

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.

# 地基微波辐射计工作环境对 K 波段亮温观测影响

王振会<sup>1)2)</sup>\* 李青<sup>1)2)</sup> 楚艳丽<sup>3)</sup> 朱雅毓<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(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中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室,南京 210044)

<sup>2)</sup>(南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044)

<sup>3)</sup>(中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089)

## 摘 要

该文研究地基微波辐射计天线性能及其工作环境对 K 波段 20~30 GHz 亮温观测数据的影响,根据辐射传输理论和天线性能参数分析建立模型,通过模拟计算给出辐射计 20~30 GHz 波段亮温观测对天线性能及其工作环境的响应,提出针对工作环境温度变化影响的订正方案,并结合观测资料进行分析验证。结果表明:如果辐射计天线增益和 3 dB 波束宽度决定的等效主波束效率  $\eta_0$  较低,则即使在能够经常进行辐射计系统液氮定标的情况下也必须考虑天线工作环境(环境温度与辐射计定标时的情景差异)对 K 波段亮温观测的影响。对某一辐射计液氮定标后 1 年多观测资料的订正验证表明:订正效果明显,尤其是在 28.0 GHz 和 30.0 GHz 两通道。

**关键词:** 地基微波辐射计; K 波段亮温观测订正; 天线性能; 工作环境

## 引 言

地基微波辐射计是应用遥感技术进行大气状态观测的仪器<sup>[1-3]</sup>,可以连续工作,典型设置的时间分辨率为 1 s,极大地弥补了常规探空资料观测时间分辨率低的缺点,尤其是能满足对边界层大气温湿垂直分布廓线以及云、降水进行连续监测的需要,因而备受关注<sup>[4-10]</sup>。最近 Wang 等<sup>[11]</sup>研究了地基微波辐射计对闪电引起的高温气柱的响应,提出利用微波辐射计观测闪电特性的可能性。

由辐射计的一级数据可以得到亮度温度(简称亮温),代表辐射计在指定的频率处接收到的电磁波强度,属于非常规观测资料,需要经过对亮温的反演计算才能获得大气温湿垂直分布廓线以及云与降水信息等二级数据<sup>[12-15]</sup>,所以,对微波辐射计亮温数据要进行严格的质量控制,为后续的直接同化和大气

温湿廓线反演等能够使用更为可靠的亮温数据提供保障,使其更好地在气象分析、灾害性天气监测和预警等工作中发挥作用。

微波辐射计亮温数据质量控制方法,可以参考使用气象仪器常规观测常用的统计特征阈值法<sup>[16]</sup>①。基于亮温和辐射传输方程模拟亮温一致性分析的质量控制方法,已在星载微波辐射计观测数据质量控制中成功使用,如 Lu 等<sup>[17]</sup>将 FY-3 星载微波温度计观测亮温与基于欧洲中尺度天气预报中心模式的模拟亮温对比,发现仪器个别通道的频率漂移问题并提出订正方案;Goldberg 等<sup>[18]</sup>通过比较美国 NOAA 星载 AMSU-A 的观测亮温和模拟亮温,发现二者差异存在非对称性,而后 Weng 等<sup>[19]</sup>认为非对称性的原因可能是星载天线指向偏移或者其偏振方向位移。Weng 等<sup>[20]</sup>对星载微波辐射计 ATMS 的结构和天线性能对亮温测量的影响进行了系统推导和计算,结果给出了天线旁瓣对 ATMS

2014-04-06 收到,2014-09-10 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(41275043,41005005),城市气象科学研究基金项目(IUMKY&UMRF201101),江苏省研究生创新项目(CXLX12-0499)

\* email: eiap@nuist.edu.cn

①朱雅毓,王振会,楚艳丽,等.地基微波辐射计亮温观测数据的综合质量控制与效果分析.气象科学,待发表。

亮温测量数据影响和订正模型。因此,王振会等<sup>[21]</sup>、敖雪等<sup>[22]</sup>提出利用晴天每日 08:00(北京时,下同)的观测资料和大气辐射传输理论计算,判断微波辐射计观测期间的工作状态,并分析辐射计可能存在的性能漂移。李青等<sup>②</sup>对观测亮温进行统计一致性分析和订正实验,发现在所取的两年亮温数据序列中有两个不连续点,经证实分别与辐射计定标和搬家对应,因此提出亮温观测数据分段订正方案。该方案在 50~60 GHz 波段既提高了遥感观测信息的全样本一致性,又提高了观测亮温与正演计算的一致性,而在 20~30 GHz 波段,虽有改善,但不明显,尤其是通道 7(28 GHz)和通道 8(30 GHz)订正几乎无意义。该文推断的主要原因是辐射计天线性能及其工作环境对该波段观测亮温有影响,但一时难以估计。陈向东等<sup>[23]</sup>曾对天线增益为 27.08 dB、主波束宽度为 10° 的 8 mm 波段地基辐射计进行研究,认为旁瓣影响很微弱,该天线主波束效率达 0.96。目前常见的辐射计性能标称值中天线增益更高、3 dB 波束宽度更窄,但对旁瓣的影响研究较少。

本文在李青等<sup>②</sup>研究工作的基础上,探讨地基微波辐射计天线性能及其工作环境对 K 波段 20~30 GHz 波段观测亮温的影响,根据辐射传输理论和天线性能参数分析建立亮温订正模型,通过模拟计算给出辐射计 20~30 GHz 波段观测亮温对天线性能及其工作环境的响应,提出针对工作环境温度变化影响的订正方案,并结合实际观测资料进行验证。

## 1 理论分析

根据文献[12-13],指向天顶的辐射计观测得到的下行亮温可以用地基遥感大气辐射传输方程表示为

$$T_B(0) = T_B(\infty)\tau(0, \infty) + \int_0^{\infty} k_a(z)T(z)\tau(0, z)dz. \quad (1)$$

其中,  $\tau(0, z) = \exp\{-\int_0^z k_a(z')dz'\}$  是从高度  $z$  处到地基微波辐射计天线 ( $z=0$ ) 处大气层的透过率,  $\tau(0, \infty)$  是整层大气  $z=\infty$  的透过率,  $T_B(\infty)$  为宇宙背景的辐射亮温(本文计算取 2.9 K);  $T(z)$  是大

