

引用格式:Gu Songyan, Wang Zhenzhan, Lu Naimeng, *et al.* The Principle and Data Analysis of Radiometric Calibration for Aeria-test of FY-3/MWHS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1205-1211. [谷松岩, 王振占, 卢乃锰, 等. 风云三号微波湿度计航空校飞辐射定标原理及数据分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1205-1211.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1205

## 风云三号微波湿度计航空校飞辐射定标原理 及数据分析

谷松岩<sup>1</sup>, 王振占<sup>2</sup>, 卢乃锰<sup>1</sup>, 杨忠东<sup>1</sup>, 李靖<sup>2</sup>, 张升伟<sup>2</sup>, 杨磊<sup>1</sup>, 吴雪宝<sup>1</sup>

(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. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

**摘要:**风云三号微波湿度计是我国首次在轨定量应用于大气探测的星载被动微波辐射计, 为验证载荷辐射性能, 发射前于2007年9月至11月开展了航空校飞试验, 历时2个月共转场青海湖、敦煌和云南普洱3个试验场, 地面同步实施了辐射校正测量。在阐述星载微波大气探测载荷航空校飞辐射定标原理基础上, 开展航空校飞数据分析, 并与同步辐射校正测量结果进行了比对验证, 结果表明风云三号微波湿度计初样产品探测结果符合设计指标要求。风云三号微波湿度计航空校飞试验为其资料在轨业务定量应用奠定了基础, 其中航空校飞辐射定标模型支撑了后续风云三号卫星微波湿度计在轨业务定标。

**关键词:**风云三号; 微波湿度计; 航空校飞; 辐射定标

**中图分类号:**P407.1; TP75 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2019)06-1205-07

### 1 引言

风云三号是实现全球、全天候、三维、定量和多光谱遥感的我国第二代极轨气象卫星, 规划中由3个批次八颗卫星组成, 其中风云三号A星是01批实验批次的首发星, 到目前为止风云三号已成功发射A、B、C和D 4颗卫星, 实现了在轨多星组网业务服务。微波湿度计是风云三号星载大气探测系统的主要载荷之一, 与微波温度计和红外分光计联合实现大气温湿度廓线的星载探测, 在风云三号02批D星上红外高光谱大气探测仪取代红外分光计实现风云三号星载大气探测系统的更新换代。微波湿度计利用微波波段183.31 GHz大气水汽吸收线探测大气湿度垂直分布, 在轨业务运行能获取与台风、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。

风云三号A星微波湿度计是我国首个在轨业务定量应用的星载微波大气探测载荷, 载荷设计指标大大缩短了我国在同类遥感仪器上与国外的差距(性能指标见表1)。为验证载荷探测原理和性能, 减少仪器上星风险, 在原国防科工委支持下, 中国气象局于2007年7月至9月与风云三号卫星总体和载荷研制单位共同组织开展了我国民用航天首次大规模多载荷三维综合航空校飞试验。其中风云三号微波湿度计校飞试验历时2个月共转场了青海湖、敦煌和云南普洱3个试验场, 总共飞行了7个架次。微波湿度计航空校飞过程中地面同步开展了辐射校正测量。微波湿度计航空校飞试验获取的数据为反演和应用算法研究提供了模拟数据集; 同时航空校飞试验也为建立风云卫星有效载荷航空试验平台, 为促进我国气象卫星有效载荷和地面

收稿日期:2018-07-06; 修订日期:2019-10-18

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0504900/2018YFB0504902)和国家自然科学基金项目(41201360, 41775020)资助。

作者简介:谷松岩(1963—), 女, 辽宁鞍山人, 博士, 研究员, 主要从事微波遥感应用研究。E-mail:gusy@cma.gov.cn。

表 1 FY-3A/MWHS 性能参数在轨测试结果

Table 1 FY-3A/MWHS characters on orbit

通道序号	中心频率/GHz	频率稳定度/MHz	单边带宽/MHz	天线主波束效率/%	波束宽度/°	NEΔT/K	定标精度/K
1	150(H)	5.4	1 001.458	96.16	2.0	0.90	1.3
2	150(V)	5.4	987.083	96.49	2.0	0.70	1.4
3	183.31±1	2.6	480.769 6	98.36	1.1	0.86	1.5
4	183.31±3	2.6	1 033.654 6	98.36	1.1	0.91	0.9
5	183.31±7	2.6	2 186.397 6	98.36	1/1	0.91	1.1

