

引用格式: Li Jiaoyang, Wang Zhenzhan, Gu Songyan, *et al.* Common Re-calibration Technology for Spaceborne Microwave Atmospheric Humidity Sounder[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1212-1220.  
[李娇阳, 王振占, 谷松岩, 等. 星载微波大气湿度探测器再定标共性技术分析[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1212-1220.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1212

## 星载微波大气湿度探测器再定标共性技术分析

李娇阳<sup>1,2</sup>, 王振占<sup>1</sup>, 谷松岩<sup>3</sup>, 张升伟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 探测大气水汽的星载微波大气湿度探测器是国内外气象卫星上的关键载荷之一。多台星载微波大气湿度探测器观测数据构成的长时间序列数据集在天气预报、数据同化和全球气候监测与评估中有着非常重要的作用。由于微波辐射没有绝对基准, 并且不同卫星平台上的微波大气湿度探测器的系统响应特性和定标方法不尽相同, 因此, 再定标是提高多台星载微波大气湿度探测器的长时间序列观测数据的长期一致性和稳定性的关键技术。我国的四台星载微波大气湿度探测器自2008年以来已经积累了超过10 a的重要观测数据集, 亟待通过再定标技术实现4台载荷在轨历史观测数据长期一致性和稳定性并有效应用。为此, 详细总结了国内外星载微波大气湿度探测器研究现状, 并对国内外星载微波大气湿度探测器再定标共性技术研究现状进行总结分析, 然后给出我国星载微波大气湿度探测器再定标方案的构想, 为再定标处理提供关键共性技术参考。

**关键词:** 星载微波大气湿度探测器; 再定标; 一致性; 共性技术

**中图分类号:** TP722.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1004-0323(2019)06-1212-09

### 1 引言

水汽是维持地球大气平衡的重要元素, 它对云和降水的形成以及温室气体的影响等应用和研究有重要作用<sup>[1]</sup>。水汽被全球气候观测系统<sup>[2]</sup>定义为一个关键气候变量<sup>[3]</sup>。星载微波大气湿度探测器是一种专门用来探测大气水汽垂直廓线的微波辐射计<sup>[4]</sup>。星载微波大气湿度探测器具有全天候和全天时探测的优势, 提高了星载大气探测的时间和空间覆盖率。星载微波大气湿度探测器观测数据对数值天气预报技术、数据同化和全球气候监测与评估等有重要影响<sup>[5-9]</sup>。迄今为止, 国内外各气象卫星上已搭载了数十台的星载微波大气探测器, 形成了大量的、长期的观测数据集。由于微波辐射没有

绝对基准或参考基准数据集, 并且不同卫星平台上的微波大气探测器的系统响应特性和定标方法都不同, 因此不同卫星平台上微波大气探测器的数据间的长期一致性和稳定性是其在天气预报、数据同化和全球气候监测与评估等应用中的重要基础和前提。再定标是提高多台星载微波大气探测器长时间序列观测数据的长期一致性和稳定性的关键技术。我国星载微波大气湿度探测始于2008年发射的风云三号气象卫星A星, 至今已有4台星载微波大气湿度探测器在轨运行, 积累了超过10 a的有效历史观测数据。为充分有效地应用这些观测数据, 亟待确定合理有效的再定标技术, 以实现4台星载微波大气湿度探测器观测数据长期的一致性和

收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目“国产多系列遥感卫星历史资料再定标技术”(2018YFB0504900, 2018YFB0504902)。

作者简介: 李娇阳(1992—), 女, 吉林农安人, 博士研究生, 主要从事微波辐射计定标及应用研究。E-mail: lijiaoyang199204@126.com。

通讯作者: 王振占(1969—), 男, 河北青龙人, 研究员, 主要从事微波遥感新技术及应用技术研究。E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn。

稳定性。

首先详细总结国内外太阳同步轨道星载微波大气探测仪研究现状,然后对各种再定标方法进行详细总结和分类,分析总结星载微波大气探测仪再定标共性技术,进而给出我国星载微波大气湿度探测仪再定标技术方案的思考,为我国风云系列气象卫星平台的多台星载微波大气探测仪长期观测数据的应用和评价提供参考和技术支持。

## 2 国内外星载微波大气湿度探测仪

近 40 a 来,国际上各系列太阳同步轨道气象卫星搭载了很多台交轨扫描模式的用于探测大气湿度信息的星载微波大气湿度探测仪。表 1 对国内外各太阳同步轨道卫星搭载的星载微波大气湿度探测仪的具体性能指标进行总结。