气温度层结;  $k_a(z)$  是大气的体积吸收系数,在晴空无云条件下为氧气和水汽吸收系数之和,主要依赖于辐射传输路径上的大气温度的、压力、湿度和频率,在云雨天气,忽略云雨散射,  $k_a(z)$  包含云、雨滴群的吸收。

按式(1)模拟计算出的亮温仅是辐射计天线处的大气下行亮温。指向天顶的辐射计天线实际接收到的功率用天线温度  $T_A$  表示<sup>[13, 24]</sup>, 由天线的功率方向性函数  $F(\theta, \varphi)$  和来自各方向的亮温  $T_B(\theta, \varphi)$  决定。来自天顶方向的亮温,即  $\theta=0^\circ$  处的  $T_B(\theta, \varphi)$ , 即式(1)给出的大气下行亮温  $T_B(0)$ 。

为了估算天线工作环境对亮温观测的影响,定义旁瓣参数

$$\gamma = \frac{1}{\Omega_s} \int_{\Omega_s} F(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (2)$$

以便将  $F(\theta, \varphi)$  等效表示为

$$F(\theta, \varphi) = \begin{cases} 1, & \text{在 } \Omega_m \text{ 内;} \\ \gamma, & \text{在 } \Omega_s \text{ 内(即在 } \Omega_m \text{ 外)。} \end{cases} \quad (3)$$

如图 1 所示。式(2)和式(3)中,  $\Omega_m$  为天线主瓣 3 dB 波束立体角,由平面角  $\alpha$  确定;  $\Omega_m$  外为旁瓣立体角,记为  $\Omega_s = 4\pi - \Omega_m$ 。

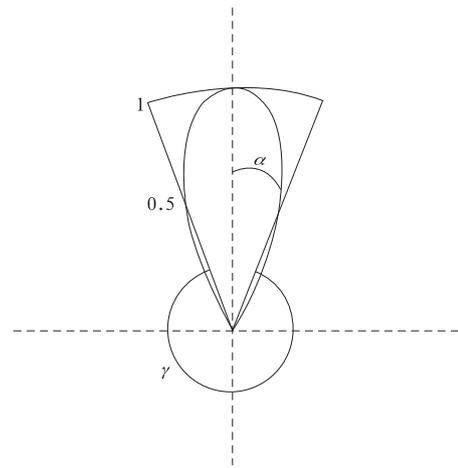


图 1 辐射计天线方向性函数等效示意图

Fig. 1 Schematic of radiometer antenna directivity function

旁瓣参数  $\gamma$  和旁瓣电平平均表征天线旁瓣特征,但旁瓣电平为区间值<sup>[25-26]</sup>,而  $\gamma$  只是 1 个值。

假设  $T_B(\theta, \varphi)$  在上半球各向同性为  $T_B(0)$  (简记为  $T_B$ , 属于大气辐射)、下半球各向同性为  $T_S$  (属

②李青,胡方超,楚艳丽,等. 北京一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, 待发表.

于工作环境辐射),并考虑到天线反射体是放在上半球开窗式屏蔽罩内,则可推导得到天线温度为

$$T_A = \frac{[T_B(1 - \cos\alpha) + T_B\gamma\beta\cos\alpha + T_S\gamma(1 - \beta)\cos\alpha + T_S\gamma]}{[(1 - \cos\alpha) + \gamma\cos\alpha + \gamma]}, \quad (4)$$

其中,

$$\beta = \frac{\Omega_w - \Omega_m}{2\pi - \Omega_m}, \quad (5)$$

代表屏蔽罩上窗口的有效大小,  $0 \leq \beta \leq 1$ , 且在不同波长有差异, 其中,  $\Omega_w$  为天线罩开窗立体角,  $\Omega_m$  为 3 dB 主波束立体角。

由式(4)并参照天线增益和主波束效率的定义<sup>[23, 27-29]</sup>, 可得天线增益

$$G = 2/[(1 - \cos\alpha) + \gamma(\cos\alpha + 1)], \quad (6)$$

以及等效主波束效率

$$\eta_e = (1 - \cos\alpha)/[(1 - \cos\alpha) + \gamma(\cos\alpha + 1)], \quad (7)$$

并得  $G$ ,  $\eta_e$  之间的关系为

$$\eta_e = (1 - \cos\alpha)G/2. \quad (8)$$

式(8)表明,  $\eta_e$  与  $G$  成正比, 但随  $\alpha$  减小而减小。这里,  $\eta_e$  为等效主波束效率, 由 3 dB 点定义, 不同于文献中的 0-0 点主波束效率。

由式(4)分析  $T_B$  和  $T_S$  对  $T_A$  的贡献权重比例, 并考虑到  $\alpha$  很小, 可以得到

$$T_A = \{T_B[\beta + (2 - \beta)\eta_e] + T_S(2 - \beta)(1 - \eta_e)\}/2. \quad (9)$$

理想的天线  $\gamma=0$ ,  $\eta_e=1$ , 总有  $T_A=T_B$ , 与工作环境无关。而实际中,  $T_A$  与  $T_B$  的关系如式(9)所示, 受环境亮温变化影响。

辐射计标定给出将  $T_A$  转换为  $T_B$  所需要的关系式

$$T_B = aT_A + b, \quad (10)$$

其中,  $a$  和  $b$  为标定系数。对比式(9)与式(10), 显然在理论上

$$a = 2/[\beta + (2 - \beta)\eta_e], \quad (11)$$

$$b = -T_S(2 - \beta)(1 - \eta_e)/[\beta + (2 - \beta)\eta_e]. \quad (12)$$

其中,  $a$  是仪器常数, 但系数  $b$  不是常数。如果将  $b$  作为常数, 则导致由定标得到的  $T_B$  因为  $T_S$  增大(减小)而减小(增大), 所以, 要考虑环境亮温变化对观测值的影响。将按照定标关系式(10)得到的  $T_B$  记为  $T_{BM}$ (即  $T_B$  的辐射计观测值), 记  $b_0$  为定标情景下的标定系数, 据式(10)有

$$T_{BM} = aT_A + b_0,$$

从而

$$T_B = T_{BM} + \delta T_B, \quad (13)$$

$$\delta T_B = \Delta T_S(2 - \beta)(1 - \eta_e)/[\beta + (2 - \beta)\eta_e]. \quad (14)$$

