

# FY-3C 微波温度计在轨辐射非线性定标新方法

安大伟<sup>1</sup>, 谷松岩<sup>1</sup>, 杨忠东<sup>1</sup>, 陈文新<sup>2</sup>

(1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 航天五院西安分院, 陕西 西安 610100)

**摘要:**结合 FY-3C 微波温度计地面真空试验数据呈现出的高次特性, 理论分析按照马克劳林展开的二极管方程呈现的高次项, 分析 FY-3C 微波温度计在轨辐射非线性特性, 设计了两点线性定标修正 + 三次方程非线性建模订正方法, 对温度计的非线性特性偏差进行良好的校正和定标, 该方法能够很好的对仪器高次曲线进行良好标定, 结果采用 O-B 和与 ATMS 进行交叉比对方法进行验证, 定标精度比使用国外常规 U 参数订正方法提高最高达 4 K, 显著提高全球大气三维温度产品性能。

**关键词:**风云三号 C 星; 微波温度计; 二极管; 定标; 三次方程

**中图分类号:** P413.2 **文献标识码:** A

## On-orbit radiometric calibration for nonlinear of FY-3C MWTS

AN Da-Wei<sup>1</sup>, GU Song-Yan<sup>1</sup>, YANG Zhong-Dong<sup>1</sup>, CHEN Wen-Xin<sup>2</sup>

(1. CMA National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Xi'an Branch five branches of aerospace, Xi'an 610100, China)

**Abstract:** The temperature data measured with the microwave thermometer in the ground vacuum experiment suffer from a high-order nonlinearity, which cannot be properly calibrated with the traditional method. The origin of this high-order term was analyzed with the diode equation expressed in the form of Maclaurin expansion. A method combining the two-point linear correction with the cubic equation nonlinear correction was proposed to calibrate the deviation of the temperature data from the actual one. The method was verified through the cross-comparison of data from O-B and ATMS for the FY-3C microwave thermometer. The calibration precision reaches up to 4 K higher than that achieved using the U parameter correction method.

**Key words:** FY-3C, MWTS, diode, calibration, three equations

**PACS:** TP722.6

## 引言

风云三号 C 星是我国第二代极轨气象卫星的首发业务星, 主要任务之一就是获取全球全天候高精度大气参数为数值天气预报提供初始场信息。其主载荷--微波温度计 MWTS 中重要的氧气吸收谱段, 和美国 ATMS 温度通道 50 ~ 57 GHz 一致, 全球三维大气温度廓线数据为数值天气预报和台风暴雨强对流天气系统预测分析提供重要保障<sup>[1-2]</sup>。MWTS 在地面真空定标试验中数据呈现出的高次曲线特性, 使得应用欧空局 ESA-metop 卫星同类仪器 AM-

SU 上使用的经典小 U 非线性订正方法<sup>[3]</sup>在 MWTS 上失效。迄今为止采用国外小 U 非线性订正方法的在轨 MWTS 定标精度具有严重的负偏差, 各通道平均偏差在 4 K。

在 FY3C-MWTS 的在轨定标验证中, 采用模式比对 O-B(O 是卫星观测亮温, B 是模式正演亮温) 进行比对和与国外辐射精度较高的相同波段(如 NOAA 卫星 ATMS<sup>[4]</sup>资料) 进行交叉比对。在近窗区通道(即受地面影响的通道, MWTS 为 1-4 通道) 采用交叉比对, MWTS 和 ATMS 星下点的分辨率为 33 km, 采用两颗卫星交叉过境时间差 5 分钟内的数

收稿日期: 2015-06-18, 修回日期: 2015-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(41105009, 61527805)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (NSFC41105009, 61527805)

作者简介 (Biography): 安大伟(1982-), 男, 湖北荆门, 副研, 博士, 主要研究方向为微波毫米波遥感定标。E-mail: andawei@cma.gov.cn

Received date: 2015-06-18, revised date: 2015-12-13

据,筛选  $3 \times 3$  像元尺度内理想均匀目标,进行数据交叉比对;在大气吸收通道(即大气垂直路径探测通道)采用 O-B 比对验证,这里采用 T639 作为模式背景场资料,采用 CRTM 模式进行正演生成卫星模拟观测亮温,进行数据模式比对验证。