1991 年发射的 DMSP-F11 卫星上的 SSM/T-2<sup>[10]</sup> (Special Sensor Microwave-Humidity) 开启了微波大气湿度的星载探测。随后 DMSP-F12 及 F14-15 系列气象卫星上也搭载了用于大气湿度探测的探测频率在 90~190 GHz 的 5 通道微波大气探测仪 SSM/T-2。至今,SSM/T-2 积累了超过 27 a 的大气湿度观测数据。AMSU-B<sup>[11]</sup> (Advanced Microwave Sounding Unit-B) 是搭载于 NOAA15-NOAA17 卫星上的通道大气湿度探测仪,其探测频率为 89~183 GHz。这 3 台 AMSU-B 在 1998~2014 年积累了大约 16 年的大气湿度观测数据。在 NOAA18-19 及 MetopA-C 卫星上,AMSU-B 被性能较优的 MHS<sup>[12]</sup> (Microwave Humidity Sounding) 所取代,MHS 在通道带宽和极化方式上都与 AMSU-B 不同,并且用 157 GHz 探测频率替代了 AMSU-B 的 150 GHz 探测频率。自 2005 年至今,共计 5 台 MHS 积累了超过 13 a 的大气观测数据。搭载于 2002 年发射的 Aqua 卫星上的 HSB<sup>[13]</sup> (Humidity Sounder for Brazil) 是将 AMSU-B 的 89 GHz 探测通道去掉,其他 4 个探测通道与 AMSU-B 相同。为了防止射频干扰,HSB 将 AMSU-B 的视频放大器部分进行了重新设计并用全屏蔽罩覆盖。自 2002 年 9 月至 2003 年 2 月,HSB 积累了很多高质量的大气湿度观测数据。搭载于美国的 NOAA20 和 Suomi NPP 卫星上的 ATMS<sup>[14]</sup> 是最新一代的星载微波大气探测仪,包含 23.8~183 GHz 共计 22 个探测通道,可实现大气温度和湿度等重要参数的同步探测。自 2011 年 Suomi NPP 发射至今,ATMS 已

表 1 国内外太阳同步轨道星载微波大气探测仪性能指标

Table 1 The microwave humidity sounders onboard sunsynchronous orbit satellites at home and abroad

探测仪	频率/GHz	带宽(边带数量)	极化角	
SSM/T	91.655±1.25	1.5(2)	θ	
	150.0±1.25	1.5(2)	θ	
	-2	183.31±1.0	0.5(2)	θ
	美国	183.31±3.0	1.0(2)	θ
		183.31±7.0	1.5(2)	θ
AMSU	89.0	1.0(2)	90-θ	
	150.0	1.0(2)	90-θ	
	-B	183.31±1.0	0.5(2)	90-θ
	美国	183.31±3.0	1.0(2)	90-θ
		183.31±7.0	2.0(2)	90-θ
HSB	150.0	1.0(2)	90-θ	
	美国	183.31±1.0	0.5(2)	90-θ
	巴西	183.31±3.0	1.0(2)	90-θ
		183.31±7.0	2.0(2)	90-θ
MHS	89.0	2.4(1)	90-θ	
	157.0	2.4(1)	90-θ	
	美国	183.311±1.0	0.5(2)	θ
	欧洲	183.31±3.0	0.9(2)	θ
ATMS	190.311	2.2(1)	90-θ	
	88.2	2.0(1)	90-θ	
	美国	165.5	3.0(1)	θ
	183.31±1.0	0.5(2)	θ	
	183.31±3.0	1.0(2)	θ	
	183.31±7.0	2.0(2)	θ	
MWHS	150	1.0(2)	90-θ	
中国	150	1.0(2)	θ	
	183.31±1	0.5(2)	90-θ	
	183.31±3	1.0(2)	90-θ	
	183.31±7	1.0(2)	90-θ	
MWHS	89	1.5(2)	90-θ	
-II	150	1.5(2)	90-θ	
中国	183.31±1	0.5(2)	θ	
	183.31±1.8	0.7(2)	θ	
	183.31±3	1(2)	θ	
	183.31±4.5	2(2)	θ	
	183.31±7	2(2)	θ	

积累了超过 7 a 的大气观测数据。

我国的风云三号系列卫星 A、B 星搭载了第一代的星载微波大气湿度探测仪 MWHS<sup>[15]</sup> (Microwave Humidity Sounder)。MWHS 是包含 150 和 183 GHz 探测频率的 5 通道大气湿度廓线微波探测仪,其中 150 GHz 首次采用水平和垂直两种极化状态接收。风云三号 C、D 星搭载了升级版的 MWHS-II<sup>[16]</sup>,增加了 89 和 118 GHz 探测频率,

118 GHz探测频率的加入使得MWHS-II成为可以同时探测大气温度廓线和湿度廓线的微波探测仪。我国风云三号系列的MWHS至今已积累了超过10 a的有效观测数据、MWHS-II也已积累了超过5 a的观测数据。

### 3 再定标共性技术研究现状

星载微波大气湿度探测仪的观测值一般存在偏差和不确定性。偏差可分为辐射测量偏差和空间几何偏差。辐射测量偏差一般包含仪器定标偏差、天线偏差、定标源偏差和仪器非线性偏差等。由于微波辐射没有绝对基准或参考基准数据集,常用其他替代的定标方法来量化辐射测量偏差,补偿不同卫星平台上的星载微波大气探测仪间存在的一致性偏差。常用的方法包括星载微波大气湿度探测仪与微波辐射传输模型模拟亮温的交叉比对,即O-B法;评估两台星载微波大气湿度探测仪的O-B结果的差值的双偏差检验验证法;与机载同类载荷的交叉定标;与星载同类载荷的交叉定标;用稳定的目标进行替代定标等方法。这些方法都是用来实现星载微波大气探测仪再定标的共性方法和技术。