应用系统的改进和技术发展提供了必要的技术支撑。

## 2 风云三号微波湿度计航空校飞试验概况

风云三号微波湿度计航空校飞平台采用陕西阎良中国试飞院运-8 飞机(图 1)。航空校飞试验中校飞飞机为非密闭机舱,机舱内配备有惯导系统。航空校飞试验中微波湿度计对地观测面安装了整流罩。



图 1 风云三号航空校飞平台

Fig.1 Airborne platform of FY-3

微波湿度计青海湖校飞试验共执行了 2 个飞行架次,起降机场为兰州中川机场,设计有 4 条飞行航线(图 2)。2007 年 9 月 21 日微波湿度计第一航次,有效频点为 150 GHz,飞行试验历时 4 h;9 月 24 日微波湿度计第二航次,有效频点为 183 GHz,飞行试验历时 4 h。微波湿度计青海湖校飞过程中地面同步开展了青海湖湖面温度及湖面风向风速测量,每个飞行架次地面释放两次探空气球。

微波湿度计敦煌校飞试验共执行了 3 个飞行架次,起降机场为敦煌机场。设计有 5 条航线。2007 年 10 月 8 日微波湿度计执行敦煌校飞第一航次,有效频点为 150 GHz;10 月 10 日微波湿度计敦煌校飞执行第二航次,有效频点为 150 GHz;10 月 12 日微波湿度计敦煌校飞执行第三架次飞行,有效频点为 183

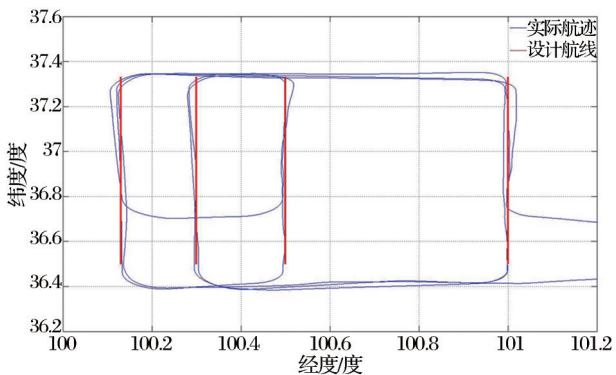


图 2 风云三号青海湖校飞实际航线图

Fig.2 Actual route map of FY-3 airborne platform over Qinghai lake

GHz。微波湿度计敦煌校飞试验中,在敦煌辐射校正场场区校飞航线上布设了 4 个同步测量点,每个飞行架次安排释放了两次探空气球。

微波湿度计云南普洱校飞试验共执行了 2 个飞行架次,起降机场为思茅机场,设计有 4 条飞行航线。2007 年 11 月 16 日微波湿度计普洱校飞执行第一架次飞行,有效频点为 150 GHz;11 月 18 日微波湿度计普洱校飞执行第二架次飞行,有效频点为 183 GHz。微波湿度计普洱校飞试验中,校飞航线上地面在普洱微波辐射校正场预选场区设置了 7 个地面气象观测点,每次与飞行同步从北京时间上午 11 时到下午 15 时,每隔 15 min 进行一次温度湿度要素观测,同时每个飞行架次安排释放了两次探空气球。

微波湿度计 3 站校飞均开展了地面同步观测,在青海湖还租用了船只以走水方式测量水面温度和风向风速。图 3 是 2007 年 9 月 21 日微波湿度计 150 GHz 频点校飞时青海湖水面风温测量的船迹,探空站设在渔政码头船迹起点处。

