

FY-3A/MWHS 在轨辐射定标及结果分析

谷松岩¹, 王振占², 李靖², 张升伟², 张丽³

(1. 中国气象局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, 北京 100081;
2. 中国科学院空间科学与应用中心, 北京 100190; 3. 中国空间技术研究院卫星应用系统部, 北京 100086)

[摘要] 风云三号 A 星微波湿度计(FY-3A/MWHS)是我国首次在轨定量遥感大气参数的高频微波辐射计, 本文以发射前地面真空试验数据为基础完成了 FY-3A/MWHS 在轨辐射定标, 利用同期在轨的同类载荷 NOAA/AMSU-B 数据进行在轨辐射定标对比分析, 结果表明 FY-3A/MWHS 在轨星上定标观测基础数据在卫星绕地飞行一圈的观测过程中变化合理, 经非线性偏差订正和天线订正等辐射定标处理后, FY-3A/MWHS 与 NOAA-17/AMSU-B 对应通道定标结果相比匹配目标点通道亮温差最大不超过 1.5 K, FY-3A/MWHS 在轨辐射定标结果为其资料在数值天气预报模式中的同化以及大气参数反演等定量应用奠定了基础。FY-3A/MWHS 定标及结果分析方法对我国未来星载被动微波探测器的在轨定量应用具有示范意义。

[关键词] 风云三号; 微波湿度计; 在轨辐射定标; 非线性订正

[中图分类号] P414.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)07-0092-09

1 前言

风云三号 A 星(FY-3A)微波湿度计(MWHS: microwave humidity sounder)是我国首次用来定量遥感大气参数的星载被动微波辐射计, 设计功能与目前在轨的同类遥感器, 美国极轨业务环境卫星大气探测载荷 AMSU-B(advanced microwave sounding unit B)相当, 能全天候获取全球大气水汽垂直分布, 获取与台风、暴雨等强对流天气现象密切相关的云雨大气参数, 为数值天气预报提供大气湿度初始场信息^[1]。

辐射定标是被动微波探测载荷在轨定量应用的基础, 国际上同类载荷辐射定标采用相同的技术, 一般辐射定标包括发射前定标和发射后定标两个阶段。发射前定标主要是在实验室可控条件下, 测试仪器的基本性能参数以及输入的辐射量与输出的电压(或计数值)间的对应关系, 得到可以传递到星上使用、在轨无法得到的非线性定标参数等辐射定标基础数据; 在轨定标阶段主要获取仪器在轨

工作温度、接收机增益等状态参数, 以及仪器对参考黑体和冷空的观测值等在轨定标基础参数。载荷的总体设计方案和技术性能决定了在轨辐射定标算法的技术细节, 冷空修正和非线性偏差修正是在轨辐射定标的关键技术。被动微波探测载荷在轨辐射定标结果的验证是目前的技术难题^[2,3]。FY-3A/MWHS 是我国首次在轨运行的被动微波探测器, 风云三号的微波载荷也是我国第一次尝试在轨微波遥感器两点定标技术。因此, FY-3A/MWHS 在轨辐射定标分析对未来我国微波载荷在轨定量应用具有重要意义。

FY-3A/MWHS 在轨辐射定标以发射前真空定标试验结果为基础数据, 综合应用在轨星上两点定标技术。FY-3A/MWHS 在轨星上定标模式与 AMSU-B 相同, 在轨运行时, 每个扫描周期对冷空和内部热源黑体观测, 实现在轨两点定标基础数据获取^[4]。FY-3A/MWHS 及同类星载遥感器 AMSU-B、MHS(microwave humidity sounder)和 HSB(humidity sounder for brazil)等在轨均采用跨

[收稿日期] 2013-04-20

[基金项目] 国家“863 计划”资助项目(2007AA12Z115)

[作者简介] 谷松岩(1963—), 女, 辽宁鞍山市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波遥感应用; E-mail: gusy@cma.gov.cn

轨方式完成周期扫描,这类载荷在在轨星上均采用两点定标技术。以Raunders为首的科学小组完成了NOAA系列卫星微波湿度探测器的辐射定标工作^[5]。业务运行的AMSU-B、HSB和MHS在在轨星上定标技术中都采用固定的冷空辐射修正,并根据地面真空试验确定的单参数非线性订正算法进行在轨非线性订正处理^[6]。根据AMSU-B在轨运行情况,当卫星平台处于空间不同位置时,AMSU-B冷空观测不同取样位置天线旁瓣受到的来自平台、地球和空间的辐射干扰不同^[7],固定冷空辐射偏差修正对定量应用产生误差,因此FY-3A/MWHS改进了AMSU-B的冷空辐射偏差修正技术,根据地球目标多年平均遥感观测结果,得到热力分布基础数据,结合FY-3A/MWHS三维天线方向图,通过正演模拟分析建立随目标热力性质而变的冷空辐射订正算法。

