

FY-3B 卫星微波湿度计热真空定标方法和结果分析

王振占,张升伟,李 靖,李 芸,吴 琼

(中国科学院微波遥感技术重点实验室,中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190)

[摘要] 本文论述了风云三号卫星B星微波湿度计(MWHS-3B)发射前热真空定标的原理和方法,建立了各种定标误差的修正算法,获得了MWHS-3B的系统线性度、观测不同目标的灵敏度和最终定标精度等关键技术指标。这些参数已经用于MWHS-3B在轨数据的处理。

[关键词] 风云三号卫星;微波湿度计;发射前定标;热真空定标

[中图分类号] TP722.6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0033-14

1 前言

风云三号(FY-3)卫星是我国第二代极轨气象卫星,微波湿度计(MWHS)是FY-3卫星的主要有效载荷之一^[1]。FY-3卫星MWHS可以全天时、全天候地观测大气湿度的垂直分布(水汽廓线)、水汽含量和降雨量等全球性空间气象资料,为数值天气预报、气候变化研究和环境监测提供重要参数,有助于提高中、长期数值天气预报和天气预报的准确性。大气在微波和亚毫米波段存在几个水汽吸收区,如图1所示,在0~200 GHz频率范围内,分别有两条氧气吸收线和两条水汽吸收线。氧气吸收线可用于大气温度廓线测量,分别位于50~60 GHz和118.75 GHz。水汽吸收峰值附近可以用来进行大气水汽信息的获取。水汽第一条吸收线中心位于22.235 GHz,可用于大气水汽含量的测量;第二条吸收线中心位于183.31 GHz,可以进行大气湿度廓线的测量。

FY-3卫星A星和B星的MWHS(以下分别简称为MWHS-3A、MWHS-3B)和国外发射的微波探测仪SSMT-2和AMSU-B类似^[2],在183.31 GHz吸收线上有3个通道(183.31±1 GHz, 183.31±3 GHz和183.31±7 GHz),可以获得大气湿度剖面信息,而

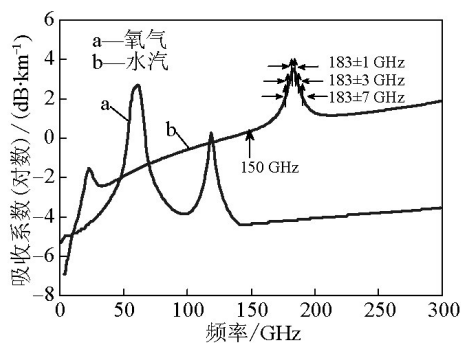


图1 大气微波吸收区以及MWHS-3B通道选择

Fig.1 Selected microwave bands for MWHS-3B channels

注:大气压1 000 mb(1 mb=100 Pa),温度20℃,相对湿度50%

150 GHz采用的水平极化和垂直极化是两个窗区通道,可以给出地球表面和较低大气的信息,用来探测云中含水量、强降雨和卷云等大气参数,这与国外的单一垂直极化通道是不同的。表1给出MWHS-3B接收机的通道参数。表中 $NE\Delta T$ 为接收机温度分辨率。MWHS-3B是一套基于超外差接收机的全功率型微波辐射计。系统由天线与接收机单元、数据处理单元和电源单元组成。MWHS-3B接收的信号来自地球大气层的自由空间辐射,是通过一个垂直于卫星飞行轨迹进行扫描的天线反射面获取的。

[收稿日期] 2013-04-22

[作者简介] 王振占(1969—),男,河北青龙县人,研究员,博士生导师,主要研究方向为微波遥感新技术及应用技术;

E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn

表1 MWHS-3B接收机通道参数

Table 1 Receiver channel specifications of MWHS-3B

通道	中心频率 /GHz	极化	带宽 /MHz	NE Δ T /K	频率精度 /MHz	天线主波束效率/%	3dB波束宽度/(°)	亮温动态范围 /K
1	150	V	1 000	1.1	50	≥ 93	1.1	3~340
2	150	H	1 000	1.1	50	≥ 93	1.1	3~340
3	183.31 \pm 1	H	500	1.2	30	≥ 95	1.1	3~340
4	183.31 \pm 3	H	1 000	1.1	30	≥ 95	1.1	3~340
5	183.31 \pm 7	H	2 000	1.2	30	≥ 95	1.1	3~340

MWHS-3B采用机械扫描,结合卫星运动(卫星相对地球速度约7.5 km/s)和天线窄波束的交轨方向扫描,如图2a所示。为增加对地观测时间,电机带动天线进行360°的连续变速圆周扫描,扫描周期为2.667 s,对地观测扫描张角为 $\pm 53.35^\circ$ (以天底点为中心)。高温定标源位于天顶点位置,冷空定标源角度为 287° (距离天底点 73°),扫描过程如图2b所示。为保证足够小的辐射测量灵敏度,必须尽可能增加对地观测时间。因此在对地观测期间降低马达速度进行匀速扫描,对地观测时间为1.71 s。FY-3卫星轨道高度为836 km,天底点像元为圆形,由于扫描刈幅垂直于飞行轨迹,随着入射角的增大,地面像元逐渐变化为椭圆形且尺寸变大。MWHS-3B刈幅像元如图2a所示。

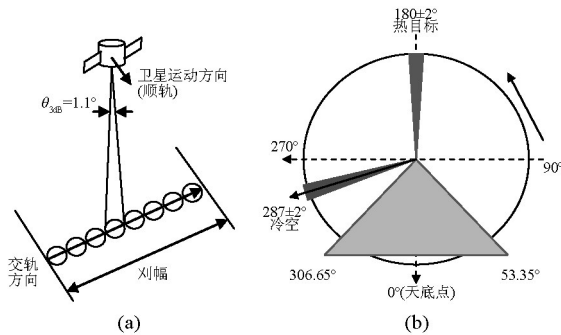


图2 MWHS-3B扫描模式示意图
Fig.2 Scanning geometry of MWHS-3B

2 MWHS-3B定标原理和方法

2.1 实时定标技术原理

MWHS-3B采用星上实时两点定标技术,也就是以热参考源的辐亮度(R_w)和冷参考源的辐亮度(R_c)作为标准,位于其中的被测目标的辐亮度(R_A)通过线性插值获得。图3实线表示两点定标的示意

图。图3中纵坐标表示输出电压的计数值(counts)或者电压(V),其中 C_w 、 C_c 、 C_A 分别表示观测热负载、冷负载和目标时辐射计的输出电压。

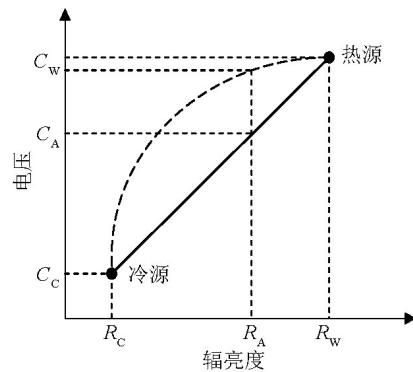


图3 两点定标示意图

Fig.3 Two-points calibration

热定标源是安装在内部的一个尖劈定标体。热参考源的温度(T_w)是利用安装在定标目标内部的铂电阻温度计(PRT)的测量结果通过一系列计算得到的。冷目标的温度(T_c)是利用天线测量宇宙背景辐射得到的。在进行定标之前,这两个定标源的温度要用Planck定律转换为辐亮度。如果直接使用温度 T_w 、 T_c 定标会产生误差,这是由于假设亮度温度(简称亮温)和辐射计输出之间是线性的所致。但是对于实验室定标,如果采用亮温作为定标单位,当低温负载采用80 K左右的黑体,热负载采用常温黑体时,所有频率的定标误差都非常小;而在星上两点定标时,必须采用辐亮度作为定标单位,也就是建立辐亮度和输出电压之间的线性关系,否则会引起亮温与辐亮度之间非线性和辐射计系统非线性之间的混淆。