采用国外经典小 U 非线性订正方法进行定标, MWTS 呈现出严重的定标误差,即各通道平均偏差达到  $-4$  K(如图 2),难以业务应用. 经过具体分析数据, MWTS 真空定标数据呈现高次曲线特性,和 ESA-AMSU 真空定标曲线呈现的二次曲线特性不同,因此小 U 非线性订正方法不适用于 MWTS 的仪器定标过程。

国内相关学者开展了相关毫米波辐射计定标方面的工作<sup>[5-9]</sup>. 本文将提出针对高次曲线特性的微波辐射计新定标方法,该方法具体过程包括两点定标低温点修正,建立三次方程非线性订正模型,开展定标过程,改进高次曲线特性的微波辐射计定标性能。

## 1 U 参数订正方法和结果

ESA-metop 卫星 AMSU 上使用的经典小 U 非线性订正方法难以适应通道误差呈现高次曲线情况,因为 U 参数的物理定义为采用具有二次方程函数特性进行低温延展. 采用地面真空试验  $95 \sim 320$  K 的二次曲线,通过 U 参数函数方程进行延展到在轨冷空目标  $2.73$  K,进而进行非线性订正如图 1, MWTS 通道特性呈现高次振荡效应, U 参数的低温延展和振荡曲线指向的低温点偏差较大,难以实现高精度非线性订正,导致偏差较大,经过和美国 NOAA 的 ATMS 进行交叉比对,精度如图 2。

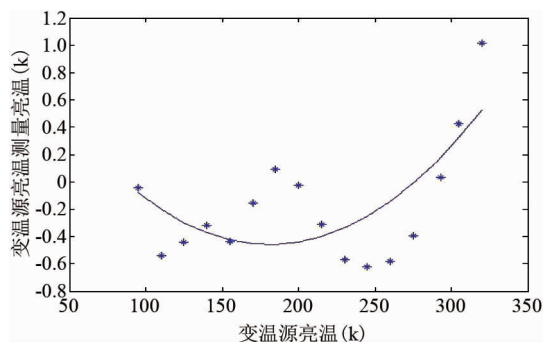


图 1 U 参数函数方程拟合曲线  
Fig. 1 The fitting of U parameter function equation to the experimental data

图 1 实线代表 U 参数函数曲线,点线代表地面真空试验测试数据偏差分布. 横坐标表示变温源亮温,纵坐标表示变温源亮温-测量亮温。

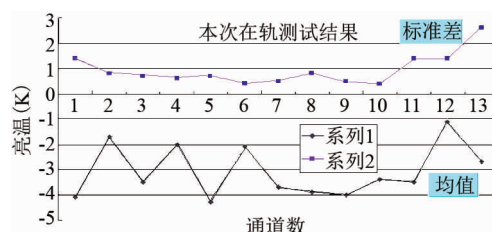


图 2 MWTS 和 ATMS 进行交叉比对结果  
Fig. 2 The cross comparison of MWTS and ATMS

图 2 中粉色点表示 13 个通道的标准差,蓝色点表示偏差,可以看到大部分通道的偏差都在  $-4$  K 量级,具有严重的负向偏差. 横坐标表示 1-13 个通道,纵坐标表示亮温。

## 2 温度计接收机两点定标修正

在完成水分烘烤、真空检漏、抽真空和真空罐降温,以及冷定标源降温和变温源降温等工作之后,开始地面真空定标试验. 完成了微波温度计工作温度为  $15^\circ\text{C}$  时的定标测试. 变温源的温度设定为:  $95$  K、 $110$  K、 $125$  K、 $140$  K、 $155$  K、 $170$  K、 $185$  K、 $200$  K、 $215$  K、 $230$  K、 $245$  K、 $260$  K、 $275$  K、 $293$  K、 $305$  K、 $320$  K,共 16 个测试点,冷源的温度设定为  $95$  K,在  $15^\circ\text{C}$  时微波温度计的热定标源稳定在  $293$  K。

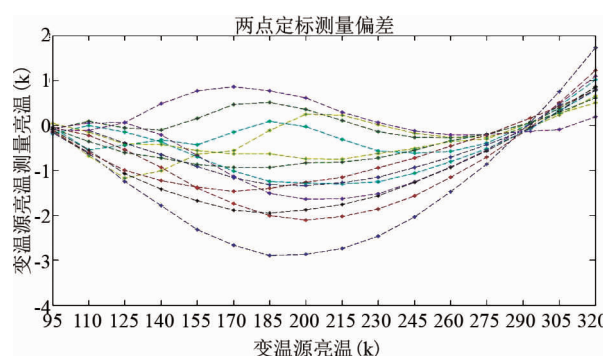


图 3  $15^\circ\text{C}$  升温试验对应的真空定标试验曲线  
Fig. 3 Target temperature calibration in a vacuum test with the thermometer working at  $15^\circ\text{C}$