在非线性修正方面,NOAA系列卫星的微波探测器均采用相同的订正方式,利用发射前确定的非线性订正因子,根据仪器的在轨工作状态确定非线性修正参数^[8-10];根据FY-3A/MWHS地面真空试验结果,3参数非线性定标修正算法可以保证非线性偏差达到最小^[11]。在轨测试结果表明,根据FY-3A/MWHS特点进行的两项在轨辐射定标算法改进确保了FY-3A/MWHS在轨星上定标的精度,为FY-3A/MWHS数据的定量应用奠定了基础。

本文详细介绍了FY-3A/MWHS在轨星上定标算法,利用与AMSU-B的交叉比对,分析了FY-3A/MWHS在轨辐射定标结果,为利用FY-3A/MWHS数据进行大气参数反演和数值预报同化应用奠定

基础。

2 FY-3A/MWHS 仪器特性及在轨辐射定标流程介绍

2.1 仪器特性

FY-3A/MWHS为全功率型微波辐射计,在轨正常工作模式下两副偏置抛物面天线在扫描机构驱动下,垂直于飞行轨迹连续变速圆周扫描,获取到的微波辐射被反射到波纹喇叭馈源,经准光学系统极化分离和分频得到以计数形式表示的各通道观测值。FY-3A/MWHS在8/3s的扫描周期内,以天底点为中心对地观测扫描张角为 $\pm 53.35^\circ$,连续采样98个点,采样间隔为 1.1° ;内部热源黑体定标源位于天顶点,两副天线对应两个黑体,每个黑体分别埋嵌了7个PRT(platinum resistance thermometer),其中5个用于定标体物理温度测量,2个备份;冷空定标观测角度位置为 107.1° ,FY-3A/MWHS在对冷空和内部热源黑体进行定标观测的2个匀速扫描时段内,各通道分别获取3组冷空视场观测值和3组内部热源黑体观测值,同时估算外空微波辐射,获取在轨定标必需的基础数据,利用冷空和内部热源黑体完成在轨星上两点定标。

FY-3A/MWHS各通道接收机均设计为双边带,频率稳定度达到5.0MHz,天线主波束效率大于96%,详细通道特性参数在轨测试结果见表1。在一个扫描周期内FY-3A/MWHS对地观测视场、冷空观测视场和内部热源黑体观测视场为3个匀速扫描段;其他为快速切换段,包括加速和匀速过程。

表1 微波湿度计性能参数在轨测试结果

Table 1 Performance characteristics checked on orbit for FY-3A/MWHS

通道序号	中心频率 /GHz	中心波数 /cm ⁻¹	单边带宽 /MHz	NEΔT /k	频率稳定度 /MHz	天线主波束效率 /%	接收机工作方式	动态范围 /V	定标精度 /K
1	150(H)	5.003 7	1 001.458	0.90	5.4	96.16	双边带	4.9~9.5	1.3
2	150(V)	5.003 7	987.083	0.70	5.4	96.49	双边带	3.3~8.0	1.4
3	183.31±1	6.114 6	480.769 6	0.86	2.6	98.36	双边带	4.9~9.5	1.5
4	183.31±3	6.114 6	1 033.654 6	0.91	2.6	98.36	双边带	2.2~7.0	0.9
5	183.31±7	6.114 6	2 186.397 6	0.91	2.6	98.36	双边带	4.0~9.6	1.1

注:H为垂直极化,V为水平极化

2.2 微波湿度计在轨辐射定标流程

FY-3A/MWHS在轨辐射定标是将微波湿度计原始遥感计数值转换成微波辐射物理量的过程,在轨星上定标系统设计为两点定标,内部黑体为热定标参考点,宇宙外空为冷定标参考点。FY-3A/MWHS

在轨星上辐射定标主要包括定标基础数据处理和质量控制、定标系数计算和对地观测数据辐射定标等。在定标基础数据处理和质量控制中通过月亮的轨道预报确定月亮视向量,当月亮进入冷空观测视场时,修正冷空观测测量。辐射定标流程见图1。

