修改日期: 2023-06-01

修改日期: 2023-07-07



毕研盟<sup>1,2,3</sup> 李娟<sup>4</sup> 吴春强<sup>4</sup> 安大伟<sup>1,2,3</sup> 韩阳<sup>4</sup> 廖蜜<sup>1,2,3</sup> 徐唯伟<sup>1,2,3</sup>

胡菊旸<sup>1,2,3</sup> 窦芳丽<sup>1,2,3</sup> 李小青<sup>1,2,3</sup>

- 1. 许健民气象卫星创新中心,北京 100081
- 2. 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,北京 100081
- 3. 国家卫星气象中心, 北京 100081
- 4. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081



摘要 全球/区域数值预报同化系统所需要的重要资料来源之一是卫星微波遥感的亮温数据。 微波遥感仪器的高层大气(平流层中上部)探测通道亮温的定标精度,受多种因素影响,存 在一定的偏差。由于高层大气高精度探测资料相对比较匮乏,因此对微波遥感的高层大气亮 温的精度检验评估成为重要研究内容。本文对在轨运行的微波温度遥感器 AMSU-A、ATMS 和 FY-3D MWTS-2 在 2020 年观测数据进行了定标精度检验评估,综合使用了三种评估方法 进行了较为全面的分析,即基于掩星资料、再分析资料的辐射传输模拟比较和同类仪器交叉 定标比较。三种检验评估方法从不同角度揭示了各仪器高层大气探测通道观测资料的误差特 征,分析了对比误差的可能来源。三种评估方案给出的高层通道亮温的偏差存在差异,但基 本结果变化趋势是一致的,即高层通道相比中低层通道,存在较大的噪音。除了交叉定标方 法,其它两种方法都检验出了高层资料偏差的季节变化;整体而言,AMSU-A表现要优于

资助项目 国家重点研发计划项目(2022YFF0801302),民用航天技术预研项目(D040301)

Funded by National Key Research and Development Program of China (2022YFF0801302) and Civil Aerospace Technology Pre Research Project(D040301)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>收稿日期: 2022 年 11 月 7 如; 网络出版日期:

作者简介 毕研盟, 男, 1979 年出生, 博士, 研究员, 主要从事卫星大气遥感研究。E-mail: biym@cma.cn 通讯作者 徐唯伟, E-mail: xuww@cma.gov.cn

MWTS-2和 ATMS。本研究评估的高层亮温偏差的时间、空间变化特征可为微波高层大气资料的同化、气候应用提供参考。

关键词 微波遥感 掩星 辐射传输 交叉定标

文章编号中图分类号 P407.4文献标识码 Adoi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2307.22214



# Calibration evaluation of satellite microwave sounding with channels at upper atmosphere

BI Yanmeng<sup>1,2,3</sup>, LI Juan<sup>4</sup>, WU Chunqiang<sup>4</sup>, AN Dawei<sup>1,2,3</sup>, HAN Yang<sup>4</sup>, LIAO Mi<sup>1,2,3</sup>, XU Weiwei<sup>1,2,3</sup>, HU Juyang<sup>1,2,3j</sup>, DOU Fangli<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaoqing<sup>1,2,3</sup>

- 1. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Beijing 100081
- Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081
- 3. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081
- 4. CMA Earth System M Zou odeling and Prediction Centre, Beijing 100081

**Abstract** Satellite microwave remote sensing data is one of the most important data required by global/regional assimilation system. The brightness temperatures of the upper atmosphere (middle and upper stratosphere) from microwave remote sensing are affected by many factors, and have certain errors. The accuracy evaluation of microwave remote sensing of the upper atmosphere has become an important research content due to the relatively lack of high-accuracy sounding data of the upper atmosphere. In this paper, the accuracy of the observation data of the on-orbit microwave temperature radiometers like AMSU-A、ATMS and FY-3D MWTS-2 is examined and evaluated in 2020. Three evaluation methods, i.e., comparison with radio occultation observation, with radiation transfer simulation and with cross calibration, are comprehensively used for the analysis. From different aspects, the three approaches reveal the error characteristics of the data at the upper atmosphere from various

instruments, and the possible sources of the errors are analyzed. The specific deviation values of the brightness temperatures of the high-level channels are different from the three evaluation schemes, but the basic trend of the variation are consistent, that is, the high-level channels have greater noise than the middle and low level channels. In addition to the cross calibration method, the other two methods show the seasonal variation of the deviation. On the whole, AMSU-A performs better than MWTS-2 and ATMS. The temporal and spatial variation characteristics of brightness temperature accuracy at the upper atmosphere can provide reference for microwave data assimilation and climate application.

Keywords Microwave remote sensing, Radio Occultation, Radiation transfer, Cross calibration

### 1. 引言

目前,卫星遥感资料广泛应用于数值天气预报系统,明显地提高了数值天气 预报的准确率(Eyre et al., 2021)。相对于红外和可见光资料,微波资料具有一定 穿透薄云的能力,可以探测到云下大气垂直温湿度信息,以及地表参数信息。因 此,微波资料是数值预报系统所需要的重要非常规资料之一,并在同化系统中占 有重要的地位。

自 1978 年 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) TIROS (Television Infrared Observation Satellite)卫星发射以来,第一代微波探测单元 MSU (Microwave Sounding Unit)利用 50-60GHz 的氧气吸收波段来探测大气温度 (Eyre et al., 2020)。最初,MSU 在该波段内只有四个通道,可以提供对流层和低 平流层内四个高度的大气温度。当 1998 年 NOAA-15 号卫星发射以后,MSU 被 高级微波探测单元 Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A)取代(Christy et al., 2003)。2006 年开始,AMSU-A 也搭载在欧洲 METOP (Meteorological Operational Satellite)系列卫星上。2011 年,SNPP (Suomi-National Polar-orbiting Partnership)卫星发射,卫星上装有先进技术微波探测仪 ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder)。相比 AMSU, ATMS 具有更多的探测通道、

