

三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析^{* 1}

刘红燕
LIU Hongyan

中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089

Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China

2009-06-18 收稿,2009-08-24 改回.

Li Hongyan. 2011. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years. Acta Meteorologica Sinica, 69(4):719-728

Abstract The brightness temperatures between the measurement by the ground-based 12-channel microwave radiometer and that computed by the radiative transfer theory are compared. The data are measured in sunny day in September 2006. The results are as follows. The standard deviation of T_b in 51.250 GHz is 3.8 K, which is the maximum. The values from other channels are all less than the value in the 51.250 GHz. The bias values of T_b in 51.250 GHz and 52.280 GHz are larger than 1.0 K. The bias values in the other channels are less than 1.0 K. The slopes of the T_b fitting line are 0.66 and 0.7 in 52.280 GHz and 53.850 GHz, respectively. The slopes of other channels are larger than 0.8.

The temperature profile measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer are compared with that measured by the Radiosonde from September 2005 to August 2008 in Beijing. The difference is increasing with the height.

The measurements are analysed in terms of four seasons. From 0 to 10 km (with the heights from 8 km to 9 km excluded), the difference in Summer is larger than any of those in all other seasons. From 0 to 2.750 km, the difference in Spring is larger than in all other seasons. From 2.750 km to 3 km, the difference in Winter is larger than in all other seasons. From 3 km to 9 km, the difference in Autumn is larger than in all other seasons.

There exists clear difference between the temperature profile measurements in sunny day and in cloudy day. The slope in sunny day is larger than that in cloudy day, which may be due to the sample number for the comparison.

Key words Ground-based microwave radiometer, Temperature profile, Calibration, Retrieval, Precision

摘要 对安装在北京南郊观象台的地基微波辐射计测量的温度廓线数据的精度进行了分析。首先在2006年9月晴天条件下,对比由7个氧气通道测量的亮温与由微波辐射传输模式计算的亮温。得到51.250 GHz的测量值与计算值的标准差值最大,为3.8 K,其余通道均小于1.8 K。2种亮温的偏差值以及绝对偏差值,在51.250和52.280 GHz处大于1.0 K,在其余5个通道处都小于1.0 K。2种亮温拟合直线的斜率,在52.280和53.850 GHz处分别为0.66与0.7,其余通道都大于0.8。然后,使用2005年9月—2008年8月的观测数据,对比地基微波辐射计与探空同时观测的大气温度。结果显示,2种测量技术的差异随高度而增大。另外,将3 a观测数据按照季节以及晴天与非晴无降水天进行对比分析。结果显示,不同季节2种测量技术存在不同差异。其中,夏季测量差异最小。而晴天测量差异在3.250 km以下比非晴无降水天小。

关键词 地基微波辐射计, 温度廓线, 标定, 反演, 精度

中图分类号 P407.7

1 引言

目前测量大气温度廓线的设备有铁塔、探空、飞

机观测、地面遥感(地基微波辐射计、电声测温系统(RASS))以及卫星遥感(高文华等,2006;刘辉等,2008)。许多外场实验对各种观测设备的测量精度

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906026)。

作者简介:刘红燕,主要从事大气探测与大气物理研究,E-mail:hyliu@ium.cn

都进行了研究。Westerwater (1999)曾将测量温度廓线的仪器,如地基微波辐射计、RASS 以及塔上各个高度测量的温度进行对比研究。在温、湿、云实验中, Dominique(2006)将多种地基遥感设备(包括多台地基微波辐射计、云雷达、风廓线雷达等)联合观测,获取云的温度、水汽垂直廓线。Revercomb 等(2003)就曾用大气辐射探测 1997 和 1996 的水汽观测实验观测资料对比水汽测量的绝对精度。这些实验对仪器的测量精度都进行了严格考察,不足之处在于观测时间短,有的仅 1 个月。

地基微波辐射计在测量水汽总量以及液态水方

面被广泛使用,此外,地基微波辐射计在遥测大气垂直廓线分布中也被广泛使用。经过近 50 多年的发展,地基微波辐射计设备也在不断更新发展,表 1 中列出了各种地基微波辐射计的生产地以及性能等(Westerwater, et al, 2005)。

本研究将 3 a 由地基 12 通道微波辐射计测量的温度廓线与同时同地的探空温度廓线进行对比分析,探讨各种因子(比如高度、季节、云)对 2 种设备测量的温度廓线差别的影响。同时,对仪器测量的亮温与辐射传输模式计算的亮温也进行对比分析。

表 1 各种地基微波辐射计及其特性

Table 1 Several kinds of the ground-based Microwave Radiometers and their main functions

生产厂家	特性说明
NOAA 双通道微波辐射计	20.6(或 23.87)、31.65 GHz, 测量柱水汽含量(PWV)与柱液态水含量(LWP)
Radiometrics 公司的 MWR(Radiometrics Corporation Microwave Radiometer)	23.8、31.4 GHz, 测量柱水汽含量(PWV)与柱液态水含量(LWP), 还安装热吹风及湿度检测器
Bern 大气应用物理所设计研发的 TROWARA	21、31 GHz, 连续测量柱水汽含量(PWV)与柱液态水含量(LWP)
Kipp&Zone BV 公司生产由俄国 ATTEX 公司开发研制的 MTP(Meteorological Temperature Profiler)	61 GHz, 测量 0—600 m 边界层内的温度廓线
Radiometrics 公司设计生产的 MWRP(Radiometrics Corporation Microwave Profiler)	22—30 GHz 有 5 个通道, 在 51—59 GHz 有 7 个通道, 安装有测天顶红外温度的仪器及测量周边温度、湿度、气压的仪器, 仪器可自动作高度角、方位角旋转
由德国辐射计物理 GmbH 公司设计完成, 在 Bonn 大学运行 22 通道微波辐射计 MICCY(Microwave Radiometer for Cloud Cartography)	22.235 GHz 水汽线的高频部分有 10 个通道, 60 GHz 氧气吸收带的低频部分有 10 个通道, 90 GHz 有 2 个通道
德国辐射计物理 GmbH 公司设计完成的 RPG-HATPRO 辐射计	60 GHz 氧气吸收带有 14 个通道
Bern 大气应用物理所设计研发的遥感对流层水汽、云液态水、温度廓线的辐射计	9 个 18—151 GHz 微波频段的通道, 还装有宽带红外辐射计(8—14 μm)、气象感应仪、降雨检测仪、随机照相机
NOAA 设计安装的多频率扫描辐射计(GSR:NOAA Ground-Based Scanning Radiometer)	1 个 89 GHz 双偏振测量仪, 183.31 GHz 水汽吸收线附近有 7 个通道, 1 个 340 GHz 双偏振通道, 380.2 GHz 附近有 3 个通道, 还装有 10.6 μm 的红外辐射计