经过对热负载、冷空输出电压数据有效范围的检测,并采用一定的数据平均算法,就可以根据平

均后的冷、热负载电压值 (C_c , C_w) 及其辐亮度平均值 (R_c , R_w), 得到定标方程

$$R_A = AC_A + B \quad (1)$$

式(1)中, R_A 和 C_A 分别为观测地球表面时的辐亮度和输出电压计数值; A 和 B 为定标系数。

$$A = (R_w - R_c) / (C_w - C_c) \quad (2)$$

$$B = (R_c C_w - R_w C_c) / (C_w - C_c) \quad (3)$$

根据 MWHS-3B 仪器性能和定标特点, 在轨定标方程采用二次方程的形式^[3,4], 参考图 3 中的定标虚线

$$R_A(C) = a_0 + a_1 C_A + a_2 C_A^2 \quad (4)$$

其中的 3 个系数为

$$a_0 = R_w - AC_w + uA^2 C_w C_c \quad (5)$$

$$a_1 = A - uA^2 (C_w + C_c) \quad (6)$$

$$a_2 = uA^2 \quad (7)$$

式(5)~式(7)中, u 为非线性参数, 是一个常数, 表示曲线的弯曲程度, 只与接收机的工作温度有关。图 4 举例说明 150 GHz 通道不同的 u 表示的含义。输入条件: 冷源温度 95 K, 热源温度 305 K, 变温源目标从 80 K 变化到 330 K。辐射计观测冷源的输出电压为 3.0 V, 观测热源的输出电压为 6.0 V。辐射计的参数 u 变化时通过两点定标输出电压与二次曲线定标输出电压之间的关系就可以从图 4 中看出: u 的正负表示曲线的开口方向, u 为正数表示在两个定标源之间, 真实输出电压位于两点直线方程的上部; 而 u 为负数表示真实输出电压位于两点直线方程的下部; u 的绝对值越小, 输出越接近直线方程。此外, u 值的大小与输出电压的外推范围、非线性误差的大小都有直接关系。 u 的绝对值越大, 越需要考虑在轨定标对 2.7 K 冷空的电压输出是否超出辐射计测量的有效量程; 而且 u 的绝对值越大, u 的测量要求越准确, 否则对实测数据中由于非线性修正而引起的误差的不确定性越大。

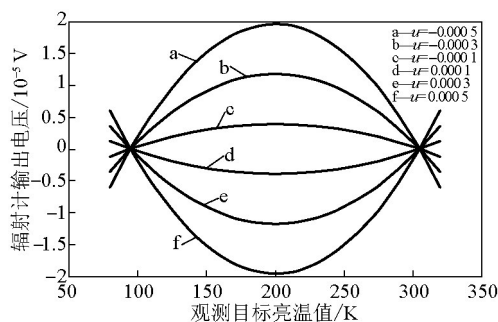


图 4 非线性参数 u 在辐射计输出响应中的作用

Fig.4 Role of nonlinear parameter u in the output of microwave radiometer to different T_b

2.2 MWHS-3B 发射前后的定标方法

为了获取地球表面和大气的亮温, MWHS-3B 测量的电压值需要经过一系列的转换。这个转换过程包括两部分: 一是从测量电压到天线温度的转换, 也称为定标过程; 二是从天线温度到目标亮温的转换。由于用于电压到亮温转换的方法可以在发射前后不同时间完成, 所以通常针对不同时间的算法又可以把定标分为发射前的定标和发射后的定标。

MWHS-3B 在发射前要在真空环境, 模拟在空间运行所经历的环境条件, 并且得出定标方程中的系数。这个过程称为热真空测试或定标 (thermal-vacuum testing, 或者 T/V testing)。定标方法一般采用把辐射计放置在一个绝热的辐射体内, 辐射体可以控制在不同的温度。辐射计馈源对准信号源, 一般是温度可以变化的黑体, 温度变化范围在 90~350 K。冷空喇叭对准一个温度在 80~100 K 的冷黑体。冷黑体的温度保持不变。在所有定标黑体中均放置温度传感器精确测量黑体的温度分布。同时, 在辐射计主要衰减部件, 如馈源、波导、开关和隔离等, 均放置温度传感器测量这些部件的温度, 通过测量工作在不同环境温度下辐射计对目标信号和定标信号的响应, 确定外部定标体温度、辐射计内部定标源温度、辐射计各种前端元件等对辐射计输出信号的影响。

此外, 为了分析天线的特性对观测目标辐射的影响, 需要对天线方向图进行分析, 确定天线旁瓣、交叉极化等参数的影响, 这个过程称为天线方向图校正, 或者天线订正。而产生亮温的算法称为亮温算法。

发射后定标包括辐射计星上定标、发射后的定标和检验等。其中发射后的定标和检验根据实现的方法不同可以分为替代定标、交叉定标和其他数据源定标等方法。

下面主要针对 MWHS-3B 的发射前热真空定标和天线订正技术进行分析和阐述。

3 MWHS-3B 热真空定标技术

3.1 定标方案

MWHS-3B 真空定标试验的目的是全面测量 MWHS-3B 的系统响应特性, 建立热真空环境下各种参数对 MWHS-3B 输出影响的量化关系, 提供 MWHS-3B 在轨运行不可测参数的地面分析结果。主要内容如下。

1)在真空条件下对MWHS-3B的整体性能指标进行测试,了解和掌握系统在真空环境中不同工作环境温度下的电特性,确定在轨定标所需要的基础参数;

2)在真空条件下进行MWHS-3B定标试验,建立定标方程,进行定标误差分析并确定在不同环境温度下MWHS-3B的灵敏度、线性度、定标准确度等主要技术指标;

3)确定不同温度下不同通道的非线性修正系数。

FY-3卫星(A/B/C星)MWHS-3B热真空定标试验总体测试方案基本一致:MWHS-3B、变温源、冷定标源在KM2热真空罐中的相对位置不变,如图5所示,冷定标源位置固定在仪器冷空观测点(107°),变温源中心位置固定在天底180°方向(考虑安装结构和定标源的体积,位置略有调整,A星在207°,B星在197°,C星在180°)。变温源温度在95~330 K变化,变化温度梯度为15 K,用来模拟地球表面亮温变化,冷源的温度稳定在95 K附近,使用液氮系统冷却,用来模拟冷空。真空罐内的温度不变。在轨运行仪器温度的变化通过温控系统调整MWHS-3B的底板温度(0°~30°变化范围)模拟实现。在定标过程中,在FY-3卫星MWHS-3B数控单元和电源单元、冷源、变温源屏蔽罩上贴热敏电阻,使用LakeShore 218测温系统实时监测记录各个测温点的物理温度。