更高的空间分辨率和更宽的扫描范围,可以描绘出更多的云和暖核结构细节 (Bormann, N. et al., 2013)。目前,除 SNPP 卫星外,ATMS 也搭载在 NOAA-20 卫星,未来还将搭载在 JPSS(Joint Polar Satellite System)-2/3/4 卫星上。

2008年,中国新一代极轨气象卫星首发试验卫星 FY-3A 发射,标志着我国 极轨气象卫星成功地实现了技术升级换代,实现了新的跨越发展(Yang et al., 2012)。其中,对大气遥感和数值天气预报起到重要作用的探测仪器之一是微波 温度计 MWTS(Microwave Temperature Sounder)(游然等,2013),它的主要任务就 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。经过不断发 展,最新 FY-3D 星上搭载的第二代 MWTS-2 有 13 个通道,性能指标也有了很大 的提升(安大伟等,2016; Han et al.,2020)。

为了实现对大气的分层观测,微波温度探测仪器设计有多个通道,这些通道中心频率不同,但主要位于 50-60GHz 的氧气吸收带。不同通道的权重函数峰值位于不同高度,亦即对不同高度层上大气辐射敏感,从而可以实现从近地面一直到平流层上部(~50km)的大气温度观测 (Aires et al., 2015;王业桂等,2018;吴晓京等,2017;李力等,2016)。从探测层次而言,我们习惯上将探测大气层次较高的通道称之为高层大气探测通道。利用 50-60 GHz 的氧气吸收线探测大气温度,要达到探测高层大气(平流层中、上部)的目的,要求通道带宽必须要窄,这导致接收能量低。虽然高层大气温度波动变化不大,但仪器本身所具有的指标特性使得高层大气的精确测量较为困难。

微波探测仪器对地球大气进行观测,记录的原始信号是电信号,通过两点定标方程,将电信号可以与亮温联系起来(Ranzani et al., 2013)。在定标过程中,由于许多定标误差源的影响,定标出的亮温会出现噪音和系统偏差。白噪音可能产生于仪器自身灵敏度性能,系统偏差可能来自于仪器工作温度的偏离、天线的旁瓣效应和扫描角度等。在观测资料应用于天气预报和气候研究之前,量化、记录和校正这些偏差是很重要的,对于 30km 高度以上的平流层中上部大气探测资料尤其如此。传统上,我们习惯于使用探空等方法检验评估卫星遥感资料,但是对于 30km 高度以上的区域,传统探测方法难以达到这个区域,探空数据仅分布于陆地上空,广大海洋上空缺少数据。因此,如何检验评估微波高层通道遥感的大气资料,成为数值天气预报等应用领域重要的研究内容。

4

本研究的目标聚焦在微波高层大气探测资料偏差评估测试,揭示资料误差变 化特征,为用户使用提供参考。检验评估所用的方法非常重要,需要尽可能多的 评估方法提供全面的、多角度的验证信息。基于观测模拟的方法是资料同化中评 估观测误差的主要方法,交叉对比的方法广为人知且使用广泛,国际上也建立了 专注于交叉定标的组织 GSICS (Global Space-based Inter-Calibration System), 开展不同卫星在 SNO (Simultaneous Nadir Overpasses)的情况下资料源之间的比 较,提高一致性。除上述两种方法之外,我们增加了掩星探测作为评估参考源, 掩星是独立于微波的资料源,具有无需定标、探测精度高的优点,经过多年的连 续发展,掩星资料也获得了广泛的使用。以上这三种方案相互验证、相互补充, 构成了本研究的综合方案,确保所得到的评估测试结果可靠、可信和可用。

### 2. 资料及评估技术方案

采用的评估资料主要包括 2020 年 NOAA-15/18/19 和 METOP-A/B 卫星 AMSU-A、SNPP 卫星和 NOAA-20 卫星 ATMS、FY-3D 卫星 MWTS-2 的观测资料,这些仪器的高层探测通道权重函数高度一般约在 20 hPa 以上。各仪器中心 频率和带宽是完全相同的,但灵敏度和定标精度存在差异,表 1 给出了这些通道 参数,从灵敏度看,MWTS-2 与 ATMS 相当,从定标精度看,MWTS-2 与 AMSU-A 相当。图 1 是高层探测通道的权重函数垂直分布图,最高探测通道峰值接近约 2 hPa。

表1微波高层探测通道特性(f=57.290)	GHz`	c)
------------------------	------	----

频率	带宽		灵敏度(k)		定	标精度(1	()	权重函
(MHz)	(MHz)	MWTS-2	ATMS	AMSUA	MWTS-2	ATMS	AMSUA	数峰值 (hPa)
$f_0 \pm 322 \\ \pm 48$	36	1.2	1.2	0.4	1.5	0.75	1.5	20.947
$\begin{array}{c} f_0 \pm 322 \\ \pm 22 \end{array}$	16	1.7	1.5	0.6	1.5	0.75	1.5	11.024
$f_0 \pm 322 \\ \pm 10$	8	2.4	2.4	0.8	1.5	0.75	1.5	4.935
$f_0 \pm 322 \\ \pm 4.5$	3	3.6	3.6	1.2	1.5	0.75	1.5	2.164

Table 1 Characteristics of microwave high-level channels (f<sub>0</sub>=57.290 GHz)



Fig.1 Distribution of weight functions of the high-level channels of microwave detectors

对以上微波遥感资料的检验评估并不容易,原因是独立的、可信赖的全球范围的大气高层探测资料较少。如前所述,本研究综合利用三种方案对微波高层通道所探测的数据进行检验评估。

首先是利用 GNSS(Global Navigation Satellite System)无线电掩星(Radio Occultation, RO)数据,检验评估微波探测资料。GNSS RO 利用导航卫星发射的 无线电信号来探测地球大气(Anthes R.A, 2011; 郭志梅等, 2008),在大气折射率 球形对称的假设下,弯曲角和折射率的垂直廓线可以从被地球大气影响的 GNSS 卫星无线电信号的测量值中得到(毕研盟等, 2012),进一步,折射率廓线可以 用来生成温度和水汽廓线产品,通常使用一维变分算法,消除大气低层温度、水 汽的模糊性(毕研盟等, 2013)。GNSS 掩星探测数据原则上是可追溯的,具有 高精确度和准确度,高垂直分辨率,没有云的污染,不需要系统校准,也没有仪 器漂移。因此可将无线电掩星资料作为标准参考源(Liao et al., 2016; Zou et al., 2014; Hou et al., 2013)。目前,可提供掩星观测的卫星较多,如中国的 FY-3 搭载的掩星探测仪 GNOS (the GNSS Occultation Sounder)(廖蜜等, 2015),美国的