#### 3.1 O-B法

O-B法是用星载微波大气载荷的观测亮温值减去利用微波辐射传输模型模拟的亮温值。O-B的结果可用于评价星载微波大气载荷探测结果的相对准确性和长期一致性、稳定性等。O-B的结果包含辐射传输模型输入的大气和地表参数的偏差,辐射传输模型的偏差,以及实际观测目标的时空状态与输入辐射传输模型的大气、地表参数所在时空状态存在的匹配偏差等。

Falcone等<sup>[17]</sup>利用约6个月的无线电探空仪的数据经时空匹配后作为模拟SSM/T-2辐射传输模型的输入,将得到的模拟亮温与SSM/T-2的观测亮温进行O-B分析。对无线电探空仪数据的匹配标准为时间差小于 $\pm 1$  h,空间差小于100 km。O-B结果说明除窗区通道外,模拟值与观测值具有较好的一致性。窗区通道受地表发射率的影响,导致O-B结果较大。对于其他通道,影响O-B结果的因素包含辐射传输模型缺少对云和降水的影响的分析、无线电探空仪数据的不确定性、辐射传输模型的偏差、不同无线电探空仪探测大气温湿度性能的差异等。

鉴于SSM/T-2的数据没有被充分应用于气象应用和再分析中,Kobayashi等<sup>[3]</sup>又分别利用无线电探空仪数据和ECMWF的ERA-Interim数据、ERA-20C、日本55年的再分析数据集JRA-55等作为快速辐射传输模型RTTOV 11.2的输入,模拟晴空条件下的1992~2008年的SSM/T-2的亮度温度,并与观测亮温进行O-B分析,为SSM/T-2的再分析应用提出建议。在辐射传输模拟中,天线认为具有理想的指向性和反射性,由于实际中天线的不理想性,可能会导致O-B结果存在天线引入的偏差。使用不同再分析数据作为辐射传输模型输入数据进行亮温模拟得到的O-B结果显示,在1992~2008年间SSM/T-2观测值具有一定的稳定性,并且搭载SSM/T-2的不同卫星平台的O-B结果存在随时间变化的特性。

Atkinson<sup>[18]</sup>将AMSU-B与NWP模型辐射亮温模拟值进行O-B分析。对于辐射传输模型,不能保证在任何时空尺度范围内都与实际观测值完全一致,但是对于相当长时间和大空间范围内的晴空海面条件下的辐射传输模型模拟值可以有效模拟实测亮温。实际上,很多辐射传输模型多用来模拟实测亮温来消除系统偏差,保证数据同化不会受模型干扰。但是这种方法不能很好地分离模型偏差和仪器偏差,所以不能用O-B这种方法来评价绝对偏差。

Moradi等<sup>[19]</sup>将ATMS的观测亮温分别与输入数为GPS-RO和无线电探空仪数据的辐射传输模型模拟亮温进行对比,分析ATMS观测亮温的相对有效性和不确定性,验证ATMS的低平流层、高对流层和中高对流层大气水汽探测性能,证明了GPS-RO和无线电探空仪数据用于O-B分析的可行性。

Brogniez等<sup>[20]</sup>详细总结分析了SAPHIR、ATMS、MHS、AMSU-B和SSMIS的O-B特性。辐射传输模型的建立使用了RAOBs的无线电探空仪数据和NWP数据。对于得到的O-B结果,进一步通过RAOBs、全球导航卫星系统接收机、差分吸收激光雷达和拉曼雷达等分辨O-B的偏差的来源。

ECMWF和Met Office<sup>[21]</sup>分别评估了FY3C卫星上的MWHS-II的183 GHz的O-B结果,并与ATMS的O-B结果进行了对比分析。O-B分析条件是筛选海面情况下无云时的南北纬 $60^\circ$ 之间的数据进行分析。对于MWHS-2的118 GHz通道,与



AMSU-A和ATMS的有相似吸收峰的对应通道都进行了O-B结果的日分析和月平均分析。

### 3.2 双偏差检验验证法

双偏差法是利用辐射传输模型分别模拟两台辐射计的模拟亮温,将两个模拟亮温与实测亮温进行O-B对比得到的两个偏差相减即可得到双偏差。双偏差检验验证法相比于O-B法减少了辐射传输模型的偏差。