2 背景介绍

2.1 仪器

由美国 Radiometrics 公司生产的地基 12 通道微波辐射计, 包含 5 个位于 30 GHz 附近水汽微波吸收通道和 7 个位于 60 GHz 附近氧气微波吸收通道。使用双反馈高斯光学天线。其中, 位于水汽通道的波束宽度为 4.5°与 5.5°, 氧气通道的波束宽度为 2.7°与 2.3°(表 2)。高度角旋转镜反射信号到天线中, 天线罩旁边安装的鼓风机用于吹去天线罩上的雨水, 保障降水时的观测。仪器还装有测量云底温度和高度的红外仪, 以及测量附近温度、湿度、气

表 2 地基 12 通道微波辐射计通道表
Table 2 The specification of the 12-channel ground-based Microwave Radiometer

频率(GHz)	波束宽度(°)	廓线
22.235	5.5	水汽/云液态水廓线
23.035	5.5	水汽/云液态水廓线
23.835	5.5	水汽/云液态水廓线
26.235	5.5	水汽/云液态水廓线
30.000	4.5	水汽/云液态水廓线
51.250	2.7	温度/云液态水廓线
52.280	2.7	温度/云液态水廓线
53.850	2.7	温度/云液态水廓线
54.940	2.7	温度/云液态水廓线
56.660	2.7	温度/云液态水廓线
57.290	2.7	温度/云液态水廓线
58.800	2.3	温度/云液态水廓线

压的维萨拉探测器等设备。

2.2 测量原理和方法

地基微波辐射计接收到辐射电压值,标定成为亮温,最后反演得到各种大气廓线以及其他积分量(比如柱水汽总量、柱液态水总量),如图1所示(Hewison, 2006)。

2.2.1 地基微波辐射计标定方法

$$T_{b,v}^{TRM} = (T_2 - T_1)(V_s - V_1)/(V_2 - V_1) + T_1 \quad (1)$$

由式(1)将地基微波辐射计测量的电压值转变为辐射亮温值。其中, T_1 、 T_2 为2个黑体的温度, V_1 与 V_2 为微波辐射计观测2个黑体时测量的电压

值, V_s 为观测天空时的电压值, $T_{b,v}^{TRM}$ 为亮温值。

标定地基微波辐射计的方法有液氮标定、理论标定、基于辐射传输模式和探空测量的标定以及扫角标定(又称 Tipping 标定)等。在野外观测中,由于不方便购置液氮且液氮易挥发,多使用 Tipping 标定方法。Tipping 方法通过建立微波辐射计不同高度角观测得到的电压值与相应位置上的大气亮温的关系来进行标定。Han 等(2000)分析了几种对此种标定方法有影响的因子,如:地球曲率和大气折射率、天线波束宽、天线指向角误差、平均辐射亮温、随机噪声、辐射计方程增益不确定性以及大气的非均匀性,并提出了消除这些因子的相应方法。

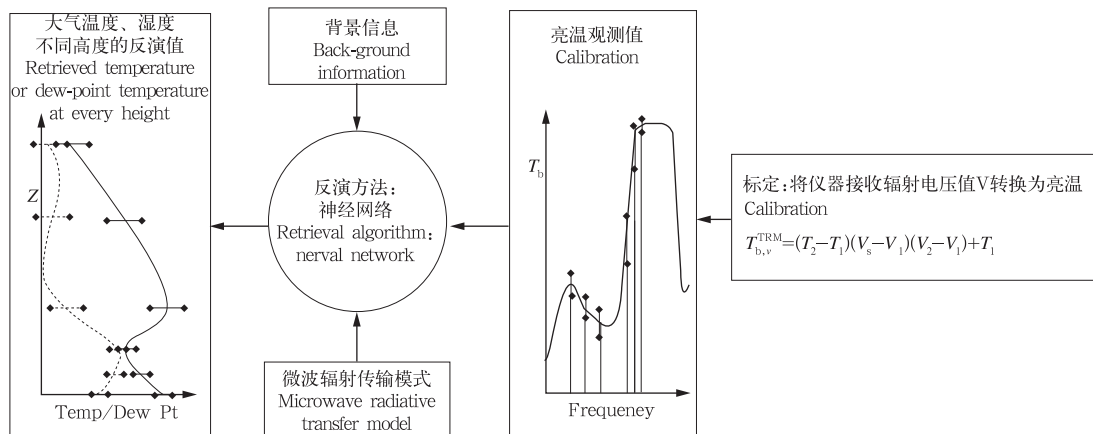


图1 地基微波辐射计测量大气温度廓线原理

Fig. 1 Sketch map of the atmospheric temperature profile measurement by the ground-based Microwave Radiometer

2.2.2 地基微波辐射计反演方法

地基微波辐射计测量的亮温值通过各种反演方法可得到大气温度、湿度、水汽、液态水等的垂直廓线分布以及大气水汽、液态水总量等值。其中反演方法有牛顿迭代反演法、线性统计法、贝叶斯最大概率法以及神经网络法等。魏重等(1995)提出使用3通道迭代反演算法,薛永康等(1983)提出使用蒙特卡罗反演算法。本文使用的地基12通道微波辐射计用了神经网络反演算法。