3.2 定标源偏差修正算法

为了对MWHS-3B进行实时定标,需要对外部冷源和内部热源数据进行处理,以获得有效的冷源

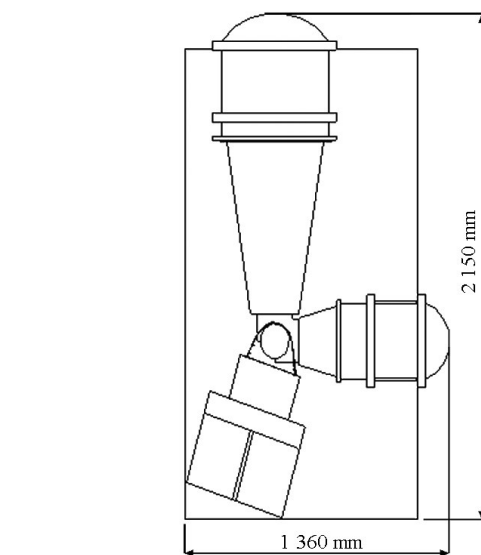


图5 MWHS-3B热真空定标示意图

Fig.5 T/V testing scheme diagram of MWHS-3B

注:图中右侧定标源为冷源,下方为MWHS,上部是变温源,湿度计后面的支架上有升降机构用于调整天线的高度

和热源亮温。为此需要进行3个校正:a.带宽校正;b.发射率校正;c.冷热偏差校正。

3.2.1 带宽校正

由于MWHS-3B有些通道实际带宽较大(见表1),不能完全满足单色光的要求,所以需要对其进行修正。修正方法是在整个通带内进行积分,把积分结果和理想矩形通带下的亮温进行线形拟合,来得到转换系数。用公式表示为

$$T_m = b_0 + b_1 T \quad (8)$$

式(8)中, T_m 为经过带宽修正后的黑体温度; T 为黑体温度。表2给出式(8)的系数 b_0 、 b_1 。

表2 MWHS-3B带宽修正系数

Table 2 Band correction coefficients for MWHS-3B

通道	150-1	150-2	183-1	183-2	183-3
b_0	-0.000 392	-0.000 381	-0.000 073	-0.000 340	-0.007 791
b_1	1.000 067	1.000 065	1.000 010	1.000 048	1.001 380

T 经过式(8)转换为 T_m ,然后通过Planck定律转换为辐射量用来进行定标。黑体辐亮度 R 与黑体物理温度之间的关系用Planck定律表示为

$$R(\text{ch}) = e \frac{2h\nu^5}{c^3} \frac{1}{\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1} \quad (9)$$

式(9)中, h 为普朗克常数; c , k , ν 分别为光速、波尔兹曼常数和频率; e 是黑体的发射率; R 为辐亮度,单位为 $\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。而辐射量再转换为温度可

通过求解式(9)的逆运算来得到。为了直观,在本文中笔者采用K作为亮温和温度的单位。此外用到的常数为:光速 $c=2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$;普朗克常数 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;波尔兹曼常数 $k=1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;频率 ν 单位为Hz。

3.2.2 发射率校正

由于实际的定标源不是理想的黑体,因此不管是 T_m 还是 R 都不是最终的辐射量,需要考虑定标源

的发射率。表3为冷源和变温源黑体发射率的测量结果。而热源的发射率根据俄罗斯研制方提供的数据为0.999 0,不确定度小于0.000 9。

表3 冷源和变温源的发射率测量结果

通道	发射率测量值	发射率不确定度
150-1	0.999 2	<0.000 3
180	0.999 4	<0.000 3
183	0.999 3	<0.000 3

在热真空定标中,定标源包括冷源、热源、变温源3个。其辐射量的计算过程相同:首先利用测量电压及其热敏电阻转换系数计算对应的物理温度 T ;然后根据变温源进行冷热偏差修正,得到修正后的冷热源温度 T_m ;第三步进行带宽修正,并利用Planck定律计算等效温度;最后计算辐射量,即用发射率乘以等效温度;此外,考虑周围环境的影响,需要加上反射的贡献。定标源的有效辐射亮温 T_e 为

$$T_e = e_f \cdot T_w + (1 - e_f) \cdot T_{em} \quad (10)$$

式(10)中, T_{em} 为环境温度; e_f 为定标源的发射率。

3.2.3 MWHS-3B定标源冷热偏差修正

定标源偏差包括冷源定标偏差(通常称为冷偏差)、热源定标偏差(通常称为热偏差)和变温源定标偏差。如何鉴别偏差的来源非常关键,它关系到系统非线性参数的准确性,进而关系到卫星升空后在轨数据的质量。

Wang(2011)的研究表明,变温源的亮温偏差对系统的非线性参数影响不大,因此这里先假设变温源的温度经过带宽和发射率修正后是准确的,没有误差,而主要估算冷、热偏差。笔者利用在给定的环境温度下MWHS-3B的响应特性不变化的特点修正冷、热偏差。原理是:在给定的环境温度下,如果确定了MWHS-3B的系统响应,那么它的定标方程曲线的非线性成分就是确定的,不受其他因素的影响。而这个非线性成分等于实际温度与测量温度的差。因此,通过该温度下的非线性曲线(测量偏差与实际温度的二次曲线),就可以确定在对应的冷源、热源温度下的测量偏差。系统的非线性 Q 定义为

$$Q = u(C_A - C_H)(C_A - C_C)/G^2 \quad (11)$$

式(11)中, G 为接收机增益,数值上等于式(2)系数 A 的倒数;对于给定的仪器温度下, u 为常数。可见系统非线性曲线的分布特点是在每对定标点(冷源

温度及其输出电压、热源温度及其电压)的非线性 Q 为0。非线性随着观测目标的变化呈现二次曲线形式变化。据此,在这些定标点坐标上如果非线性不为0则说明定标源存在偏差。这就是冷、热偏差修正的根据。图6给出MWHS-3B在150 GHz和183 GHz、仪器温度20℃的冷源和热源温度下偏差随着变温源温度变化的计算结果。表4和表5给出不同仪器温度下冷热偏差的统计结果。可见,热偏差除150 GHz在277.40 K和285.41 K略大以外,其余都很小;冷源基本上不受变温源的影响;热源受变温源的影响,但是影响很小。

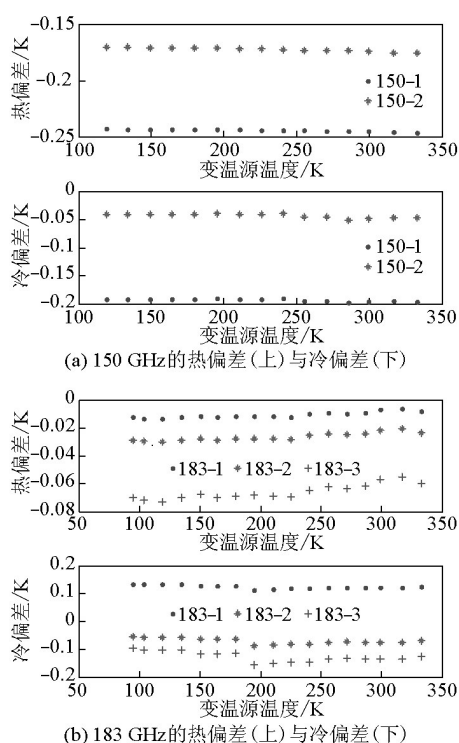


图6 在20℃下MWHS-3B的冷热偏差

Fig.6 Cold and hot biases of MWHS-3B at 20 °C

产生偏差的原因基本上可以归结为定标体表面物理温度梯度的贡献。因为黑体的发射率 >0.999 ,而周围背景温度和发射体自身温度的最大不确定度小于100 K。这样对于100 K的黑体,亮温的不确定度小于0.2 K。而表面温度梯度的大小取决于定标源所处的环境温度与辐射体基体底部的差异。从表4和表5可以看出,热偏差随着仪器(IF)温度升高而减小,这说明热偏差是由辐射体表面温度变化导致的:IF温度升高,辐射体表面的温度升高,导致热源表面和底面的温差加大。而冷偏差随着