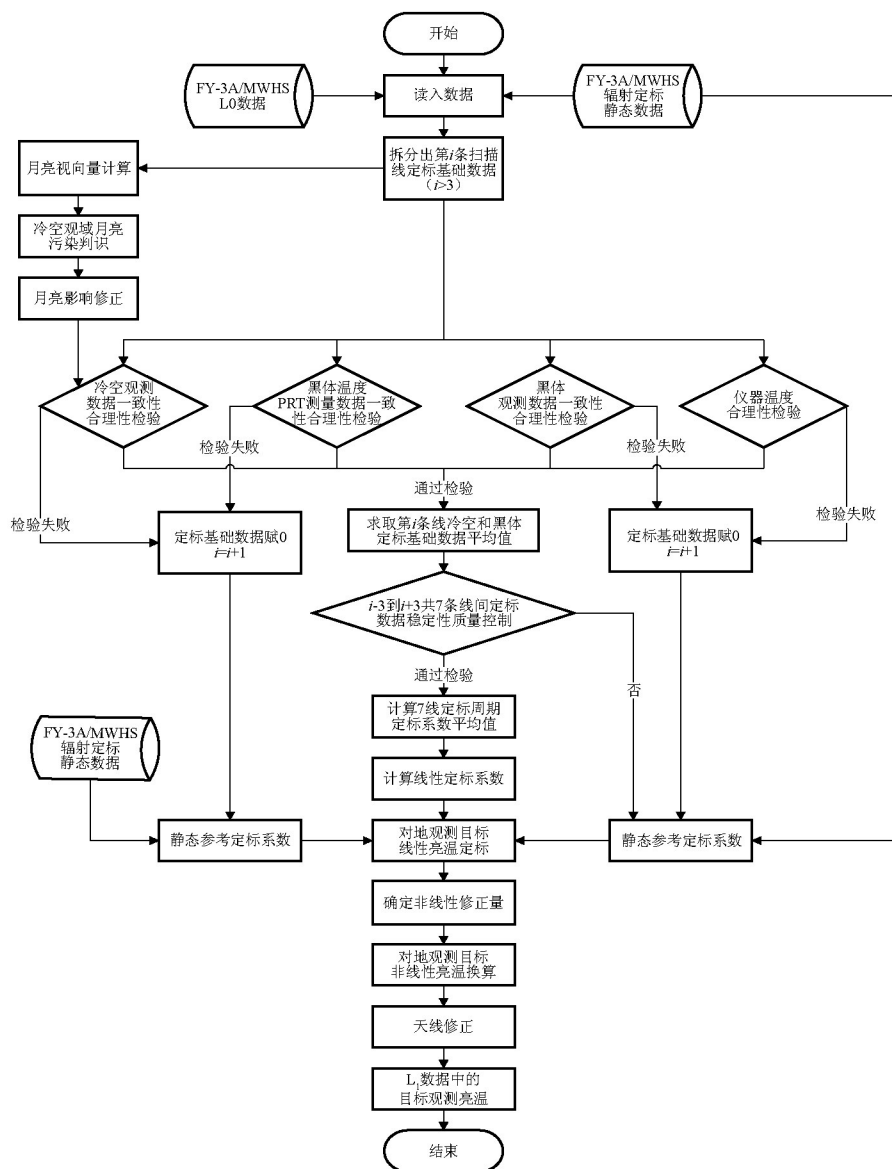


图1 辐射定标流程示意图

Fig.1 Flow chart for radiation calibration

3 FY-3A/MWHS在轨辐射定标基础数据质量检验控制原理

FY-3A/MWHS在轨星上定标基础数据包括星上内部热源黑体温度PRT测量数据、冷空观测计数值、内部热源黑体观测计数值和仪器工作温度等。理想条件下FY-3A/MWHS定标基础数据在扫描周期内和扫描周期间应该稳定一致,受FY-3A/MWHS仪器性能和工作环境变化影响,定标基础数据有时会发生跳变,失去代表性,影响定标精度,因此首先需要在计算定标系数之前对定标基础数据进行质量分析,完成定标基础数据的质量检验和质

量控制,生成可用于计算定标系数的在轨星上定标基础数据。

3.1 定标黑体温度测量数据质量控制

FY-3A/MWHS在一个扫描周期内与2个频点对应的2个内部热源黑体可以分别得到5个PRT测量值,根据每个PRT地面确定的温度转换系数,可将PRT测量值按照式(1)转换成物理温度,对5个PRT温度按照式(2)进行加权平均得到每条扫描线一个扫描周期中内部热源黑体的平均温度。图2是FY-3A/MWHS一条轨道上分别对应150 GHz和183 GHz内部热源黑体的平均温度变化曲线。由于FY-3A/MWHS在轨运行期间内部热源黑体不具

有主动温控能力,受卫星平台热力条件制约被动温控,与卫星平台达到动态热平衡后,内部热源黑体温度随平台的热力状况每条轨道呈周期性变

化,一般每条轨道中温度的周期性脉动幅度不超过 0.60 K。

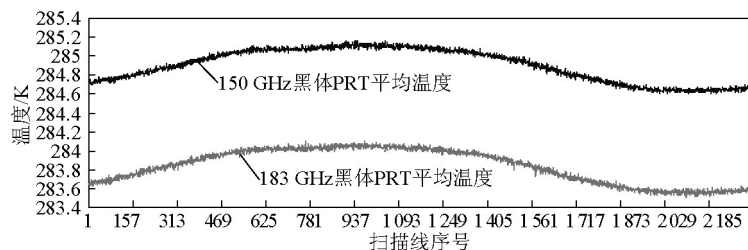


图2 黑体平均温度变化(2008年11月22日11:03 UTC)