微波湿度计普洱校飞时在微波辐射校正场预选场区范围内布设了 7 个地表及大气参数测量点(图 4 中红点),测量区域与飞行航线(图 4 中黄线)的配置关系见图 4。

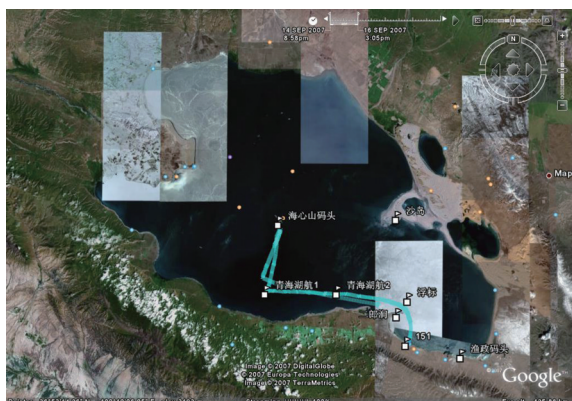


图3 青海湖湖面观测船迹示意

Fig.3 Ship route map in Qinghai lake

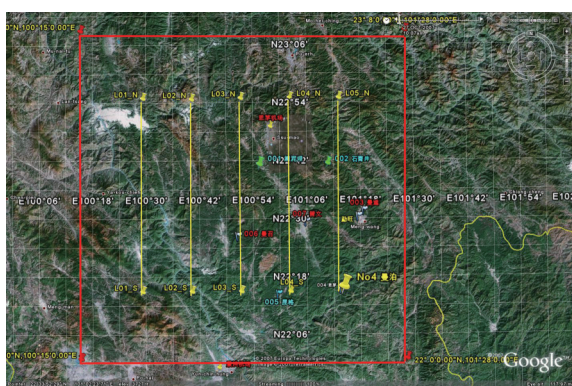


图4 普洱校飞航线和地面观测站点示意

Fig.4 Sketch map of flight route and ground observation stations

### 3 风云三号微波湿度计航空校飞数据辐射定标原理

风云三号微波湿度计航空校飞试验主要任务之一就是要验证载荷辐射定标原理的正确性。风云三号微波湿度计为全功率型微波辐射计,两付偏置抛物面天线以星下点连续变速圆周扫描方式,获取地气系统微波辐射;在8/3 s的扫描周期内,风云三号微波湿度计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个数据;内部定标源位于天顶点,冷定标观测角度位置为 $107.1^\circ$ 。风云三号微波湿度计在对冷、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、热源黑体观测值,利用这些定标基础数据完成辐射定标。风云三号微波湿度计各通道接收机均设计为双带通,频率稳定度达到5.0 MHz,天线主波束效率大于96.0%<sup>[6]</sup>。

风云三号微波湿度计设计为两点周期定标,为验证定标系统正确性,航空校飞试验中使用液氮装

置控制冷源温度,热源直接用微波湿度计内部定标黑体,载荷对地面装有透波材料的整流罩。通过对星载微波湿度计样机进行改装,调整观测时序后形成与星载不同的机载(如图5所示)时序,时序中微波湿度计天底对地观测、天顶热源黑体观测,期间对冷源观测。风云三号微波湿度计采用二次非线性辐射定标方程,航空校飞试验中微波湿度计接收到的用于辐射定标的冷源辐射( $R_c$ )和热源辐射( $R_w$ )分别表示如下:

$$\begin{aligned} R_c &= a_0 + a_1 \times C_c + a_2 \times C_c^2 \\ R_w &= a_0 + a_1 \times C_w + a_2 \times C_w^2 \end{aligned} \quad (1)$$

联立这两个方程可以解出系数:

$$a_0 = R_w - \overline{C_w}/G + u \times \overline{C_w} \times \overline{C_c}/G^2$$

$$a_1 = 1/G - u \times (\overline{C_w} + \overline{C_c})/G^2$$

$$a_2 = u/G^2$$

$$G = \frac{\overline{C_w} - \overline{C_c}}{R_w - R_c} \quad (2)$$

风云三号微波湿度计校飞试验中对地观测时接收到的辐射( $R_e$ ):

$$R_e \times \tau = a_0 + a_1 \times C_e + a_2 \times C_e^2 \quad (3)$$

其中: $R_w$ 和 $C_w$ 分别是热源辐射量和热源观测计数值; $R_c$ 和 $C_c$ 分别是冷源辐射量和冷源观测计数值; $R_e$ 和 $C_e$ 分别是地气系统的辐射量和观测计数值;仪器非线性系数 $u$ 随仪器温度而变化,通过地面真空实验确定<sup>[1-6,9]</sup>; $\tau$ 为微波湿度计航空校飞系统对地观测面天线挡风整流罩透过率。