图 3 横坐标表示从  $95$  K ~  $293$  K 的 16 个观测亮温点(即观测对象变温源温度),纵坐标表示变温源亮温-两点定标测量亮温值,某些通道呈现三次方程曲线特性,而不是常见的二次曲线特性,因此对于这种类型的真空定标数据, AMSU 定标采用的 U 形式对二次曲线进行非线性订正的方法是无效的,因为在  $95$  K 低温端进行二次延展寻找  $2.73$  K 亮温点时,难以高精度延展到在轨冷空观测对应的  $2.73$  K。

观测温度是在每条扫描线利用冷源和热源的温度数据( $T_C$  和  $T_H$ ) 和观测数据( $V_C$ 、 $V_H$  和  $V_S$ ), 采用两点定标的方法计算得到,  $T_S$  是 2.73 K 低温端.

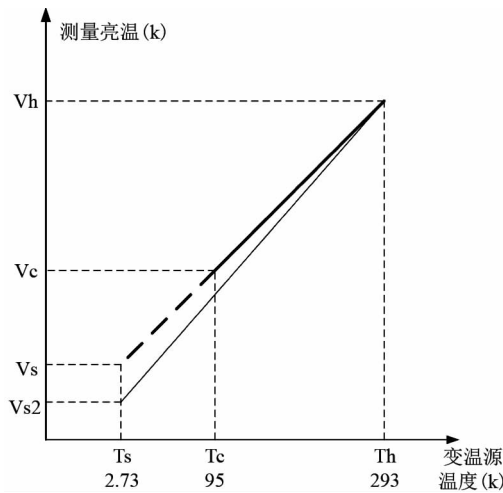


图4 两点定标修正  
Fig.4 Two points calibration correction

如图4所示,

$$T_C = a * V_C + b \quad (1)$$

$$T_H = a * V_H + b \quad (2)$$

$$T_S = a * V_S + b \quad (3)$$

其中:  $a = (T_H - T_C) / (V_H - V_C)$ ,

$$b = (V_H * T_C - V_C * T_H) / (V_H - V_C),$$

$V_H$  和  $V_C$  代表热定标源和冷定标源的测量亮温.

由于在地面真空试验中, 只能人造 95 ( $T_c$ ) ~ 320 K ( $T_h$ ) 的变温源范围, 地面难以实现 2.73 K ( $T_s$ ) 的宇宙背景低亮温, 图4中黑色粗实线表示地面能够进行的测量试验, 在地面通过线性拟合, 采用最小二乘法向低温段延展至 2.73 K, 对应的测量亮温为  $V_s$ , 图中黑色粗虚线表示延展结果. 卫星发射入轨后, 采用观测宇宙冷空 2.73 K 作为低温端代替地面试验中的 95 k 低温端, 因此温度计在卫星轨道上具有 2.73 ( $T_s$ ) ~ 293K ( $T_h$ ) 的更宽变温范围. 在低温端 2.73K ( $T_s$ ) 处对应的卫星测量亮温为  $V_{s2}$ , 因此和地面对应的  $V_s$  具有一定的偏差, 即卫星轨道上对应的两点定标直线和地面真空定标直线不重合. 在轨进行非线性订正工作前, 需要进行低温端偏差订正.

先进行订正:

$$VV = V_S - V_{S2} \quad (4)$$

$$T_S = a * (V_{S2} + VV) + b \quad (5)$$

$$T_H = a * V_H + b \quad (6)$$

通过公式(5)、(6)联合得到经过低温端偏差订

正的两点定标系数, 该系数适合于星载两点定标过程.

通过上式的低温端偏差订正, 卫星在轨的两点定标直线和地面真空定标试验直线一致, 为后面的三次方程非线性订正采用地面真空定标数据提供科学基础.

### 3 温度计接收响应高次曲线机理

小信号检波是高频输入信号的振幅小于 0.2 V, 利用二极管伏安特性弯曲部分进行频率变换, 然后通过低通滤波器实现检波. 通常称其为平方律检波图5.