3 地基微波辐射计亮温对比

地基微波辐射计测量由空中发射、散射的微波信号引起的电压值,通过标定,再由电压值获得大气辐射亮温 T_b 值。同时,根据探空测量值,由大气辐

射传输模式计算出在地面可接收到的相应频率的微波亮温值。较早的微波辐射传输模式有 Liebe 模式、Rosenkranz、ARM 等编写的模式(Hewison, 2006)。本文使用了由 Rosenkranz 发展的 LBL 模式。选择2006年秋季晴空条件下,共22个样本,对由地基微波辐射计测量的亮温 $T_{b, \text{radiometer}}$ 与由微波辐射传输模式计算得到的亮温 $T_{b, \text{LBL}}$ 进行对比分析。其中微波辐射传输模式使用的是与地基微波辐射计同一地点,在08和20时(北京时,下同)的探空测量得到的大气各种参数。由式(2)、(3)、(4)计算出2种测量方法得到的亮温的标准差、偏差以及绝对偏差值。通过对数据作线性拟合,得到拟合直线的斜率以及截距。图2a—g分别为7个氧气通道的对比结果。在7个氧气通道中,51.250 GHz 通道的标准

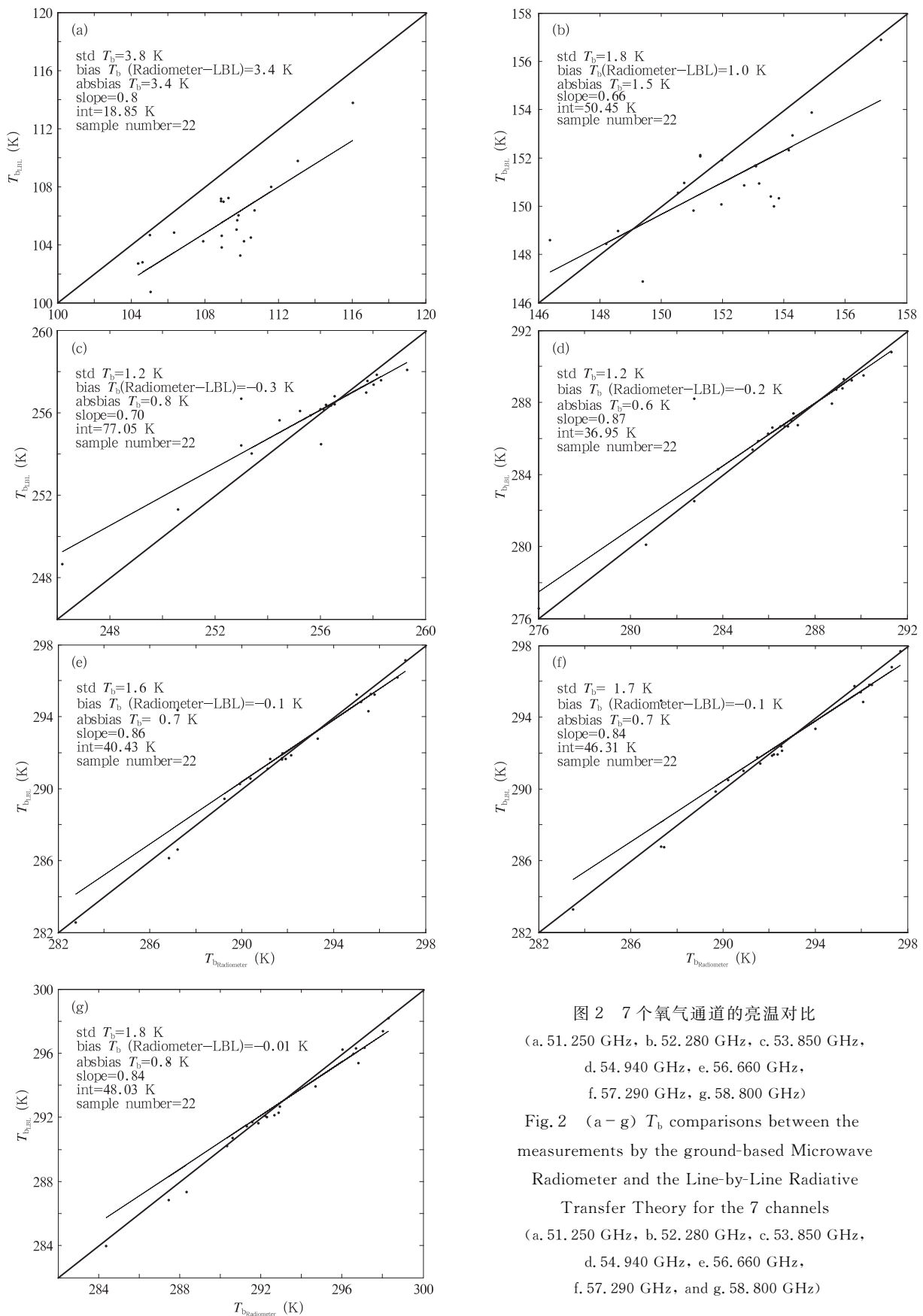


图2 7个氧气通道的亮温对比

(a. 51.250 GHz, b. 52.280 GHz, c. 53.850 GHz,
d. 54.940 GHz, e. 56.660 GHz,
f. 57.290 GHz, g. 58.800 GHz)

Fig. 2 (a-g) T_b comparisons between the
measurements by the ground-based Microwave
Radiometer and the Line-by-Line Radiative
Transfer Theory for the 7 channels

(a. 51.250 GHz, b. 52.280 GHz, c. 53.850 GHz,
d. 54.940 GHz, e. 56.660 GHz,
f. 57.290 GHz, and g. 58.800 GHz)

差最大为 3.8 K,其余通道都低于 1.8 K。而偏差和绝对偏差,51.250 和 52.280 GHz 高于 1.0 K,其余通道的都小于 1.0 K。拟合直线的斜率,52.280 和 53.850 GHz 分别为 0.66 和 0.7,其余通道都在 0.8 以上。

$$T_{b_{std}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{bi_{LBL}} - T_{bi_{Radiometer}})^2}{N}} \quad (2)$$

$$T_{b_{bias}} = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{bi_{LBL}} - T_{bi_{Radiometer}})}{N} \quad (3)$$

$$T_{b_{absbias}} = \frac{\sum_{i=1}^N | (T_{bi_{LBL}} - T_{bi_{Radiometer}}) |}{N} \quad (4)$$