表4 150 GHz的冷热偏差统计结果
Table 4 Cold and hot biases' statistics at 150 GHz

IF 温度/K	热源温度/K	冷源温度/K	热偏差/K		冷偏差/K	
			CH1	CH2	CH1	CH2
277.18	276.47	94.98	-0.608 4	-0.575 0	-0.282 7	-0.120 0
287.40	287.82	94.18	-0.441 7	-0.453 5	-0.178 5	-0.024 7
295.59	298.35	95.78	-0.244 4	-0.172 7	-0.193 0	-0.043 5

表5 183.31 GHz的冷热偏差统计结果
Table 5 Cold and hot biases' statistics at 183.31 GHz

IF 温度/K	热源温度/K	冷源温度/K	热偏差/K			冷偏差/K		
			CH3	CH4	CH5	CH3	CH4	CH5
275.40	277.45	95.03	0.207 7	0.162 2	0.101 3	-0.027 7	-0.217 1	-0.179 8
285.41	288.80	92.24	0.239 8	0.226 2	0.161 7	-0.305 6	-0.324 0	-0.290 8
295.57	299.78	94.95	-0.010 7	-0.026 5	-0.066 1	0.123 4	-0.070 8	-0.126 7

IF 温度变化很小,并且与变温源温度的变化无关,这与冷源温度只受真空罐背景温度调制的假设是一致的。在真空定标中,真空罐的热沉温度保持在100 K附近,与冷源温度95 K非常接近。因此,冷源的偏差是稳定的,而且很小。

3.3 变温源误差的修正以及其对非线性参数的影响

为了分析变温源对定标结果的影响,笔者首先比较变温源亮温与湿度计测量亮温(通过两点定标得到的天线温度)的差的变化特性,如图7所示,给

出了20 °C下 MWHS-3B 的5个通道的定标偏差及二次拟合残差。其中为了分析偏差的特性,图中分别对各自的偏差与变温源温度之间进行二次拟合,得到的残差分布也分别在对应的图中给出。

从二次拟合的残差可以发现:这些残差具有一定的规律性,即符合三次曲线线型。而且在不同频率/通道、不同极化和不同温度下,残差的变化趋势都相同(其他温度下的图形相似,由于篇幅关系这里简略)。

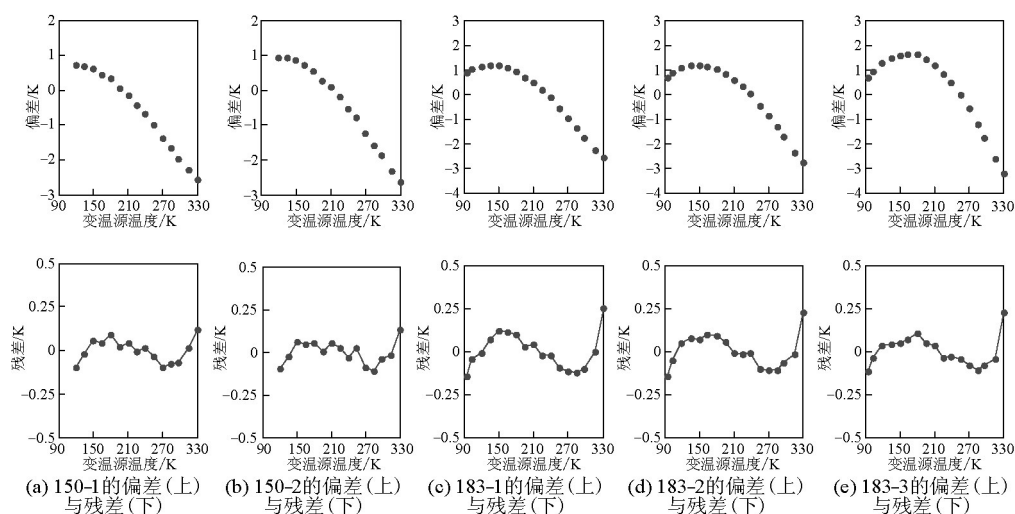


图7 在20 °C下的定标偏差及二次拟合残差

Fig.7 The calibration biases and residuals after two-order fit at 20 °C

注:偏差=变温源温度-测量温度;残差=偏差-二次拟合偏差

考虑接收机为线性系统,不可能同时产生相似的三次项,故认为这个三次项的产生可能是由变温

源引起的。根据年丰等(2009)的研究结果:当背景温度和辐射体底面温度存在差异时,辐射体的表面

存在温度梯度,其等效温度的高低取决于背景温度和底面温度的差、辐射体锥体的宽高比和吸波材料物理化学特性等。对于目前使用的冷源,如果环境温度为 293 K,则当底板温度分别为 80 K 和 330 K 时,其等效温度分别为 80.74 K 和 329.64 K,偏差分别为 0.74 K 和 -0.36 K。这些差值还是假设整个环境处于热力学平衡条件下模拟得到的。在热真空定标过程中,冷源和热源温度基本上不变,冷源工作温度为 95 K,与热沉背景相近;而热源处于湿度计环境温度内,与周围背景温度差异很小,因此冷、热源引起的偏差很小。因此,上述误差主要由变温源的温差及其与周围背景的作用共同产生,而冷、热偏差的影响可以忽略。图 8、图 9 给出了 150 GHz 和 183 GHz 不同通道不同温度下的偏差拟合结果,可以看出,三次拟合残差基本在 0.1 K 以内,具体系数在表 6 中给出。

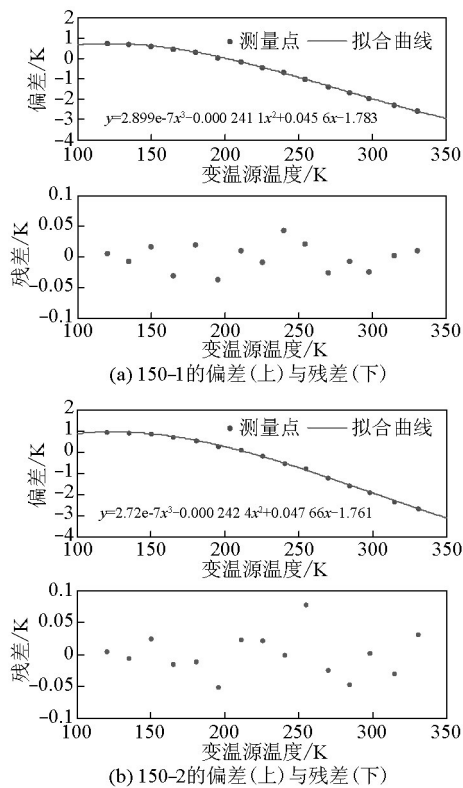


图 8 150 GHz 在 20 °C 下的定标偏差及三次拟合残差
Fig.8 The calibration biases and residuals after three-order fit of 150 GHz at 20 °C
注:偏差=变温源温度 - 测量温度