其中,  $\delta T_B$  为工作环境亮温订正量,  $\Delta T_S$  为工作环境变化引起的  $T_S$  变化量。

工作环境变化最明显的原因是地表温度的变化(含日变化和季节变化)。地表温度  $T_g$  在 1 年内的变化  $\Delta T_g$  可达几十 K。辐射计安装场地调整、下雨引起地表积水等, 也会带来地表比辐射率变化。据文献<sup>[30]</sup>, 草地比辐射率约为 0.94, 裸土地比辐射率约为 0.86, 沙地比辐射率约为 0.82, 水面比辐射率最小, 约为 0.4。可见地表比辐射率的变化  $\Delta\epsilon$  也会达几到十几甚至几十个百分点。根据 Westwater 等<sup>[12]</sup>,  $T_S \approx \epsilon T_g$ , 可得

$$\Delta T_S = \epsilon T_g + T_g \Delta\epsilon. \quad (15)$$

由式(14)可知,  $\delta T_B$  与  $\Delta T_S$  成正比, 且  $\beta$  和  $\eta_e$  越小,  $\delta T_B$  越大。当天线反射面完全无罩, 即  $\beta=1$  时,  $\delta T_B = \Delta T_S(1 - \eta_e)/(1 + \eta_e)$ 。当天线罩窗口恰为 3 dB 主波束大小, 即  $\beta=0$  时,  $\delta T_B = \Delta T_S(1 - \eta_e)/\eta_e$ 。可见, 抑制工作环境亮温变化影响的最有效方式是通过增大  $\alpha$  和减小  $\gamma$  来增大  $\eta_e$ 。由于增大  $\alpha$  将导致降低空间分辨率, 因此, 只能减小  $\gamma$ 。

## 2 数值计算

### 2.1 气象探测实验中常用的辐射计天线的性能

两类典型辐射计在 K 波段的天线性能, 如表 1 第 1 行至第 3 行给出。取图 1 中  $\alpha$  为表 1 中  $W_{HPB}$  (半功率波束频宽)的一半(即  $\alpha = 0.5W_{HPB}$ ),  $\gamma = X_{max}$  即旁瓣电平  $X$  的最大值, 由式(7)计算得到  $\eta_e$  见表 1 第 6 行。可见, 大部分波段的  $\eta_e$  都较小。若  $\gamma$  和  $\eta_e$  由厂家提供的  $G$  和  $\alpha$  决定, 由式(7)和式(8)得  $\gamma$  和  $\eta_e$  见表 1 第 7 行和第 8 行, 可见各通道的  $\eta_e$  也都不高。参考叶云裳等<sup>[29]</sup>对主波束效率大于 90%的需求, 取  $\eta_e > 90\%$ , 则对应的  $\gamma$  要在  $-40 \sim 50$  dB 范围内(见表 1 中第 9 行)或者  $\alpha$  要比表 1 中第 4 行的数值大(见表 1 中第 10 行)。

综合表 1 和第 1 章可知: ①即使是  $\alpha = 3.1^\circ$  的天线,  $\eta_e > 90\%$  对应  $\gamma < -40.8$  dB。显然, 这对天线旁瓣提出了很高的要求。适当增大  $\alpha$  可以降低对  $\gamma$  的要求, 但这降低了空间分辨率。②对于  $\alpha = 3.1^\circ$ ,

$G=30$  dB的天线,旁瓣参数 $\gamma=-35.7$  dB, $\eta_e$ 也只有73.17%,如果进一步考虑口径、形面偏差、遮挡等因素的影响<sup>[28-29]</sup>, $\eta_e$ 会进一步减小。以 $\epsilon=0.85$ , $\Delta\epsilon=0.05$ , $T_g=280$  K, $\Delta T_g=10$  K(典型的中纬度地区地表昼夜温差和季节温差)和 $\eta_e=90\%$ 为参照,代入式(14)、式(15),可得 $\Delta T_s=22.5$  K, $\delta T_B=$

1.2 K(取 $\beta=1$ )和2.5 K(取 $\beta=0$ )。若 $\eta_e=70\%$ , $\delta T_B$ 为4.0 K(取 $\beta=1$ )和9.6 K(取 $\beta=0$ )。而微波辐射计的亮温灵敏度标称值通常小于0.2 K(积分时间为1 s)。所以,天线工作环境可能会对辐射计亮温观测带来不可忽略的干扰。

表1 两类典型辐射计的K波段天线性能与分析

Table 1 Antenna performance and analysis for two typical types of K-band radiometers

行号	条件	参数	A类辐射计		B类辐射计	
			22~31 GHz	22 GHz	30 GHz	
1	厂家提供	$G/\text{dB}$	33.2	30	32	
2		$X/\text{dB}$	$<-30$	$<-23$	$<-24$	
3		$W_{\text{HPB}}/(\text{°})$	3.3~3.5	6.3	4.9	
4	取 $\alpha=0.5W_{\text{HPB}}$	$\alpha/(\text{°})$	1.7	3.1	2.5	
5	$\gamma=X_{\text{max}}$	$\gamma/\text{dB}$	-30.0	-23.0	-24.0	
6		$\eta_e/\%$	18.04	13.13	10.64	
7	$\gamma$ 由 $G$ 和 $\alpha$ 决定	$\gamma/\text{dB}$	-35.9	-35.7	-38.1	
8		$\eta_e/\%$	45.98	73.17	75.42	
9	由需求 $\eta_e=90\%$ 决定	$\gamma/\text{dB}$	-46.2	-40.8	-42.8	
10		$\alpha/(\text{°})$	2.38	3.44	2.73	

## 2.2 基于 $T_B$ 模拟数据的环境亮温变化影响

针对表1中B类辐射计K波段的4个代表性通道的频率,按照表1第8行中B类辐射计在2个频率处的 $\eta_e$ 值内插到4个频率处(得到 $\eta_e$ 在73%~75%范围内); $T_B$ 用式(1)正演计算,即 $T_B(0)$ 。计算条件同文献[31],即美国1962年标准大气(海平面高度处大气温度和水汽密度分别为290 K和7.5 g/m<sup>3</sup>)、云天(取云层处于900~1880 m高度之间、云中液水含量为中等数值0.3 g/m<sup>3</sup>)、雨天(取雨滴位于云底之下、高度0~900 m之间,雨强4 mm/h,忽略云雨区散射)。  $T_B$ 计算结果见表2第1行到第3行。这些 $T_B$ 值与文献[31]的图示结果基本相同。晴空 $T_B$ 在22~25 GHz水汽波段一般比较大,而在26~30 GHz大气窗区一般比较小。在云天尤其是云含水量较大甚至雨天情况下各通道 $T_B$ 都会比较大,尤其是26~30 GHz大气窗波段云降水天气的 $T_B$ 明显大于晴空时的 $T_B$ 。