Fig.2 The curve line of average temperature for black body target in an orbit (2008-11-22, 11:03 UTC)

相邻扫描周期 PRT 平均温度差值一般都小于 0.1 K,两块黑体由于安装位置不同,热力状态也有差异,其中 150 GHz 对应的黑体,由于靠近仪器电源系统,达到热平衡后温度比 183 GHz 黑体高约 1.1 K。

$$T_{ij} = f_{0,ij} + f_{1,ij}V_{ij} + f_{2,ij}V_{ij}^2, V_{ij} = \frac{DN_{ij} \times 10}{32768} \quad (1)$$

式(1)中, T_{ij} ($j=1, 2, \dots, 5; i=1, 2$) 为 150 GHz ($i=1$) 或 183 GHz ($i=2$) 第 j 个 PRT 测得的物理温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; $f_{0,ij}$ 、 $f_{1,ij}$ 、 $f_{2,ij}$ 分别代表第 j 个 PRT 温度转换公式中的 0 次、1 次和 2 次项; V_{ij} 为根据 PRT 测量值转换得到的电压值; DN_{ij} 为 PRT 测量得到的原始计数值。

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

式(2)中, $\bar{T}_{b,i}$ 为一个扫描周期中内部热源黑体的平均温度; w_{ij} 为权重平均系数,根据目前 FY-3A/MWHS 在轨实际数据分析,5 个 PRT 均有效,对黑体有效温度的代表性一致,取 $w_{ij}=1$, PRT 失效时对应的 PRT $w_{ij}=0$,如果 PRT 对黑体有效温度的代表性具有特殊性 PRT 应根据具体试验结果取 0~1 之间的常数; m 为通过质量检验的 PRT 数量,5 个 PRT 温度数据中任何一个数据 T_{ij} ,如果与其他 PRT 温度数据相差都超过 0.1 K,就认为该数据异常,不参与平均温度求算,因此 m 值小于或等于 5。计算得到每个扫描周期黑体平均温度 $\bar{T}_{b,i}$ 后,对 $\bar{T}_{b,i}$ 的稳定性进行质量控制,如果与前面最临近扫描周期质检合格

的平均温度数据相比,温差超过 0.1 K,认为 $\bar{T}_{b,i}$ 数据异常,将用前面最临近的质检合格的平均温度数据来替代。这样可以一定程度上抑制温度数据的异常变化,确保黑体温度测量数据的连续稳定。 ΔT_b 为热源温度偏差订正值。

3.2 定标观测数据质量控制

定标观测计数值数据包括微波湿度计对冷空和内部热源黑体的观测计数值数据。微波湿度计每个通道在一个扫描周期内分别获取 3 组冷空和内部热源黑体观测计数值数据,仪器工作状态稳定时,这 3 组数据应该足够一致,某个观测计数值与其他观测计数值之差的绝对值如果都大于 100 个计数值,则认定为坏数据,扫描线平均计数值等于一条线上好数据的算术平均值。同时在多个扫描周期间每条扫描线的平均计数值数据应该具有稳定性。根据 MWHS 发射前真空定标试验数据分析结果,MWHS 要经过 14 个扫描周期的平均,灵敏度才能达到稳定,在轨定标处理时,MWHS 为了与同星装载的微波温度计和红外分光计协同应用,3 个载荷在轨定标周期取相同时间段,这样 MWHS 的定标周期取 7 条扫描线。分析冷空、内部热源黑体观测计数值数据在扫描周期期间的稳定性时,以一个定标周期为步长滑动平均处理。在对某条线进行定标处理时,定标周期取前后各 3 条线 ($n=3$),如果定标周期内某一条扫描线平均计数值与其他线平均计数值之差都大于预先确定的阈值,就应剔除该条线的平均计数值数据,同时按照归一化权重系数对扫描周期内合格的观测平均计数值进行加权平均。

定标周期中计算平均观测计数值的归一化权

重系数按式(3)确定;定标观测计数平均值按式(4)计算。

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

式(3)中, $j=-3,-2,-1,0,1,2,3$ 为一个扫描周期中与待定标线相隔的扫描线数, $j=0$ 为带定标扫描线; W_j 为权重系数。

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

式(4)中, $p=c$,或 $p=w$ 分别代表了冷空观测计数

($p=c$: cosmic view)或黑体观测计数($p=w$: warm black body view); i 为微波湿度计通道序号,从1到5; ℓ 为扫描线序号; k 为第 ℓ 扫描线定标周期中符合质量控制条件的数据的序号; m 为第 ℓ 扫描线定标周期中通过质量检验的定标观测计数值的总个数; W_k 为式(3)确定的权重系数。图3和图4以微波湿度计通道3为例,分别给出了微波湿度计随卫星绕地球一圈时通道3冷空和内部热源黑体观测数据的变化曲线。可以看到定标观测数据平均值相对于3个观测数据具有稳定性,扫描线间定标观测数据平均值的脉动量一般在20个计数值之内。

