

# 风云三号A星微波湿度计探测通道定标分析

谷松岩<sup>1</sup> 郭杨<sup>1</sup> 王振占<sup>2</sup> 卢乃锰<sup>1</sup>

(1 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081;

2 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要:** 微波湿度计装载在中国新一代极轨气象卫星风云三号卫星上, 可完成全天候大气湿度信息的被动微波遥感探测。风云三号A星(FY-3A)微波湿度计(MWHS)在150~191GHz频率范围内有5个通道, 为保证在轨定量应用, FY-3A发射之前, 在2m真空罐(TVAC)中完成了MWHS真空试验, 获得了接收机非线性等基本参数。FY-3A MWHS在轨运行的4年中, 性能一直稳定, 扫描周期内冷空和热源观测结果的变化一般在20个计数以内; 绕地一圈的轨道观测中热源温度变化不超过0.5K。基于从TVAC试验中获得的非线性订正, FY-3A MWHS观测亮温与NOAA-17 AMSU-B及NOAA-18 MHS观测亮温有很好的—致性; FY-3A MWHS与NOAA-17 AMSU-B瞬时匹配点平均亮温差在 $183 \pm 1$ GHz通道小于1.0K。在观测场与背景场的比较分析中, FY-3A MWHS $183.31 \pm 1$ GHz通道的观测和模拟亮温差与NOAA-18 MHS具有相同分布特性; 而对 $183.31 \pm 7$ GHz通道而言, FY-3A MWHS与背景场更为吻合。分析表明, FY-3A MWHS数据将有助于数值天气预报。

**关键词:** FY-3A MWHS, 定标, 交叉对比

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.005

## Calibration Analyses for Sounding Channels of MWHS Onboard FY-3A

Gu Songyan<sup>1</sup>, Guo Yang<sup>1</sup>, Wang Zhenzhan<sup>2</sup>, Lu Naimeng<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites and the National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** The Microwave Humidity Sounder (MWHS) is a five-channel microwave radiometer in the range of 150~191 GHz onboard FengYun 3 (FY-3). Before the launch of FY-3A, the intensive thermal vacuum (TVAC) tests for MWHS had been carried out in a 2-m TVAC chamber, and the basic parameters such as receiver nonlinearity were obtained. Four-year operation shows that the performance of FY-3A MWHS remains stable. The variations among space views and warm target views in the interval of scan lines were generally within 20 counts. In addition, the temperature fluctuation of the warm target in a single pass is within 0.5 K. Primarily, due to the nonlinearity correction obtained from the TVAC test, radiance measurements of MWHS agree well with NOAA-17 AMSU-B and NOAA-18 Microwave Humidity Sounder (MHS) data. Averaged brightness temperature differences between FY-3 MWHS and NOAA-17 AMSU-B, at simultaneous cross-overpass points, are less than 1.08 K for the channels at  $183 \pm 1$  GHz. In the observation-minus-background comparison, the observed and simulated brightness temperature biases of FY-3 MWHS and NOAA-18 MHS exhibit similar performance in the  $183.31 \pm 1$  GHz channel; but in the  $183.31 \pm 7$  GHz channel, MWHS agrees better with background. It is anticipated that FY-3 MWHS data will contribute to numerical weather prediction.

**Keywords:** Calibration, cross comparison, FY-3A MWHS

### 1 引言

风云三号(FY-3)卫星是中国第二代太阳同步轨道卫星, 该系列的前两颗星, 即FY-3A和FY-3B, 分别

在2008年5月27日和2011年11月9日成功发射。FY-3的大气垂直探测仪器组包括微波湿度计(MWHS)、红外分光计(IRAS)和微波温度计(MWTS), 其中微波湿度计可全天候探测全球大气湿度, 并监测台风和暴雨等灾害性天气系统<sup>[1]</sup>。同化应用MWHS数据可以改善数值天气预报中所需的大气湿度场<sup>[2,3]</sup>。

中国科学院空间科学与应用研究中心完成了FY-3A/B两颗星微波湿度计的研制, 为确定MWHS的辐射

收稿日期: 2013年3月27日; 修回日期: 2013年6月20日

第一作者: 谷松岩(1963—), Email: gusy@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB951600); 国家高新技术研究发展计划(863计划)项目(2007AA12Z115)