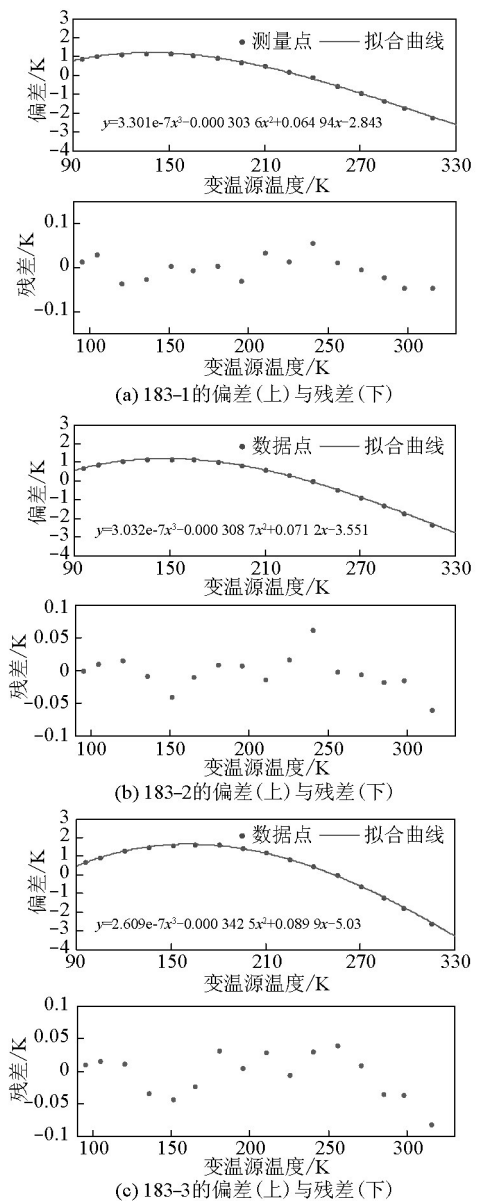


图 9 183 GHz 在 20 °C 下的定标偏差及三次拟合残差
Fig.9 The calibration biases and residuals after three-order fit of 183 GHz at 20 °C
注:偏差=变温源温度 - 测量温度

根据上述分析结果,上述偏差 ΔT 与变温源温度之间用三次多项式拟合为

$$\Delta T = p_1 \times T^3 + p_2 \times T^2 + p_3 \times T + p_4 \quad (12)$$

表 6 的拟合系数中,三次项系数非常接近。这与变温源在 150 ~ 183 GHz 的特点一致:发射率随频率变化不明显。因此,可以用其平均值 3.1×10^{-7} 表示。

表6 变温源温度与湿度计测量温度偏差的三次拟合系数

Table 6 Fitted coefficients between the target temperatures and their measurements

频率/GHz	IF 温度/K	通道	p_1	p_2	p_3	p_4
150	277.18	CH1	$3.7e-7$	-0.000 33	0.066	-3.1
		CH2	$3.7e-7$	-0.000 36	0.078	-3.8
	287.40	CH1	$3.4e-7$	-0.000 29	0.057	-2.4
		CH2	$3.6e-7$	-0.000 32	0.065	-2.8
	295.59	CH1	$2.9e-7$	-0.000 24	0.046	-1.8
		CH2	$2.7e-7$	-0.000 24	0.048	-1.8
183	275.40	CH1	$2.4e-7$	-0.000 34	0.090	-4.9
		CH2	$3.4e-7$	-0.000 38	0.094	-5.2
		CH3	$3.5e-7$	-0.000 50	0.140	-8.3
	285.41	CH1	$2.2e-7$	-0.000 29	0.074	-4.1
		CH2	$2.8e-7$	-0.000 33	0.084	-4.8
		CH3	$3e-7$	-0.000 41	0.110	-6.5
	295.57	CH1	$3.3e-7$	-0.000 30	0.065	-2.8
		CH2	$3e-7$	-0.000 31	0.071	-3.6
		CH3	$2.6e-7$	-0.000 34	0.090	-5.0

根据前面分析,认为表6中的三次拟合系数全部来源于变温源的不确定性。如果把变温源的发射率、温度梯度以及MWHS-3B天线的性能指标综合考虑,那么变温源辐射亮温的修正偏差 ΔT_{var} 可以用三次多项式拟合

$$\Delta T_{var} = v_1 \times T^3 + v_2 \times T^2 + v_3 \times T + v_4 \quad (13)$$

式(13)中,系数 v_1 使用表6中三次拟合系数的平均值来计算; v_2, v_3, v_4 3个系数通过试验数据确定。在本次定标试验中,在每个IF温度下分别进行了与冷源和热源温度相同的变温源试验,也就是当变温源温度分别与冷源温度、热源温度相近(小于1 K)时,进行了定标试验。利用这些温度点,可以确定变温源系数 v_2, v_3 和 v_4 :在图8和图9定标偏差中,减去式(9)中三次项贡献,得到二阶偏差贡献的总和。这些二阶偏差包含了变温源和接收机非线性的综合贡献。但是在变温源的温度与冷源或热源相同的时候,可以认为非线性贡献为0,因此这些偏差就是变温源的贡献。这样通过在冷源、热源温度点的偏差与相应温度的二阶拟合,就可以得到变温源系数 v_2, v_3 和 v_4 。拟合的结果如图10所示。结合由表6求得的三阶系数 v_1 ,就可以得到变温源亮温偏差的修正曲线,如图11所示。表7给出最终的修正系数。用变温源的物理温度减去这个修正量就是修正后的变温源辐射亮温。

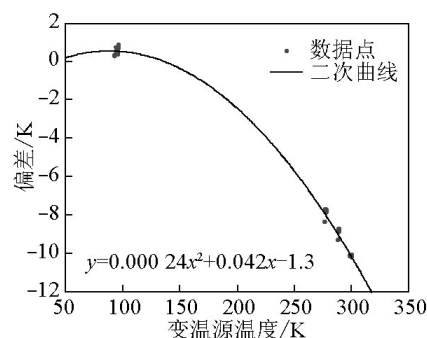


图10 变温源的二阶贡献随着温度的变化
Fig.10 The second-order bias curve of the target temperature

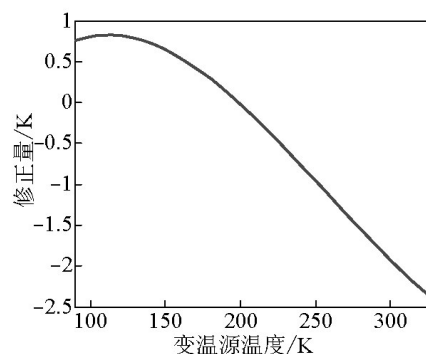


图11 变温源的修正量曲线
Fig.11 The corrected target temperatures

表7 变源三次修正方程的4个系数

Table 7 The correction coefficients of the target

系数	v_1	v_2	v_3	v_4
数值	$3.1e-7$	-0.000 24	0.042	-1.3

在MWHS-3A热真空定标中,非线性系数 u 的计算是假设变温源的温度是准确的,在修正冷、热偏差后,得到了非线性修正参数。而现在的处理是首先对变温源的亮温进行修正,然后得到非线性系

数。表8给出了变温源修正前后得到的非线性参数的差异。可见,变温源修正前, u 值的标准差都大于经过修正的 u 值标准差,也就是说,在不对变温源进行修正时, u 值的波动是很大的。表8最后一列给出了两种修正方法得到的 u 值计算残差之间的差异,均在0.1 K以内。但是通过分析不同变温源温度下 u 值的变化情况,可以发现:在变温源未修正的情况下, u 值随变温源温度的升高而明显升高,说明 u 值本身还有一定的变温源温度的影响没有去除。

表8 变温源误差对非线性参数的影响

Table 8 The effect of target temperature biases to nonlinear parameters

频率/GHz	温度/℃	通道	经过变温源修正		未经变温源修正		两种方法引起的 误差/K
			u 值	标准差	u 值	标准差	
150	0	CH1	-0.010 1	0.000 9	-0.019 3	0.002 2	0.05
		CH2	-0.016 5	0.000 7	-0.026 6	0.002 1	0.03
	10	CH1	-0.005 3	0.000 8	-0.013 6	0.002 6	0.09
		CH2	-0.010 2	0.000 5	-0.019 2	0.001 8	0.04
	20	CH1	-0.003 2	0.000 8	-0.009 3	0.001 6	0.07
		CH2	-0.005 8	0.000 8	-0.012	0.001 3	0.03
183	0	CH3	-0.012 2	0.000 1	-0.016 5	0.000 7	-0.02
		CH4	-0.010 2	0.000 4	-0.014 5	0.001 1	0.00
		CH5	-0.019 9	0.000 4	-0.026 1	0.001 2	-0.09
	10	CH3	-0.008 9	0.000 7	-0.013 4	0.001 2	0.02
		CH4	-0.009 6	0.000 5	-0.014 1	0.001 2	0.02
		CH5	-0.014 9	0.000 5	-0.019 8	0.001 2	0.02
	20	CH3	-0.004 3	0.000 3	-0.008 7	0.001 1	0.04
		CH4	-0.006 2	0.000 3	-0.010 8	0.001 1	0.04
		CH5	-0.011 4	0.000 4	-0.016 1	0.000 9	0.04