COSMIC-2 (the Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate) (Schreiner et al, 2020; Anthes et al., 2022)。Staten 等(2009)对 COSMIC 温度场资料进行验证,结果表明在 5-20km 的垂直范围内温度偏差最小在 1K 以内,整体评估均方根误差约为 2K。需要注意的是,在真正使用掩星数据作为参考数据之前,首先应该了解清楚掩星数据整体误差特性,在此基础上,对掩星廓线开展进一步的质量控制(Zou et al., 2006),以确保所用掩星数据的准确性和可靠性。

其次,通过高分辨率再分析场数据输入辐射传输模式计算得到的模拟亮温作 为参考数据,也可以检验评估微波遥感资料,且具有很多其它方法不具备的优势。 再分析数据具有时空连续性,可获得高频次、长时间序列的全球辐射模拟数据。 利用这一数据,可以对观测资料进行时间、空间、扫描位置等多维度评估分析, 检测各种仪器定标偏差,从而为偏差原理分析及订正提供帮助,有助于提升观测 资料质量。但此种方法也存在局限,由于辐射传输模式对有云和降水情况的模拟 不准确,因此使用该方法时通常需要进行云和降水像元的剔除。对海冰像元模拟 也会存在较大偏差,因此一般选用南北纬 60°内的像元作为质量评估的偏差统计 对象。如果再分析场数据已经同化使用过某遥感器观测数据,那么模拟数据与观 测数据是存在一定相关性的,两者并不完全独立。

最后,除了与其它数据源进行比较,这些卫星相同通道在同一时间、地点的 观测数据是可以相互进行比较的,即交叉比对方法,评估相互之间的差异。参考 全球空间交叉定标系统 GSICS 算法规范,交叉比对方法流程主要由数据匹配、 数据转换和结果比对三部分组成。交叉点经严格的空间时间匹配、观测几何匹配 和均匀性检验,得到具有相似观测条件的样本,最后比对亮温差异。

### 3. 检验评估结果与分析

### 3.1 基于掩星数据的检验评估

(1) 掩星观测精度分析

GNSS 掩星探测的大气廓线是比较稳定和准确的,特别是从对流层中部到平 流层下部的观测,但是,这里我们主要关注更高层观测数据,所以掩星高层数据 的性能将决定我们采用哪个卫星的观测做为对比参考源。

7

在统计样本相当的条件下, FY-3D GNOS 与 COSMIC-2 的折射率廓线均与 ERA5 (ECMWF Reanalysis V5)进行匹配,分别得到与 ERA5 的偏差和标准差。 图 2 给出了 2020 年 1 月 1 日-5 日期间的统计分析结果,可以看出,两者的误差 特征非常类似,且误差值接近,整体质量趋于一致;在 5km 以下,GNOS 的负 偏差和标准偏差均小于 COSMIC-2;在 18-30km 的范围内,COSMIC-2 的波动特 征更明显,这可能是由于 COSMIC-2 更多的样本分布在低纬度地区,受低纬地 区上空重力波的影响有关,因此造成了这样的误差特征;最后,在我们更为关注 的 30km 高度之上,COSMIC-2 的标准偏差更小,说明在高层,COSMIC-2 的探 测能力可能优于 FY3D GNOS。

在大气高层,由于水汽可以忽略,折射率误差反映的即是温度探测误差。与 微波高层探测通道性能相比,掩星在高层 2K 的实测精度也是优于 ATMS 部分高 层通道 NEDT (Noise Equivalent Delta Temperature)设计指标的,如 ATMS 通道 14/15 的 NEDT 指标分别是 2.4 K 和 3.6 K,这表明掩星高层探测数据可以检验评 估微波资料。

基于上述分析结果,再考虑到 COSMIC-2 掩星数据量远多于 FY-3D,因此本研究采用 COSMIC-2 作为检验评估微波高层资料的参考数据。





和标准差(粗实线);右图为比较样本数量

Fig.2 Comparison of refractive index between FY-3D GNOS, COSMIC-2 and ERA5 form January 1 to 5,2020. Left

figure shows the deviation (thin solid line) and the standard deviation (thick solid line); Right figure shows the

comparative sample counts.

(2) 微波与掩星观测数据比较结果

从掩星观测信号中可以反演得到折射率、大气温度和湿度,待检验的微波观

测量是大气亮温,显然,二者不是同一个物理量。为了能够比较,还需要利用辐射传输模式将掩星观测的大气廓线转换为微波观测量,即模拟输出各个通道的亮温。由于陆表发射率精度问题,目前辐射传输模式 RTTOV(Saunders, et al., 2018) 在海面上的亮温模拟精度远优于陆地的,因此只模拟在洋面上、晴空条件、南北 纬 60°之间的观测。ATMS、AMSU-A 晴空像元的选取是基于 23、31GHz 窗区通 道反演的云水含量,如果低于 0.05,则认为是晴空。 MWTS-2 晴空像元的选取 是使用反演产品中的云散射指数,如果低于 5,则认为是晴空。二者时空匹配条 件是空间距离小于 50km,时间差小于 3h。另外,为了确保评估结果的可靠和准 确性,还对掩星资料进行了以下质量控制:

- 去除数据中质量标识 QC flag = 1 (代表数据质量存在问题)的 RO 廓线资料;
- 为了确保 RO 廓线的有效长度,只保留廓线底部气压大于 850 hPa,层顶气压小于 5hPa;
- 对 RO 折射率廓线进行双权重检查,只保留 Z score< 4 (即只接受偏差小于 4 倍标准差的资料)的廓线;