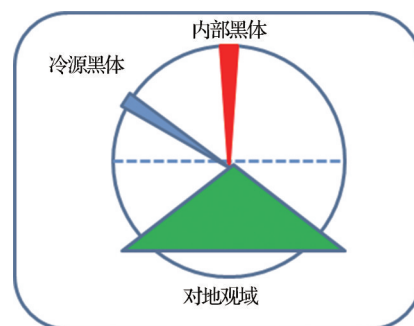


图5 微波湿度计校飞观测时序示意

Fig.5 Observation sequence diagram of FY-3 airborne platform

风云三号微波湿度计航空校飞试验过程中,冷源没有测温点,只能结合液氮沸点与气压的理论关系确定,以青海湖150 GHz频点校飞为例,飞机飞行高度为8 000 m,从当日同步施放探空气球得到的数据看8 000 m高度附近气压372.2 hPa,液氮沸点与气压的理论关系:



$$T_c = T_0 - 0.00825 \times (101325 - p) \quad (4)$$

其中:  $T_0 = 77.25$  K 是标准气压下 (1 013.25 hPa) 液氮的沸点温度,  $p$  为大气压 (Pa); 从无线电探空得到 8 000 m 高度气压值, 根据上式计算得到 8 000 m 飞行高度冷源温度为 71.97 K; 微波湿度计内部黑体定标源在 150 GHz 发射率为 0.999 0; 天线罩透波材料在 150 GHz 频点透过率 0.85。在敦煌和普洱校飞试验中, 均同步施放探空, 可以推算飞行高度液氮制冷的冷源温度。

风云三号微波湿度计普洱校飞试验中每个扫描周期获取 3 个冷源和 3 个热源观测数据, 飞机爬升进入稳定飞行航段后的基础数据带入辐射定标方程, 处理得到微波湿度计窗区 150 GHz 通道普洱校飞过澜沧江扫描线的亮温变化曲线 (图 6), 从图中可以看到, 澜沧江两岸雨林区域亮温接近 279.0 K, 澜沧江水体亮温为 212 K, 风云三号微波湿度计 150 GHz 窗区通道对普洱地表辐射响应敏感。

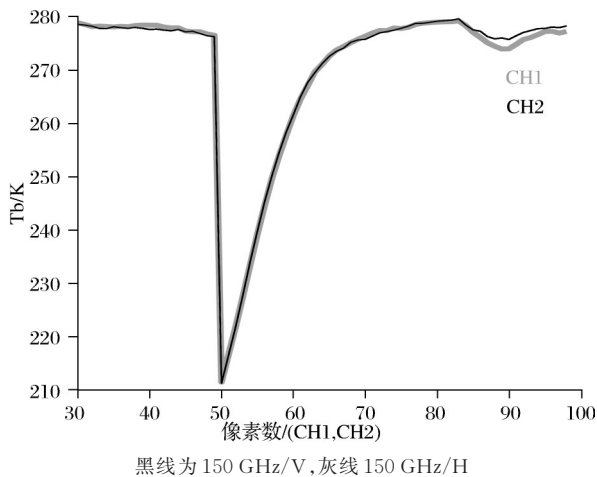


图 6 风云三号微波湿度计飞越澜沧江过程中 150 GHz 通道亮温变化曲线

Fig.6 Brightness temperature change of airborne FY-3/MWHS flying over Lanchang lake

#### 4 风云三号微波湿度计校飞数据辐射定标分析

风云三号微波湿度计航空校飞过程中按照载荷设计原理完成辐射定标, 得到仪器观测亮温; 外场同步获取大气和地表参数正演计算校飞高度仪器入瞳处的背景辐射亮温。通过观测亮温与背景亮温的对比分析, 检验验证载荷定标系统和定标模型设计的合理性。