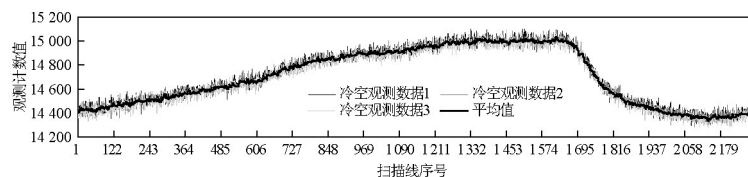


图3 微波湿度计通道3冷空观测数据变化曲线(2008年11月20日11:03 UTC)

Fig.3 The curve line of space view data for channel 3 of FY-3A/MWHS(2008-11-20, 11:03 UTC)

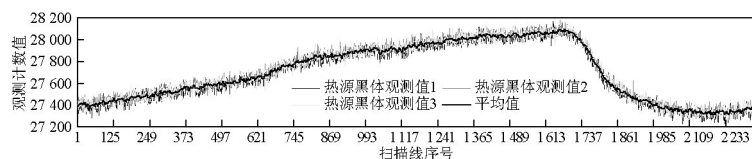


图4 微波湿度计通道3热源黑体观测数据变化曲线(2008年11月20日11:03 UTC)

Fig.4 The curve line of warm target view data for channel 3 of FY-3A/MWHS(2008-11-20, 11:03 UTC)

4 FY-3A/MWHS在轨辐射定标

4.1 线性定标系数计算

在线性定标假定条件下,某一定标周期中微波湿度计对冷空和内部热源黑体的观测结果满足线性方程(5)。

$$\begin{cases} R_w(ic) = a(ic) \times \overline{C_w}(ic) + b(ic) \\ R_c(ic) = a(ic) \times \overline{C_c}(ic) + b(ic) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $R_w(ic)$ 、 $R_c(ic)$ 为黑体和冷空的微波辐射量, ic 为通道序号; $R_w(ic)$ 为黑体微波辐射量,根据PRT测温结果经普朗克函数转换得到; $R_c(ic)$ 为冷空对应的微波辐射量; $\overline{C_w}(ic)$ 、 $\overline{C_c}(ic)$ 分别为黑体和冷空观测计数值的平均值。根据式(5)可以解得线性定标斜率系数 $a(ic)$ 和线性定标截距系数 $b(ic)$ 。

$$\begin{cases} a(ic) = \frac{R_w(ic) - R_c(ic)}{\overline{C_w}(ic) - \overline{C_c}(ic)} \\ b(ic) = \frac{R_c(ic) \times \overline{C_w}(ic) - R_w(ic) \times \overline{C_c}(ic)}{\overline{C_w}(ic) - \overline{C_c}(ic)} \end{cases} \quad (6)$$

4.2 对地观测像元亮温计算

FY-3A/MWHS原始对地观测计数值亮温转换的过程包括线性定标、非线性偏差订正和天线订正处理等。

首先根据式(7)计算得到对地观测像元线性定标辐射量 $R_0(ic,ip)$,经普朗克函数转换得到对地观测亮温初值 $T_0(ic,ip)$ 。

$$R_0(ic,ip) = a(ic) \times C(ic,ip) + b(ic) \quad (7)$$

式(7)中, $R_0(ic,ip)$ 为对地观测微波辐射量; $C(ic,ip)$ 为对地观测原始遥感计数值; $a(ic)$ 、 $b(ic)$ 为线性定

标系数;其中ic为通道序号,ic=1,2,3,4,5;ip为观测像元序号,ip=1,2,⋯,98。

微波湿度计发射前定标结果的统计分析表明,微波湿度计非线性亮温偏差是仪器温度和观测目标亮温的函数,可以通过3参数非线性订正方程进行订正。微波湿度计每个扫描周期都可以得到仪器工作温度(T_{inst})的遥测数据,据此可确定非线性亮温偏差订正量计算系数 $e_2(ic, T_{inst})$ 、 $e_1(ic, T_{inst})$ 和 $e_0(ic, T_{inst})$,按式(8)可计算得到非线性亮温偏差订正量 $\Delta T(ic)$,然后与对地观测亮温初值 $T_0(ic, ip)$ 相加,

得到非线性天线亮温 $T_{na}(ic, ip)$ 。

$$T_{na}(ic, ip) = T_0(ic, ip) + \Delta T(ic) \quad (8)$$

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

式(8)中, $e_2(ic, T_{inst})$ 、 $e_1(ic, T_{inst})$ 、 $e_0(ic, T_{inst})$ 由仪器研制方根据地面真空定标试验数据给出(见表2和表3),在4个仪器工作温度下不同通道取值不同,在轨根据每个扫描周期仪器温度的遥测数据,通过线性插值确定。