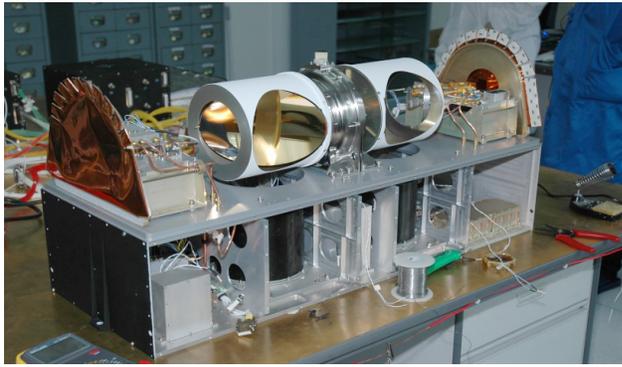


图1 FY-3A MWHS仪器实物图片

特性，在卫星发射前对其进行了热真空（TVAC）测试。本文首先介绍MWHS仪器，尤其是其通道特性和在轨定标过程。将FY-3 MWHS与NOAA-17 AMSU-B的观测结果进行比较分析。同时，还比较了FY-3A MWHS和NOAA-18的微波湿度计（MHS）的观测及模拟亮温差。

## 2 微波湿度计（MWHS）简介

MWHS为全功率型微波辐射计，在150~191GHz频段设有5个通道，其中在183.31GHz强水汽吸收线附近设置了3个垂直极化的双边带探测通道（ $183.31 \pm 1\text{GHz}$ ， $183.31 \pm 3\text{GHz}$ ， $183.31 \pm 7\text{GHz}$ ）。150GHz处的两个窗区具有不同的极化方式（垂直和水平）<sup>[4]</sup>。图1展示了仪器照片，原理在图2中给出。对MWHS光谱特性的更多细节在文献[5]中有描述。

MWHS在轨正常工作模式中，两个偏置抛物面天线垂直于飞行轨道。跨轨扫描带宽度为2700km，过赤

道局地时间为上午10:20。入射的微波辐射被天线反射到圆锥形波纹喇叭馈源，150GHz频点通过准光学系统实现极化分离，183GHz频点分为3个设计通道，得到以计数形式表示的各通道观测值。为提高灵敏度，每个接收机设计为双边带。信号经过12.75ms的积分放大，转换成14位数据。MWHS的频率稳定性为5.0MHz，探测通道的主波束效率大于98.0%。MWHS在轨特征参数的细节描述在表1中给出。

MWHS天线视场宽度 $1.1^\circ$ ，指向精度为 $0.1^\circ$ ，星下点空间分辨率约为16km。每8/3s，MWHS扫描98个地球观测点，3个空间观测点，3个内部黑体观测点，对地扫描张角为 $\pm 53.35^\circ$ 。一个扫描周期内，天线转速又多次切换，在观测地球、冷空及内部黑体期间天线匀速旋转，而在这3个观测区之间切换时，天线做加速和减速运动。热源黑体上埋嵌有7个铂电阻温度计（PRT），其中5个用于监测黑体温度，2个作为备份。微波湿度计与卫星平台间可以进行热交换，处于被动温控状态。冷空观测像元中心在 $107.1^\circ$ ，冷空与内部热源观测数据用于完成MWHS的在轨两点定标。