由于 RO 廓线不是严格垂直局地地表的,整根 RO 廓线有一定的位置漂移,因此需要对不同权重函数峰值高度的探测通道分别进行匹配。掩星观测无法提供的地表、大气参数则从 ERA5 进行提取,卫星几何信息由微波观测提供。

图 3~图 6 给出了 8 颗卫星搭载相同中心频率的 4 个高层探测通道(见表 1) 的观测亮温与掩星模拟亮温之间偏差和标准差的时间序列图,按天统计的匹配样 本量一般在 180-800 之间波动。在 4 个通道中,权重函数峰值高度相对较低的 57.290±0.322±0.048 GHz, 57.290±0.322±0.022 GHz 通道,各仪器偏差在±0.8K 以 内波动,而对于最高的通道 57.290±0.322±0.0045 GHz,除 METOP-A 外,其它 卫星数据偏差几乎都超过了-1K,最大值接近-2K。METOP-A 搭载的 AMSU 有 着较小的偏差,在所有的仪器中标准差也是最小的,稳定性最好。NOAA-18 搭 载的 AMSU 则有着较大的偏差。整体而言,不同仪器的偏差日变化都有着类似 的变化趋势,各个仪器中,两个相对探测高度较高的通道 57.290±0.322 ±0.010 GHz, 57.290±0.322±0.0045 GHz,偏差表现出了明显的季节性变化。



图 3 2020 年各卫星搭载的微波温度探测仪中心频率 57.290 ± 0.322 ± 0.048 GHz 通道相对于掩星观测的偏差(上)、

标准差(下)时间序列

Fig.3 Time series of deviation (top) and standard deviation(bottom) of  $57.290 \pm 0.322 \pm 0.048$  GHz channel of microwave

temperature detector carried by each satellite in 2020













# 的时间序列 Fig.4 Time series of deviation (top) and standard deviation(bottom) of 57.290 ± 0.322 ± 0.022 GHz channel of microwave temperature detector carried by each satellite in 2020











图 5 2020 年各卫星搭载的微波温度探测仪中心频率 57.290±0.322±0.010 GHz 通道相对于掩星观测的偏差(上)、

标准差(下)的时间序列

Fig.5 Time series of deviation (top) and standard deviation(bottom) of  $57.290 \pm 0.322 \pm 0.010$  GHz channel of microwave

temperature detector carried by each satellite in 2020











图 6 2020 年各卫星搭载的微波温度探测仪中心频率 57.290±0.322±0.0045 GHz 通道相对于掩星观测的偏差(上)、

标准差(下)的时间序列

Fig.6 Time series of deviation (top) and standard deviation(bottom) of  $57.290 \pm 0.322 \pm 0.0045$  GHz channel of microwave temperature detector carried by each satellite in 2020

在微波资料的实际同化应用中,会对资料进行相应的偏差订正工作,因此, 代表噪音的标准差对同化影响就相对比较重要。表2给出了8颗卫星搭载的微波 温度计按标准差排序后的结果。可以看到,各卫星搭载的 AMSU-A 仪器精度最 高, FY-3D MWTS-2 和 ATMS 排名较靠后, 后两者具有相当的精度。

表 2 基于掩星数据的微波高层通道检验评估结果,按标准差数值由小到大排列。(f<sub>0</sub>=57.290GHz)

Table 2 Evaluation results of microwave high level channel based on Occultation data. The results are arranged in

	order of standard deviation value from small to large.( $f_0$ =57.290GHz)										
$f_0 \pm 0.3$	322±0.048	3 GHz	$f_0 \pm 0.3$	322±0.022	2 GHz	$f_0 \pm 0.3$	322±0.010	) GHz	$f_0 \pm 0.3$	22±0.004	5 GHz
ПĒ	心思	标准差	口臣	心思	标准差	ПĘ	心思	标准差	田見	心思	标准差
上生	议命	(K)	上生	议命	(K)	上生	汉府	(K)	上生	汉奋	( <b>K</b> )
NOAA-18	AMSU-A	0.52	NOAA-15	AMSU-A	0.67	NOAA-18	AMSU-A	0.91	NOAA-18	AMSU-A	1.31
METOP-A	AMSU-A	0.53	NOAA-18	AMSU-A	0.67	NOAA-15	AMSU-A	0.92	METOP-B	AMSU-A	1.38
NOAA-19	AMSU-A	0.54	METOP-B	AMSU-A	0.69	METOP-B	AMSU-A	0.93	METOP-A	AMSU-A	1.40

METOP-B	AMSU-A	0.54	NOAA-19	AMSU-A	0.70	METOP-A	AMSU-A	0.96	NOAA-19	AMSU-A	1.42
NOAA-20	ATMS	0.59	METOP-A	AMSU-A	0.70	NOAA-19	AMSU-A	0.97	NOAA-20	ATMS	1.78
FY-3D	MWTS-2	0.63	NOAA-20	ATMS	0.85	NOAA-20	ATMS	1.21	FY-3D	MWTS-2	1.88
SNPP	ATMS	0.65	FY-3D	MWTS-2	0.86	FY-3D	MWTS-2	1.28	SNPP	ATMS	1.90
NOAA-15	AMSU-A		SNPP	ATMS	0.93	SNPP	ATMS	1.32	NOAA-15	AMSU-A	Nan

## 3.2 基于观测模拟的检验评估

(1) 观测模拟方法

在轨卫星仪器基于观测模拟的辐射精度评估均需要以辐射传输模拟为基础, 对微波辐射传输而言,在没有详尽考虑云雨粒子散射效应的情况下,云雨区卫星 辐射亮温模拟和实际观测还有相当大偏差,降水云区的观测模拟亮温偏差(观测 -模拟,简称 OMB)可达 10k。为了更为合理地检测仪器性能和识别晴空观测, 需要尽可能地去除云和降水等对卫星观测的污染 (Lu et al., 2020)。在本文研究中, 剔除了降水云视场而保留了非降水云视场,主要原因是云对微波影响很弱,尤其 在高层通道,云的影响更弱。基于微波观测数据,国内外有许多方法应用于微波 探测仪器的降水检测(Weng et al., 2003)。这些方法以观测通道亮温以及不同通 道亮温差为判断依据,因此其检测效果也会因仪器而异。我们采用 ERA5 再分析 资料的云水/云冰含量之和做阈值,对 FY-3D MWTS-2 观测的降水视场进行检验, 结果表明,观测模拟偏差较大的区域与云水和云冰含量的空间分布对应,这一方 案很大程度上消除了负偏差较大的区域。从平均效果而言,尽管剔除降水视场前 后 OMB 的平均偏差变化不大,但标准差会显著下降,说明采用这一方法是可靠 有效的。因此,为减少不同仪器观测之间的差异,本研究选用再分析资料的云水 /云冰含量之和作为微波视场降水标识。