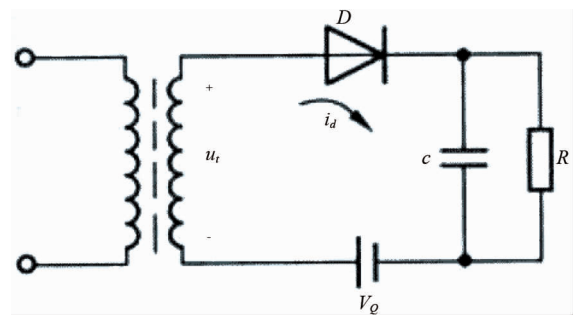


图5 二极管平方律检波  
Fig.5 The square-law detector diode

二极管方程的马克劳林展开如下:

二极管方程是  $I = I_s * [\exp(V/uT) - 1]$ , 式中  $uT$  是热电压,  $V$  是二极管的压降,  $I$  是二极管的电流, 常温下是 26 mv, 由于实际二极管不是理想二极管, 所以实际计算采用的  $uT$  比 26 mv 大一些.

记  $x = V/uT$ , 使用马克劳林级数将二极管方程展开得到:

$$I = I_s * (x + x^2/2! + x^3/3! + x^4/4! + \dots) \quad (7)$$

式中,  $x = V/uT$  当  $V$  是小于  $uT$  的小信号, 我们可以忽略高阶小量得到,  $I = I_s * (x + x^2/2!)$ , 这就是小信号二极管方程, 但是在实际应用中当大信号出现时, 二次项后面的三次、四次等高次项不可忽略. 也就是说在大信号条件下图6 检波器 I-V 曲线上面叠加了高次振荡曲线.

当接收机灵敏度低, 例如本机噪声  $T_R = 1\ 000$  K, 在轨测量的大气亮温范围  $T_A$  为 100 ~ 300 K, 这样二极管检波范围  $T_o$  就是 1 002.7 ~ 1 300 K (亮温中值 1 151.35 K), 而有效工作区  $T$  只有 1 100 ~ 1 300 K (亮温宽度 200 K), 是大动态范围中的很小一段, 相对亮温带宽:  $WW = \text{亮温宽度} / \text{亮温中值} = 200\ \text{K} / 1151.35\ \text{K} = 0.17$ .

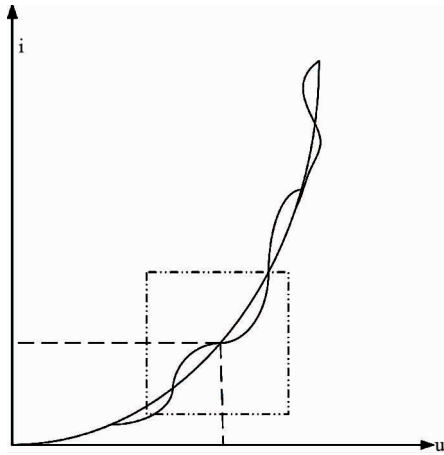


图6 I-V 曲线上面叠加了高次振荡曲线  
Fig.6 I-V curves with low and high order terms

即  $WW \ll 1$ , 因此二极管的 I-U 曲线在此小范围内弧度较好, 呈现二次特性, 用小 U 方法较好(在 FY3-A/B 的 MWTS 中得到验证), 如图 7 左图.

$$\text{灵敏度: } \Delta T_s = \frac{T_A + T_R}{\sqrt{B_{IF}\tau}} \quad (8)$$

其中,  $T_R$  为接收机本机噪声,  $T_A$  天线观测大气亮温,  $B_{IF}$  为中频带宽,  $\tau$  为积分时间.

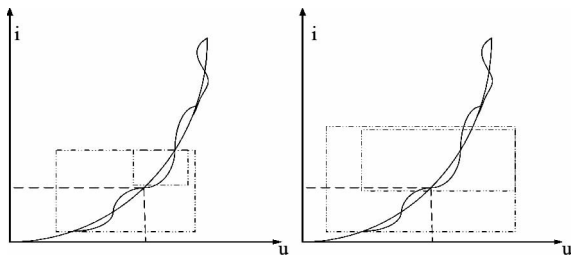


图7 (左图)灵敏度低对应的 I-V 曲线和工作范围. (右图)灵敏度高对应的 I-V 曲线和工作范围  
Fig.7 IV curves and scope of work for the instrument with low sensitivity (left) and high sensitivity (Right)

可以看到图 7(左图)中大框部分  $T_o$  是 0 ~ 1 300 K 监测范围, 小框部分  $T$  是 1 100 ~ 1 300 K 监测范围, 可以看到在该小范围内呈现二次曲线特性.