## 3 MWHS在轨业务定标原理

FY-3 MWHS业务定标方法是实时在轨定标，包括原始计数到微波辐射的转换、非线性订正和天线订正等过程。

### 3.1 定标基础数据的质量控制

定标数据的质量控制包括对热源铂电阻温度计（PRT）观测值、冷空和热源的位置及观测值、仪器

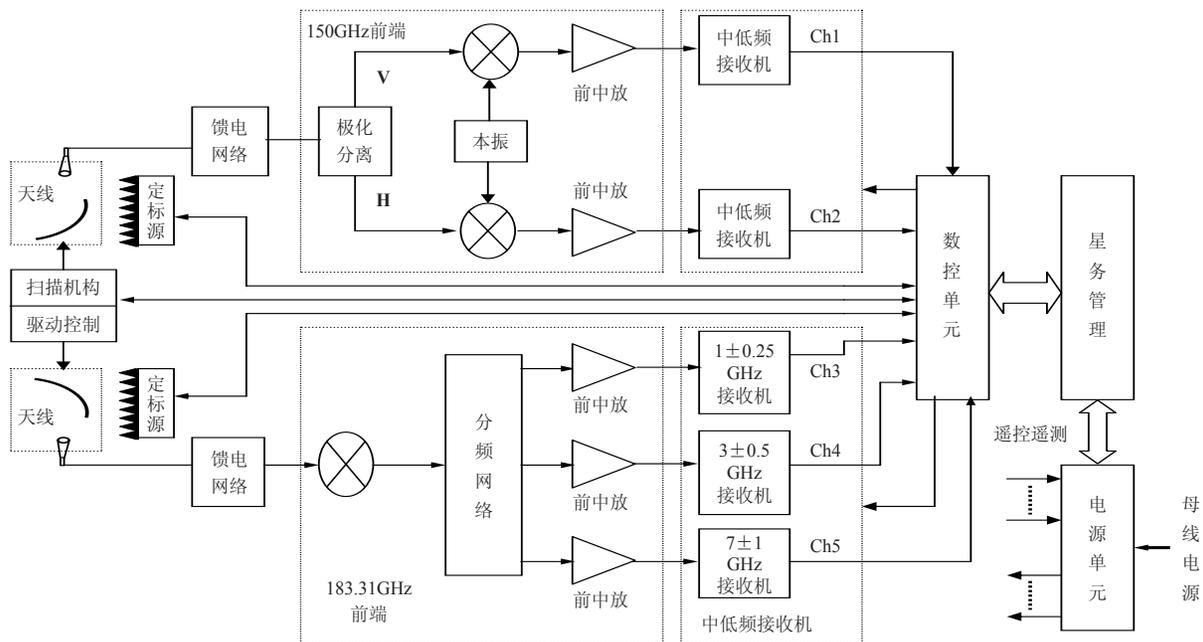


图2 FY-3A MWHS仪器原理框图

表1 FY-3A MWHS在轨性能参数

通道	中心频率 (GHz)	带宽 (MHz)	灵敏度NEDT (Max) (K)	天线主波束效率 (%)	定标偏差 (K)
1	150 (H)	1001.46	0.90	96.16	1.3
2	150 (V)	987.08	0.70	96.49	1.4
3	183.31±1	480.77	0.86	98.36	1.5
4	183.31±3	1033.65	0.91	98.36	0.9
5	183.31±7	2186.40	0.91	98.36	1.1

温度等数据的质检和控制。数据质检过程中订正掉数据中的异常值，然后计算仪器增益。

在每个MWHS扫描周期内，埋嵌在热源黑体内部的5个PRT实时测量黑体的物理温度，每个PRT的计数值通过公式(1)转换成温度。热源的平均温度由扫描周期内所有PRT测量值通过公式(2)加权得到。图3d给出了183GHz热源平均温度的变化。MWHS与卫星平台的热交换达到平衡后，热源温度的变化呈现出周期性。通常，一个轨道周期内温度变化振幅为0.5K。动态热平衡后，183GHz热源相邻扫面线间的平均温度差通常小于0.1K。

$$T_{i,j} = f_{0,i,j} + f_{1,i,j}V_{i,j} + f_{2,i,j}V_{i,j}^2 \quad (1)$$

$$V_{i,j} = C \times DN_{i,j}$$

其中， $T_{i,j}(j=1, 2, \dots, 5; i=1, 2)$ 为150GHz ( $i=1$ )或183GHz ( $i=2$ )对应黑体内部PRT ( $j$ )测量到的物理温度，单位为K。PRT ( $j$ )温度转换公式中， $f_{0,i,j}$ 、 $f_{1,i,j}$ 和 $f_{2,i,j}$ 分别为多项式0次、1次和2次项系数。 $V_{i,j}$ 为PRT

测量的电压值(伏)， $DN_{i,j}$ 为PRT原始测量计数， $C$ 为常数，取10./32768，单位为伏。进而，

$$\bar{T}_{b,i} = \frac{\sum_{j=1}^m w_{i,j} T_{i,j}}{\sum_{j=1}^m w_{i,j}} + \Delta T_b \quad (2)$$

其中， $\bar{T}_{b,i}$ 为扫描线上内部热目标点的平均温度， $w_{i,j}$ 为平均权重系数。在FY-3 MWHS处理系统中， $w_{i,j}=1$ 即所有PRT取一个常数； $m$ 为通过质量控制的PRT个数。 $T_{i,j}$ 表示每个PRT的温度测量值。当各PRT之间温度差大于0.1K时，数据被判定为异常值不参与温度平均值计算。因此， $m \leq 5$ 。当前扫描周期的 $\bar{T}_{b,i}$ 与之前扫描周期 $\bar{T}_{b,i-1}$ 的差值如果大于0.1K， $\bar{T}_{b,i}$ 也被认为是异常值，使用前面最近的有效 $\bar{T}_{b,i-1}$ 代替当前的热源温度平均值。热源黑体偏差订正因子 $\Delta T_b$ 基于地面真空测试的分析数据得到。

在定标过程中，扫描周期内每个通道分别获取3个冷空观测数据和3个热源观测数据。仪器达到热平衡之后，3个观测值在计数上应该一致，根据事先给定的阈值，核查每个通道每个观测计数值的有效性，及扫描线间测量结果的一致性。当一个通道的基本定标数据没有通过核查，这一通道数据被标记为坏的数据。对没有通过检验的通道，这一定标周期被标记为坏周期，使用TVAC结果作为参考定标系数。

