

风云三号卫星微波温度计的在轨性能 长期稳定性分析

游然¹ 谷松岩¹ 郭阳¹ 吴学宝¹ 杨虎¹ 陈文新²

(¹ 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081; ² 中国航天科技集团公司, 北京 100048)

摘要: 中国风云三号 (FY-3) A星于2008年5月27日成功发射, 其上装载的微波温度计 (Microwave Temperature Sounder, MWTS) 有4个通道, 频率分别为50.3, 53.596, 54.94和57.29GHz, 可提供地面至平流层下部的大气温度廓线信息。介绍了MWTS的仪器特征和定标方法, 对FY-3A发射后MWTS的仪器性能相关参数的长序列特征进行了监测分析, 这些参数主要包括灵敏度、冷空和内部暖黑体的计数值、仪器温度和通道增益。通过再分析资料和微波辐射传输模拟, 比较了FY-3A卫星MWTS与NOAA-18卫星先进微波温度探测器 (Advanced Microwave Sounding Unit-A, AMSU-A) 的观测和模拟的亮温偏差。结果表明, MWTS所有通道的灵敏度值优于其指标; 通道1和3的亮温偏差与AMSU-A接近; 通道2和4的偏差比AMSU-A要大一些。

关键词: 定标, 风云三号 (FY-3), 微波温度计 (MWTS)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.002

Long-Term Calibration and Accuracy Assessment of the FengYun-3 Microwave Temperature Sounder Radiance Measurements

You Ran¹, Gu Songyan¹, Guo Yang¹, Wu Xuebao¹, Yang Hu¹, Chen Wenxin²

(¹ National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

² China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048)

Abstract: The Chinese FengYun-3 (FY-3)A satellite was successfully launched on May 27, 2008, with a Microwave Temperature Sounder (MWTS) onboard. MWTS has four channels with frequencies of 50.3, 53.596, 54.94, and 57.29 GHz, respectively. The MWTS measurements are primarily used for profiling atmospheric temperatures from surface to lower stratosphere. MWTS is a cross-track scanning instrument, and its Earth-view measurements are calibrated through the warm target and cold space measurements during every scan cycle. In this paper, the FY-3A MWTS and its channel characteristics are first introduced. The calibration process and the postlaunch instrument performance are then presented, including the long-term trends of noise equivalent differential temperature (NEDT), calibration counts from cold space and warm targets, instrument telemetry, and channel gains. The observed and simulated brightness temperature (BT) differences of MWTS and Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) are compared. It is shown that the MWTS NEDT values at all channels are much better than its specification. The BT biases of MWTS channels 1 and 3 with respect to the simulations are similar in magnitude to those from National Oceanic and Atmospheric Administration-18 AMSU-A. The MWTS biases at channels 2 and 4 are larger than AMSU-A.

Keywords: Calibration, FengYun-3 (FY-3), Microwave Temperature Sounder (MWTS)

1 引言

风云三号 (FY-3) 是中国第二代太阳同步轨道系

列卫星, 前两颗卫星FY-3A和FY-3B分别于2008年5月27日和2011年11月9日成功发射^[1], 其上装载有微波温度计 (Microwave Temperature Sounder, MWTS), 微波湿度计和微波成像仪3种微波仪器。

本文介绍了MWTS的仪器特征和在轨定标过程, 通过跟踪2009年和2010年MWTS的仪器温度和冷暖定标源计数值的长期变化, 分析评估了MWTS的长期在轨性能特征; 通过数值预报资料和微波辐射传输模拟, 比较了FY-3A MWTS和NOAA-18 AMSU-A的亮温偏差。

收稿日期: 2013年4月1日; 修回日期: 2013年6月8日
第一作者: 游然 (1975—), Email: youran@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); 国家自然科学基金资助项目 (40605008); 国家高新技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2007AA12Z115); 科技部国际科技合作专项 (2010DFA21140)