4 MWHS-3B定标结果和定标精度分析

4.1 定标准确度

定标准确度,也称定标偏差,定义为MWHS-3B测量的亮温与实际计算的亮温之间的偏差 ΔT ^[3-5]。亮温的计算是通过目标上面分布的测温电阻测量的物理温度和已知黑体发射率的乘积来实现的。

$$\Delta T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{m,MWHS} - T_{m,PRT})_i \quad (14)$$

式(14)中, $T_{m,PRT}$ 为铂电阻测量并经过计算得到的辐射量; $T_{m,MWHS}$ 是MWHS-3B测量的辐射量。需要说明的是,由于辐射量有时用亮温(K)表示,也有时用辐亮度表示(如NOAA系列MWHS),所以这里简称为辐射量。

定标准确度是表示测量值偏离真实值程度的一个参数,通常包括随机误差和系统误差,这些误差是尚未发现或者不能校正的。笔者分别选取MWHS-3B天线对准外部变温源时的数据点(其中150 GHz为63~67,183 GHz为54~63)在200个扫描周期内测量亮温的平均值与利用变温源辐射亮温进行比较得到的定标准确度。例如,图12给出10℃下150 GHz和183 GHz的5个通道的定标偏差结果。从图12也可以看出修正后的冷热偏差已经小于0.1 K。此外,通过比较不同温度下的定标偏差的结果可以发现,150 GHz的定标偏差随着IF温度升高而减小,从0.7 K减小到0.35 K。而183 GHz的3个通道的定标偏差差异较大:183-1通道定标偏差在0℃和10℃基本上为1.0 K,而在20℃时减小为0.5 K;182-2通

道在0℃、10℃和20℃的偏差分别为0.5 K、1.0 K和0.7 K；182-3通道在0℃、10℃的偏差均为1.8 K，而在20℃的偏差为1.4 K，说明这个通道的线性度略差。

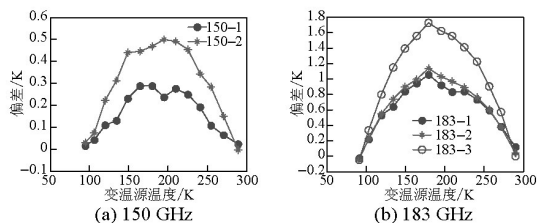


图12 经过定标源偏差修正后的150 GHz和183 GHz在10℃下定标偏差

Fig.12 150 GHz and 183 GHz calibration biases after target temperature correction at 10℃

4.2 接收机线性度

接收机线性度可以用线性相关系数 R 来表示

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (V_{out}^i - \bar{V}_{out})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{out}^i - \bar{V}_{out})^2 \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}} \quad (15)$$

式(15)中, N 为测量点数; \bar{T} 及 \bar{V}_{out} 分别为目标温度和输出电压的均值。接收机非线性系数是利用变温源设为不同温度点时的MWHs-3B输出电压值与对应变温源的亮温值进行二次拟和,计算得到仪器的线性度,再在定标时进行修正得到的。经过定标源的偏差修正后,系统线性度统计平均结果见表9。

4.3 接收机温度分辨率(灵敏度)

$NE\Delta T$ 反映了接收机可探测的最小天线亮温变化的能力。它是接收机系统噪声的函数,影响因素包括电子器件的噪声、增益的短期变化和定标观测计数值噪声等。

利用真空定标试验数据进行温度分辨率分析时,分别选取MWHs-3B天线对准内部热源、外部冷源时的3个数据采样点的中间一个数据采样点在 N 包内的输出电压,然后转换为亮温,再计算这些亮温之间的标准差。为了综合分析高温源和低温源的温度分辨率差异,使用式(16)计算最终灵敏度

$$NE\Delta T = STD(R_{PRT,i} - R_{MWHs,i})_{i=1:N} \quad (16)$$

式(16)中, STD 为标准差运算。图13、图14给出MWHs-3B利用式(16)计算得到的最终热真空定标观测变温源的温度分辨率结果,可见MWHs-3B各个接收通道的温度分辨率最大分别不超过0.75 K、

表9 MWHs-3B线性度

Table 9 Linearity of MWHs-3B

通道	IF 温度/℃	线性度
150-1	0	0.999 994
	10	0.999 998
	20	0.999 999
150-2	0	0.999 985
	10	0.999 994
	20	0.999 998
183-1	0	0.999 978
	10	0.999 977
	20	0.999 995
183-2	0	0.999 988
	10	0.999 973
	20	0.999 989
183-3	0	0.999 956
	10	0.999 937
	20	0.999 964

0.75 K、0.9K、0.5 K 和 0.5 K。同时,还比较了MWHs-3B观测热源、冷源温度分辨率和综合(热源和冷源)在不同变温源温度下的温度分辨率。可见MWHs-3B观测热源、冷源的灵敏度基本上是稳定的,不随变温源温度的变化而改变。但是当变温源的温度变化时,其灵敏度随着变温源温度的升高而增大,符合灵敏度的定义。图13是升降温循环试验,图14是单升温试验。表10给出每个IF温度下灵敏度平均值的比较。

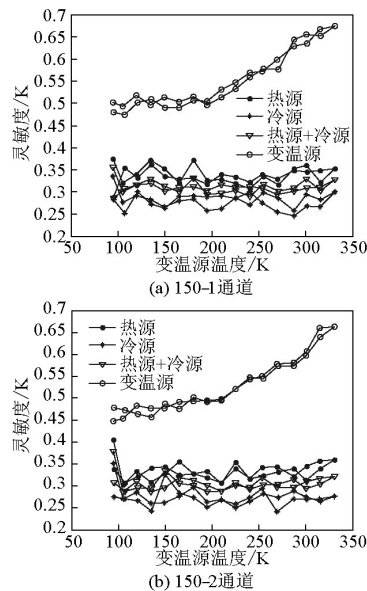


图13 在10℃、150 GHz下观测不同定标源的灵敏度比较
Fig.13 Comparison of sensitivity of 150 GHz at 10℃