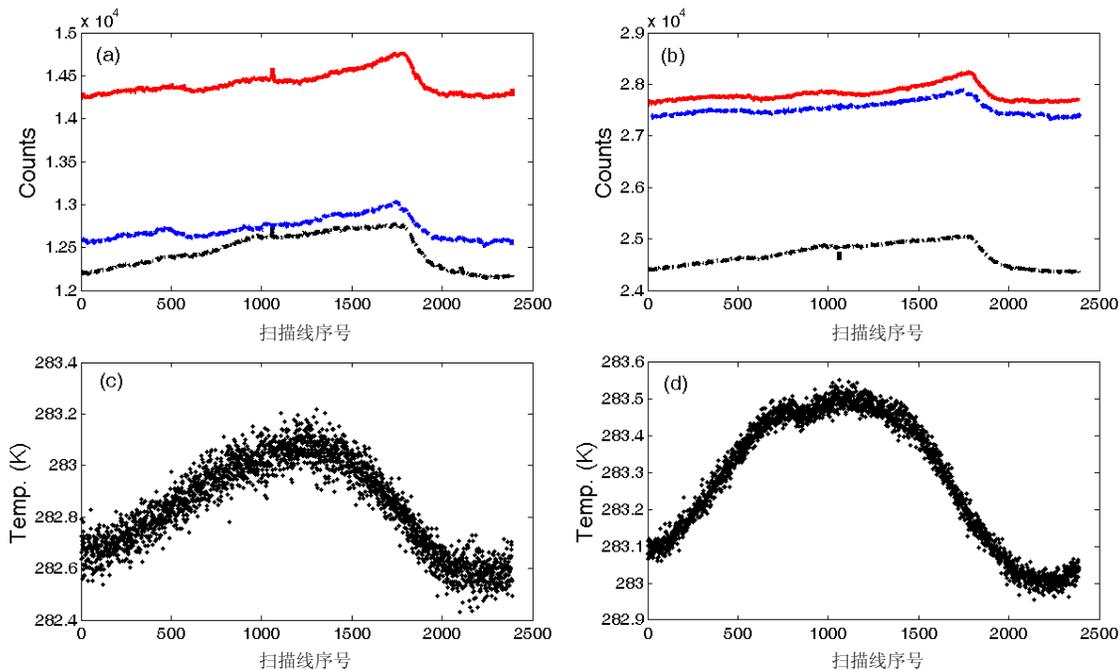


图3 在轨观测中基本定标数据分布(黑线、红线和蓝线分别代表通道3、4、5)  
 (a) 平均空间像元; (b) 平均内部黑体像元; (c) 仪器温度; (d) 平均PRT温度  
 (在这3个像元中，FY-3 MWHS平均定标数据非常一致; 扫描线间的平均定标数据波动通常在20以内; 此外，一个轨道观测内，热目标温度在0.5K，可以看出MWHS辐射定标有很好的效果)

通过质检的通道，根据质检合格的定标基础数据计算平均值。定标数据处理过程中，定标周期取7个扫描线，这一周期也适用于另外两个探测仪器（MWTS和IRAS）。TVAC试验结果表明7线周期可以使定标基础数据足够稳定。TVAC测试中根据冷源和热源数据分析，当定标周期所含扫描线数增加到7时，等效噪声温度（NEAT）随定标周期的变化趋于稳定<sup>[6]</sup>。

为了进一步减少仪器噪声，定标数据在定标周期内进行平滑。通过式（3）计算一个标准化平滑权重函数 $W_j$ ，其为一个三角权重函数。平均值由式（4）计算得到<sup>[7]</sup>。

$$W_j = (1 - \frac{|j|}{n+1}) / (n+1) \quad (3)$$

其中， $j=-n, \dots, +n$ 为扫描线相对序号， $j=0$ 为待定标扫描线， $W_j$ 为权重系数， $n$ 为常数（ $n=3$ ），即每条扫描线的定标处理要考虑到前后3条扫描线。

$$\overline{C_p(i,l)} = \frac{\sum_{k=1}^m W_k \times C_p(i,k)}{\sum_{k=1}^m W_k} \quad (4)$$

其中， $p=c$ 和 $p=w$ 分别为冷空（ $p=c$ ，宇宙背景）和黑体（ $p=w$ ，热源黑体）的观测计数； $i$ 为MWHS通道1~5编号； $l$ 为扫描线编号； $k$ 为数据编号，这些数据是定标周期 $l$ 中通过质量检验和控制的数据； $m$ 为定标周期内通过质量检验的数据样本总数； $W_j$ 为由式（3）确定的权重系数。

有时月球会进入MWHS的冷空观测视场，如不及时纠正会影响定标结果。一般月亮的影响能持续多条连续轨道，每个轨道约10min。月亮污染会使冷空辐射增加30K，如不及时校正，MWHS对地观测像元的亮温将产生约8K的偏差。业务算法中，通过标准天文公式确定月球位置，计算出月球与MWHS空间视场间的立体夹角。若角度小于 $0.5^\circ$ ，冷空观测数据被判定为受到污染，取3个观测值中未被污染的数据；如果所有样本均被月亮影响，则冷空计数由其他临近扫描周期未受污染的观测数据外推得到<sup>[8]</sup>。