辐射传输模式仍然采用 RTTOV,实现对各微波仪器的正演模拟。同时,为 更准确定位偏差的来源,分别建立了针对多种大气背景资料的接口并开发相应的 时空插值程序,本研究重点分析基于 ERA5 再分析、美国环境预报中心 GDAS

(Global Data Assimilation System)产生的检验结果。ERA5选用等压面数据, 空间段分辨率为0.25° x 0.25°, 气压层 37 层, 最高层气压 1.0 hPa。GDAS 选用 原始分辨率数据,即空间分辨率 0.11° x 0.11°, 气压层 127 层, 最高层气压可达 0.01 hPa。

14

#### (2) 观测与模拟的比较结果

图 7 给出了 NOAA-15、NOAA-18、NOAA-19、METOP-A 和 METOP-B 共 5颗卫星上 AMSU-A 通道 5-14 的统计结果,包含了高层第 11-14 通道。统计日 期是 2020 年 1、4、7、10 四个月的 10 日至 19 日。由图可见,整体而言,随着 探测高度的升高偏差均值逐渐增大,高层通道的平均偏差高于其他探测通道且均 为负偏差。NOAA-15 和 NOAA-18 的平均偏差较大,而 METOP-A、METOP-B 的平均偏差较小,两者相差约0.5K-1.0K。从观测模拟偏差的标准差看,通道6、 7两个中层通道的标准差最小(约为0.3K),随着通道探测高度的降低和升高, 标准差都逐渐增大,至最高层的通道14,标准差可达1.1K。低层探测通道观测 模拟标准差的增大与模拟数据中地表信息处理不完善有关。高层探测通道观测模 拟标准差的增大一方面与探测通道本身灵敏度有关,另一方面也与部分通道的探 测范围超出了输入场 ERA5 的最高层高度(1hPa)有关。超出最高层高度的大气 状态以RTTOV模式自带的气候廓线库插值得到,与实际大气状态存在较大差异, 因此导致高层通道观测模拟偏差的标准差较大。另外, NOAA-15 的通道 6 以及 NOAA-19 的通道 8 存在观测模拟偏差均值和标准差与其他卫星相比显著偏大的 现象,这种异常的偏差不排除是仪器自身的原因,因其不属于本研究的高层通道, 所以不作进一步的细究。



图 7 2020 年不同季节代表性时段各卫星 AMSU-A 中高层通道 ERA5 模拟结果与观测值偏差的统计结果。从上至下 分别是偏差均值和偏差标准差

Fig.7 Statistical results of simulateding ERA5 and observed deviation of middle-high-level channel of AMSU-A carried by each

#### deviation

图 8 和图 9 分别给出了 NOAA-19 和 METOP-B 两颗卫星上 AMSU-A 仪器 通道 5 至通道 14 在 2020 年每月代表性日期观测模拟的偏差逐日统计结果。由时 间序列可见, NOAA-19 和 METOP-B 的结果类似,即中层通道的观测模拟的偏 差季节变化特性很小,而高层通道观测模拟的偏差统计特征体现出一定的季节变 化,且季节变化随着探测高度的升高而变强,这与掩星评估结果是一致的,但观 测模拟的偏差季节特征来源有待于进一步研究。

由上面的分析可见,AMSU-A 的高层通道的观测模拟存在一定的偏差,且 不同卫星的仪器具有很大一致性。图 10 给出了 NOAA-19 通道 14 在 2020 年中 一天的亮温偏差的全球分布。由图可见,对应于观测亮温高值区,观测模拟偏差 为负偏差,反之亦然。另外,分析 METOP-A 搭载的 ATMSU-A 通道 14 的偏差 空间分布(图略),虽然两者分别属于上午、下午轨道卫星,同样也可以发现两 者观测模拟偏差在空间分布上也具有较强的一致性。此通道观测亮温高值区对应 于对流层上层和平流层底层的高温区域,云雨影响有限,出现这一现象的原因, 可能是辐射传输模式的模拟在此通道存在误差导致。



Fig.8 Daily statistical results of simulated by ERA5 and observed deviation of middle-high-level channel of NOAA-19

AMSU-A from 2020.01 to 2020.12



图 9 同图 8, 但为 METOP-B 的结果



图 10 2020 年 1 月 14 日 NOAA19 AMSU-A 第 14 通道观测亮温与正演亮温的空间分布及两者的差异。上中下图分别表示观测亮温、正演亮温和亮温差值的分布; 左、右两列分别表示升轨和降轨的情况

Fig.10 The spatial distribution and the difference between observed bright temperature and simulated bright temperature of NOAA19 AMSU-A channel 14 on January 14, 2020. The upper, middle and lower figures respectively show the distributions of observed bright temperature, simulated bright temperature and their difference; the left and right figures show the ascending and descending, respectively.