4 影响反演精度的因子

4.1 高度

将位于北京南郊的地基微波辐射计与同地点的探空作对比。地基微波辐射计反演大气温度廓线应用神经网络算法,对比探空为历史探空资料。地基微波辐射计反演的温度廓线从地面到 10 km 共 47 层。探空温度插值到相同高度上,求 2 种方法测量温度值的标准差、偏差、绝对偏差,以及作线性拟合得到的直线的斜率和截距。其中探空时间为 08 与 20 时,微波辐射计测量值选取 08:00—08:59 与 20:00—20:59 测量值,并取平均值作为 08 和 20 时的值。

在不同高度,2 种测量方法得到的温度的标准差、偏差、绝对偏差不同(表 3)。

将 2005 年 9 月到 2008 年 8 月 3 a 地基微波辐射计测量的温度廓线与同时同地由探空测量的温度廓线做对比。从表 3 中标准差、绝对偏差以及偏差值(地基微波辐射计减探空)可以分析得出,两种测量技术得到的不同高度上的温度差随高度逐渐增大。其中,绝对偏差最小出现在 0.1 km 高度为 1.2 K,最大出现在 10 km 高度为 4.5 K。由偏差可以看出,100 m 以上探空测量值比微波辐射计测值高,在 4.750 km 高度处相差最大,为 1.8 K。表 3 中同时列出了 2 种方法所测得的温度的线性拟合直

线的斜率与截距。可以看出,地基微波辐射计与探空的温度差值,随高度逐步增大。

4.2 季节

将 3 a 的数据按照春、夏、秋、冬四季划分,分析 2 种测量方法测值的差异在不同季节的表现(表 4、5、6、7)。对于标准差,0—10 km(除 8.50—8.75 km 外),夏季的差异在各个高度都比其他季节低;0—3 km,冬季的差异在各个高度都比其他季节高;3—9 km,秋季的差异在各个高度都比其他季节高。对于绝对偏差值,0—10 km(除 8—9 km 外),夏季的差异在各个高度比其他季节低;0—2.75 km,春季的差异在各个高度比其他季节高;2.75—3 km,冬季比其他季节高;3—9 km,秋季的差异在各个高度都比其他季节高。对于偏差值,2.25—10 km 夏季的值最大;0—1.5 km,春季在各个高度最低;1.5—3.25 km,冬季在各个高度比其他季节低;3.25—9 km,秋季在各个高度比其他季节低。

在 2 种测量方法得到的温度拟合分析中,拟合直线的斜率在 1 km 处按照春、秋、夏、冬的顺序递减;4 km 处按春、冬、夏、秋的顺序递减;10 km 处按夏、秋、春、冬的顺序递减。可见看出,廓线差异在季节变化中复杂多变,但在某些高度处,仍有规律存在。

4.3 晴天与非晴无降水天

按照天气条件,将无云蓝天确定为晴天;在除去晴天及降水天以外的定为非晴无降水天。由此,分析晴天与非晴无降水条件下地基微波辐射计与探空测量温度值的差别(表 8)。对于标准差值,在 4.5 km 以下晴天的值低,4.75—6 km 晴天的值高,6.25—6.75 km 晴天的值低,7.25—10 km 晴天的值低。对于绝对偏差值,0—3.25 km 晴天的值低,3.25—7.25 km 晴天的值高,7.25—10 km 晴天条件的值低。对于偏差值,0—9 km 晴天的值低,9—10 km 晴天的值高。各个高度上探空测量的温度与地基微波辐射计测量的温度的线性拟合直线的斜率,晴天都比非晴无降水天的值高,这与 2 种天气条件所选取的样本有关。

表3 地基微波辐射计与探空测量的
温度廓线在各个高度的对比值

Table 3 The comparison statistics of temperatures in the different height between from the ground-based 12-channel microwave radiometer and from the radiosonde

高度(km)	标准差(K)	偏差(K)	绝对偏差(K)	线性拟合斜率	截距(K)
0.00	2.97	1.59	1.82	0.98	5.29
0.10	1.45	-0.14	1.10	1.00	-0.44
0.20	1.94	-0.60	1.18	0.98	6.59
0.30	2.19	-0.71	1.24	1.24	6.19
0.40	2.17	-0.75	1.30	0.98	5.94
0.50	2.14	-0.75	1.30	0.98	5.90
0.60	2.13	-0.67	1.29	0.98	6.32
0.70	2.82	-0.48	1.36	0.95	13.89
0.80	2.95	-0.47	1.41	0.95	15.22
0.90	3.04	-0.44	1.42	0.94	17.96
1.00	3.21	-0.33	1.42	0.93	20.77
1.25	3.05	-0.15	1.44	0.93	21.02
1.50	2.60	0.22	1.38	0.94	15.30
1.75	2.66	0.18	1.43	0.93	18.32
2.00	2.96	0.17	1.50	0.93	18.87
2.25	3.54	0.13	1.67	0.90	28.37
2.50	3.10	-0.30	1.73	0.91	25.70
2.75	3.93	-0.52	2.00	0.86	38.24
3.00	3.42	-0.85	2.10	0.88	33.50
3.25	3.29	-1.15	2.19	0.89	31.14
3.50	3.30	-1.11	2.20	0.89	30.78
3.75	3.29	-1.25	2.26	0.90	28.81
4.00	3.71	-1.38	2.45	0.89	31.52
4.25	3.99	-1.55	2.62	0.88	32.59
4.50	4.06	-1.72	2.74	0.89	31.45
4.75	3.86	-1.84	2.76	0.90	27.49
5.00	3.91	-1.77	2.76	0.89	29.61
5.25	3.81	-1.66	2.69	0.89	28.84
5.50	3.87	-1.43	2.69	0.88	32.11
5.75	3.77	-1.29	2.64	0.88	32.30
6.00	3.97	-1.38	2.73	0.86	35.05
6.25	4.30	-1.45	2.81	0.85	39.29
6.50	4.36	-1.35	2.86	0.85	38.41
6.75	4.27	-1.19	2.86	0.85	38.41
7.00	4.13	-0.92	2.83	0.86	34.75
7.25	4.32	-0.85	2.91	0.85	37.09
7.50	4.85	-0.90	3.05	0.82	43.21
7.75	4.85	-0.77	3.08	0.83	42.56
8.00	5.00	-0.59	3.17	0.82	43.70
8.25	5.30	-0.51	3.29	0.80	47.65
8.50	5.20	-0.39	3.34	0.81	44.94
8.75	5.11	-0.32	3.38	0.82	42.22
9.00	6.21	-0.42	3.64	0.81	45.58
9.25	8.74	-1.00	4.39	0.76	56.54
9.50	8.93	-0.79	4.47	0.77	53.69
9.75	9.63	-0.84	4.75	0.74	60.40
10.00	9.95	-0.89	4.92	0.71	65.98