图3给出了轨道周期内定标数据的分布，包括冷空和黑体观测数据的平均计数值，仪器温度及平均PRT温度等。总体而言，扫描线间平均定标数据偏差小于20个计数值。此外，整轨观测中热源温度的变化小于0.5K。这些确保了MWHS在轨定标的精度和稳定性。

### 3.2 定标过程

MWHS对地观测数据的定标包括3步：线性定标，非线性定标和天线溢出订正。首先，线性定标（公式5）用于计算辐射量 $R_0(ic, ip)$ 。接下来用逆普朗克定律反算得到来自于地气系统的观测亮温 $T_0(ic, ip)$ 。

$$R_0(ic, ip) = a(ic) \times C(ic, ip) + b(ic) \quad (5)$$

其中， $R_0(ic, ip)$ 是观测到的地气系统的微波辐射量， $C(ic, ip)$ 是初始计数值， $ic$ 是通道号（ $ic=1, \dots, 5$ ）， $ip$ 是扫描位置（1~98）。 $a(ic)$ 和 $b(ic)$ 是线性定标系数。

在对MWHS发射前测试数据进行统计学分析中，发现仪器的辐射响应呈非线性函数关系。通过非线性订正函数可以将其进行订正，该函数有3个参数，见附录中的公式（7）；这样就可以得到 $T_{na}(ic, ip)$ 。在MWHS数据中可以获得仪器温度（ $T_{inst}$ ）。图3c显示了MWHS在一个轨道周期内仪器温度的变化。 $e_2(ic, T_{inst})$ ， $e_1(ic, T_{inst})$ 和 $e_0(ic, T_{inst})$ 是在某参考温度下非线性亮温偏差订正参数，见表2。仪器温度在轨道上变化多样。实际上，可以利用表2中已有的仪器温度参数插值来决定其余仪器温度下的参数。

为了将天线温度转化为观测亮温，需要计算天线增益。由于来自于其他临近目标物的辐射能量也能通过天线旁瓣进入到系统中从而引起误差，因此需要通过定标过程去除。当天线扫描过地球视场的98个扫描位置时，来自外太空、卫星平台或是毗邻区域地气系统的辐射能量通过天线旁瓣进入到系统中。我们用一个线性订正方程来去除天线的溢出效应，该方程由发射前对MWHS的天线测试得到。通过公式（6）对天线温度 $T_{na}(ic, ip)$ 进行进一步订正。最终得到地表观测亮温 $T_b(ic, ip)$ ，

$$T_b(ic, ip) = r(ic, ip) \times T_{na}(ic, ip) + s(ic, ip) \quad (6)$$

其中， $r(ic, ip)$ 和 $s(ic, ip)$ 为MWHS天线订正系数，可以在厂商提供的查找表中得到。图4显示了2010年11月16日的MWHS 183GHz通道的MWHS L1数据，该数据来自于MWHS预处理业务系统。

## 4 定标结果评估

### 4.1 MWHS与AMSU-B的交叉对比

发展到今天，大部分探测器用于大气湿度廓线探测的微波遥感系统，都使用位于183GHz附近的相同的

表2 非线性校正方程的回归系数

仪器温度 (K)	系数	183.31±1GHz	183.31±3GHz	183.31±7GHz
270.1	$e_2$	-3.460000E-06	1.898000E-05	6.417000E-05
	$e_1$	1.014590E-03	-8.528890E-03	-2.543546E-02
	$e_0$	-1.040565E-01	7.691897E-01	1.865917E+00
281.5	$e_2$	5.668000E-05	2.742000E-05	7.372000E-05
	$e_1$	-2.259101E-02	-1.308138E-02	-3.043612E-02
	$e_0$	1.717057E+00	1.153825E+00	2.309422E+00
290.8	$e_2$	8.284000E-05	4.774000E-05	6.736000E-05
	$e_1$	-3.427983E-02	-2.151954E-02	-2.984520E-02
	$e_0$	2.638882E+00	1.839902E+00	2.493838E+00
300.3	$e_2$	6.837000E-05	6.772000E-05	7.781000E-05
	$e_1$	-2.967065E-02	-3.125929E-02	-3.595618E-02
	$e_0$	2.471376E+00	2.809741E+00	3.196077E+00