航空校飞辐射定标对比分析原理流程见图 7。

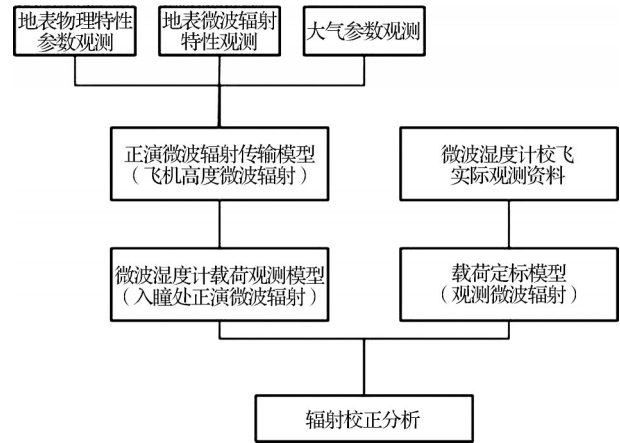


图 7 风云三号微波湿度计校飞辐射定标流程

Fig.7 Calibration flow chart of airborne FY-3/MWHS

#### 4.1 风云三号微波湿度计外场观测背景辐射计算

微波湿度计航空校飞试验中地面同步开展地表微波辐射, 以及地表和大气基础物理参数测量, 在青海湖测量水体表面温度、水面风速和水体盐度; 在普洱测量热带雨林的冠层温度、冠层下地表温/湿度和冠层风速等。采用 Weng 等<sup>[10]</sup>利用离散纵标方法开发的向量形式的辐射传输计算模式正演校飞高度载荷入瞳处的微波辐射。

大气微波辐射计算主要考虑大气中各种成分吸收、发射和散射的微波辐射。大气分子对于微波辐射主要的吸收气体是氧气和水汽, 臭氧及 NO、CO 等污染成分在微波频段也有一定的吸收作用, 因其含量稀少, 对大气的微波吸收及发射作用影响很微弱。校飞试验选取晴空条件, 避免云和降水对大气微波辐射传输过程的作用。

微波辐射在大气中传播过程中受到粒子的散射作用, 散射与入射辐射具有关系,  $I_s = SI_i$ 。其中  $I_s$  和  $I_i$  是散射和入射辐射,  $S$  是散射矩阵; 考虑大气或地表发射及散射辐射具有极化特征, 可以 Stokes 参量表示, 即:

$$I_i = (I_i, I_r, U, V)_i^T \quad (5)$$

$$I_s = (I_i, I_r, U, V)_s^T \quad (6)$$

散射矩阵通常可以表示为  $4 \times 4$  矩阵, 对于多分散粒子体系, 当假定粒子是球形时, 散射矩阵可以简化成下面的形式。

$$S = \frac{\lambda^2}{\pi \beta_s} \begin{pmatrix} S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} & S_{34} \\ 0 & 0 & -S_{34} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中:  $\lambda$  和  $\beta_s$  是入射辐射的波长和粒子的散射系数。

对于具有散射和吸收作用的大气,在光学厚度为 $\tau$ 时,在 $(\mu, \phi)$ 方向射出辐射可以表示为:

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau, \mu, \phi) - J(\tau, \mu, \phi) \quad (8)$$

其中: $J(\tau, \mu, \phi)$ 是源函数矩阵,主要大气单次散射、多次散射和发射辐射贡献,表示为:

$$J(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 M(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' + Q(\tau, \mu, \phi) \quad (9)$$

其中: $\omega(\tau)$ 是单次散射反照率, $M(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi')$ 是相矩阵,对于处于局地热平衡的大气,当平行光在 $(\mu_0, \phi_0)$ 方向入射,源函数可以表示为:

$$Q(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} M(\tau, \mu, \phi; \mu_0, \phi_0) S_b(\tau) \exp(-\tau/\mu_0) + [1 - \omega(\tau)] S_i(\tau) \quad (10)$$

对于自然光, $S_b(\tau)$ 定义为:

$$S_b(\tau) = \left( \frac{I_0}{2}, \frac{I_0}{2}, 0, 0 \right) \quad (11)$$

其中: $I_0$ 是入射光强。对于热辐射 $S_i(\tau)$ ,假定无极化。表示为:

$$S_i(\tau) = \left( \frac{B[T(\tau)]}{2}, \frac{B[T(\tau)]}{2}, 0, 0 \right)^T \quad (12)$$