表2 183 GHz频点各通道非线性订正参数

Table 2 Regression coefficients of non-linearity correction equation for the channels at 183 GHz

仪器温度/K	系数	183.31±1 GHz	183.31±3 GHz	183.31±7 GHz
270.1	e_2	-3.460 000E-06	1.898 000E-05	6.417 000E-05
	e_1	1.014 590E-03	-8.528 890E-03	-2.543 546E-02
	e_0	-1.040 565E-01	7.691 897E-01	1.865 917E+00
281.5	e_2	5.668 000E-05	2.742 000E-05	7.372 000E-05
	e_1	-2.259 101E-02	-1.308 138E-02	-3.043 612E-02
	e_0	1.717 057E+00	1.153 825E+00	2.309 422E+00
290.8	e_2	8.284 000E-05	4.774 000E-05	6.736 000E-05
	e_1	-3.427 983E-02	-2.151 954E-02	-2.984 520E-02
	e_0	2.638 882E+00	1.839 902E+00	2.493 838E+00
300.3	e_2	6.837 000E-05	6.772 000E-05	7.781 000E-05
	e_1	-2.967 065E-02	-3.125 929E-02	-3.595 618E-02
	e_0	2.471 376E+00	2.809 741E+00	3.196 077E+00

表3 150 GHz频点各通道非线性订正参数

Table 3 Regression coefficients of non-linearity correction equation for the channels at 150 GHz

仪器温度/K	系数	150-1	150-2
277.607 9	e_2	6.632 000E-05	9.966 000E-05
	e_1	-2.462 517E-02	-3.718 181E-02
	e_0	1.542 333E+00	2.511 135E+00
287.436 1	e_2	7.930 000E-05	1.347 300E-04
	e_1	-3.254 472E-02	-5.297 549E-02
	e_0	2.364 549E+00	3.759 053E+00
297.134 8	e_2	1.030 000E-04	1.486 800E-04
	e_1	-4.308 819E-02	-6.006 193E-02
	e_0	3.311 787E+00	4.421 510E+00
307.229 1	e_2	9.985 000E-05	1.539 300E-04
	e_1	-4.343 857E-02	-6.430 103E-02
	e_0	3.315 791E+00	4.875 747E+00

微波湿度计主波束宽度 1.1° ,尽管天线主波束效率大于96.0%,但仍会有约4%的辐射通过天线旁瓣影响观测结果,当天线处在对地观测98个像元点的不同位置时,进入旁瓣的干扰辐射可能来自外太空、卫星平台或地气系统的临近像元等,为了保证微波湿度计定量应用精度,需要对得到的非线性天线亮温数据 $T_{na}(ic, ip)$ 按照式(9)进行天线订正处理,最终得到对地观测像元的目标亮温 $T_b(ic, ip)$ 。

$$T_b(ic, ip) = r(ic, ip) \times T_{na}(ic, ip) + s(ic, ip) \quad (9)$$

式(9)中, $r(ic, ip)$ 、 $s(ic, ip)$ 为微波湿度计天线订正系数,由仪器研制方提供(见表4),根据通道和像元序号查表得到。

对线性定标结果经非线性偏差订正和天线订正等辐射定标处理后,得到各通道逐像元目标亮温,图5是2010年11月16日FY-3A/MWHS 183.31 GHz频点3个通道全球影像镶嵌图。

表4 微波湿度计天线订正系数

Table 4 MWHS antenna correction coefficients

像元序号	通道1		通道2		通道3		通道4		通道5	
	$r(ip,cp)$	$s(ip,cp)$	$r(ip,cp)$	$s(ip,cp)$	$r(ip,cp)$	$s(ip,cp)$	$r(ip,cp)$	$s(ip,cp)$	$r(ip,cp)$	$s(ip,cp)$
1	1.006 893	-1.916 240	0.995 687	1.545 648	1.002 314	-0.273 870	1.010 485	-2.387 720	1.004 254	-0.932 780
2	1.002 354	-0.509 990	0.990 520	3.040 682	1.002 342	-0.309 680	1.009 194	-2.093 740	1.002 983	-0.619 270
3	0.995 953	1.519 928	0.980 658	5.879 010	1.001 388	-0.104 330	0.999 311	0.373 257	0.987 907	3.339 117
4	1.014 499	-4.399 120	0.994 784	1.858 816	1.001 052	-0.043 220	0.996 890	0.968 455	0.985 007	4.101 076
5	1.014 965	-4.684 140	1.009 274	-2.309 690	1.002 452	-0.398 060	1.009 878	-2.330 430	1.007 254	-1.782 190
6	1.004 171	-1.362 880	0.997 704	1.004 763	1.002 218	-0.355 970	1.007 121	-1.647 880	1.003 018	-0.674 500
7	1.002 771	-1.036 200	0.997 997	0.930 607	1.002 194	-0.363 810	1.006 726	-1.561 480	1.002 842	-0.638 260
8	1.002 095	-0.874 050	0.998 308	0.852 055	1.002 193	-0.375 690	1.006 393	-1.489 110	1.002 750	-0.622 810
9	1.001 785	-0.802 300	0.998 628	0.770 930	1.002 213	-0.391 430	1.006 128	-1.432 680	1.002 726	-0.624 570
10	1.001 580	-0.757 500	0.998 946	0.690 093	1.002 228	-0.405 010	1.005 914	-1.388 120	1.002 765	-0.642 100
...
95	0.991 665	2.605 314	0.994 373	2.008 177	0.997 565	0.342 523	0.993 499	1.428 776	1.001 387	-0.526 660
96	0.998 746	0.342 672	0.998 378	0.859 417	0.997 223	0.397 909	0.989 996	2.286 084	0.996 354	0.783 713
97	1.003 275	-1.069 800	1.003 455	-0.609 190	0.997 174	0.376 669	0.988 391	2.656 174	0.994 613	1.218 463
98	1.003 228	-1.022 080	1.002 729	-0.425 310	0.997 160	0.337 384	0.986 443	3.100 955	0.992 277	1.800 751