当接收机灵敏度高, 例如本机噪声  $T_R = 100$  K, 在轨测量大气亮温范围  $T_A$  从 100 ~ 300 K, 这样二极管检波范围  $T_o$  就是 102.7 ~ 400 K, 而有效区  $T$  有 200 ~ 400 K, 是大动态范围中的很大一段, 相对亮温带宽:  $WW = \text{亮温宽度} / \text{亮温中值} = 200 \text{ K} / 251.35 \text{ K} = 0.8$ .

即  $WW \approx 1$ , 因此二极管的 I-U 曲线在此大范围内呈现复杂高次特性, 小 U 方法难以高精度订正.

可以看到图 7(右图)中大框部分  $T_R$  是 0 ~ 400 K 监测范围, 小框部分  $T_A$  是 200 ~ 400 K 监测范围, 可以看到在该大范围内呈现高次曲线特性. 即图 3 的各个通道呈现的高次曲线响应特性.

另外积分时间的长短也会影响高次曲线特性, 较短积分时间使得检波管的振荡特性得以呈现, 而较长积分时间的平均效应使得检波管的振荡特性得以平滑.

#### 4 高次方程非线性订正

FY-3 微波温度计在轨采用温度控制, 射频和中频部分工作温度稳定在 15 度(误差 0.1 度), 因此该仪器增益、AGC、噪声特性和非线性特性稳定.

采用式(5)、(6)得到的两点定标系数  $a, b$  代入式(10)的非线性补偿量, 订正后的亮温模型为:

$$V = 1/a * T - b/a + Q \quad (9)$$

$Q$  表示非线性贡献补偿, 采用图 1 中各个通道地面真空定标曲线建模出高次方程, 各个通道的亮温补偿公式如下:

$$\begin{aligned} Q1 &= c31 \times x^3 + c21 \times x^2 + c11 \times x + c01 \\ Q2 &= c32 \times x^3 + c22 \times x^2 + c12 \times x + c02 \\ &\dots \\ Qi &= c33 \times x^3 + c23 \times x^2 + c13 \times x + c03 \end{aligned} \quad (10)$$

#### 5 结果精度检验

图 8 为通道 5 温度亮温的全球分布, 可以看见 5 km 大气高度温度具有纬度分布特性, 且亚洲西伯利亚地区具有明显低温寒潮特性.

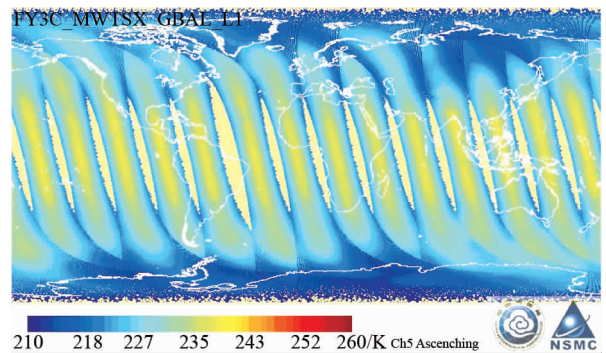


图8 通道5 亮温全球分布  
Fig.8 Brightness temperature global distribution for channel 5

采用模式比对 O-B 和与 NOAA-ATMS 的交叉比对进行定标精度验证如下.

图 9 中蓝色表示 O-B 比对偏差结果, 可以看到大部分通道亮温偏差在 1 K 以内, 3 通道受到地面

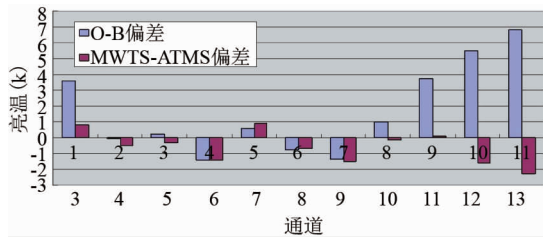


图9 O-B 和交叉比对偏差

Fig.9 O-B and cross comparison for error

干扰,模式误差大,11~13 通道由于是窄带通道,理论上误差较大.红色表示和 NOAA 的 ATMS 进行交叉比对偏差结果,可以看到大部分通道亮温偏差在 1 K 以内.