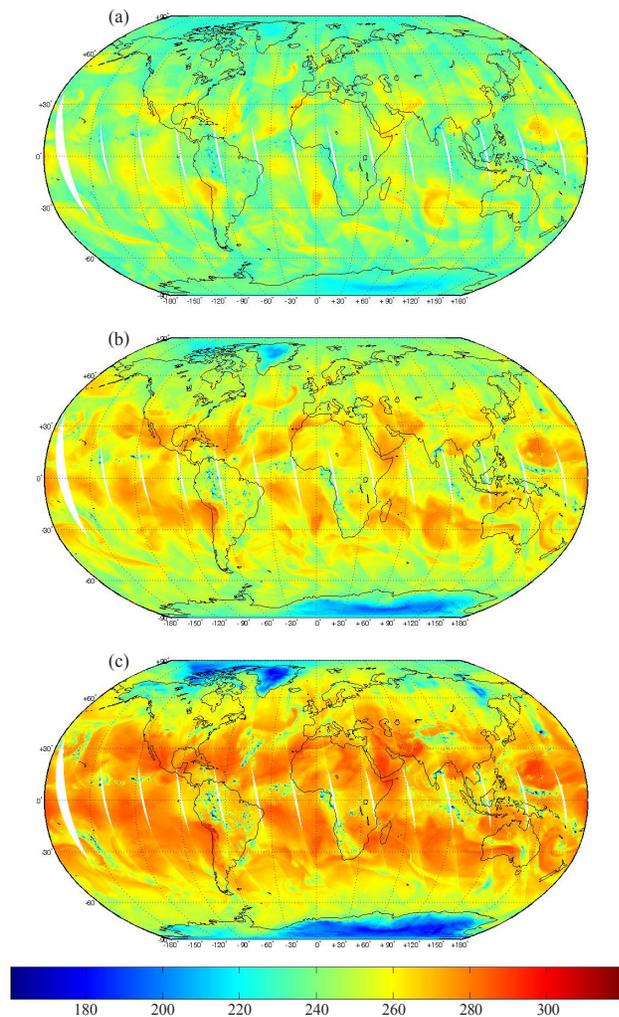


图4 FY-3A MWHS主探测通道全球拼图(2010年11月16日)  
(a)  $183.31 \pm 1\text{GHz}$ ; (b)  $183.31 \pm 3\text{GHz}$ ; (c)  
 $183.31 \pm 7\text{GHz}$

水汽吸收波段。不同传感器在同一时间对相同目标物进行探测时所获得的亮温差异应该是小的,并具有稳定的偏差<sup>[9]</sup>。NOAA 17 AMSU-B和FY-3A MWHS水汽探测有着相同的中心频率和带宽等的设计指标。

本文将2008年6月1—30日FY-3A MWHS定标结果与NOAA 17 AMUS-B的数据进行对比,匹配数据的时间间隔小于30min。这段时间内,如果没有强天气系统过境,在均匀的目标区域上地气系统的温度将保持稳定。FY-3A上装载有可见光和红外扫描辐射计(VIRR)。MWHS像元的云检测结合VIRR业务云检测产品来确定。利用一个 $5 \times 5$ 的分析区域做均匀性检测,如果亮温标准差大于临界值1.0K,表明该分析区域不够均匀<sup>[10]</sup>。 $5 \times 5$ 的区域检测也可以避免地理位置误差影响,这种效应能导致两台仪器的不匹配。经过均匀性检测,还进行了扫描位置的检测。对于跨轨迹横扫的微波辐射计,每个像素点有不同的扫描角。亮

表3 匹配数据的交叉比对

通道	偏差 (K)	标准差 (K)	均方差 (K)
3	0.86	0.65	1.08
4	1.24	1.17	1.71
5	1.72	2.56	3.08

温随像元位置发生变化。当位于扫描线上几乎相同的位置时,探测到的数据才能排除临边效应从而匹配在一起。然后,将两个仪器在 $5 \times 5$ 区域内探测到的数据值分别进行平均。

经过对NOAA-17 AMSU-B和FY-3A MWHS数据进行时间和空间上的匹配以及均匀性检测,在全球范围内,得到了超过2500对匹配数据。对匹配目标的亮温进行交叉对比,得到了FY3A MWHS定标结果中的相对偏差值。通过对比MWHS和AMSU-B的亮温值的平均值和标准差来进行统计学分析。可以看出,虽然在数据匹配时对误差进行严格的控制,但是权重函数峰值位置较低通道(位于 $183 \pm 7\text{GHz}$ )的标准差趋势仍略大(2.56K);这可能是由于这些通道对时间和位置差异更为敏感,从而导致了MWHS在通道 $183 \pm 7\text{GHz}$ 处产生更多的噪音。总之,MWHS和AMSU-B的观测亮温值非常一致,各个通道的均方差(RMSE)值在1.08~3.07K之间(表3)。

## 4.2 背景场和观测场的对比分析

MWHS在183GHz附近的3个通道和MHS在183GHz通道的中心频率相同。可以利用NOAA-18卫星的MHS亮温观测值对FY-3 MWHS亮温观测值进行质量评估。但是,直接对FY-3A MWHS和NOAA-18 MHS观测资料进行逐个像元比较是不可能的,因为在全球范围内,二者所观测的区域除了高纬度地区外没有相互重叠的区域<sup>[11]</sup>。利用模式模拟结果对比才有可能对两颗卫星上探测器的特性进行统计意义上的对比,这被称为双差值方法。将MWHS观测值减去背景场模拟值(O-B)得到偏差值,对偏差值的统计特性进行检测并和晴空条件下海洋上的NOAA-18 MHS O-B偏差值进行对比。