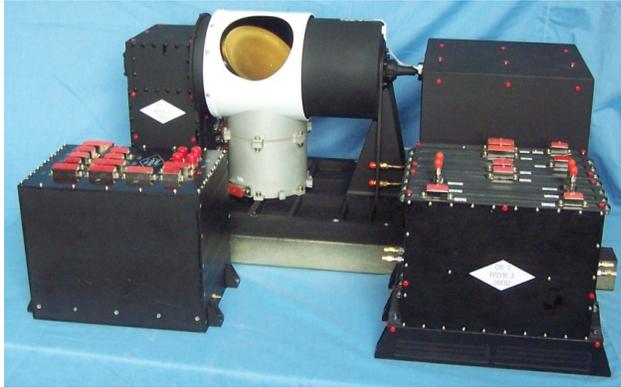


图1 装载在FY-3A卫星上的微波温度计 (MWTS) 照片

2 仪器和通道特征

MWTS是周期自定标的全功率型被动微波辐射计, 由中国航天科技集团西安分院研制^[2], 重量为39kg, 额定功率58W。MWTS分成3个单机装星, 分别是探测头部、系统控制器和接收处理器。探测头部安装于对地面舱板上, 系统控制器和接收处理器安装于有效载荷舱内。图1为MWTS的照片。

MWTS有两种工作模式: 定点模式和扫描模式。在定点模式中, 地面可以发指令控制MWTS的天线指向角度, 这种模式有助于在轨定标和仪器状态监控。正常在轨情况下MWTS采用跨轨步进扫描模式, 地球观测视场的步进扫描角为 6.9° , 扫描周期为16s, 依次扫过 $\pm 48.3^\circ$ 范围的地球视场 (Field of View, FOV) 15次 (FOV 0到FOV 14)、冷空和内部暖黑体各1次 (FOV 15和FOV 16)。其中FOV 0和FOV 14离地球最远, FOV 7在星下点位置, FOV 15观测冷空 (扫描角为 121.2°), FOV 16观测内部暖黑体 (扫描角度为 228.3°)。图2给出了MWTS的扫描时序图。

MWTS有4个通道, 其频率分别为50.3, 53.596, 54.94和57.29GHz, 与AMSU-A的通道3, 5, 7和9的频率一致。MWTS主要用来探测地面至20km高度范围内的温度信息。除通道2为双边带外, 其他所有通道都

表1 FY-3A微波温度计 (MWTS) 的设计指标和观测结果

参数	设计指标	观测结果
对地扫描张角	$\pm (48.3^\circ \pm 0.1^\circ)$	-48.275° $+48.3^\circ$
扫描步进角	$6.9^\circ \pm 0.1^\circ$	$6.85^\circ \sim 6.95^\circ$
星上校正黑体	2	2
星下点水平分辨率 (km)	50.30GHz	61.25km
	53.596GHz	57.79km
	54.94GHz	57.47km
	57.290GHz	54.31km
扫描周期	$16s \pm 0.1s$	16.01s
积分时间	0.78s	0.78s
量化等级	$>13\text{bit}$	16bit

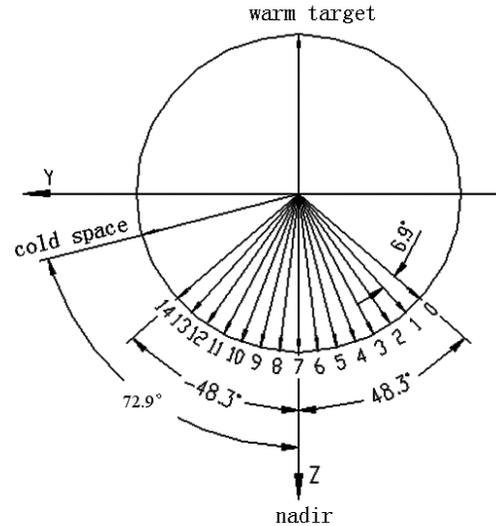


图2 微波温度计 (MWTS) 扫描时序图

是单边带模式。表1列出了MWTS的设计指标和观测结果, 表2列出了MWTS各通道特征。

3 在轨定标方法

FY-3A MWTS每扫描一圈, 都会观测一次冷空和一次暖黑体, 在轨定标算法以这两个为参考点进行两点定标, 根据发射前的热真空室试验推导的非线性参数进行非线性订正。

MWTS的内部暖黑体中装有4个铂电阻温度计 (Platinum Resistance Thermometers, PRTs)。定标过程使用的内部暖黑体的参考温度为所有测得的有效PRT的平均值。

卫星发射前, 利用上海航天技术研究院509所的KM2真空罐对MWTS进行了测试和标定。在真空测试过程中, 设定仪器温度分别为0, 10, 20和 30°C , 利用变温源作为地球场景, 尽可能覆盖可能的在轨情况。根据这些真空罐的测试数据, 推导定标相关的误差订正和非线性订正的参数^[3, 4]。