将 $T_B$ 代入式(9),并以 $T_s=238$  K( $\epsilon=0.85$ , $T_g=280$  K)为参照,得到 $T_A$ ,见表2第4行到第6行。可见,238 K的环境亮温使K波段 $T_A>T_B$ 。如前所述, $T_A$ 与 $T_B$ 之差值在晴天时较大,在云天时较小,在雨天时更小。

取 $\Delta T_s=22.5$  K( $\Delta\epsilon=0.05$ , $\Delta T_g=10$  K),按照表2中的 $\eta_e$ ,由式(14)计算 $\delta T_B$ 如表2第7行,可见各通道受干扰 $\delta T_B$ 在3.2~3.5 K之间(取 $\beta=1$ ),大小因 $\eta_e$ 不同而不同。如果该辐射计天线 $\eta_e$ 达到90%,则 $\delta T_B$ 减小成1.2 K,但依然超过辐射计标称灵敏度。因此,该辐射计因天线 $\eta_e$ 较低而要求天线工作环境变化( $\Delta T_s$ )要尽量小,否则就需要经常进行辐射计系统标定。

用比值 $T_B/\delta T_B$ 表示各通道对环境亮温变化的抵抗能力,该比值越大抵抗能力越强。针对该辐射计的计算结果如表2第8行到第10行。可见,该辐射计K波段在晴天时抵抗能力最低,尤其是28 GHz和30 GHz,这两个通道不利于用来观测晴空;云雨天时,28 GHz和30 GHz抵抗能力增加最快,即28 GHz和30 GHz通道可用来观测云降水特征。

由于天线罩使 $\beta$ 减小,表2第11行到第17行给出取 $\beta=0$ 时的结果。对比表明,天线反射体罩会使 $T_A$ 大大增加,但减小了天气阴晴的差异,且使 $\delta T_B$ 增加,使得 $T_B$ 对天线工作环境亮温变化更敏感,这不利于大气湿度和云、降水遥感。为了保持天线反射体罩的优点而又降低其对大气亮温观测的影响,必须进行天线工作环境亮温影响订正。

表 2 B 类辐射计 K 波段下行亮温和天线温度在天空不同状况下对比以及环境亮温变化影响  
( $T_B$  计算中,假设  $T_S=238$  K,  $\Delta T_S=22.5$  K,其余条件同文献[31])

Table 2 Comparison of the K-band downward brightness temperature and antenna temperature for type-B radiometer and analysis on the influence of environment under different sky conditions  
(let  $T_S=238$  K,  $\Delta T_S=22.5$  K and other parameters for  $T_B$  calculation are the same as Reference [31])

行号	条件	计算参数	22.2 GHz ( $\eta_e=73.17\%$ )	25.0 GHz ( $\eta_e=73.98\%$ )	28.0 GHz ( $\eta_e=74.84\%$ )	30.0 GHz ( $\eta_e=75.42\%$ )
1		晴空 $T_B/K$	31	28	17	16
2		云天 $T_B/K$	42	33	29	30
3		雨天 $T_B/K$	61	53	51	54
4		晴空 $T_A/K$	59	55	45	43
5		云天 $T_A/K$	68	60	55	56
6		雨天 $T_A/K$	85	77	75	77
7	$\beta=1$	$\delta T_B/K$	3.5	3.4	3.2	3.2
8		晴空 $T_B/\delta T_B$	8.9	8.3	5.3	5.1
9		云天 $T_B/\delta T_B$	12.0	9.8	9.0	9.5
10		雨天 $T_B/\delta T_B$	17.5	15.8	15.8	17.1
11		晴空 $T_A/K$	87	83	73	71
12		云天 $T_A/K$	95	86	82	81
13		雨天 $T_A/K$	108	101	98	99
14	$\beta=0$	$\delta T_B/K$	8.3	7.9	7.6	7.3
15		晴空 $T_B/\delta T_B$	3.8	3.5	2.2	2.2
16		云天 $T_B/\delta T_B$	5.1	4.2	3.8	4.1
17		雨天 $T_B/\delta T_B$	7.4	6.7	6.7	7.4

### 3 观测数据的订正方案与效果

记  $T_{BO}$  为  $T_{BM}$  订正后的值,由式(13)得

$$T_{BO} = T_{BM} + \delta T_B \quad (16)$$

为便于计算  $\delta T_B$ ,假设地表温度与辐射计自测的环境气温相同, $\Delta T_S$  主要由环境气温(记为  $T_g$ )的时间变化  $\Delta T_g$  来决定(忽略  $\epsilon$  的变化),则由式(14)和式(15)可得订正值估算模型为

$$\delta T_B = c \Delta T_g \quad (17)$$

式(17)中, $c$  为系数,理论上  $c = \epsilon(2 - \beta)(1 - \eta_e) / [\beta + (2 - \beta)\eta_e]$ 。取  $\epsilon = 0.9, \eta_e = 0.75, \beta = 0$ ,则  $c = 0.3$ ,这是系数的理论估计值。

由于亮温的反演和同化应用多以式(1)正演计算得到的  $T_B$ (记为  $T_{BC}$ )为参照,所以令  $\sum (T_{BO} - T_{BC})^2$  最小,则