其中: $B[T(\tau)]$ 是Plank函数。利用球面三角关系,可由散射矩阵线性变换得到相矩阵,即:

$$M(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') = L(\pi - i_2) S(\Theta) L(-i_1) \quad (13)$$

其中: $i_1$ 和 $i_2$ 是两个转动角度,而

$$L(i) = \begin{pmatrix} \cos^2 i & \sin^2 i & \frac{1}{2} \sin 2i & 0 \\ \sin^2 i & \cos^2 i & -\frac{1}{2} \sin 2i & 0 \\ -\sin 2i & \sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Dave(1970)研究表明,相矩阵 $M(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi')$ 的元素可以展开为Fourier余弦和正弦级数表示,同样,对于辐射向量可以以同样的形式表示。

利用离散纵标方法可将方程进一步转化成方程矩阵,求得方程解析解,正演计算得到校飞飞行高度处地气系统的微波辐射,然后结合微波湿度计仪器观测模型得到风云三号微波湿度计仪器入瞳处的微波辐射亮温。以普洱校飞试验为例,将大气和地表同步观测数据带入辐射传输计算模型,得到扫频计算结果(图8),地表微波辐射模拟计算结果见图9。

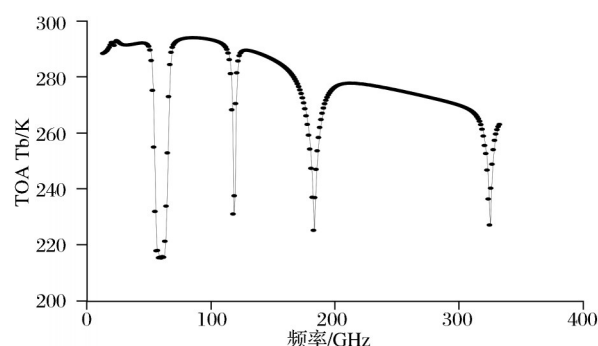


图8 普洱航空校飞背景正演亮温扫频图

Fig.8 Sweep frequency diagram of background forward simulation brightness temperature over Puer area

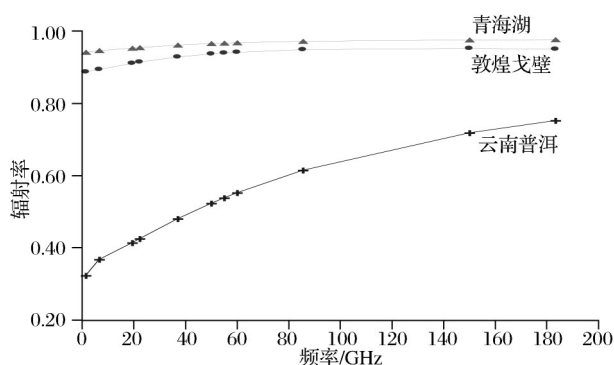


图9 航空校飞试验中地表微波辐射扫频图

Fig.9 Sweep frequency diagram of surface forward simulation brightness temperature during aviation flying

## 4.2 风云三号微波湿度计校飞数据比对分析

风云三号微波湿度计校飞时,受条件限制,每个航次只能飞一个频点,数据比对分析以风云三号微波湿度计窗区150 GHz通道为例。青海湖航空校飞期间,根据校飞同步观测,2007年9月21日飞行时段青海湖水面风速约3.6 m/s,水面温度13.2℃,湖水平均盐度12.9‰。将上述参数带入洋面微波辐射传输模型,得到青海湖微波湿度计窗区通道(150 GHz)微波发射率特征值0.73;利用同步释放探空的数据带入大气微波辐射传输模式计算得到8000 m飞行高度微波湿度计仪器入瞳处150 GHz通道背景亮温187.1 K,微波湿度计校飞150 GHz通道观测亮温为182.3 K。