在本文中,利用辐射传输模式(CRTM)对MWHS和MHS的亮温值进行模拟。CRTM是基于仪器的快速辐射传输模式,由美国卫星数据同化联合中心开发,可用于模拟大气层顶的辐射量和不同大气及地表条件下的卫星梯度辐射量,是数据同化系统NWP模式的重要组成部分。

模拟所使用的输入数据来自于美国国家环境预测中心的全球数据同化系统(GDAS)。选取2010年12月11—15日NOAA-18 MHS L1C数据和FY-3A MWHS L1数据进行分析。仅对晴空条件下 $\pm 45^\circ$ 纬度带内海

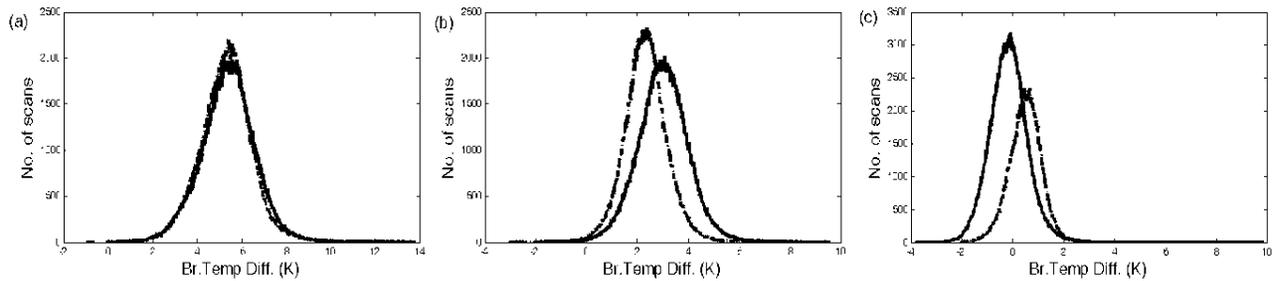


图5 2010年12月11—15日晴空条件下, 海洋区域MWHS (实线)和MHS (虚线)观测值同CRTM模拟值之间的偏差直方图分布 (亮温差=观测亮温 $T_b$ -背景模拟亮温 $T_{b0}$ ) (a) 通道 $183 \pm 1\text{GHz}$ ; (b) 通道 $183 \pm 3\text{GHz}$ ; (c)  $183 \pm 7\text{GHz}$  (结果表明, 在 $183 \pm 1\text{GHz}$ 和 $183 \pm 7\text{GHz}$ 的水汽吸收通道, FY-3A MWHS的O-B差值小于NOAA-18/MHS)

洋区域的观测值和CRTM模拟值进行对比。根据FY-3业务产品系统生成的VIRR-VASS匹配数据, 用FY-3 VIRR云检测产品来筛除云像元。对于NOAA-18 MHS LIC的晴空检测按照ATOVS和AVHRR预处理包的科学描述进行<sup>[12]</sup>。

图5显示了2010年12月11—15日晴空条件下MWHS和MHS在海洋区域的观测值和CRTM模拟值偏差分布情况。在 $183.31 \pm 7\text{GHz}$ 通道MWHS显示出比MHS更好的一致性; 但是在 $183.31 \pm 3\text{GHz}$ , MHS显示出比MWHS更好的一致性。对于 $183.31 \pm 1\text{GHz}$ 的吸收峰值通道, 它们的表现几乎相同。O-B偏差有多个来源, 如仪器定标过程、仪器中心频率特性变化、仪器参数以及背景场或是模式误差等, 这些需要进行进一步研究。

## 5 总结和结论

装载在FY-3A卫星上的MWHS仪器于2008年投入业务应用, 在台风暴雨等灾害性风暴监测和NWP数据同化中发挥了重要作用。

MWHS在轨定标的重要参数由发射前场地真空测试数据通过在轨分析进一步优化得来。通过TVAC测试数据处理和分析, 获得MWHS接收器的非线性参数, 这些基础参数随仪器温度的变化不大, 为在轨定标使用奠定了基础。

MWHS在轨定标系统运行良好, 定标基础数据稳定。扫描线之间平均冷空观测和热源观测变化通常在20个计数之内。在一周轨道观测中, 热源物温度波动在0.5K。

MWHS和AMSU-B的交叉对比结果表明二者十分相似, 在 $183 \pm 1\text{GHz}$ 通道, 两种仪器的亮温差异仅为1.08K, MWHS的在轨性能同搭载在其他平台上同类仪器相当。在 $183.31 \pm 1\text{GHz}$ 通道上FY-3 MWHS和NOAA-18 MHS的观测值与模拟值偏差表现相似; 但是在 $183.31 \pm 7\text{GHz}$ 通道, MWHS与背景场有更好的