ATMS 将温度探测、湿度探测通道合为一个仪器,搭载于 SNPP 以及

NOAA-20 卫星上,其高层通道包括通道 12 至通道 15 共 4 个通道。将分析 AMSU-A 数据的方法应用到 ATMS 上,并且数据时段也相同,可以发现类似结 果,即偏差均值随着探测高度的升高逐渐增大,高层通道的平均偏差高于其他探 测通道且均为负偏差,相对而言,NOAA-20 的偏差和标准差小于 SNPP;标准 差随着通道探测高度的降低和升高都会逐渐增大,至最高层的通道 15,标准差 可达 1.7K 以上。

对 FY-3D MWTS-2 的高层通道(图 11)分析表明,观测模拟偏差的均值在 -1.0K 至-2.0K 之间,随着探测高度的升高偏差均值逐渐增大。从观测模拟偏差 的标准差看,通道 6 和 7 两个中层通道的标准差最小(约为 0.3K),随着通道 探测高度的降低和升高标准差逐渐增大,至最高层的通道 13,标准差可达 1.75K。 相对而言,在中高层通道中,最高层的通道 13 观测模拟偏差的均值和标准差较 之其他通道都变大,表明该通道呈现出强的噪声特征。



图 11 2019 年 6 月至 2020 年 5 月, FY-3D MWTS-2 中高层通道 ERA5 模拟结果与观测值的统计结果。从上至下 分别是偏差均值和偏差标准差

Fig.11 Statistical results of the mean bias and the standard deviation between the simulation using ERA5 and observations for middle-high level channels of FY-3D MWTS-2 from Jan 2019 to May 2020.From top to bottom are the bias mean and the standard deviation

此外,从长时间序列来看,在 2019 至 2020 年一年的时间内,各通道基于 ERA5 的观测模拟的偏差标准差波动幅度在 0.1K 附近,体现出较好的稳定性。

对国内外三种微波温度探测仪高层通道的分析表明,观测模拟偏差无论是均 值还是标准差均随着探测高度的升高而增大,为了进一步确认误差来源,分析了 输入背景场数据最高层高度对观测模拟的偏差影响,选择最高层较高的 GDAS 数据进行对比分析。图 12 给出了 NOAA-20 ATMS 各通道 2020 年期间多天基于 ERA5 和 GDAS 两种输入场的观测模拟偏差统计特征图。由图可见,基于两种输入的观测模拟偏差统计特征具有差异。特别对于探测器高层通道,基于 GDAS 的观测模拟偏差平均值和标准差均小于 ERA5 的结果,且又以平均值的差异最为显著。对于通道 10 至通道 15 而言,以 ERA5 和 GDAS 为输入的观测模拟偏差 均随着探测通道的升高而增大,但 ERA5 有着更大的变化幅度(-1.0K 至-2.0K),而 GDAS 约为-0.5K,因此,未来采用高拓展高度的背景场数据对评估仪器观测精度是很有必要的。



于 GDAS 的结果

Fig.12 Statistical characteristics of the mean bias and the standard deviation between the simulations and the observations

for each channels of NOAA-20 ATMS during 2020. From top to bottom are the mean bias and the standard deviation

表 3 给出了各仪器按照标准差排序后的结果。结论与前表 2 掩星的比较结果相似, AMSU-A 仪器性能最好, FY-3D MWTS-2 和 ATMS 相当。

表3基于观测模拟的微波高层通道检验评估结果,按标准差数值由小到大排列。(f<sub>0</sub>=57.290GHz)

Table 3 Evaluation results of microwave high level channels based on observation and simulation. The results are

arranged in order of the standard deviation value from small to large.(fo=57.290GHz)

$f_0 \pm 0.3$	322±0.048	8 GHz	$f_0 \pm 0.3$	322±0.022	GHz	$f_0 \pm 0.3$	322±0.010	) GHz	$f_0 \pm 0.32$	22±0.004	5 GHz
718	公現	标准差	71日	い現	标准差	귀티	公現	标准差	コ目	公現	标准差
上生	汉帝	(K)	上生	汉帝	(K)	上生	议奋	(K)	上生	仪奋	(K)
NOAA-18	AMSU-A	0.50	NOAA-18	AMSU-A	0.55	NOAA-18	AMSU-A	0.63	NOAA-18	AMSU-A	1.04
NOAA-19	AMSU-A	0.55	NOAA-15	AMSU-A	0.56	NOAA-15	AMSU-A	0.64	METOP-B	AMSU-A	1.09
METOP-B	AMSU-A	0.55	NOAA-19	AMSU-A	0.61	METOP-B	AMSU-A	0.68	NOAA-19	AMSU-A	1.10
METOP-A	AMSU-A	0.56	МЕТОР-В	AMSU-A	0.62	NOAA-19	AMSU-A	0.69	METOP-A	AMSU-A	1.13
NOAA-20	ATMS	0.59	METOP-A	AMSU-A	0.64	METOP-A	AMSU-A	0.73	NOAA-20	ATMS	1.73
FY-3D	MWTS-2	0.64	FY-3D	MWTS-2	0.77	NOAA-20	ATMS	1.02	FY-3D	MWTS-2	1.84
SNPP	ATMS	0.66	NOAA-20	ATMS	0.80	FY-3D	MWTS-2	1.12	SNPP	ATMS-2	1.96
NOAA-15	AMSU-A	Nan	SNPP	ATMS	0.91	SNPP	ATMS	1.20	NOAA-15	AMSU-A	Nan

# 3.3 基于交叉定标的检验评估

如第2节介绍,不同卫星之间相同通道在同一时间、地点的观测数据是可以 相互进行比较的,寻找这些交叉点的观测数据就成为重要一环。通过寻找实际匹 配数据样本,我们发现,实际匹配可用的样本点数远少于前面两种方法,大量的 样本点分布在近极地附近,中低纬度地区分布很少。由于卫星运行轨道相位的差 异,甚至还会出现长达数月不会交叉的情况,即使在极区也无法找到合适的样本 点。但是,鉴于这种方法的直观性、简洁性和可信性,本研究对 FY-3D MWTS-2 与搭载在 SNPP 和 NOAA-20 上的 ATMS 高层通道在 2020 年的交叉情况进行了 比较分析。

为了较好地开展交叉比对,需要对卫星轨道和仪器观测几何参数有详细了解。 表 4 给出了 FY-3D MWTS-2 和 SNPP ATMS 主要观测参数,整体上二者很接近, 仅在赤交点地方时上有较大差异,这为交叉比对奠定了较好地基础。

表 4 FY-3D MWTS-2 和 SNPP ATMS 观测参数比较

_	仪器名称	MWTS-2	ATMS
_	卫星轨道高度	820 km	817 km
	赤交点地方时	13:40	9:30
	扫描范围	±49.5°	±51.2°
	扫描周期	5.2 秒	8/3 秒
	单视场分辨率	33 km	33 km
	每行视场数	90个	96个