2007年10月10日校飞飞行时段敦煌戈壁地表温度约26.5℃,利用地表微波辐射传输模型,微波湿度计150 GHz频点,敦煌戈壁微波发射率为0.97,飞行高度微波湿度计仪器入瞳处150 GHz通道背景亮温263.6 K,微波湿度计校飞150 GHz通道观测亮温为252.8 K。

2007年11月16日校飞飞行时段思茅地面气温

约 23.0 °C,地表植被覆盖度设为 1.0,植被高度设为 8 m。利用地表微波辐射传输模型,思茅热带雨林微波发射率特征值 0.952,飞行高度微波湿度计仪器入瞳处 150 GHz 通道背景亮温 248.4 K,微波湿度计校飞 150 GHz 通道观测亮温为 245.6 K。

3 个校飞地点 3 个航次辐射定标对比分析结果

表 2 航空校飞辐射定标结果比对

Table 2 Result contrast analysis of calibration during aviation flying

航飞观测亮温/K	外场同步试验背景亮温(航飞高度 8 000 m)/K	对比分析地点	观测-背景/K
181.3	187.1	青海湖水面	-5.8
245.6	248.4	普洱雨林	-2.8
252.8	263.6	敦煌戈壁	-10.8

航空平台辐射定标的不确定性主要来自冷源和整流罩。冷源没有直接测温设计,只能根据无线电探空结果估算飞行高度处气压值,计算航空校飞高度液氮的温度,进而推算由液氮制冷的冷源温度,这个过程给冷源辐射参考带来误差;而仪器整流罩微波透过性能的不确定性也会使校飞定标结果与模拟计算结果产生偏差;在计算背景场微波辐射亮温时,150 GHz 高频微波地表微波发射率的不确定性也是导致观测与背景间亮温偏差大的原因。

从对比分析结果看,3 个试验场的校飞观测亮温均低于背景场亮温,根据辐射定标方程分析,仪器对地面整流罩微波透过率被高估了;复杂密实介质敦煌戈壁以及上层热力结构不确定的青海湖水体,导致背景场正演辐射计算不确定性增加,观测与背景场之间辐射偏差增大;普洱热带雨林空间分布均匀,可用于微波辐射计辐射校正;风云三号微波湿度计校飞数据辐射定标结果表明微波湿度计定标系统稳定。

风云三号 A 星成功发射在轨运行后,选取 2008 年 7 月 22 日过境时间相差 15 min,卫星轨道一致的 NOAA17 和 FY-3A 两颗卫星,NOAA17/AMSU-B/L1C 和 FY-3A/MWHS/L1 的匹配数据,进行交叉比对<sup>[2-3,7]</sup>,表 3 中的结果表明,二者观测亮温间具有很好的 consistency。风云三号微波湿度计航空校飞试验结果确保了其在轨辐射定标结果的正确性。

表 3 在轨微波亮温交叉比对

Table 3 Cross comparison of microwave brightness temperature on orbit

	偏差/K	标准差/K	均方根误差/K
	$TB_{FY-3A}-TB_{NOAA17}$		
150 GHz	-1.334	0.570 5	1.438 3

见表 2。

表 2 给出了校飞定标结果和外场观测正演模拟计算结果,风云三号微波湿度计航空校飞定标结果低于外场观测正演模拟计算结果;传统光学辐射校正场用于微波载荷时,观测与背景间的辐射偏差较大,而普洱热带雨林试验场观测与背景辐射亮温差相对小。

## 5 结 语

风云三号微波湿度计是我国成功在轨业务应用的星载大气探测被动微波辐射计,通过发射前航空校飞试验的数据分析,得到如下结论。

(1) 星载微波辐射计发射前的航空校飞试验可以有效地验证载荷定标系统性能,为在轨应用奠定基础。

(2) 普洱热带雨林校飞观测与背景亮温偏差小于敦煌和青海湖等传统光学辐射校正场,表明普洱更适合用于被动微波辐射校正试验。

(3) 校飞试验数据表明,风云三号微波湿度计窗区通道对地气系统目标响应敏感。

风云三号微波湿度计航空校飞试验保证了在卫星发射前地面系统就获取到了载荷科学数据,航空校飞试验并验证了载荷性能;风云三号微波湿度计航空校飞试验辐射定标模型为后续风云三号微波湿度计的在轨业务运行及应用奠定了基础,同时也为我国民用航天被动微波载荷研制阶段的原理验证积累了经验。