MWTS的在轨定标算法将星上MWTS观测地球的计数值转换成辐射值, 这个过程主要包括数据严格质量控制、数据定标、非线性订正、天线方向图订正和月亮污染订正后, 生成MWTS L1数据。卫星发射前, 通过真空定标试验确定了4种仪器温度条件下的非线性定标参数; 卫星运行期间, 用MWTS每条扫描线的实测仪器温度插值计算非线性参数, 以实时弥补由不完全平方律检波器可能带来的非线性影响^[5-9]。

4 MWTS性能的在轨校核

卫星发射后的3个月内, 利用在轨数据, 系统地进行了MWTS的发射后定标和验证。验证的参数主要有: 灵敏度 (NEDT)、冷空和内部暖黑体计数

表2 FY-3A微波温度计 (MWTS) 的通道特征

通道 编号	频率 (GHz)		波段数	3dB波束宽度 (MHz)		NEDT (K)		波束 效率 ^a	天底 极化	视场 ^b (deg)
	设计值	测量值		设计值	测量值	设计值	测量值			
1	50.30	50.26213	1	180	162	0.5	0.192	94.9%	V	4.029
2	53.596±0.115	53.60146	2	170×2	178.1×2	0.4	0.102	94.8%	H	3.960
3	54.94	54.98109	1	400	375.8	0.4	0.088	95.6%	V	4.029
4	57.290	57.33962	1	330	316.8	0.4	0.190	94.7%	H	3.687

注：^a为测量值，设计指标是>90%；^b设计指标是4°。

值、仪器温度和通道增益等。下文给出了这些参数的MWTS长时间性能稳定性分析结果。

4.1 灵敏度

灵敏度定义为辐射计测定的天线亮温的标准差，它表征了接收机的系统噪声，它会受到电子噪声、短期增益变化和观测的计数值噪声的影响。真空定标时，将目标场景设置为固定温度（300K），此时利用方程（1）计算得到的辐射计输出的标准差即为真空定标灵敏度。灵敏度是衡量辐射计发射前性能的核心指标，其定义如下：

$$NEDT = \frac{T_H - T_L}{C_H - C_L} \sqrt{\frac{C_{HRMS}^2 + C_{LRMS}^2}{2}} \quad (1)$$

其中， T_L 和 T_H 分别表示冷空和内部暖黑体的温度， C_L 和 C_H 分别是冷空和内部暖黑体的计数值， C_{LRMS} 和 C_{HRMS} 分别是 C_L 和 C_H 的标准差。

本文分析的是在轨数据，灵敏度的计算是用内部暖黑体的温度变化在0.1K以内的10条连续的扫描线计算得到的。100条连续扫描线可以计算得到10个灵敏度值，以其中的第三大值作为这100条线的灵敏度值。表2给出了MWTS的4个通道的灵敏度指标和发射前3个月的在轨数据的计算值。多数通道的在轨灵敏度都要优于发射前的值，这要归功于仪器的在轨温度比热真空罐的温度低使得灵敏度高。

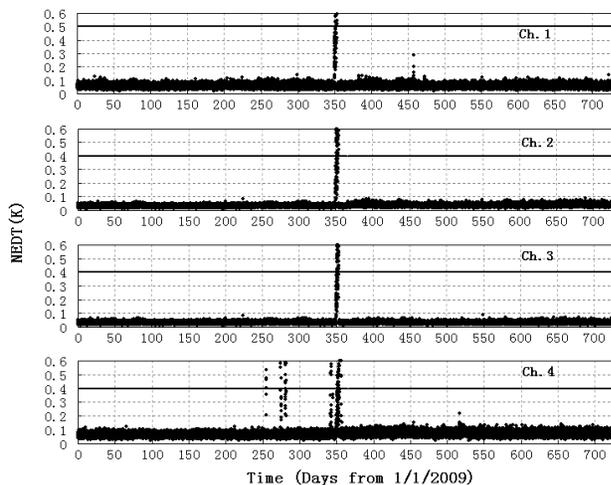


图3 2009年1月1日—2010年12月31日微波温度计 (MWTS) 的灵敏度 (水平实线表示该通道的灵敏度设计值)

图3给出了2009年和2010年的MWTS灵敏度曲线。曲线上的每个点都是用上述方法从100条连续扫描线计算得到的灵敏度。总的来说，在轨数据计算得到的所有4个通道的灵敏度值都稳定在0.1K附近，都比表2中的指标高得多。

在日计数为350，250~270期间出现了一些异常值，仪器制造方分析认为这些异常是天线的角编码器异常产生的，经仔细检查后，修改了程序并注入到MWTS，从图3可以看到，日计数350后的灵敏度值很稳定，表明问题解决正确。