Saunders等<sup>[22]</sup>用数值天气预报(NWP)模型的6 h预报廓线及表面参数输入RTTOV 7快速辐射传输模型进行亮温模拟,与NOAA19和Metop-A卫星上的MHS实际观测亮温进行了全球平均的O-B分析和双偏差对比分析。O-B结果表明两台MHS具有很好的时间稳定性,但偏差大小是不同的。对于两台MHS的双偏差分析结果表明它们相对于彼此具有很高的稳定性。

Ebrahimi等<sup>[23]</sup>进行了NOAA18、19卫星上的MHS与MetopA、B卫星上的AMSU-B的双偏差检验验证,并分析了区域性和季节性的双偏差结果。在数据匹配的过程中使用了两种匹配方法,第一种是在 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格内进行数据的平均统计分析,第二种是在一定的时空阈值范围内进行匹配,两种数据匹配方法使用的数据都是晴空海洋条件下的,使用的筛选条件是CLW云液水小于等于0.1 mm,环境参数包括大气温湿廓线,海面风速和海面温度。双偏差结果证明双偏差法可有效获取具有一致性的观测数据集。

### 3.3 与机载载荷的交叉定标法

与机载载荷的交叉定标选用与星载微波大气探测载荷具有相同或相似通道探测频率和通道设置的机载微波大气探测仪,在卫星与飞机共同过境的时空交叉点处获取观测亮温并进行对比分析,验证星载微波大气探测载荷的相对稳定性。交叉验证选取的地物目标和大气状况都会影响交叉定标结果的准确性。

SSM/T-2发射后,除了自动进行星上定标以外,Falcone等<sup>[17,24]</sup>利用搭载于ER-2飞机的具有相同探测频率和通道设置的毫米波成像辐射计MIR进行了两次机载辐射计交叉定标试验。根据卫星轨道、飞机航迹、水汽和云的变化程度等大气状况和地表参数特性等来确定飞行地点和时间。用于定标验证的机载辐射计最佳的飞行条件为地表类型为:平坦无风的海面,且大气状况为无云的情况。

但星载和机载探测仪的交叉定标要尽可能多地观测不同地表类型上的大气辐射,且保证星载和机载探测仪观测的时空一致性。在稳定大气状况下,由于地表发射率均匀性的影响,地表类型为陆地、海岸线、海洋时星载和机载探测仪间探测结果差异由大变小。

Atkinson<sup>[18]</sup>分析了AMSU-B与机载微波探测仪的交叉定标。测试地点为大气具有高水汽浓度特性的热带南大西洋和大气具有低水汽浓度特性的北极的波罗的海地区。进行交叉定标的C130-Hercules飞机装载了很多可测量温度、湿度、压力、风、云以及气溶胶等参数的辐射计。其中,用于测试AMSU-B的辐射计是包含与AMSU-B通道相似的探测频率的AMSU模拟器MARSS<sup>[25-26]</sup>。将机载辐射计和无线电探空仪测量的大气廓线输入辐射传输模型(无云情况)进行亮温模拟,并与实测亮温进行对比验证。

Blackwell等<sup>[27]</sup>利用NPOESS的机载探测仪NAST-M对Aqua、NOAA16、NOAA17和Metop-A卫星上的AMSU和MHS进行了在轨辐射交叉验证。机载辐射计在卫星过境同时获取相同观测目标的微波辐射,但机载探测仪和星载探测仪飞行高度显著不同,并且有各自的扫描刈幅几何,所以在进行交叉定标时需要进行大气校正。大气校正包括对非天底点观测像元辐射量的临边校正以及不同平台飞行高度的大气校正。根据时空匹配要求,在多种大气状态下,用NAST-M探测的微波辐射亮温对AMSU和MHS观测的亮温进行验证。

Larar等<sup>[28]</sup>选取2013年5月中纬度的加州南部棕榈谷的机载观测结果与Suomi NPP的ATMS进行交叉验证,还选取了2015年5月格陵兰岛的场地进行ATMS的机载观测的交叉验证。机载辐射计类型为NAST-I。

### 3.4 与星载同类载荷的交叉定标法

星载同类载荷间的交叉定标广泛用于获取载荷间的相对偏差,为载荷的探测数据和用于气候应用分析的长期载荷数据集等衍生产品的有效使用提供重要支持,但无法量化每台载荷的绝对偏差。因此,星载同类载荷间的交叉定标常选取一台性能长期稳定且轨道漂移最小的载荷作为参考,将其其他载荷基于此相对基准仪器进行相互定标校正。交叉定标要求进行定标的载荷间在尽可能相近的时间观测空间距离尽可能近的地物目标,且观测目

标场景需要尽可能多地覆盖各种类型的大气和地表状态。

星下点交叉定标法 SNOs<sup>[29-30]</sup>是星载微波大气湿度探测仪间最常用的在轨交叉定标方法。对于太阳同步轨道气象卫星,星下点常出现在极区,不同卫星平台上的同类载荷在星下点可观测来自地球或大气层同一时空尺度内的微波辐射,因此星下点交叉定标可得出不同卫星平台间微波大气湿度探测仪间的偏差并实现仪器间的交叉定标校正。SNO方法的不确定性主要来自于探测仪的系统特性、噪声灵敏度以及由于时空差异导致的观测场景的不均匀。