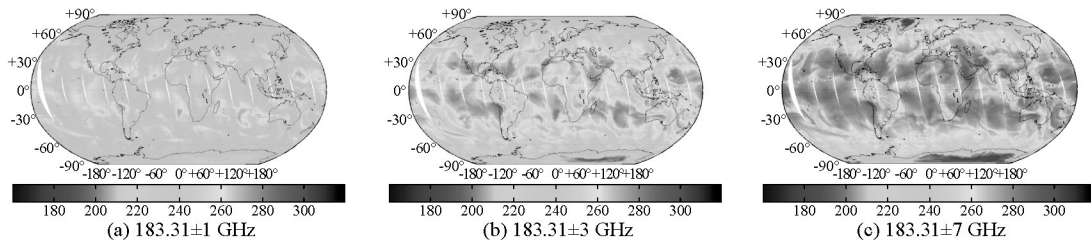


图5 FY-3A/MWHS 183.31 GHz 频点3个吸收通道全球拼图(2010年11月16日)

Fig.5 Globe image mosaic of FY-3A MWHS absorption channels at 183.31 GHz (2010-11-16)

5 FY-3A/MWHS 在轨辐射定标结果分析

星载被动微波辐射计,两个通道特性参数一致载荷同时观测相同目标时,观测亮温的差异主要取决于两个载荷辐射定标的系统偏差。FY-3A/MWHS 定标结果分析以 NOAA17/AMSU-B 为参考载荷,对比分析 NOAA17/AMSU-B 和 FY-3A/MWHS 均匀匹配目标区亮温差,得到 FY-3A/MWHS 与 NOAA17/AMSU-B 对应通道间的相对定标偏差。

选取2008年7月22日 NOAA17/AMSU-B/L1C 和 FY-3A/MWHS/L1 为对比分析数据。2008年7月22日 NOAA17 和 FY-3A 两颗卫星轨道一致,过境时间相差约 15 min。如果没有强天气系统过境,一般足够大的均匀目标区,地气系统温度特性在 15 min 内变化不大;同时对于足够大的均匀目标

区而言,两个遥感仪器空间取样的差异相对较小。NOAA17/AMSU-B 和 FY-3A/MWHS 比对分析区大小为 3×3 像元,均匀性检验条件阈值为分析区亮温标准差小于 1.0 K。

NOAA17/AMSU-B 和 FY-3A/MWHS 在 183 GHz 频点的 3 个通道中心频点和带宽等基本特性参数相同;NOAA17/AMSU-B 的 150 GHz 通道与 FY-3A/MWHS 通道 2 极化特性以及通道中心频点和带宽特性相同,但 FY-3A/MWHS 通道 2 双边带间距略小;FY-3A/MWHS 通道 1 没有 NOAA17/AMSU-B 的对应通道,与 NOAA17/AMSU-B 通道 2 频点相同但极化特性不同,本文参考了 NOAA17/AMSU-B 通道 2 得到了匹配数据。

经过时空匹配和分析区均匀性检验,共得到 2008 年 7 月 22 日 NOAA17/AMSU-B 和 FY-3A/MWHS 各通道匹配数据对 500 多组,均匀匹配目标

区的亮温交叉比对可以分析得到FY-3A/MWHS通道2、通道3、通道4和通道5定标结果的相对偏差。匹配数据间的相关性超过99%。亮温交叉比对分析结果见表5,结果表明,FY-3A/MWHS定标结果通道各通道亮温偏差在0.9~1.5 K。FY-3A/MWHS的辐射定标结果为其资料的定量应用奠定了基础。

表5 全球均匀匹配目标区亮温比对分析结果
Table 5 Controlled analysis results of brightness temperature for globe homogeneous matched object area