4.2 仪器温度

定标过程中，采用仪器的混频器温度作为MWTS业务定标算法的仪器参考温度。图4给出了2009—2010年MWTS的混频器温度和内部暖黑体PRT的平均温度。曲线上的每个点是一条轨道所有扫描线的混频器温度平均值。

从图4a可以看出，混频器的温度曲线随季节的变化明显，北半球夏季时混频器的温度高，冬季相对低一些，这与卫星平台和外空环境的变化规律是一致的。从图4b看出，MWTS的内部暖黑体的温度在2年内的变化幅度在0.3K以内，这表明MWTS对其内部暖黑体的温控做得很好。温控的方案是当内部暖黑体的温度低于设定下限时，MWTS的温控系统就开始对它

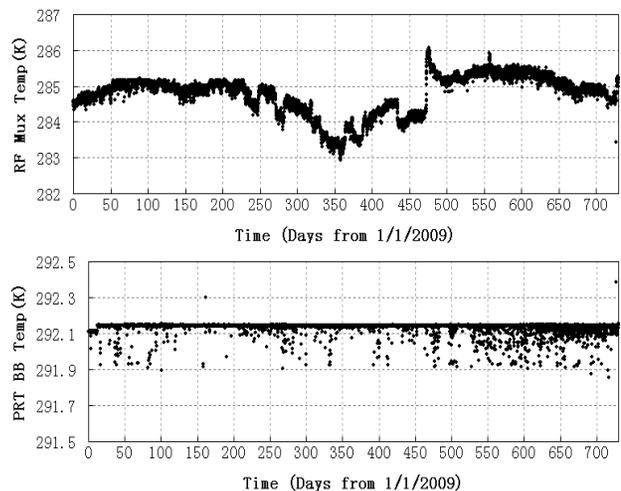


图4 2009年1月1日—2010年12月31日微波温度计 (MWTS) 的混频器温度和内部暖黑体平均温度

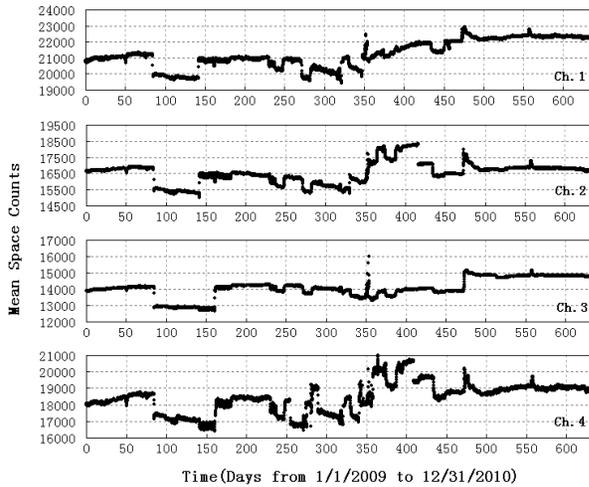


图5 2009年1月1日—2010年12月31日微波温度计 (MWTS) 的冷空计数值

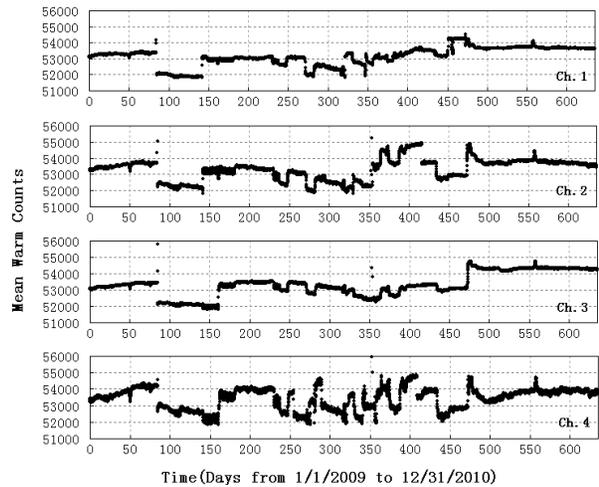


图6 2009年1月1日—2010年12月31日微波温度计 (MWTS) 的内部暖黑体计数值

进行加热直到达到设定的温度上限。因此，图4所示的温度值总是等于或低于设定温度上限。

4.3 冷空和内部暖黑体计数值

图5和图6分别给出了2009—2010年冷空和黑体计数值的变化曲线，其中曲线上的每个点代表一条轨道上所有扫描线的冷空或内部暖黑体计数值的平均值。比较这两组图的时间序列可以看出，二者随时间的波动是一致的，这是因为冷暖计数值都是从同一个接收器接收的。