Table 4 Comparison of observed parameters between FY-3D MWTS-2 and SNPP ATMS

基于两颗卫星的轨道和观测几何信息,可以统计出它们轨道运行交点的位置 和时间,如在 SNPP 和 FY-3D 两颗卫星在极地地区上空会出现轨道交叉,可以 匹配到轨道交叉点。为了准确选择出轨道交叉时可用于评估的观测点,需要对交 叉点附近的观测像元按照一定规则进行匹配。本研究参照 GSICS 交叉定标匹配 规则进行匹配,空间上,限定像元中心距离不超过 10km;时间上,为了减少观 测目标温度随时间变化的影响,尽量保证二者观测时间的一致性,设定观测时间 差阈值为 5 分钟;观测几何方面,为了确保两仪器在相似地面出射角和相似大气 路径条件下进行观测,两仪器像元观测天顶角之间需满足差值小于 5 度,最后, 要对匹配出的像元进行均匀性检验,由于两个遥感器空间匹配难以做到完全一致, 目标地物的均匀性将会较大程度影响着比对的不确定性。本研究仅选择均匀场景 下的像元进行交叉比对,均匀性判据是筛选探测像元周边 3×3 数据亮温标准差小 于 1K。

基于以上判断条件,对 2020 年 1 月 1 日至 12 月 31 日 FY-3D MWTS-2 和 NOAA-20、SNPP 进行匹配。匹配成功的样本总计约 1200 对,亮温分布区间范 围是 150-300K,区域上主要集中分布在高纬度的南北两极地区,中低纬度地区 几乎没有分布。

图 13 展示了 2020 年 FY-3D 通道 10 和 SNPP、NOAA-20 相应通道的匹配样本统计量时间序列,其中 MWTS-2 与 SNPP 的交叉主要分布在上半年,而 MWTS-2 与 NOAA-20 的交叉主要分布在下半年,但 8-11 月共 4 个月没有匹配到符合条件的交叉数据。由于上半年匹配到的数据样本对偏少且数量不稳定(2-30 个),统计结果较为离散,在 12 月份,具有较多的交叉点数据样本对(350 个),我们对数据样本丰富的 12 月份进行了重点统计分析,表 5 给出 12 月份 4 个高层通道的统计结果。







Fig.13 The time series of the mean bias, standard deviation between MWTS-2 channel 10, SNPP and NOAA-20

表 5 FY-3D MWTS-2 和 NOAA-20 ATMS 交叉对比

Table 5 Cross comparison result of FY-3D MWTS-2 and NOAA-20 ATMS							
通道	偏差(K)	标准差(K)	RMSE (K)	数据量			
10	-0.1	0.7	0.75	350			
11	0.5	0.9	1.2	350			
12	0.3	1.5	1.55	350			
13	-0.3	2	2.1	350			

从上述结果可以看出, FY-3D MWTS-2 高层通道, 通道平均偏差在-0.3 至 0.5K 之间, 标准差小于 2.1K, 整体精度评估表明, FY-3D MWTS-2 和 ATMS 精度相当。

# 4. 结论

卫星微波遥感的亮温数据为全球/区域数值预报同化系统提供了重要的资料 来源。相比于中低层,微波遥感的高层大气数据具有相对较高的误差,如何检验 评估微波的高层探测数据,是微波资料应用领域面对的重要研究内容。论文选择 以三种方法和高精度的资料作为参考,即掩星探测、观测模拟和交叉对比,综合 评估微波高层资料误差,揭示资料误差变化特征。

三种评估方案在空间覆盖性、时间连续性、评估独立性方面可相互验证,互 为补充。基于掩星资料和观测模拟方法,得到的结果具有较好的一致性,二者对 多颗卫星4个高层通道的检验评估表明:低层通道性能优于高层通道,这与仪器 灵敏度、定标精度指标是一致的; 探测高度最高的通道(中心频率 57.290±0.322 ±0.0045 GHz)标准差约 1-2K, 探测高度最低的通道(中心频率 57.290±0.322± 0.048)标准差约 0.5K 左右; AMSU-A 探测精度最高, FY-3D MWTS-2 精度相比 AMSU-A 存在一定差距,与 ATMS 精度相当。从偏差来看,各仪器通道偏差都 存在随着季节震荡的现象,其中高层通道尤为明显,这一结果可能会对基于卫星 资料的高层大气气候变化研究有重要意义。基于交叉对比的方法,对 FY-3D MWTS-2 和 ATMS 进行了比较,标准差在 0.7-2K 范围,偏差小于 0.5K。

对微波高层探测数据的检验评估是一项长期且有挑战性的任务。着眼未来, 一方面需要继续寻找误差源,完善现有检验方法,如采用更新的精确的辐射传输 模式或采用多个辐射传输模式进行对比模拟,确保检验结果的可信;另一方面也 要拓展新的检验数据源。通过对比可以看到,国产卫星资料与国外资料仍然存在 一定差距,弥补这一差距需要不断提升国产仪器研制水平,并且提高观测资料的 处理水平,得到高精度的遥感产品,为数值天气预报、高层大气科学研究提供有 价值的参考资料。



### 参考文献(References)

Aires F, Prigent C, Orlandi E, et al. 2015. microwave hyperspectral measurements for temperature and humidity atmospheric profiling from satellite: The clear - sky case[J]. J Geophys. Res. Atmos., 120(21): 11, 311-334, 351.

安大伟,谷松岩,杨忠东,等. 2016. FY-3C 微波温度计在轨辐射非线性定标新方法[J]. 红外 与毫米波学报, 35(3):317~321. An D W, Gu S Y, Yang Z D, et al. 2016.on-orbit radiometric calibration for nonlinear of FY-3C MWTS[J]. Infrared Millim. Waves (in Chinese),35(3): 317~321.

Anthes R A.2011. exploring earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather[J]. Atmos. Meas. Tech., 4, 1077–1103, doi: 10.5194/amt-4-1077-2011.