$$c = - \sum (T_{BM} - T_{BC}) \Delta T_g / \sum (\Delta T_g)^2 \quad (18)$$

由式(18)可计算系数  $c$  的样本估计值。

为避开云的不确定性对样本估算订正系数的影响,实际中可以仅选用晴空数据样本,但所得系数  $c$  代表环境影响,故也可用于订正非晴空亮温观测数据。

某辐射计 K 波段 22~30 GHz 范围内实际有 8

个观测通道,各通道中心频率从水汽吸收线(22.232 GHz)附近逐渐升高到大气窗区(30 GHz)(表 3)。该辐射计在 2010 年 12 月 22 日进行了一次液氮定标,提取此后每日 08:00 和 20:00 的数据,直到 2011 年 12 月 31 日,共得到 746 次数据,其中有 309 次判为晴空观测数据(李青等<sup>②</sup>)。晴空条件下辐射计自带温度计记录的环境气温与定标时的环境气温(取定标当日 08:00 辐射计自带温度计记录的环境气温为 277.724 K)之差,即  $\Delta T_g$ (如图 2 所示)。K 波段的 4 个代表性通道的观测值和正值序列,分别如图 2 中  $T_{BM}$  和  $T_{BC}$  所示。由图 2 可见,在定标后的 1 年多时间里,辐射计环境气温变化振幅达 40 K,对应的亮温影响  $\delta T_B$  为几到十几度(各通道会有差别)。在定标后的近 3 个月里,辐射计环境气温一直比定标时低,而对应 K 波段各通道的测值  $T_{BM}$  均偏高于  $T_{BC}$ ;进入夏半年,辐射计环境气温逐渐比定标时高, $T_{BM}$  逐渐偏低于  $T_{BC}$ ;后进入冬半年,则又重复冬半年  $T_{BM}$  偏高。这种年周期现象在大气吸收较弱的 28 GHz 和 30 GHz 尤其明显。根据式(18)求该样本的订正系数  $c$  值见表 3,与其理论值 0.3 在同一量级。将表 3 中的订正系数  $c$  代入式(16)和式(17)对观测值  $T_{BM}$  进行订正,得到  $T_{BO}$  如图 2 所示。可见,各通道都得到了明显的订正,观

表 3 B 类辐射计 K 波段亮温的环境温度变化订正系数及订正效果统计量  
 Table 3 Coefficient  $c$  for calibrating the environment temperature influence on K-band brightness temperature measured by type-B radiometer and the statistics to show the efficiency of calibration

通道	频率/GHz	订正系数 $c$	订正前拟合直线 $T_{BM}=aT_{BC}+b$	拟合度 $R_{MC}^2$	订正后拟合直线 $T_{BO}=aT_{BC}+b$	拟合度 $R_{OC}^2$
1	22.23	0.215088	$y=1.1112x-2.4141$	0.9537	$y=0.9862x-0.2928$	0.9763
2	22.50	0.224503	$y=1.1119x-1.1412$	0.9571	$y=0.9792x+0.9970$	0.9763
3	23.03	0.352293	$y=1.1879x-0.9221$	0.9194	$y=0.9700x+2.1907$	0.9680
4	23.83	0.354430	$y=1.2161x-0.7508$	0.8861	$y=0.9634x+2.4390$	0.9563
5	25.00	0.329222	$y=1.2402x-0.9890$	0.8174	$y=0.9577x+2.0860$	0.9395
6	26.23	0.265974	$y=1.2885x-2.6649$	0.8019	$y=0.9890x+0.6199$	0.9431
7	28.00	0.350330	$y=1.0714x+0.3436$	0.3846	$y=1.0091x+0.0591$	0.9138
8	30.00	0.457644	$y=0.1129x+12.659$	0.0049	$y=0.9314x+2.2196$	0.7931