Luo等<sup>[31]</sup>将1992~2008年的搭载于F11、F12、F14、F15的SSM/T-2与2000~2008年的搭载于NOAA15、16的AMSU-B进行交叉定标。使用的交叉定标方法包括所有地表类型的纬向平均比较、地表类型为热带海洋的纬向平均比较、星下点交叉比对。总体上AMSU-B测量值大于SSM/T-2测量值。

John等<sup>[6]</sup>利用星下点(SNOs)交叉定标法对NOAA-15-17的AMSU-B与NOAA18、19及MetopA上的MHS进行交叉定标。根据Holl等提出的匹配方法,对多卫星平台间的AMSU-B和MHS进行全球的星下点匹配,要求匹配对间空间距离小于5 km,时间差小于300 s。

Gu等<sup>[32]</sup>进行了FY-3A的MWHS与NOAA17的AMSU-B的交叉定标研究,选取两颗卫星轨道一致,过境时间相差约15 min的2008年7月22日数据,分析了在没有强天气系统过境,且数据均匀性检验条件阈值为分析区域亮温标准差小于1.0 K的数据。

He等<sup>[33]</sup>进行了NOAA-11的AMSU-B与FY-3B的MWHS的交叉定标,选取2010年11月~2015年8月数据进行星下点匹配,时间阈值为15 min,经纬度阈值0.5°。匹配得到的星下点涵盖海洋、陆地和岛屿的晴天和云天情况。结果表明星下点处匹配数据存在一致性,相关系数优于0.96。

Moradi等<sup>[19]</sup>将太阳同步轨道Suomi NPP卫星的ATMS与低轨道的Megha-Tropiques(M-T)卫星的SAPHIR微波探测仪进行交叉定标。因为对于太阳同步轨道卫星,交叉定标载荷间的共同观测目标通常出现在高纬度地区,而高纬度目标较小的亮度温度使微波探测仪在轨交叉定标的具有挑战。

低轨道M-T卫星载荷与太阳同步轨道卫星载荷间会存在很多个适合交叉定标的热带地区的共同观测目标,因此将两台载荷进行交叉定标,结果表明两者具有很好的一致性,证明了SAPHIR可作为微波水汽探测通道的交叉定标参考仪器。

### 3.5 用稳定的替代目标进行的定标法

Yang等<sup>[34]</sup>提出了利用月球微波亮温对搭载于Suomi NPP卫星的星载微波大气探测仪ATMS的在轨定标和稳定性进行评估,并认为这一最新的在轨定标方法可扩展应用于其他星载微波大气探测仪中。研究认为月球辐射在微波波段是高度稳定的,改变仪器视场内的月球微波辐射大小的主要因素为视场内的相位角和位置,因此月球表面辐射可以用来作为一个用于评估微波辐射计定标准确性和长期定标稳定性的永久的参考源。对于ATMS,当其天线扫描到冷空位置时,月球辐射在一年内会多次进入天线主瓣并持续2~3 d。因此,在ATMS在轨观测寿命期内,可获取大量的月球辐射观测值样本用于定标和长期稳定性的评估。ATMS在冷空观测位置共有4个采样点,筛选至少有一个采样点观测对象为冷空,其他采样点观测对象为月亮的观测值样本用于构建两点定标方程并获取月球微波亮温,然后对天线指向偏差进行校正,并构建月球有效微波亮温模型,用于ATMS长期定标稳定性评估。对比5 a的ATMS的K-/Ka-和V-/W-波段探测通道的月球观测亮温值和构建的月球有效微波亮温模型模拟值,证明了观测值与模拟值之间具有很强的 consistency及ATMS具有很高的长期定标稳定性,说明了构建的月球微波亮温模型的有效性 and 利用该模型进行ATMS长期定标稳定性评估的可行性。

## 4 关于风云三号微波湿度计再定标方案的思考

我国风云三号系列气象卫星的2台微波大气湿度探测仪MWHS及2台升级版的MWHS-II自2008年在轨运行以来已积累了超过10 a的历史观测数据集,该微波大气湿度的长时间序列数据集在天气预报、数据同化和全球气候监测与评估中有着非常重要的作用。而长时间序列数据的一致性和稳定性是实现这些重要应用的关键基础。由于每台微波大气湿度探测仪的定标方法和系统响应特性均不相同,因此亟待通过再定标实现对我国风云

