨天探测. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊 D): 65-72.
- [16] 郭丽君, 郭学良. 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*, 2015, 73(2): 368-381.
- [17] 唐英杰, 马舒庆, 杨玲, 等. 云底高度的地基毫米波云雷达观测对比. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 680-687.
- [18] 车云飞, 马舒庆, 杨玲, 等. 云对地基微波辐射计反演湿度廓线的影响. *应用气象学报*, 2015, 26(2): 193-203.
- [19] 王志诚, 张雪芬, 郝佳佳, 等. 不同天气条件下地基微波辐射计探测性能比对. *应用气象学报*, 2018, 29(3): 282-295.
- [20] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 微波辐射计亮温观测质量控制研究. *气象科学*, 2013, 33(2): 130-137.
- [21] 王振会, 曹雪芬, 黄建松, 等. 基于气象资料变化特征和辐射传

- 输模式的微波辐射计工作状态分析. 大气科学学报, 2014, 37(1):1-8.
- [22] 李青, 胡方超, 楚艳丽, 等. 北京-地基微波辐射计的观测数据一致性分析和订正实验. 遥感技术与应用, 2014, 29(4):547-556.
- [23] 王振会, 李青, 楚艳丽, 等. 地基微波辐射计工作环境对 K 波段亮温观测影响. 应用气象学报, 2014, 25(6):711-721.
- [24] 傅新姝, 谈建国. 地基微波辐射计探测资料质量控制方法. 应用气象学报, 2017, 28(2):209-217.
- [25] Turner D D, Clough S A, Liljegren J C, et al. Retrieving liquid water path and precipitable water vapor from the atmospheric radiation measurement (ARM) microwave radiometers. *IEEE Trans Geosc Remote Sens*, 2007, 45(11):3680-3690.
- [26] 鲍艳松, 钱程, 闵锦忠, 等. 利用地基微波辐射计资料反演 0~10 km 大气温湿廓线试验研究. 热带气象学报, 2016, 32(2):163-171.
- [27] 中国气象局. 地面气象观测资料质量控制. 北京:气象出版社, 2010.
- [28] 周毓荃, 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究. 气象, 2010, 36(11):50-58.

Comparison of Brightness Temperature of Multi-type Ground-based Microwave Radiometers

Mao Jiajia¹⁾ Zhang Xuefen¹⁾ Wang Zhicheng²⁾³⁾ Yang Rongkang¹⁾
Pan Xuguang⁴⁾ Ji Chengli¹⁾ Guo Ran¹⁾

¹⁾ (Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081)

²⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

³⁾ (Key Laboratory of Atmosphere Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225)

⁴⁾ (Yantai Meteorological Administration of Shandong Province, Yantai 264000)

Abstract

Ground-based microwave radiometer (MWR) can detect temperature and humidity profiles continuously and steadily, which compensate the shortcoming of the conventional sounding because of the long observation time interval. As a result, it is very helpful to explore the thermal process evolution of meso-scale synoptic system. At present, many types of ground-based MWR are developed at home and abroad. They are of different technical systems and their suitability for wide operational use is much concerned in scientific research institutions and management departments.

The error of MWR product includes the contribution of both algorithm and hardware system, which is hard to distinguish. Therefore, to evaluate the observation performance of hardware system of the MWR, the brightness temperature of MWR is directly compared in this experiment. Using observations of 4-type radiometers and operational sounding data at the testbed of China Meteorological Administration from January 2016 to March 2018, and the simulated brightness temperature based on forward calculation from sounding data of MonoRTM as the reference, the accuracy of radiometers in different weather and seasons is compared and analyzed.

Results show that the accuracy of brightness temperature of the domestic radiometer is similar to that of the imported radiometer. The observed brightness temperature of 4 radiometers are well related with simulated brightness temperature, and correlation coefficients basically are above 0.9, reaching a significant level of 0.001. Under clear sky conditions, the average of mean square root between the observed and simulated brightness temperature of four radiometers is 2.08—3.75 K. And the MWR-G shows the smallest error of brightness temperature, whose average deviation of each channel is 1.08 K, and the root mean square error is 2.08 K. The brightness temperature errors are minimum in winter and maximum in sum-

mer. Under precipitation conditions, the effectiveness of the brightness temperature observation of MWR is obviously reduced.

Certainly, there are also some errors in sounding data itself. And it is difficult to completely avoid the drifting problem of sounding balloon, although a variety of ground-based remote sensing methods are used to assist the identification. It suggests to develop and apply calibration system with high accuracy and high stability, to ensure the accurate measurement of the radiometer. In addition, best observation mode of MWR during precipitation, and the material selection, replacement and maintenance of the radome need to be tested and verified, to expand the effective detection range of MWR.

Key words: microwave radiometer; error analysis; sounding; brightness temperature; MonoRTM