在图上可以看到计数值曲线有一些跳变，将图5和图6与图4比较可以看到，三组图的波动规律是一致的。为方便比较，在图8a中将通道4的冷空计数值和仪器温度画在一起，可以看到二者的变化规律确实是一致的。这意味着冷空和内部暖黑体的计数值随仪器的温度变化而变化，例如日计数为480时仪器温度增

加，冷空和内部暖黑体的计数值也同时增加。仪器温度和计数值二者相互依赖的原因是仪器温度会影响通道的增益，图8b给出了仪器温度与通道4的增益，可以看到二者的变化规律是完全一致的。

4.4 通道增益

MWTS的通道增益 (Gain) 会受到仪器温度变化、仪器老化等因素的影响，定义为

$$Gain = \frac{C_H - C_L}{T_H - T_L} \quad (2)$$

其中， T_L 、 T_H 、 C_L 和 C_H 的定义同方程(1)。

图7显示了2009—2010年的MWTS的通道增益变化，曲线上的每一个点都是一条轨道上的所有扫描线的平均值。总的来说，通道增益值较为稳定。

在通道增益的图上有很多小的波动。比较图7与图4可以看出，通道增益的波动趋势与仪器温度一致。图8把通道4的增益和仪器温度画在一张图上，可以看出，二者的波动很类似。其余3个通道的特征类似，这里就不给出了。这表明MWTS的通道增益随仪器温度灵敏变化。

5 定标结果评价

FY-3A MWTS的4个通道和NOAA卫星AMSU-A的3, 5, 7, 9通道频率一致，因此，二者具有可比性。但是，除高纬度地区外，直接比较FY-3A MWTS与NOAA-18 AMSU-A的像元亮温是不可能的，因为这两颗卫星在其他地方的过境时间都不相同^[10, 11]。本文中，通过同化分析场和数值模拟的方法，分别对同一时段的可获得的所有FY-3A MWTS和NOAA18 AMSU-A的3, 5, 7, 9通道进行辐射传输亮温模拟，并分别与观测的亮温进行偏差统计分析，从而实现在