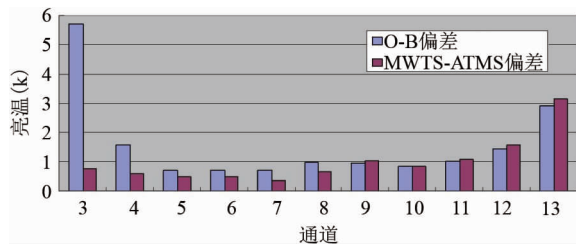


图10 O-B 和交叉比对标标准差

Fig.10 O-B and cross comparison for Standard deviation

图 10 中蓝色表示 O-B 比对标标准差结果,可以看到大部分通道亮温标准差在 1 K 以内,3、4 通道受到地面干扰,模式误差大,11~13 通道由于是窄带通道,理论上误差较大.红色表示和 NOAA 的 ATMS 进行交叉比对标标准差结果,可以看到大部分通道亮温标准差在 1 K 以内,和美国的 ATMS 一致性较好.

## 6 小结

针对 FY-3C 微波温度计在轨辐射非线性特性,根据检波二极管在微波辐射计高灵敏度要求下具有的大动态范围检测特性,设计了两点线性定标修正 + 三次方程非线性建模订正方法,对温度计的非线性特性偏差进行良好的校正,该方法能够很好的对

仪器高次曲线进行良好标定,结果采用 O-B 和与 ATMS 进行交叉比对方法进行验证,定标精度比使用国外常规 U 参数订正方法提高最高达 4 K,显著提高全球大气三维温度产品性能,目前,相关业务化工作正在进行中.

## References

- [1] Weng F. Zou, X. Wang, X. , *et al.* Introduction to Suomi NPP ATMS for NWP and tropical cyclone application, [J]. *J. Geophys. Res.*, vol. 117, doi:10.1029/2012JD018144.
- [2] Zou X. Wang X, Weng F. *et al.* Assessments of Chinese Feng-Yun microwave temperature sounder (MWTS)-measurements for weather and climate applications, [J]. *J. Ocean. Atmos. Technol.*, 2011. 28(. 10):. 1206 - 1227,
- [3] AIRS PROJECT. ALGORITHM THEORETICAL BASIS DOCUMENT. Level 1b, Part 3: Microwave Instruments [R]. JET PROPULSION LABORATORY California Institute of Technology Pasadena, California.
- [4] ZOUU Xiao-Lei, Lin Lin, Weng Fu-Zhong. Absolute calibration of atms upper level temperature sounding channels using gps ro observations [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2014, **52**(2), 1397 - 1405.
- [5] LUAN Hui, ZHAO Kai. Error analysis and accuracy validation of two-point calibration for microwave radiometer receiver [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (栾卉, 赵凯. 微波辐射计接收机两点定标法误差分析及准确性验证. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4): 289 - 292.
- [6] PENG Shu-Sheng, WU Li, YIN Xing-Hui, XU Zhi-Cai. Characteristic parameters measurement of a 3 mm band radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭树生, 吴礼, 殷兴辉, 徐之材. 3 mm 波段辐射计特性参数的测试. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 129 - 132.
- [7] HUANG Quan-Liang, XIAO Zhi-Hui, ZHANG Zu-Yin, GUO Wei. Calibration system for mmw radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄全亮 肖志辉 张祖荫 郭伟. 毫米波辐射计定标系统. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(2): 119 - 122.
- [8] PENG Shu-Sheng, LI Xing-Guo. Study on the calibration method of 8mm measuring radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭树生, 李兴国. 8mm 测量辐射计定标方法的研究. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(4): 279 - 284.
- [9] GUO Yang, LU Nai-Meng, QI Cheng-Li, GU Song-Yan, XU Jian-Min. Calibration and validation of microwave humidity and temperature sounder onboard FY-3C satellite [J]. *Chinese J. Geophysics* (郭杨, 卢乃锰, 漆成莉, 谷松岩, 许健民. 风云三号 C 星微波湿温探测仪的定标和验证. *地球物理学报*), 2015, **58**(1): 20 - 31.