致性。本文中的研究结果将为MWHS以及类似的微波探测仪器的进一步验证和应用提供有用的信息。

## 附录

FY-3A MWHS TVAC的试验目的是检测系统响应特性, 并建立TVAC条件下MWHS输入参数和输出参数之间的量化关系<sup>[5, 13]</sup>。主要内容包括性能测试, 真空定标试验, 定标误差分析和确定不同环境温度下主要技术参数, 如MWHS非线性校正系数等。这里, 我们总结了用于支持在轨定标的TVAC测试要点。

FY-3A MWHS TVAC测试在一个2m的真空罐内进行(KM2), 该罐是由上海空间飞行技术研究院509所建成。KM2的真空参数在 $1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 和 $1.5 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 之间。在TVAC测试中, PRTs用于测量冷、暖以及模拟地球目标源。PRT的温度测量精度优于0.1K。3个定标黑体源的发射率大于0.9993。

MWHS接收器的非线性由TVAC测试数据决定。关于MWHS定标偏差的详细描述见[5]。该偏差主要来自于接收器的非线性特性。在4种环境温度中, 如 $0^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ 和 $30^\circ\text{C}$ , 3个位于183GHz附近的水汽探测通道的非线性曲线显示出相似分布。依据TVAC测试数据分析, 可以用一个含有3个参数的二次方程来较好地拟合非线性偏差定标, 如下:

$$\Delta T(ic) = e_2(ic, T_{inst}) \times T_0^2(ic) + e_1(ic, T_{inst}) \times T_0(ic) + e_0(ic, T_{inst})$$

$$T_0(ic) = \text{Planck}^{-1}(R)$$

$$R = a \times C + b \quad (7)$$

$$T_{na}(ic) = T_0(ic) + \Delta T(ic)$$

其中,  $e_2(ic, T_{inst})$ ,  $e_1(ic, T_{inst})$ 和 $e_0(ic, T_{inst})$ 是回归系数, 见表2 (给定仪器温度 $T_{inst}$ 和通道号 $ic$ , 查得以上3个参数);  $\Delta T(ic)$ 是非线性偏差定标总量;  $T_0(ic)$ 是地球目标温度, 该值由 $R$ 得到, 通过线性定标结果并利用普朗克函数重新转化为温度。 $T_{na}(ic)$ 是校正后的天线非线性温度。通过一个非线性校正, 3个探测通

道的最大温度偏差不高于0.37K（表2）。非线性定标过程中所用到的含有3个参数的二次方程被用于FY-3A MWHS业务预处理系统中。

致谢：感谢中国科学院空间科学与应用研究中心（CSSAR）的李靖和张升伟研究员提供了MWHS TVAC测试数据。

#### 参考文献

- [1] Dong C H, Yang J, Zhang W J, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3a. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90: 1531-1544.
- [2] Guan L, Zou X, Weng F, et al. Assessments of FY-3A Microwave Humidity Sounder (MWHS) measurements using NOAA-18 Microwave Humidity Sounder (MHS). *J Geophys Res*, 2011, 116, D10106, doi: 10.1029/2010JD015412.
- [3] Lu Q F. Initial evaluation and assimilation of FY-3A atmospheric sounding data in the ECMWF System. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1453-1457.
- [4] Li J, Zhang S W, Jiang J S, et al. In-orbit performance of Microwave Humidity Sounder (MWHS) of the Chinese FY-3 meteorological satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International, 25-30 July 2010, Honolulu, HI.
- [5] Wang Z Z, Li J, Zhang S W, et al. Prelaunch calibration of Microwave Humidity Sounder on China's FY-3A meteorological satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2011, 8: 29-33.
- [6] Saunders R W, Hewison T J. The radiometric characterization of AMSU-B. *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, 1995, 43: 760-771.
- [7] JPL. AIRS project algorithm theoretical basis document Part 3: Microwave Instruments. JPL D-17005, Version 2.1, 2000.
- [8] Mo T. Postlaunch Calibration of the NOAA-18 Advanced Microwave Sounding Unit-A. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2007, 45: 1928-1937.
- [9] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's Polar orbiting satellites from NOAA-15 and later), 2009.
- [10] Yan B H, Weng F Z. Intercalibration between special sensor microwave imager/sounder and special sensor microwave imager. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 984-995.
- [11] Weng F Z. Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64: 3799-3807.
- [12] Labrot T, Lavanant L, Whyte K. AAPP documentation scientific description (AAPP-1), 2002.
- [13] 谷松岩, 王振占, 李靖, 等. 风云三号A星微波湿度计主探测通道辐射特性. *应用气象学报*, 2010, 21: 335-342.