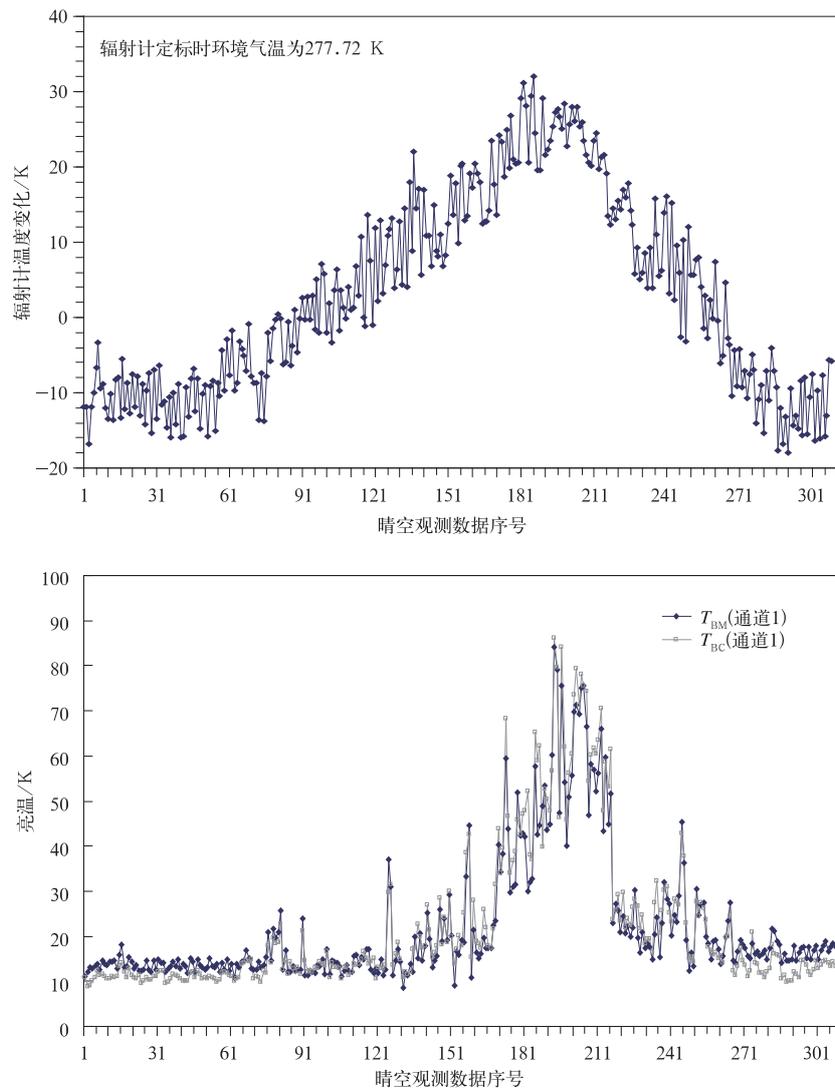
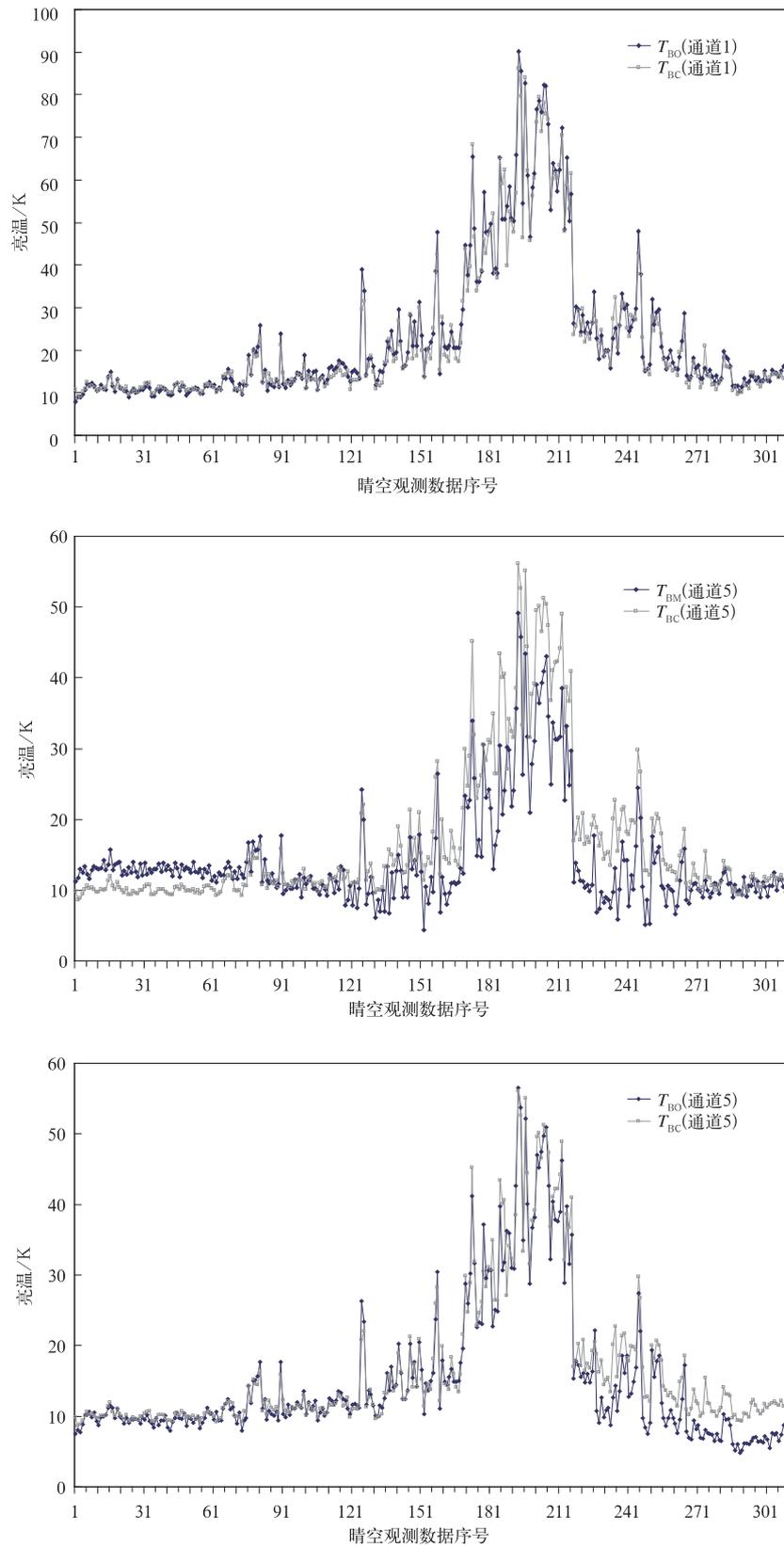
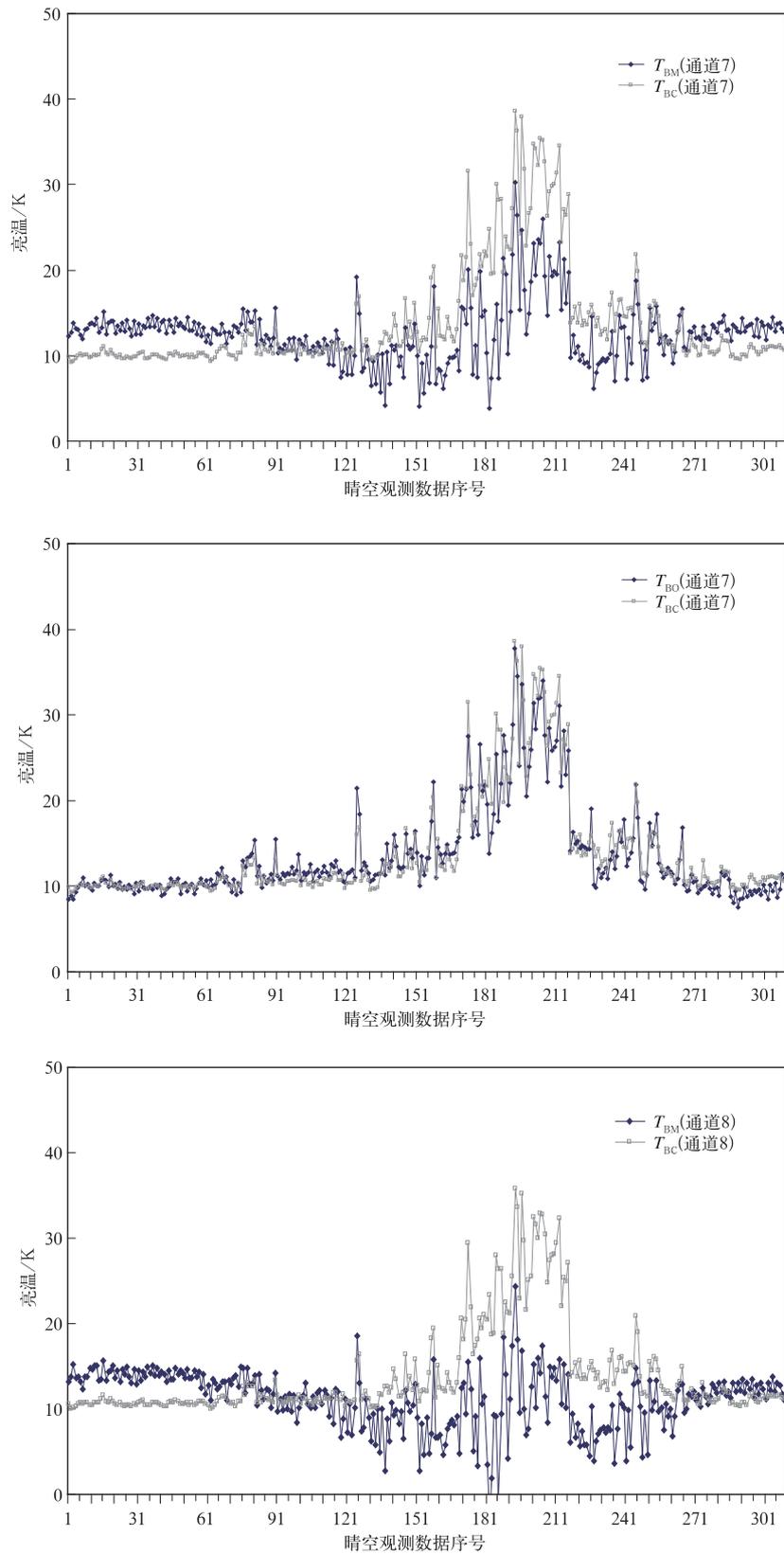