注:由升降温循环试验测得

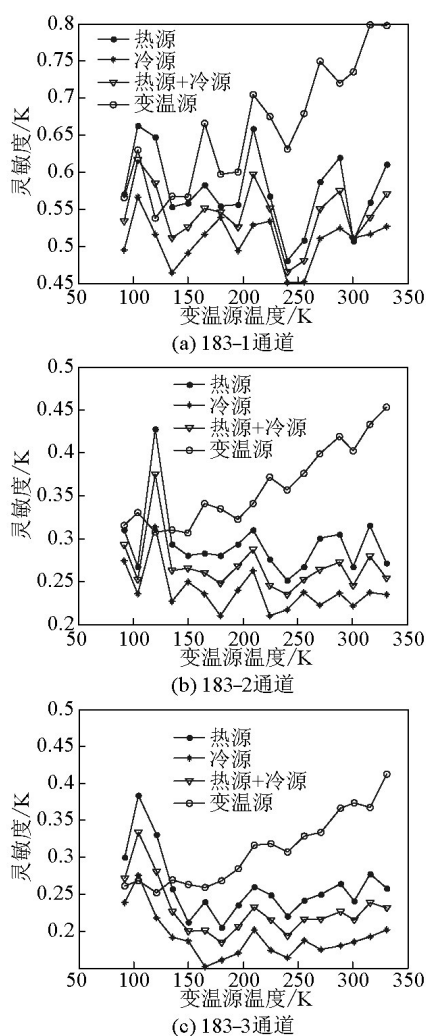


图 14 在 10 °C、183 GHz 下观测不同定标源的灵敏度比较

Fig.14 Comparison of sensitivity of 183 GHz at 10 °C

注:由单升温或单降温试验测得

4.4 MWHS-3B 的定标精度分析

定标精度 ΔT_{CAL} 包括所有的误差贡献,定义为

$$\Delta T_{CAL} = \{ [X\Delta T_w]^2 + [(1-X)\Delta T_c]^2 + [4(X-X^2)\Delta T_{NL}]^2 + [\Delta T_{SYS}]^2 \}^{1/2} \quad (17)$$

式(17)中, ΔT_w 为定标黑体辐射的不确定性; ΔT_c 为冷空定标的不确定性; ΔT_{NL} 为传输函数最大非线性项的不确定性; ΔT_{SYS} 为设备随机波动的不确定性。其中 X 定义为

$$X = (T_s - T_c) / (T_w - T_c) \quad (18)$$

式(18)中, T_s 为场景辐射亮温。

4.4.1 热源亮温的不确定性

图 15 给出 PRT 的安装位置,可以看出 150 GHz 定标体的电阻 4 在下方,电阻 5 挨着中频盒。整个

表 10 MWHS-3B 观测不同目标的灵敏度平均值比较

Table 10 The averaged sensitivity of MWHS-3B at different targets

通道	仪器温度/°C	目标灵敏度/K			
		热源	冷源	热源+冷源	变温源
150-1	0	0.35	0.29	0.32	0.57
	10	0.34	0.28	0.31	0.55
	20	0.34	0.27	0.31	0.53
150-2	0	0.36	0.28	0.32	0.56
	10	0.33	0.27	0.31	0.53
	20	0.33	0.26	0.30	0.51
183-1	0	0.61	0.54	0.57	0.67
	10	0.58	0.51	0.54	0.66
	20	0.58	0.52	0.55	0.65
183-2	0	0.28	0.25	0.27	0.36
	10	0.29	0.24	0.27	0.36
	20	0.28	0.23	0.26	0.35
183-3	0	0.24	0.18	0.21	0.31
	10	0.26	0.19	0.23	0.31
	20	0.23	0.18	0.20	0.30

定标体周围没有绝热,因此受底板温度变化和周围温度变化的影响,5个电阻温度之间的差异较大。而 183 GHz 定标体远离发热部件,因此温度差异较小。下面分别分析两个定标体的温度特点。

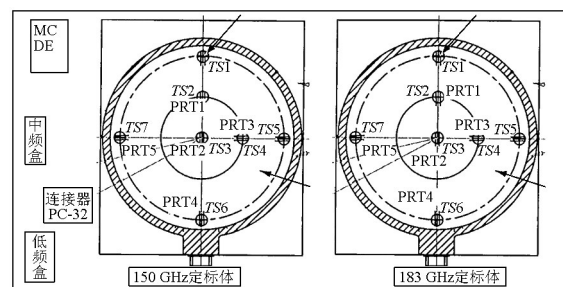


图 15 PRT 的安装位置

Fig.15 The installation of the PRTs

1) 150 GHz 热定标源。在 IF 温度 0 °C 和 20 °C 下,分别比较了在变温源温度从 95 ~ 330 K 变化时 150 GHz 定标体内部 5 个 PRT 测量值的变化,发现当 IF 温度为 0 °C 时,5 个 PRT 温度差异最大可达 1.5 K,而在 20 °C 下的最小差异达到 0.7 K。不同的变温源温度对 5 个电阻温度的均匀性也有影响:变温源温度越高,PRT 测量温度的差异越大。这些差异主要表现在 5 号电阻与其他 4 个电阻之间的温度上,其

他4个电阻在上述4种情况下的最大差异在0.7 K附近。因此,5号电阻的温度是引起定标不确定的主要原因。因此,这里分别比较了采用直接平均和加权平均(根据每个电阻所处位置重要性加权,5个电阻由1~5的权重系数分布如下:2/9,3/9,2/9,1/9,

1/9;2号电阻位于中间权重最大)。两种方法计算的热源温度见表11。本次定标过程中,采用这5个PRT的温度平均值作为热源温度,因此热源的不确定度不大于0.2 K。

表11 150 GHz热源不确定度

Table 11 The uncertainties of the hot calibrator at 150 GHz

IF 温度/K	变源温度/K	热源平均温度/K	热源加权平均温度/K	最大温度差/K	不确定度/K
277.18	330.32	276.86	276.77	1.56	0.08
	94.83	276.37	276.37	1.08	0.00
287.40	330.81	288.57	288.53	1.26	0.04
	95.55	287.47	287.50	0.86	-0.03
295.59	330.71	298.21	298.23	0.69	-0.02
	96.28	298.83	298.79	1.17	0.04

2)183 GHz热定标源。从图15可以看出,183 GHz定标体远离发热部件,5个PRT之间的温度差异受仪器温度影响不明显,而受变温源温度影响明显。

变温源温度越高,温差越小,反之越大。这个结果与150 GHz定标源的正好相反。表12给出183 GHz热源不确定度。

表12 183 GHz热源不确定度

Table 12 The uncertainties of the hot calibrator at 183 GHz

IF 温度/K	变源温度/K	热源平均温度/K	热源加权平均温度/K	最大温度差/K	不确定度/K
274.52	329.74	275.63	275.72	0.73	-0.09
	91.50	276.37	276.51	1.16	-0.14
285.41	330.80	288.72	288.86	1.31	-0.14
	91.95	288.26	288.36	0.96	-0.10
295.57	330.87	299.41	299.49	0.94	-0.08
	95.52	299.80	299.90	1.20	-0.10

150 GHz和183 GHz的热源温度分布差异的原因可能是150 GHz的5号电阻受到IF温度的影响明显,随着IF温度的升高5号电阻的温度升高,而IF温度升高与变温源的温度升高有正相关关系。183 GHz定标体温度变化很小,可能是由于接收机本身的温度比较稳定。

4.4.2 冷源亮温的不确定性

冷源的不确定性主要来自冷偏差的不确定性,估计冷偏差不确定度见表13和表14。该数据对在轨数据处理不适用,而是需要根据在轨测试结果进一步确定。

表13 150 GHz冷源不确定度

Table 13 The uncertainties of the cold calibrator at 150 GHz

IF 温度/K	变源温度/K	不确定度/K
277.18	330.32	0.04
	94.83	0.02
287.40	330.81	0.03
	95.55	0.02
295.59	330.71	0.02
	96.28	0.02

表 14 183 GHz 冷源不确定度

Table 14 The uncertainties of the cold calibrator at 183 GHz

IF 温度/K	变源温度/K	不确定度/K
274.52	329.74	0.04
	91.50	0.03
285.41	330.80	0.03
	91.95	0.02
295.57	330.87	0.03
	95.52	0.02