Anthes R, Sjoberg J, Feng X, et al. 2022. comparison of COSMIC and COSMIC-2 radio occultation refractivity and bending angle uncertainties in august 2006 and 2021 [J]. Atmosphere, 13, 790.

毕研盟, 陈洁, 杨光林, 等. 2012. 基于改进的单差法计算 GPS 掩星附加相位[J]. 物理学 报, 61(14): 149301. Bi Y M, Chen J, Yang G L, et al. 2012.GPS occultation excess phase computed utilizing the updated single difference technique. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 61(14): 149301. doi: 10.7498/aps.61.149301

毕研盟, 廖蜜, 张鹏, 等. 2013.应用一维变分法反演 GPS 掩星大气温湿廓线[J]. 物理学 报, 62(15): 159301. Bi Y M, Liao M, Zhang P, et al. 2013. 1DVAR retrieval method for GPS radio occultation measurements of atmospheric temperature and humidity profiles. Acta Phys. Sin.(in Chinese), 62(15): 159301. doi: 10.7498/aps.62.159301

Bormann N, Fouilloux A, Bell W. 2013. evaluation and assimilation Of ATMS data in the ECMWF system [J]. ECMWF Technical Memoranda, 689, 1–41.

Christy J R, Spencer R W, Norris W B, et al. 2003.error estimates of version 5.0 of MSU/AMSU bulk atmospheric temperatures [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 20, 613–629.

Eyre J R., English S J., Forsythe M. 2020. assimilation of satellite data in numerical weather prediction. part I: The early years [J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 146(726): 49-68.

Eyre J R, Bell W, Cotton J, et al. 2021. assimilation of satellite data in numerical weather prediction. part II: recent years. [J] Quart J Roy Meteorol Soc, 148(734): 521-556.

郭志梅,李煌,廖启龙.2008.GPS 探测气象参数的技术进展[J].气候与环境研究,13 (2):212-224.Guo Z M, Li H, Miao Q L.2008.the technical progress in meteorological parameter observation by GPS[J]. Climatic and Environmental Research. 13 (2):212-224.

Han Y, Hou X Y. 2020. evaluation of the in-orbit performance of the microwave temperature sounder onboard the FY-3D satellite using different radiative transfer models [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 253, 107041.

Hou X Y, Han Y, Hu X Q, et al. 2019. Verification of Fengyun-3D MWTS and MWHS calibration accuracy using GPS radio occultation data [J]. J. Meteor. Res., 33(4), 695–704, doi: 10.1007/s13351-019-82089.

李力,张蓬勃,戴竹君,等.2016. 利用微波辐射计对南京2013 年12 月霾天大气温湿 结构的探测分析[J]. 大气科学,21 (1):9-16.Li L, Zhang PB, Dai Z J, et al.2016. Using Microwave Radiometer Data to Detect and Analyze the Atmospheric Temperature and Moisture Structure of the Haze Weather of Nanjing in December 2013. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 21 (1) :9-16. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15002.

廖蜜,张鹏,毕研盟,等.2015.风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验[J]. 气象学 报.2015.73 (6):1131-1140. Liao M, Zhang P, Bi Y M, et al. 2015. a preliminary estimation of the radio occultation products accuracy from the Fengyun-3C meteorological satellite. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), , 73(6):1131-1140.

Liao M, Peng Z, Guang L Y, et al. 2016. preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3C [J], Atmos. Meas. Tech., 9, 781–792, doi:10.5194/amt-9-781-2016.

Lu Q F, Hu J Y, Wu C Q, et al. 2020. monitoring the performance of the fengyun satellite instruments using radiative transfer models and NWP fields [J]. J Quant Spectrosc Radiat Transfer. 255, 107239.

Ranzani L, Spietz L, Popovic Z, et al. 2013. two-port microwave calibration at millikelvin temperatures [J]. Review of Scientific Instruments 84, 034704. doi: 10.1063/1.4794910

Saunders R, James H,Emma T. 2018. an update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). Geosci Model Dev, 11(7): 2717-2737.

Schreiner W S, Weiss J P, Anthes R A, et al. 2020. COSMIC-2 radio occultation constellation: first results [J]. Geophysical Research Letters, 47.e2019GL086841.

Staten P W, Reichler T. 2009. apparent precision of GPS radio occultation temperatures[J]. Geophys Res Lett, 36(24):L24806

王业桂,张斌,蔡其发,等.2018.不同卫星微波遥感资料同化对台风路径模拟的影响[J]. 大气科学,42(2):398-410.Wang YG, Zhang B, Cai QF, et al. 2018. effects of assimilating microwave remote sensing data of different satellite on the simulation of typhoon track

[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 42 (2) :398-410.

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1709.17150.

Weng, F., L. Zhao, R. R. Ferraro, et al. 2003. advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms [J]. RADIO SCI, 38(4).

吴晓京,朱江,王曦,等.2017.风云三号微波观测资料的海雾同化模拟[J].大气科学,41 (3):422-436.Wu X J, Zhu J, Wang X, et al.2017.Sea Fog Simulation with Assimilation of FY-3A Microwave Data[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 41 (3):422-436. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16105.

游然, 谷松岩, 郭阳, 等. 2013: 风云三号卫星微波温度计的在轨性能长期稳定性分析 [J]. 气象科技进展, 2(4): 13-17. You R, Gu S Y, Guo Y, et al.2013. long-term calibration and accuracy assessment of the FengYun-3 microwave temperature sounder radiance measurements [J]. Advances in Meteorological Science and Technology. 2013(04):15-19. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.002

Yang J, Zhang P, Lu N, et al. 2012. improvements on global meteorological observations from the current fengyun 3 satellites and beyond [J]. INT J DIGIT EARTH, 5(3): 251-265

Zou X, Zeng, Janet. 2006. a quality control procedure for GPS radio occultation data [J]. Journal of Geophysical Research. 111. 10.1029/2005JD005846.

Han X L, Lin L, Weng F Z. 2014. absolute calibration of ATMS upper level temperature sounding channels using GPS RO observations [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 52, 1397.