图 2 2010 年 12 月 22 日—2011 年 12 月 31 日每日 08:00 和 20:00 晴空时辐射计环境温度变化  $\Delta T_{\text{R}}$  及 K 波段 4 个代表性通道亮温观测值  $T_{\text{BM}}$ 、订正值  $T_{\text{BO}}$  和模拟值  $T_{\text{BC}}$  的时间序列

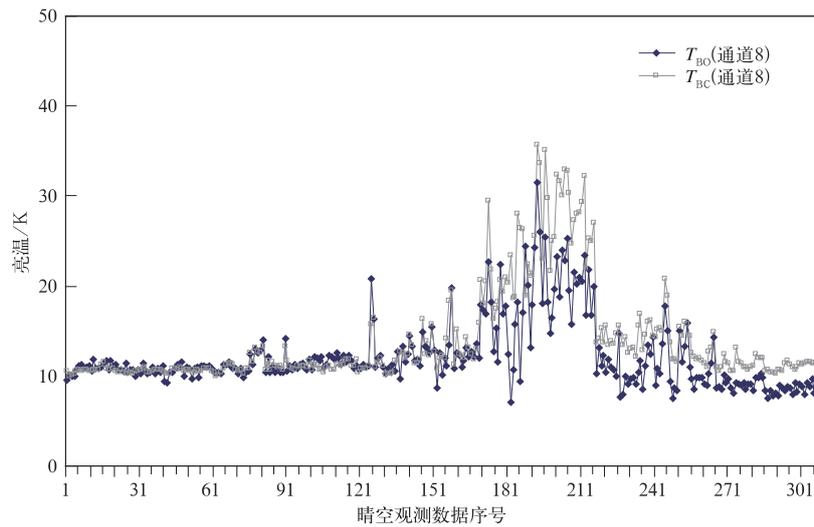
Fig. 2 Time series of clear sky environment temperature change  $T_{\text{R}}$  and the observed brightness temperature  $T_{\text{BM}}$ , the corrected brightness temperature  $T_{\text{BO}}$  and the simulated  $T_{\text{BC}}$  for 4 typical channels in K-band at 0800 BT and 2000 BT from 22 Dec 2010 to 31 Dec 2011



续图 2



续图 2



续图 2

测数据和正演数据之间的拟合度(见表 3)明显提高、拟合直线的斜率更加接近于 1,尤其是对通道 7 和通道 8 观测亮温的订正,即使在晴空情况下  $T_{BM}$  和  $T_{BC}$  几乎不相关,但环境温度变化订正后  $T_{BO}$  和  $T_{BC}$  明显相关。这表明环境温度变化订正有利于 K 波段数据在大气水汽、云和降水遥感中的应用。

#### 4 结论与讨论

本文根据辐射传输理论和天线性能参数分析建立亮温计算模型,通过模拟计算给出辐射计 K 波段各通道亮温观测数据对天线性能及其工作环境的响应,并结合 1 年多的观测资料分析研究辐射计天线性能及其工作环境对 K 波段亮温观测数据的影响,提出了亮温观测数据的环境温度影响订正方案。主要结论如下:

1) 为降低观测环境变化对地基微波大气遥感的影响,要关注辐射计的旁瓣参数以及 3 dB 波束宽度决定的等效主波束效率  $\eta_e$ ,尤其是对 28 GHz 和 30 GHz 附近的通道。对于  $\alpha=3.1^\circ$ ,  $G=30$  dB 的天线,  $\eta_e$  仅有 73.17%, 如果考虑口径、形面偏差、遮挡等因素的影响,  $\eta_e$  会进一步减小。

2) 以  $\epsilon=0.85$ ,  $\Delta\epsilon=0.05$ ,  $T_g=280$  K,  $\Delta T_g=10$  K(典型的中纬度地区地表昼夜温差)为参照,若  $\eta_e=70\%$ , 观测亮温受到的影响  $\delta T_B$  为 4.0 K(取天线罩参数  $\beta=1$ )和 9.6 K(取  $\beta=0$ )。而微波辐射计的亮温灵敏度标称值通常小于 0.2 K(积分时间为 1 s)。所以,辐射计天线工作环境可能会对亮温观

测带来不可忽略的干扰。

3) 工作环境不同于定标情景,最明显的原因是地表温度的季节变化。北京天线工作环境温度的冬夏差异可达 40 K,即使不考虑地表比辐射率等因素,也必须考虑天线工作环境的影响。辐射计系统经常进行标定,有助于减小环境温度与辐射计定标时的情景差异,但依然会因为  $\eta_e$  较低而有必要进行环境温度变化订正。

4) 对 1 年多的观测资料应用表明,本文提出的环境温度变化订正方案简单有效, K 波段各通道(尤其是 28.0 GHz 和 30.0 GHz)亮温订正后和正演数据之间的拟合度大为改善。

环境温度变化对 K 波段亮温数据的影响,仅是本文指出的观测亮温和辐射传输模式正演计算数据之间一致性减小的原因之一。对影响辐射计亮温观测的其他因素以及综合订正方案,有待于继续研究。

**致谢:**感谢中国气象局北京市气象研究所提供了 2010—2011 年每日 08:00 和 20:00 的地基微波辐射计亮温观测数据。感谢该所李炬、刘红燕、阮顺贤、曹晓彦和北京市气象局保障中心沈永海等老师提供的帮助。感谢美国国家环境预报中心提供了 NCEP 资料。

#### 参考文献

- [1] 赵柏林. 大气物理与大气探测的一些进展. 北京大学学报, 1995, 31(3): 323-337.
- [2] Westwater E, Crewell S, Matzler C. A review of surface-based microwave and millimeter-wave radiometric remote sensing of the troposphere. *Radio Science Bulletin*, 2004, 310: 59-80.
- [3] 赵从龙, 蔡化庆, 宋玉林, 等. 对流层水汽和液态水的地基微波遥感探测. 应用气象学报, 1991, 2(2): 200-207.