表4 四季地基微波辐射计同探空
测量的温度廓线的标准差

Table 4 The standard deviation of the temperatures measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer and the radiosonde for the four seasons

高度(km)	春季(K)	夏季(K)	秋季(K)	冬季(K)
0.00	2.79	3.10	2.03	3.80
0.10	1.50	1.36	1.44	1.49
0.20	1.78	1.52	2.23	2.16
0.30	2.08	1.74	2.42	2.47
0.40	2.19	1.81	2.29	2.34
0.50	2.28	1.80	2.17	2.29
0.60	2.27	1.78	2.08	2.36
0.70	2.48	2.11	3.11	3.43
0.80	2.54	2.16	3.26	3.64
0.90	2.55	2.14	3.42	3.83
1.00	2.60	2.14	3.63	4.12
1.25	2.52	2.15	3.42	3.86
1.50	2.42	1.94	2.78	3.14
1.75	2.43	1.98	2.89	3.20
2.00	2.69	2.08	3.32	3.56
2.25	3.08	2.33	4.18	4.24
2.50	3.06	2.17	3.44	3.54
2.75	3.43	2.50	4.68	4.68
3.00	3.47	2.29	3.90	3.76
3.25	3.32	2.10	3.94	3.46
3.50	3.29	2.07	4.02	3.43
3.75	3.28	2.19	4.10	3.24
4.00	3.47	2.30	4.79	3.79
4.25	3.54	2.41	5.28	4.10
4.50	3.62	2.50	5.47	4.00
4.75	3.72	2.61	5.12	3.42
5.00	3.86	2.56	5.22	3.38
5.25	3.92	2.68	4.97	3.15
5.50	4.02	2.47	5.08	3.28
5.75	3.99	2.44	4.86	3.21
6.00	4.17	2.71	5.06	3.36
6.25	4.37	3.11	5.37	3.89
6.50	4.53	3.12	5.37	3.96
6.75	4.52	3.10	5.25	3.77
7.00	4.50	3.01	5.13	3.37
7.25	4.64	3.35	5.27	3.62
7.50	4.84	3.82	5.92	4.45
7.75	4.87	4.00	5.88	4.32
8.00	5.01	4.32	5.99	4.41
8.25	5.21	4.69	6.29	4.75
8.50	5.19	4.78	6.08	4.50
8.75	5.17	4.89	5.91	4.21
9.00	5.67	5.05	5.96	7.95
9.25	9.97	5.19	6.34	11.89
9.50	10.70	5.24	6.09	11.88
9.75	10.90	5.43	6.61	13.46
10.00	11.50	5.41	6.95	13.75

表5 四季地基微波辐射计同探空
测量的温度廓线的偏差值

Table 5 The bias of the temperatures measured by the
ground-based 12-channel microwave radiometer
and the radiosonde for the four seasons

高度(km)	春(K)	夏(K)	秋(K)	冬(K)
0.00	1.61	2.10	1.21	1.48
0.10	-0.34	-0.08	-0.17	0.05
0.20	-0.82	-0.44	-0.64	-0.46
0.30	-1.08	-0.73	-0.58	-0.40
0.40	-1.20	-0.75	-0.53	-0.48
0.50	-1.23	-0.73	-0.50	-0.51
0.60	-1.16	-0.65	-0.36	-0.46
0.70	-1.02	-0.50	-0.12	-0.25
0.80	-1.00	-0.50	-0.10	-0.22
0.90	-0.92	-0.40	-0.10	-0.30
1.00	-0.76	-0.31	0.47	-0.27
1.25	0.47	0.03	0.21	-0.36
1.50	-0.01	0.42	0.55	-0.10
1.75	0.71	0.52	0.36	-0.34
2.00	0.11	0.35	0.41	-0.19
2.25	-0.04	0.49	0.34	-0.27
2.50	-0.40	0.32	-0.29	-0.83
2.75	-0.69	0.16	-0.57	-0.96
3.00	-0.92	0.04	-1.06	-1.44
3.25	-1.08	-0.23	-1.59	-1.72
3.50	-0.94	-0.24	-1.69	-1.58
3.75	-1.00	-0.38	-2.01	-1.59
4.00	-1.11	-0.67	-2.25	-1.49
4.25	-1.21	-0.95	-2.52	-1.49
4.50	-1.33	-1.09	-2.82	-1.60
4.75	-1.42	-1.03	-3.07	-1.80
5.00	-1.33	-0.80	-3.09	-1.80
5.25	-1.16	-0.58	-3.05	-1.79
5.50	-0.92	-0.20	-2.84	-1.74
5.75	-0.74	0.06	-2.68	-1.78
6.00	-0.85	0.20	-2.82	-2.01
6.25	-0.83	0.18	-2.93	-2.21
6.50	-0.74	0.44	-2.84	-2.26
6.75	-0.59	0.65	-2.70	-2.11
7.00	-0.31	0.86	-2.42	-1.78
7.25	-0.15	1.04	-2.47	-1.81
7.50	-0.14	1.01	-2.67	1.89
7.75	0.00	1.28	-2.58	-1.76
8.00	0.24	1.46	-2.47	-1.59
8.25	0.35	1.66	-2.47	-1.55
8.50	0.49	1.75	-2.37	-1.43
8.75	0.60	1.77	-2.31	-1.32
9.00	0.63	1.83	-2.33	-1.86
9.25	-0.57	1.85	-2.29	-3.05
9.50	-0.47	1.87	-1.84	-2.63
9.75	-0.25	1.92	-1.84	-3.26
10.00	-0.37	1.75	-1.77	-3.23