三号系列气象卫星四台微波大气湿度探测仪观测的长期在轨观测数据进行再定标、再处理,获取并建立具有一致性和稳定性的长期基础大气湿度数据集。

微波大气湿度探测仪在每一个扫描周期内观测冷定标源(在轨时为冷空)、热定标源实现实时两点定标。其定标按经验及时间段一般分为发射前定标和发射后定标;发射前热真空定标为发射后的星上定标提供在轨不可测的非线性系数,发射后定标包括业务化的星上定标和在轨定标与检验。已有国内外星载微波大气湿度探测仪再定标共性技术一般是针对卫星载荷的在轨亮温数据进行交叉定标,替代定标等方法。如果所有的探测载荷能从发射前热真空定标开始实施统一化的定标方法,将尽可能较少定标方法导致的载荷间偏差,有利于更好地评估仪器系统偏差和定标源偏差等。结合已有星载大气微波湿度探测仪再定标方法及我国微波大气湿度探测仪仪器特性,对风云三号系列微波大气湿度探测仪再定标方案构想如下:

(1)分析历史4台风云三号系列微波大气湿度探测仪在轨基础参数时变特性,包括仪器温度、热源温度、冷源计数值、热源计数值时变特性,根据这些参数的时变特性,筛选符合该时变特性的发射前热真空定标数据,并针对这些筛选的数据,基于相同的发射前热真空定标算法,分别对4台探测仪再次进行热真空定标,获取非线性系数,以尽可能减少由于定标方法的差异导致的非线性系数差异。

(2)对4台微波大气湿度探测仪的L0级数据实施统一的质量控制标准,包括对热源铂电阻计数值、仪器温度稳定性、仪器增益稳定性等数据的质量检验和控制,以及冷空月球辐射污染的识别和校正。然后采用新获取的非线性系数及相同的业务化星上两点定标方法及天线订正获取L1级数据。即便4台探测仪采用相同的发射前热真空定标方法和星上定标方法,在获取的4台微波大气湿度探测仪的L1级亮温数据中还会残存系统和定标误差,需根据方案步骤(3)与(4)进行评估。

(3)构建星载微波大气湿度探测仪的辐射传输模型,与L1级亮温数据进行O-B性能长期演化分析。辐射传输模型的构建可选取已有的大气辐射传输模型,如CRTM<sup>[35]</sup>、RTTOV<sup>[36]</sup>、ARTS<sup>[37]</sup>、LinePak<sup>[38]</sup>、MODTRAN<sup>[39]</sup>、LBLRTM<sup>[40]</sup>等。也可根据Liebe等<sup>[41]</sup>和Rosenkranz<sup>[42]</sup>研究的大气吸收系

数模型及地表发射率模型FASTEM<sup>[43]</sup>、CNRM<sup>[44]</sup>、Telsem等<sup>[45]</sup>进行大气辐射传输模型的构建。O-B的结果包含辐射传输模型输入的大气和地表参数的偏差,辐射传输模型的偏差,以及实际观测目标的时空状态与输入辐射传输模型的大气、地表参数所在时空状态存在的匹配偏差等。对于相同大气状态、地表类型、匹配标准、辐射传输模型、入射角、地理位置得到的长时间序列的O-B均值和方差的一致性和稳定性可用于评价星载微波大气载荷长期观测值具有的一致性和稳定性,但不能量化仪器的绝对偏差。需根据实际数据结果,设定每台微波大气湿度探测仪的O-B结果均值和方差长时间序列中的波动范围,作为验证单台微波探测仪O-B结果有效性的标准。

(4)在分别评价4台星载微波大气湿度探测仪O-B的结果基础上,建立与表1中其他同类载荷的在轨交叉定标。首先,要充分评价用于交叉定标的同类载荷的长期观测准确性和稳定性,并且选取轨道漂移最小的同类载荷用于交叉定标。然后,可进一步通过双偏差检验验证法评估载荷间相对系统偏差。也可直接利用星下点法进行星载微波大气湿度探测仪与同类载荷间的交叉定标,星下点法交叉定标实施的关键是保证两台星载载荷在尽可能相近的时间内观测空间距离尽可能接近的地物目标,从而尽可能保证大气状态和地表类型的一致性。以同一台同类载荷分别与4台星载微波大气湿度探测仪实施交叉定标,实现4台载荷间观测结果的一致性,并根据实际情况设定合理得交叉定标后多台仪器间亮温值差异范围及随时间变化的稳定性,作为验证再定标分析技术实施的评价标准。但由于不同载荷之间以及用于交叉定标的同类载荷的天线、接收机和定标源的特殊性等,仍会存在部分偏差无法祛除。因此考虑进行以冷空、月球等稳定目标作为相对稳定的长期参考基准,进行在轨多台载荷间的一致性交叉定标,完成我国星载微波大气湿度探测仪的再定标,并构建长序列稳定、一致的观测数据集。

## 5 结 语

星载微波大气湿度探测仪再定标是实现多台探测仪构成的长期观测数据集中数据一致稳定的重要技术。本文详尽总结了国内外星载微波大气湿度探测仪及其再定标技术研究现状,结合已有再



定标技术优缺点并针对我国风云系列气象卫星搭载的4台星载微波大气湿度探测仪的仪器特性,设计了从发射前热真空定标到在轨定标的整套星载微波大气湿度探测仪再定标实施方案,探讨了再定标的研究方法和技术路线,为我国星载微波大气湿度稳定地观测长期历史数据集的建立提供参考。