## 参考文献(References):

- [1] Gu Songyan, Wang Zhenzhan, Li Jing, *et al.* The Radiometric Characteristics of Sounding Channels for FY-3A/MWHS [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(3): 335-342.[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[J],应用气象学报,2010, 21(3): 335-342.]
- [2] Gu Songyan, Wang Zhenzhan, Li Jing, *et al.* FY-3A/MWHS Data Calibration and Validation Analysis [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(7): 92-100.[谷松岩,王振占,李靖,等.FY-3A/MWHS 在轨辐射定标及结果分析[J].中国工程科学,2013,15(7):92-100.]

- [3] Guo Yang, Gu Songyan. Calibration and Validation of Microwave Humidity and Temperature Sounder on Board FY-3C Satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 20-31.[郭杨,谷松岩.风云三号C星微波湿温探测仪的定标和验证[J].地球物理学报,2015, 58(1): 20-31.]
- [4] Gu Songyan, Guo Yang, You Ran. Radiance Transfer for FY-3A/MWHS and Space View Bias Correction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 251-257. [谷松岩,郭杨,游然.FY-3A/MWHS辐射传递及冷空偏差修正[J].遥感技术与应用,2015,30(2):251-257.]
- [5] Wang Zhenzhan, Zhang Shengwei, Li Jing. Thermal-vacuum Calibration of Microwave Humidity Sounder on FY-3B Satellite [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(10): 33-46. [王振占,张升伟,李靖.FY-3B卫星微波湿度计热真空定标方法和结果分析[J].中国工程科学,2013, 15(10):33-46.]
- [6] Zhang Shengwei, Li Jing, Jiang Jingshan, *et al.* Design and Development of Microwave Humidity Sounder for FY-3 Meteorological Satellite [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(2): 199-207.[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.]
- [7] Atkinson N C. Calibration, Monitoring and Validation of AMSU-B[J].Advances in Space Research,2001,28(1):117-126.
- [8] Gu S Y, Guo Y, Wang Z Z, *et al.* Calibration Analyses for Sounding Channels of MWHS Onboard FY-3A [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12):4885-4891.
- [9] He J Y, Zhang S W, Wang Z Z. Advanced Microwave Atmospheric Sounder (AMAS) Channel Specifications and T/V Calibration Results on FY-3C Satellite[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2015,53(1):481-493.
- [10] Weng F Z. Advances in Radiative Transfer Modeling in Support of Satellite Data Assimilation [J]. Journal of The Atmospheric Sciences, 2007, 64: 3799 - 3807. doi: 10.1175/2007JAS2112.1.

## The Principle and Data Analysis of Radiometric Calibration for Aeria-test of FY-3/MWHS

Gu Songyan<sup>1</sup>, Wang Zhenzhan<sup>2</sup>, Lu Naimeng<sup>1</sup>, Yang Zhongdong<sup>1</sup>, Li Jing<sup>2</sup>,  
ZhangShengwei<sup>2</sup>, Yang Lei<sup>1</sup>, Wu Xuebao<sup>1</sup>

(1.National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;  
2.National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** FY-3 is Chinese second-generation sun-synchronous meteorological satellite series. The Microwave Humidity Sounder (MWHS) is a five-channel microwave radiometer in the range of 150~191 GHz onboard FY-3 satellite for atmosphere humidity sounding. To verify the load radiation performance, an aeria-test has been finished during Sep. and Nov. 2007 before launching, transferring around Qinghai, Dunhuang, and Puer. In this paper, the principle of airborne radiometric calibration for MWHS has been explained, the aeria-test calibration data has been analyzed, and the results has been compared with the synchrotron radiation correction measurement results. According the outcome, we consider the FY-3/MWHS is good enough to meet the requirements of design specifications. The aeria-test results make a firm foundation for MWHS's operational application, and the model of airborne radiometric calibration for MWHS supported the operational preprocessing follow-up.

**Key words:** FY-3; Microwave humidity sounder; Aeria-test; Radiometric calibration