表6 四季地基微波辐射计同探空
测量的温度廓线的绝对偏差值

Table 6 The absolute bias of the temperatures
measured by the ground-based 12-channel microwave
radiometer and the radiosonde for the four seasons

高度(km)	春季(K)	夏季(K)	秋季(K)	冬季(K)
0.00	1.94	2.33	1.41	1.61
0.10	1.21	1.03	1.12	1.06
0.20	1.30	0.97	1.32	1.12
0.30	1.45	1.09	1.26	1.14
0.40	1.57	1.14	1.22	1.15
0.50	1.65	1.16	1.20	1.17
0.60	1.63	1.17	1.13	1.19
0.70	1.62	1.21	1.26	1.35
0.80	1.66	1.27	1.32	1.36
0.90	1.66	1.27	1.35	1.40
1.00	1.59	1.28	1.37	1.44
1.25	1.52	1.36	1.41	1.44
1.50	1.45	1.33	1.45	1.29
1.75	1.48	1.33	1.49	1.44
2.00	1.61	1.39	1.50	1.52
2.25	1.79	1.51	1.64	1.71
2.50	1.94	1.50	1.66	1.83
2.75	2.15	1.54	2.10	2.21
3.00	2.28	1.51	2.24	2.34
3.25	2.32	1.47	2.53	2.42
3.50	2.32	1.43	2.70	2.41
3.75	2.24	1.50	2.88	2.38
4.00	2.36	1.61	3.24	2.57
4.25	2.44	1.75	3.55	2.70
4.50	2.55	1.83	3.78	2.75
4.75	2.64	1.87	3.80	2.66
5.00	2.68	1.82	3.83	2.61
5.25	2.67	1.79	3.73	2.50
5.50	2.67	1.71	3.71	2.57
5.75	2.62	1.68	3.61	2.55
6.00	2.70	1.77	3.72	2.66
6.25	2.78	1.83	3.77	2.81
6.50	2.84	1.88	3.78	2.87
6.75	2.85	1.96	3.76	2.78
7.00	2.85	2.07	3.74	2.56
7.25	2.91	2.25	3.79	2.63
7.50	2.98	2.41	3.97	2.76
7.75	3.01	2.57	3.97	2.69
8.00	3.13	2.80	4.01	2.66
8.25	3.26	3.01	4.12	2.70
8.50	3.34	3.16	4.09	2.69
8.75	3.39	3.27	4.10	2.68
9.00	3.49	3.41	4.18	3.47
9.25	4.81	3.52	4.29	4.93
9.50	5.13	3.61	4.44	4.87
9.75	5.30	3.73	4.44	5.55
10.00	5.49	3.71	4.65	5.83

表7 四季地基微波辐射计同探空测量的温度廓线在各个高度上线性拟合直线的斜率和截距
 Table 7 The slope and the intercept of the linearly fitting line between the temperatures measured by the ground-based 12-channel microwave radiometer and the radiosonde for the four seasons

高度 (km)	斜率				截距			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
0.00	0.98	0.78	1.00	0.89	2.76	63.43	-1.98	29.21
0.10	0.99	1.09	1.00	0.92	2.71	-27.51	0.61	20.80
0.20	0.95	1.00	0.94	0.80	14.71	-0.09	16.89	55.14
0.30	0.95	0.92	0.94	0.74	14.93	23.19	17.97	69.81
0.40	0.96	0.88	0.95	0.77	12.97	34.94	14.45	62.01
0.50	0.96	0.86	0.96	0.79	12.51	41.23	12.38	57.39
0.60	0.96	0.85	0.96	0.78	12.10	45.34	11.93	59.11
0.70	0.94	0.73	0.88	0.63	19.13	79.96	33.69	99.97
0.80	0.93	0.70	0.87	0.61	19.82	88.22	38.14	104.57
0.90	0.92	0.69	0.85	0.60	22.07	90.43	43.63	108.21
1.00	0.91	0.69	0.83	0.57	25.18	91.31	49.57	116.58
1.25	0.91	0.71	0.84	0.62	25.63	83.29	45.98	100.40
1.50	0.93	0.84	0.90	0.73	20.78	47.29	28.42	70.41
1.75	0.92	0.84	0.87	0.73	22.25	37.33	35.57	70.70
2.00	0.91	0.83	0.85	0.68	23.42	47.89	41.46	84.92
2.25	0.88	0.72	0.76	0.59	34.04	78.63	64.96	108.62
2.50	0.87	0.80	0.82	0.70	35.56	57.81	50.97	78.36
2.75	0.83	0.62	0.69	0.55	46.55	106.68	84.32	118.29
3.00	0.82	0.68	0.76	0.70	49.54	90.33	66.57	77.53
3.25	0.83	0.75	0.76	0.79	45.96	69.15	66.46	54.26
3.50	0.83	0.75	0.75	0.79	46.8	69.73	68.39	54.66
3.75	0.83	0.72	0.75	0.85	45.86	77.78	67.10	38.33
4.00	0.81	0.72	0.70	0.73	49.98	77.14	80.68	67.08
4.25	0.81	0.72	0.68	0.68	51.26	75.32	87.51	81.15
4.50	0.80	0.75	0.68	0.72	52.45	69.71	87.28	71.72
4.75	0.79	0.72	0.73	0.91	54.00	76.65	71.15	25.00
5.00	0.77	0.73	0.73	0.91	59.26	74.63	72.08	22.16
5.25	0.76	0.69	0.77	1.03	61.00	84.78	62.90	-5.27
5.50	0.75	0.73	0.74	0.95	65.01	69.93	67.63	14.59
5.75	0.75	0.75	0.76	0.98	64.34	66.76	62.29	6.70
6.00	0.75	0.70	0.75	0.98	62.66	78.31	65.50	7.53
6.25	0.74	0.63	0.72	0.80	65.48	96.06	72.06	49.72
6.50	0.74	0.67	0.72	0.77	64.73	85.87	71.60	56.64
6.75	0.75	0.72	0.74	0.80	62.03	72.46	66.42	49.58
7.00	0.76	0.80	0.76	0.89	59.07	49.72	60.57	27.46
7.25	0.75	0.76	0.76	0.76	60.74	61.51	61.31	58.15
7.50	0.73	0.68	0.71	0.43	63.97	79.77	72.67	131.88
7.75	0.74	0.69	0.71	0.40	62.63	78.32	70.22	137.47
8.00	0.73	0.69	0.70	0.32	64.45	78.17	72.59	155.36
8.25	0.71	0.65	0.68	0.21	68.07	86.86	78.50	178.25
8.50	0.72	0.68	0.70	0.20	65.10	78.60	72.50	179.85
8.75	0.72	0.70	0.72	0.20	62.92	73.78	66.70	179.41
9.00	0.71	0.70	0.73	0.14	66.37	71.69	64.25	191.59
9.25	0.54	0.71	0.74	0.32	104.47	69.26	62.59	152.89
9.50	0.47	0.76	0.77	0.46	121.51	57.07	54.84	120.41
9.75	0.40	0.76	0.77	0.21	136.00	55.89	54.84	176.17
10.00	0.30	0.81	0.70	0.05	156.26	42.86	68.40	211.24