#### 参考文献(References):

- [1] Hartmann D L, Klein Tank A M G, *et al.* Observations: Atmosphere and Surface[C]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. United Kingdom: Cambridge University Press, 2013.
- [2] GCOS. Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC (2010 Update[EB/OL]. [www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-138.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-138.pdf), 2010.
- [3] Kobayashi S, Poli P, John V O. Characterisation of Special Sensor Microwave Water Vapor Profiler (SSM/T-2) Radiances Using Radiative Transfer Simulations from Global Atmospheric Reanalyses [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(4):917-935.
- [4] Ulaby F, Long D. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014.
- [5] Andersson E, E. Hölm, Bauer P, *et al.* Analysis and Forecast Impact of the Main Humidity Observing Systems [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(627): 1-10.
- [6] John V O, Holl G, Buehler S A, *et al.* Understanding Inter-satellite Biases of Microwave Humidity Sounders Using Global Simultaneous Nadir Overpasses[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117 (D02305). doi: 10.1029/2011JD016349.
- [7] Xavier P K, John V O, Buehler S A, *et al.* Variability of Indian Summer Monsoon in a New Upper Tropospheric Humidity Data Set[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): 137-147.
- [8] Eymard L, Karbou F, Janicot S, *et al.* On the Use of Advanced Microwave Sounding Unit-A and -B Measurements for Studying the Monsoon Variability over West Africa [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D20):D20115. doi:10.1029/2009JD012935.
- [9] Buehler S A, Kuvatov M, John V O, *et al.* An Upper Tropospheric Humidity Data Set from Operational Satellite Microwave Data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (D14):D14110. doi: 10.1029/2007JD009314.
- [10] Galin I, Brest DH, Martner GR. The DMSP SSM/T-2 Microwave Water-vapor Profile[C]// SPIE Proceedings. 1935: 189-198. 1993.
- [11] Saunders R W, Hewison T J, Stringer S J, *et al.* The Radiometric Characterization of AMSU-B [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, 43(4): 760-771.
- [12] Bonsignori R. The Microwave Humidity Sounder (MHS): In-orbit Performance Assessment[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2007, 67440A:67440A-1-67440A-12.
- [13] Lambriigtsen B, Calheiros R V. The Humidity Sounder for Brazil - An International Partnership [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(2):352-361.
- [14] Kim E, Lyu C J, Leslie R V, *et al.* The Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS): A New Operational Sensor Series[C]// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012.
- [15] 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.风云三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.]
- [16] Zhang Yu, Zhang Shengwei, Wang Zhenzhan, *et al.* Technology Development of Atmospheric Humidity Sounding of FY-3 Satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 52-61.[张瑜,张升伟,王振占,等.FY-3卫星大气湿度微波探测技术发展[J].上海航天,2017,34(4):52-61.]
- [17] Falcone V J, Griffin M K, Isaacs R G, *et al.* SSM/T-2 Calibration and Validation Data Analyses[C]// IEEE Topical Symposium on Combined Optical, Microwave, Earth & Atmosphere Sensing. 1993.
- [18] Atkinson N C. Calibration, Monitoring and Validation of AMSU-B [J]. *Advances in Space Research*, 2001, 28(1): 117-126.
- [19] Moradi I, Ferraro R R. Inter-calibration and Validation of Observations from SAPHIR and ATMS Instruments [C]// AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2015.
- [20] Hélène Brogniez, English S, Jean-François Mahfouf, *et al.* A Review of Sources of Systematic Errors and Uncertainties in Observations and Simulations at 183 GHz[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, European Geosciences Union, 2016, 9(5):2207-2221. doi: 10.5194/t-9-2207-2016.
- [21] Lu Q, Lawrence H, Bormann N, *et al.* An evaluation of FY-3C Satellite Data Quality at ECMWF and the Met Office[M]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2015.
- [22] Saunders R W, Blackmore T A, Candy B, *et al.* Monitoring Satellite Radiance Biases Using NWP Models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3):1124-1138.
- [23] Ebrahimi H, Chen R, Wilheit T, *et al.* Inter-calibration of Microwave Radiometers on Polar Orbiters in the GPM Constellation [C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016.