- [4] 段英,吴志会.利用地基遥感方法监测大气中汽态、液态水含量分布特征的分析.应用气象学报,1999,10(1):34-40.
- [5] 雷恒池,魏重,沈志来,等.微波辐射计探测降雨前水汽和云液水.应用气象学报,2001,12(增刊I):73-79.
- [6] Güldner J, Spänkuch D. Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry. *Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18: 925-933.
- [7] Ware R, Carpenter R, Güldner J, et al. A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid. *Rad Sci*, 2003, 38, doi:10.1029/2002rs002856.
- [8] Cimini D, Westwater E R, Gasiewaki A J, et al. Ground-based millimeter- and submillimeter-wave observations of low vapor and liquid water contents. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2169-2180.
- [9] Ware R, Cimini D, Campos E, et al. Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. *Atmos Res*, 2013, 132: 278-290.
- [10] 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用.应用气象学报,2013,24(5):576-584.
- [11] Wang Zhenhui, Li Qing, Hu Fangchao, et al. Remote sensing of lightning by a ground-based microwave radiometer. *Atmos Res*, 2014, 150: 143-150.
- [12] Westwater E R, Wang Zhenhui, Grody N C, et al. Remote sensing of temperature profiles from a combination of observations from the satellite-based microwave sounding unit and the ground-based profiler. *J Atmos Oceanic Tech*, 1985, 2: 97-109.
- [13] 张培昌,王振会.大气微波遥感基础.北京:气象出版社,1995.
- [14] Solheim F, Godwin J, Westwater E R, et al. Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods. *Rad Sci*, 1998, 33(2): 393-404.
- [15] 刘亚亚,毛节奏,刘钧,等.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,2010,29(6):1514-1523.
- [16] 郭伟,王振会,孙安平,等.地基微波辐射计网络资料处理系统设计及实现.气象,2010,36(4):120-125.
- [17] Lu Qifeng, Bell W, Bauer P, et al. An Initial E-valuation of FY-3A Satellite Data. ECMWF Technical Memorandum 631, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2010: 58.
- [18] Goldberg M D, David S C, Zhou L H. The limb adjustment of AMSU-A observations: Methodology and validation. *Appl Meteor*, 2001, 40: 70-83.
- [19] Weng F, Zhao L, Ferraro R R, et al. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms. *Radio Sci*, 2003, 38(4): 8068-8096.
- [20] Weng F, Yang H, Zou X. On convertibility from antenna to sensor brightness temperature for ATMS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 771-775.
- [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] 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.
- [23] 陈向东,张祖荫,林士杰,等.八毫米微波天空温度.华中科技大学学报:自然科学版,1985,13(4):105-110.
- [24] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1981: 1-2162.
- [25] Rose T H, Czekala H. RPG's Atmospheric Remote Sensing Profilers Operating Manual. Version 8, 2009.
- [26] Radiometrics Corporation. Profiler Operator's Manual. <http://radiometrics.com>, 2007.
- [27] 张培昌,杜秉玉,汤达章.雷达气象学.北京:气象出版社,2001:1-511.
- [28] Rahmat-Sammi Y, A Hoferer R, Mosallaei H. Beam efficiency of reflector antennas: The simple formula. *IEEE Trans Ant Prog Mag*, 1998, 40(5): 82-87.
- [29] 叶云裳.“神舟四号”飞船微波辐射计天线的主波束效率.空间科学学报,2003,23(6):459-466.
- [30] 何文英,陈洪滨,宣越健,等.几种地表微波比辐射率变化特征的地面观测.地球物理学进展,2010,25(6):1983-1993.
- [31] Waters J W. Absorption and Emission of Microwave Radiation by Atmospheric Gases//Methods of Experimental Physics, 1976.

## Environmental Thermal Radiation Interference on Atmospheric Brightness Temperature Measurement with Ground-based K-band Microwave Radiometer

Wang Zhenhui<sup>1)2)</sup> Li Qing<sup>1)2)</sup> Chu Yanli<sup>3)</sup> Zhu Yayu<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (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)

<sup>2)</sup> (School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

<sup>3)</sup> (Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

### Abstract

Effects of operating environment thermal radiation interference on atmospheric brightness temperature measurement with ground-based K-band microwave radiometer especially for channels near 28.0 GHz and 30.0 GHz are studied. A model for simulating antenna temperature which expresses the energy received by the radiometer based on radiative transfer is derived and used to calculate the response of the brightness temperature measurements to parameters such as antenna specifications, radome, surrounding temperature and emissivity. Results show that the equivalent main beam efficiency ( $\eta_e$ ) defined by 3 dB points is only 73.17% for a typical antenna, of which the half-beam half width  $\alpha=3.1^\circ$  and the gain  $G=30$  dB. The value of  $\eta_e$  would be even smaller if factors like aperture radiation effect, shape-error, and occlusion and so on are taken into account. The brightness temperature would fluctuate by 4.0 K in case that  $\eta_e=70\%$ , the surrounding temperature and emissivity would change by  $\Delta T_g=10$  K and  $\Delta\epsilon=0.05$  around  $T_g=280$  K and  $\epsilon=0.85$  if the radome can be neglected. The fluctuation would increase up to 9.6 K if the size of the opening in the radome is just for the main beam. Therefore, if the equivalent main beam efficiency determined by the antenna gain and 3-dB beam width for the current radiometer system is not large enough, variation of the operating environment must be taken into account during the correction of K-band brightness temperature measurement even though LN calibration of the radiometer system can be performed as manual-required. For this, a brightness temperature correction method for operating environment variation is suggested according to the theoretical relationship and the result from application to observations. Over one year application after LN calibration shows that the fitness and correlation between the observed brightness temperature after correction and the calculated brightness temperature with radiative transfer equation is obviously better than before, especially for channels of 28 GHz and 30 GHz.

**Key words:** ground-based microwave radiometer; K-band brightness temperature correction; antenna specifications; operating environment interference