表8 晴天与非晴无降水天的地基微波辐射计同探空测量的温度廓线对比结果

Table 8 The temperature comparisons between from the ground-based 12-channel microwave radiometer and from the radiosonde in the sunny days and in the days which are not sunny without rainfall

高度 (km)	标准差(K)		偏差(K)		绝对偏差(K)		斜率(K)		截距(K)	
	晴天	阴无雨	晴天	阴无雨	晴天	阴无雨	晴天	阴无雨	晴天	阴无雨
0.00	2.29	1.33	1.54	1.33	1.54	1.58	0.98	1.01	4.93	-4.91
0.10	1.35	-0.23	1.08	-0.23	1.08	1.18	1.01	1.01	-1.29	-3.86
0.20	1.43	-0.42	1.17	-0.42	1.17	1.47	0.93	1.01	18.24	2.02
0.30	1.4	-0.45	1.15	-0.45	1.15	1.59	0.91	1.00	25.16	1.59
0.40	1.42	-0.53	1.16	-0.53	1.16	1.64	0.92	0.99	22.10	2.64
0.50	1.43	-0.59	1.14	-0.59	1.14	1.69	0.92	0.99	21.70	2.76
0.60	1.39	-0.55	1.09	-0.55	1.09	1.70	0.92	0.99	22.54	3.62
0.70	1.37	-0.23	1.06	-0.23	1.06	1.94	0.81	0.99	52.88	4.55
0.80	1.41	-0.21	1.09	-0.21	1.09	1.98	0.79	0.99	57.95	4.82
0.90	1.45	-0.17	1.11	-0.17	1.11	2.00	0.77	0.98	63.88	6.63
1.00	1.45	-0.04	1.10	-0.04	1.10	2.00	0.74	0.97	72.63	8.15
1.25	1.55	-0.05	1.14	-0.05	1.14	1.88	0.77	0.96	64.86	11.65
1.50	1.68	0.16	1.23	0.16	1.23	1.60	0.85	0.95	41.23	12.85
1.75	1.69	0.10	1.23	0.10	1.23	1.72	0.83	0.95	46.56	14.13
2.00	1.66	0.30	1.22	0.30	1.22	1.89	0.79	0.95	56.06	12.50
2.25	1.72	0.31	1.28	0.31	1.28	2.14	0.70	0.95	80.62	14.18
2.50	2.00	-0.29	1.50	-0.29	1.50	2.04	0.80	0.94	54.80	16.07
2.75	2.35	-0.23	1.77	-0.23	1.77	2.46	0.65	0.94	93.81	17.60
3.00	2.72	-0.67	2.10	-0.67	2.10	2.32	0.78	0.93	60.02	20.22
3.25	3.05	-0.97	2.39	-0.97	2.39	2.29	0.83	0.93	46.58	20.23
3.50	3.15	-0.87	2.45	-0.87	2.45	2.25	0.84	0.93	42.81	19.59
3.75	3.37	-1.01	2.59	-1.01	2.59	2.17	0.89	0.93	30.52	19.38
4.00	3.65	-0.95	2.81	-0.95	2.81	2.47	0.79	0.94	56.13	17.78
4.25	3.89	-1.01	3.00	-1.01	3.00	2.67	0.74	0.95	68.47	15.66
4.50	4.09	-1.26	3.14	-1.26	3.14	2.77	0.77	0.95	61.41	14.91
4.75	4.17	-1.64	3.20	-1.64	3.20	2.61	0.93	0.95	19.16	14.82
5.00	4.18	-1.63	3.17	-1.63	3.17	2.56	0.93	0.95	18.44	15.92
5.25	4.05	-1.69	3.07	-1.69	3.07	2.39	1.02	0.95	-3.38	14.77
5.50	4.02	-1.46	3.02	-1.46	3.02	2.48	0.96	0.94	12.65	17.60
5.75	3.87	-1.40	2.92	-1.40	2.92	2.42	0.98	0.93	7.48	0.93
6.00	3.90	-1.65	2.96	-1.65	2.96	2.55	0.96	0.93	12.13	20.03
6.25	3.90	-1.89	2.96	-1.89	2.96	2.69	0.88	0.93	31.62	19.40
6.50	3.90	1.82	2.94	1.82	2.94	2.72	0.87	0.92	33.51	20.95
6.75	3.85	-1.65	2.87	-1.65	2.87	2.68	0.90	0.93	25.76	20.31
7.00	3.74	-1.27	2.77	-1.27	2.77	2.61	0.93	0.93	17.49	17.79
7.25	3.72	1.34	2.75	1.34	2.75	2.74	0.90	0.94	24.64	17.05
7.50	3.74	-1.60	2.74	-1.60	2.74	3.04	0.76	0.94	59.35	16.01
7.75	3.78	-1.43	2.73	-1.43	2.73	3.02	0.77	0.94	55.18	16.64
8.00	3.81	-1.25	2.74	-1.25	2.74	3.14	0.74	0.93	62.24	17.59
8.25	3.86	-1.25	2.78	-1.25	2.78	3.30	0.67	0.93	78.24	18.24
8.50	3.88	-1.04	2.81	-1.04	2.81	3.28	0.70	0.93	69.25	17.25
8.75	3.93	-0.90	2.87	-0.90	2.87	3.25	0.75	0.94	57.93	16.09
9.00	5.34	-0.88	2.87	-0.88	2.87	3.39	0.75	0.92	57.93	18.69
9.25	7.32	-2.48	3.61	-2.48	3.61	5.07	0.66	0.90	79.42	23.91
9.50	7.69	-1.99	3.75	-1.99	3.75	4.99	0.75	0.90	57.77	23.40
9.75	9.13	-1.90	4.23	-1.90	4.23	5.22	0.69	0.86	70.09	33.36
10.00	9.34	-1.89	4.41	-1.89	4.41	5.60	0.47	0.84	119.79	37.12