- [24] Pickle J D , Isaacs R G , Griffin M K , *et al.* Comparison of Colocated SSM/T-2 and MIR Measurements: Results from the Calibration study [C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1993.
- [25] English S J , Guillou C , Prigent C , *et al.* Aircraft Measurements of Water Vapour Continuum Absorption at Millimetre Wavelengths [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 120(517):603-625.
- [26] Mcgrath A , Hewison T J . Radiometric Characterisation of the UK Met. Office Microwave Airborne Radiometer Scanning System (MARSS) [C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2011.
- [27] Blackwell W J , Bickmeier L J , Jairam L G , *et al.* On-orbit Radiometric Validation and Field-of-view Calibration of Spaceborne Microwave Sounding Instruments [C]// IEEE Microwave Radiometry & Remote Sensing of the Environment, Microrad, 2008.
- [28] Larar A M , Zhou D K , Liu X , *et al.* Advanced Sounder Validation Studies from Recent NAST-I Airborne Field Campaigns [C]// Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2016.
- [29] Cao C , Weinreb M , Xu H . Predicting Simultaneous Nadir Overpasses among Polar-Orbiting Meteorological Satellites for the Intersatellite Calibration of Radiometers [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004, 21(4):537-542.
- [30] Cao C , Xu H , Sullivan J , *et al.* Intersatellite Radiance Biases for the High-resolution Infrared Radiation Sounders (HIRS) on board NOAA-15, -16, and -17 from Simultaneous Nadir Observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(4):381-395.
- [31] Luo J , Jeyaratnam J , Shan N , *et al.* Inter-calibration of UTH-related Radiances from SSM/T-2 and AMSU-B [EB/OL]. NOAA CREST, 2017. www.gsics.atmos.umd.edu/pub/Development.
- [32] 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.]
- [33] He Jieying, Zhang Shengwei. In-orbit Performance Analysis on Monitoring Typhoon with FY-3B/MWHS, 2016, 27(6):709-715. [何杰颖, 张升伟. FY-3B/MWHS性能参数在轨实时监测 [J]. 应用气象学报, 2016, 27(6):709-715.]
- [34] Hu Y , Jun Z , Fuzhong W , *et al.* Developing Vicarious Calibration for Microwave Sounding Instruments Using Lunar Radiation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(11):6723-6733.
- [35] Han Y , Paul Van Delst, Liu Q H , *et al.* JCSDA Community Radiative Transfer Model (CRTM)-Version 1 [R]. NOAA Technical Report NESDIS 122. 2006.
- [36] Hocking J , Rayer P J , Rundle D , *et al.* RTTOV v11 Users Guide NWP-SAF Report, Met [R]. Office: Exeter, UK, 2014.
- [37] Buehler S , Eriksson P , Kuhn T , *et al.* ARTS, the Atmospheric Radiative Transfer Simulator [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 91(1):65-93.
- [38] Gordley L L , Marshall B T , Allen Chu D. Linepak: Algorithms for Modeling Spectral Transmittance and Radiance [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1994, 52(5):563-580.
- [39] Berk A , Bernstein L S , Robertson D C. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7 [R]. Report GL-TR-89 - 0122; Geophysics Laboratory: Bedford, MD, USA, 1989.
- [40] Clough S , Shephard M , Mlawer E , *et al.* Atmospheric Radiative Transfer Modeling: A Summary of the AER Codes [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 91(2):233-244.
- [41] Liebe H , Hufford G , Cotton M. Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/ice Particles at Frequencies Below 1 000 GHz [C]// Proceedings of the In AGARD, Atmospheric Propagation Effects through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation 11 p (SEE N94-30495 08-32), F, 1993.
- [42] Rosenkranz P W. Water Vapor Microwave Continuum Absorption: A Comparison of Measurements and Models [J]. Radio Science, 1998, 33(4):919-928.
- [43] English S J , Hewison T J. Fast Generic Millimeter-wave Emissivity Model [C]// Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment, International Society for Optics and Photonics, 1998, 3503:288-300.
- [44] Karbou F , Gérard, Elisabeth, Rabier F . Global 4DVAR Assimilation and Forecast Experiments Using AMSU Observations over Land. Part I: Impacts of Various Land Surface Emissivity Parameterizations [J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(1):5-19.
- [45] Prigent C , Aires F , Wang D , *et al.* Sea-surface Emissivity Parametrization from Microwaves to Millimetre Waves [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143(702):596-605.



## Common Re-calibration Technology for Spaceborne Microwave Atmospheric Humidity Sounder

Li Jiaoyang<sup>1,2</sup>, Wang Zhenzhan<sup>1</sup>, Gu Songyan<sup>3</sup>, Zhang Shengwei<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** The Spaceborne Microwave Humidity Sounder is an important payload of a meteorological satellite, which can detect the atmospheric humidity. The long-term observation data of several sounders can provide important support for meteorological forecast, data assimilation and global climate change monitoring. Due to the lack of absolute reference for microwave radiation and the difference between the characteristics and the calibration method between each sounder, re-calibration is an important technology for obtaining long-term consistent and stable observation data. Since 2008, China has launched 4 spaceborne microwave humidity sounder onboard the Fengyun-3 series meteorological satellites. There are more than 10 years observation data need to be recalibrated for valuable application. For this purpose, this paper summarized the research status of the spaceborne microwave humidity sounder domestic and overseas at first. Then the existed recalibration method for these sounders are summarized in detail. In addition, the plan of the recalibration for Chinese spaceborne microwave humidity sounders are given, which will provide the key reference for the future re-calibration processing.

**Key words:** Spaceborne Microwave Atmospheric Humidity Sounder; Re-calibration; Consistency; Common technology