通道	偏差/K ($TB_{FY-3A} - TB_{NOAA17}$)	标准差/K	均方根误差/K
2	-1.334	0.570 5	1.438 3
3	-0.484 8	1.527	1.519 1
4	-0.272 9	0.951	0.937 2
5	-0.217 6	1.122 3	1.080 3

6 结语

FY-3A/MWHS在轨稳定运行已4年多,利用在轨星上定标结果,FY-3A/MWHS遥感数据在台风暴雨等强对流天气监测,以及数值预报同化应用中发挥了重要作用。本文介绍了利用FY-3A/MWHS发射前地面真空试验数据分析得到的FY-3A/MWHS接收机非线性偏差订正方程和系数矩阵,以及根据FY-3A/MWHS天线立体方向图数据模拟分析得到的天线订正方程和系数矩阵进行在轨星上辐射定标的算法原理,并利用同时在轨的同类遥感器辐射定标结果进行了比对分析,得到如下结论。

1)FY-3A/MWHS在轨星上定标基础数据在绕地球一圈的观测过程中变化趋势合理,定标体温度轨道变化量约为0.60 K,定标观测计数值一致性偏差小于20个计数值,FY-3A/MWHS在轨星上定标系统能够满足在轨辐射定标需求。

2)FY-3A/MWHS在轨辐射定标验证结果表明,采用与AMSU-B不同的订正算法能有效订正FY-3A/MWHS仪器的非线性偏差,确保了FY-3A/

MWHS遥感数据的定量应用。

3)全球均匀目标交叉比对方法对评价被动微波探测器在轨辐射定标结果具有重要意义,同时也是FY-3A/MWHS在轨替代定标的重要技术途径。

4)经接收机非线性偏差订正和天线订正等辐射定标处理后FY-3A/MWHS通道2、通道3、通道4、通道5在轨定标结果与同时在轨的同类遥感器NOAA-17/AMSU-B的对应通道定标结果相比通道亮温偏差最大不超过1.5 K。

FY-3A/MWHS在轨辐射定标算法原理及在轨定标结果验证方法为未来同类载荷的定标及验证提供了示范,为FY-3A/MWHS资料在数值预报模式中同化和大气参数反演等方面的定量应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 杨军,董超华.新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 张升伟,李靖,姜景山,等.风云3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.
- [3] JPL. 2000, Airs project algorithm theoretical basis document part 3: Microwave instruments, JPL D-17005, Version 2.1 [R]. 2000.
- [4] Saunders R W, Hewison T J. The radiometric characterization of AMSU-B [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 1995,43(4):760-771.
- [5] Saunders R W. Results of AMSU-B radiometric characterisation tests [R]. Met O(RSI) Branch Memorandum, No.18, 1995.
- [6] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's polar orbiting satellites from NOAA-15 and later) [G]. February 2009 Revision.
- [7] Saunders R W, Hewison T J, Atkinson N C, et al. The Radiometric test results for the AMSU-B EM [R]. Met O(RSI) Branch Memorandum, No.14, 1993.
- [8] Tsan Mo. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A radiometers for NOAA-N and NOAA-N' [R]. NOAA Tech Rep NESDIS 106, 2002.
- [9] Tsan Mo. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A for NOAA-K [R]. NOAA Tech Rep NESDIS 85, 1995.
- [10] Tsan Mo. NOAA-L and NOAA-M AMSU-A antenna pattern corrections [R]. NOAA Tech Rep NESDIS 98, 2000.
- [11] 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分析[J].应用气象学报,2010,21(3):335-342.

FY-3A/MWHS data calibration and validation analysis

Gu Songyan¹, Wang Zhenzhan², Li Jing²,
Zhang Shengwei², Zhang Li³

(1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorology Centre, Beijing 100081, China; 2. Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Satellite Application System Department, CAST, Beijing 100086, China)

[Abstract] In this paper, the method for FY-3A/MWHS calibration in-orbit has been introduced. Radiometric calibration of FY-3A/MWHS on orbit has been performed based on the T/V test results and surface lab performances test results. It is confirmed that the system of radiometric calibration for MWHS is successful, and performs well on orbit. The variations among space views and warm target views in the interval of scan lines are generally within 20 counts. And the temperature fluctuation of warm target is within 0.5 K in a single pass. Due to the accuracy of the nonlinearity parameters, the radiance calibration of MWHS agrees well with NOAA-17/AMSU-B. The brightness temperature differences between FY-3 MWHS and NOAA-17/AMSU-B at simultaneous cross overpass points are less than 1.5 K. That is the foundation of quantitative application for the data of FY-3A/MWHS in numerical weather prediction (NWP). The method of calibration and validation for FY-3A/MWHS will be a good demo for the other passive microwave sounder in the future.

[Key words] FY-3A; microwave radiometer; calibration and validation; receiver non-linearity