5 结论与讨论

温度廓线精度的提高有利于前向辐射模式大气吸收或者散射谱的精确计算。地基微波辐射计使用氧气吸收频段 60 GHz 附近的 7 个通道测量大气温度的廓线分布,首先将仪器接收的辐射电压值标定为亮温,然后使用神经网络得到温度廓线。对 2006 年 9 月 22 个晴天条件下,由仪器测量的亮温与由微波辐射传输模式计算得到的亮温对比分析。51.250 GHz 的测量值与计算值的标准差最大(3.8 K),其余通道均小于 1.8 K。2 种亮温的偏差以及绝对偏差,在 51.250 和 52.280 GHz 大于 1.0 K,在其余 5 个通道处都小于 1.0 K。两种亮温拟合直线的斜率,52.280 和 53.850 GHz 分别为 0.66 和 0.7,其余通道都大于 0.8。

将 2005 年 9 月—2008 年 8 月 3 a 地基微波辐射计测量的温度廓线与同时同地由探空测量的温度廓线进行对比,结果显示,2 种测量技术得到的不同高度上的温度差随高度逐渐增大,其中绝对偏差最小出现在 0.1 km 高度处,为 1.2 K,最大出现在 10 km 高度处,为 4.5 K。

将 3 a 的数据按照春、夏、秋、冬四季划分,分析 2 种测量技术的差异在不同季节的表现。对于绝对偏差值,0—10 km(除 8—9 km 外),夏季的差异在各个高度比其他季节低;0—2.75 km,春季的差异在各个高度比其他季节高;2.75—3 km,冬季比其他季节高;3—9 km,秋季的差异在各个高度都比其他季节高。

在晴天与非晴无降水条件下地基微波辐射计与探空测量温度值的差别明显。对于绝对偏差,0—3.25 km 晴天条件下的值低;3.25—7.25 km 晴天的值高;7.25—10 km 晴天下的值低。拟合直线的斜率晴天都比非晴无降水天条件下的值高,这与 2 种天气条件所选取的样本有关。

由亮温反演得到大气温度的垂直分布是非常有意义的工作,但也是非常困难的工作。一方面能够直接测量大气垂直分布的探空由于高空漂移的问题,无法提供理想的历史参考数据;另一方面,各种

反演统计算法的能力也是制约测量温度廓线精度的原因之一。本文通过大量数据的对比分析,确定各个高度微波辐射计测量的温度与探空测值的差异,并对不同季节、晴天与非晴无降水天条件等做了分析,为将来进一步提高地基微波辐射计反演大气温度廓线精度的算法提供一些参考性依据。

致谢: Hewison 博士和美国麻省理工大学 Rosenkranz 教授为作者提供了 line-by-line(LBL)微波辐射传输模式,在此表示感谢!

参考文献

- 高文华,赵凤生,盖长松. 2006. 大气红外探测器(AIRS)温、湿度反演产品的有效性检验及在数值模式中的应用研究. 气象学报, 64(4):513-519
- 刘辉,董超华,张文建等. 2008. AIRS 晴空大气温度廓线反演试验. 气象学报, 66(4):513-519
- 魏重. 1995. 三波段地基微波辐射计联合遥感雨云大气参数的方法. 大气科学, 19(1):21-30
- 薛永康,黄润恒,周秀骥. 1983. 地对空微波遥感水汽垂直廓线的方法. 大气科学, 7(2):115-124
- Han Y, Westwater E. 2000. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 38: 1260-1276
- Hewison. 2006. Profiling Temperature and Humidity by Ground-based Microwave Radiometers[D]. University of Reading
- Hewison. 2006. Aircraft validation of clear air absorption models at millimeter wavelengths (89–183 GHz). J Geophys Res, 111: D14303, doi:10.1029/2005JD006719
- Revercomb H E, Turner D C, Tobin D D, et al. 2003. The atmospheric radiation measurement (ARM) program's water vapor intensive operational periods: Overview, accomplishments, and future challenges. Bull Amer Meteor Soc, 84: 217-236
- Ruffieux D, Nash J, Jeannet, et al. 2006. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign: TUC. Meteorologische Zeitschrift, 1: 5-10
- Westwater E, Han Y, Irisov V, et al. 1999. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments. J Atmos Oceanic Technol, 16: 805-818
- Westwater E, 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, Settembre