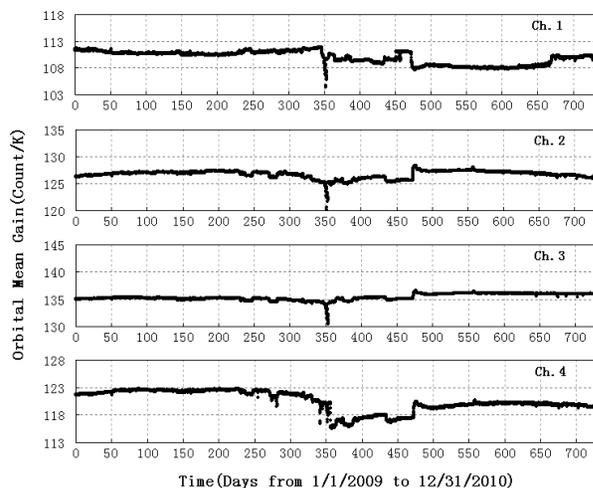


图7 2009年1月1日—2010年12月31日微波温度计 (MWTS) 的通道增益

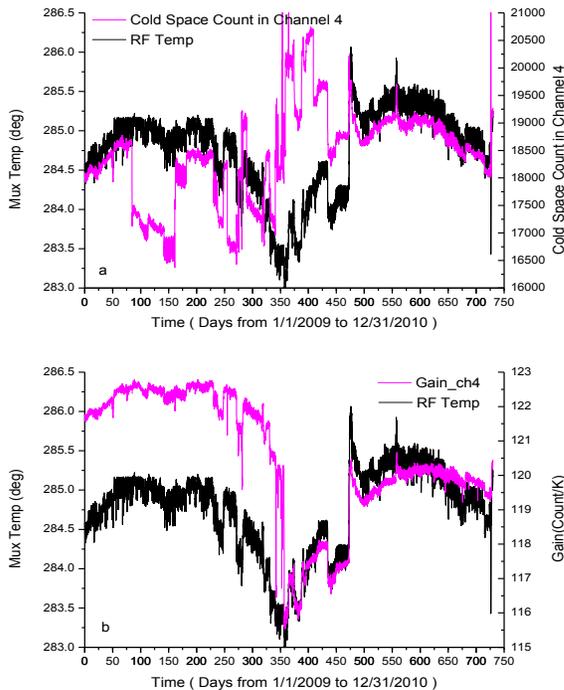


图8 2009年1月1日—2010年12月31日微波温度计 (MWTS) 的通道增益

全球范围比较这两种观测的差异。前向模拟所需的洋面的海表和大气输入数据包括海表温度、风速和温湿度廓线，均来自美国环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP)。所用的前向模型为美国卫星数据同化中心 (the US Joint Center for Satellite Data Assimilation, JCSDA) 开发的CRTM模型 (the Community Radiative Transfer Model) [12]。由于地表的微波辐射特性较为复杂多变，因此，这个过程只计算了晴空洋面的情况。

图9给出了2010年12月11—15日的FY-3A MWTS和NOAA-18 AMSU-A的观测和模拟的亮温偏差图。曲线上的每个点表征期间的亮温出现频数。从图上看，MWTS的通道1和通道4的偏差与AMSU-A接近，通道2和3的偏差要大一些，通道2和4的偏差分布很接近。

6 总结

FY-3A是中国第二代极轨卫星的第一个试验卫星。MWTS的数据对大气温度廓线反演和数值预报同化是很有用的。本文展示了卫星发射后两年的在轨性能评价，包括灵敏度、冷空和内部暖黑体计数值、仪器温度和通道增益。最后比较了MWTS和AMSU-A的观测和模拟的亮温偏差。

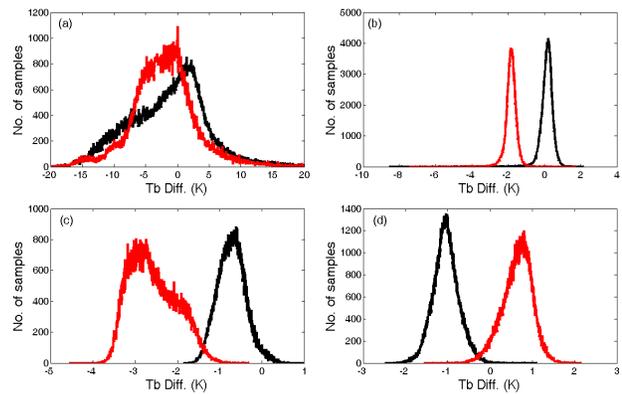


图9 FY-3A MWTS (红色)和NOAA-18 AMSU-A (黑色)的观测和模拟亮温偏差直方图

总的来说，在轨数据计算的微波温度计的灵敏度值优于指标，冷暖定标计数值的变化特征与仪器温度和通道增益一致。MWTS的通道1和通道4的观测和模拟的亮温偏差与AMSU-A很接近，通道2和3的偏差比AMSU-A要大一些。

参考文献

- [1] Dong C H, Yang J, Yang Z D, et al. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90: 1531-1544.
- [2] Chen W, Li H, Li Y M. Microwave temperature sounder onboard Fengyun-3A. 7th Annual Meeting of China Aerospace Science Academy, 2009.
- [3] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's Polar orbiting satellites from NOAA-15 and later), 2009.
- [4] Mo T. Postlaunch calibration of the METOP-A Advanced Microwave Sounding Unit-A. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 3581-3600.
- [5] Mo T. Calibration of the Advanced Microwave Sounding Unit-A for NOAA-K. NOAA Tech Rep, NESDIS 85, 1995.
- [6] Mo T. AMSU-A antenna pattern corrections. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 103-112.
- [7] Mo T. Calibration of the advanced microwave sounding unit-A radiometers for NOAA-N and NOAA-N. NOAA Tech Rep, NESDIS 106, 2002.
- [8] Mo T. Postlaunch calibration of the NOAA-19 Advanced Microwave Sounding Unit-A. *J Geophys Res*, 2010, 115, D08111.
- [9] Mo T, Kigawa S. A study of lunar contamination and on-orbit performance of the NOAA-18 Advanced Microwave Sounding Unit-A. *J Geophys Res*, 2007, 112, D20124.
- [10] Zou X, Wang X, Weng F, et al. Assessments of Chinese Fengyun Microwave Temperature Sounder (MWTS) measurements for weather and climate applications. *J Atmos Oceanic Technol*, 2011, 28: 1206-1227.
- [11] Lu Q. Initial evaluation and assimilation of FY-3A atmospheric sounding data in the ECMWF System. *Sci China Earth Sci*, 2011, 54: 1453-1457.
- [12] Weng F. Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64: 3799-3807.