4.4.3 系统的非线性误差

非线性误差是指经过非线性二次修正后的残余误差。MWHS-3B 热真空定标数据经过冷偏差、热偏差、发射率、非线性修正,最终的残差见表 15。由于经过 200 包数据的平均,所以结果中基本没有灵敏度的影响,只有非线性的残差。

从前面线性度分析结果来看,对于 MWHS-3B 非线性的不确定度,各个接收通道 150-1、150-2、183-1、183-2、183-3 初步估算分别不超过 0.2 K、0.3 K、0.2 K、0.2 K 和 0.3 K。

表 15 非线性误差(残差)

Table 15 The residuals of nonlinear errors

通道	IF 温度/℃	最大残差/K	最小残差/K
150-1	0	0.18	-0.01
	10	0.18	0.10
	20	0.08	-0.01
150-2	0	0.25	0.00
	10	0.24	0.13
	20	0.10	-0.02
183-1	0	0.12	0.01
	10	0.18	-0.07
	20	0.12	-0.02
183-2	0	0.11	-0.02
	10	0.10	-0.05
	20	0.13	-0.01
183-3	0	0.30	-0.02
	10	0.10	-0.05
	20	0.09	-0.02

4.4.4 定标精度估算

根据式(17)可以估算最后整体的定标精度,结果见表 16。

表 16 MWHS-3B 定标精度结果

Table 16 Calibration precision of MWHS-3B

通道	热源最大不确定度/K	冷源最大不确定度/K	最大非线性误差/K	最大灵敏度/K	定标精度/K
150-1	0.1	0.1	0.2	0.75	0.79
150-2	0.1	0.1	0.3	0.75	0.82
183-1	0.2	0.1	0.2	0.9	0.95
183-2	0.2	0.1	0.2	0.5	0.58
183-3	0.2	0.1	0.3	0.5	0.62

4.4.5 自动增益控制(AGC)对非线性参数的影响

另外,定标试验中,各个通道的 AGC 不是不变的,而是根据输出情况进行相应调整,具体数值如表 17 所示。

表 17 MWHS-3B 的 AGC 数值

Table 17 AGCs for MWHS-3B

温度/℃	150-1/V	150-2/V	183-1/V	183-2/V	183-3/V
0	7.1	7.4	6.3	5.2	6.6
10	6.8*	7.1	6.3	5.3	6.8
20	6.6*	6.9	6.3	5.3	6.8

注:*表示这个温度循环 AGC 曾发生改变,不是一个固定值

本文前面的处理结果只是针对表 17 中 AGC 所对应的文件进行处理的,因为在 AGC 不同的情况下 u 值通常是不同的,所以其他 AGC 下的测量数据由于太少无法得到非线性参数没有处理。图 16 是 150 GHz 在 IF 温度 10 °C 升温循环非线性修正后的残差。150 GHz 在 IF 温度 10 °C 升温过程中,从 95 K 到 195 K, AGC 分别为 7.1 V 和 7.4 V。与右边的 AGC 不同。图 16 中竖线左边的残差是利用右边得到的 u 值修正后的结果,可以看出,尽管量级上一般不超过 0.3 K,但非线性依然存在。

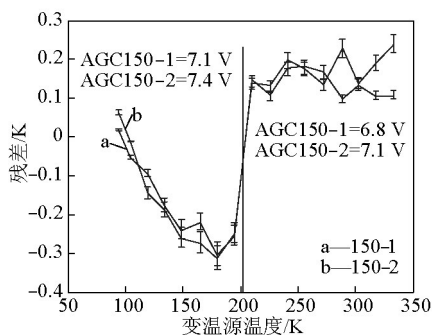


图16 150 GHz在10℃升温循环非线性修正后的残差
Fig.16 The residuals of 150 GHz after correcting of nonlinearity at 10℃

图17是183 GHz在IF温度20℃升温的曲线,从95 K到105 K,AGC电压分别为6.8 V和7.1 V。对于183-1和183-2通道(左侧上面两条线),这个非线性系数带来的残差很小,可以应用。而对于183-3通道,则出现了异常。可见AGC变化对于这个通道非线性修正有很大影响,非线性参数必须在同一个AGC下获得。

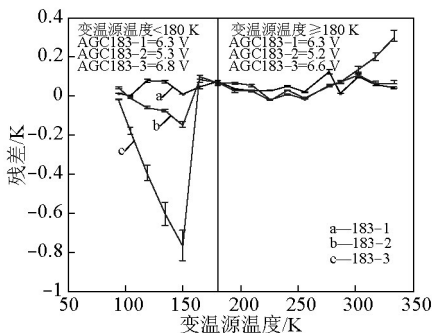


图17 183 GHz在20℃下非线性修正后的残差
Fig.17 The residuals of 183 GHz after correcting of nonlinearity at 20℃

5 结语

MWHS-3B观测热源、冷源时的灵敏度基本上是稳定的,但是观测变温源时,随着变温源的温度变化,其灵敏度也是变化的,其趋势是随着变温源温度的升高而增大。150-1、150-2、183-1、183-2和183-3 5个通道观测变温源的灵敏度最大值分别为0.75 K、0.75 K、0.9 K、0.5 K和0.5 K。

MWHS-3B的非线性系数随IF温度变化如图18所示。由图18可以看出,非线性系数随IF温度的升

高而减小,说明接收机的线性度随IF温度的升高而升高。其中,183-2通道0℃和10℃时的非线性系数比较接近,可能是由于183 GHz在0℃时用于分析非线性系数的温度点较少导致其线性度较好。最终,150-1、150-2、183-1、183-2和183-3 5个通道的最大非线性误差分别为0.2 K、0.3 K、0.2 K、0.2 K和0.3 K。

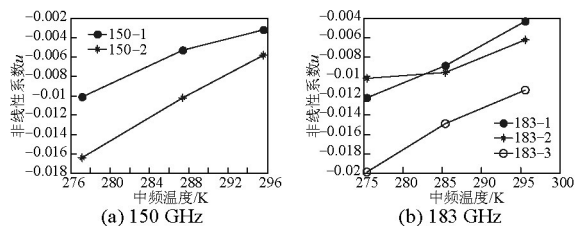


图18 MWHS非线性系数随IF温度变化
Fig.18 Nonlinear coefficients of MWHS change with IF temperatures

在不同温度下,150 GHz和183 GHz接收机中频温度随变温源温度变化,150 GHz中频温度变化最大可以达到2 K左右;183 GHz的中频温度基本稳定,因此对于 u 插值影响不大。

根据分析和计算,MWHS-3B定标精度包括冷源和热源的不确定性、非线性误差以及接收机灵敏度的影响,最终150-1、150-2、183-1、183-2和183-3 5个通道的定标精度分别为0.79 K、0.82 K、0.95 K、0.58 K和0.62 K。目前的试验条件还不完善,测量结果、处理结果和方法仍有需要改进的地方。

参考文献

- [1] 张升伟,李靖,姜景山,等.风云三号卫星微波湿度计的系统设计与研制[J].遥感学报,2008,12(2):199-207.
- [2] Saunders R W, Hewison T J, Stringer S J, et al. The radiometric characterization of AMSU-B [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(4): 760-771.
- [3] Wang Zhenzhan, Li Jing, Zhang Shengwei, et al. Prelaunch calibration of microwave humidity sounder on China's FY-3A meteorological satellite [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(1): 29-33.
- [4] JPL D-17005, Airs project algorithm theoretical basis document, level 1b, Part 3: Microwave instruments, Version 2.1 [R]. Pasadena, California: JET PROPULSION LABORATORY, California Institute of Technology, 2000.
- [5] Mo Tsan. Prelaunch calibration of the advanced microwave sounding unit-A for NOAA-K [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(8): 1460-1469.

(下转53页)