

风云三号微波成像仪定标精度评价及业务产品介绍

杨虎 李小青 游然 武胜利

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 风云三号卫星 (FY-3) 为极轨系列卫星, 目前为止分别于2008年5月和2010年10月发射了上午轨道 (A) 和下午轨道 (B) 两颗卫星。微波成像仪 (MicroWave Radiometer Imager, MWRI) 是装载于FY-3上的重要遥感仪器。该仪器为10通道双极化微波成像仪器, 中心观测频率设置为10.65, 18.7, 23.8, 36.5和89.0GHz, 每个频点有垂直 (V) 和水平 (H) 两个探测通道。获取的对地观测亮温数据可用于定量获取大气降水、水汽、海面风速、海温、海冰分布、土壤湿度和陆表温度等地球物理参数信息。目前微波成像仪运行状态稳定, 每天获取两次全球覆盖数据。主要介绍微波成像仪定标状况和主要业务产品算法。

关键词: 风云三号卫星, 微波成像仪, 定标

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.014

Environmental Data Records from FengYun-3B Microwave Radiation Imager

Yang Hu, Li Xiaoqing, You Ran, Wu Shengli

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

Abstract: Microwave Radiation Imagers (MWRI) onboard the FengYun (FY)-3A/B satellites of China Meteorological Administration were launched on May 28, 2008, and November 5, 2010, respectively. They both observe the Earth atmosphere and land surface at 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, and 89.0 GHz with dual polarization. After extensive on-orbit calibrations, the MWRI Level-1 data were collocated in space and time with the data from Aqua Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), F18 Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS), and Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager for cross-calibration. A forward radiative transfer model was used to simulate the clear sky brightness temperatures at the MWRI frequencies over ocean. The differences between MWRI observations and model simulations, referred to as "O-A," and the double difference results from pairs of MWRI and AMSR-E were examined. Comparing to the biases between AMSR-E/SSMIS measurements and model simulations, the biases for MWRI are small and stable. Atmospheric and surface geophysical parameters are retrieved from MWRI observations using the heritage algorithms. It is shown that these environmental data records from MWRI are comparable with those similar data products from AMSR-E and SSMIS. Their biases from each other seemed to be minimal.

Keywords: FengYun (FY)-3, Microwave Radiation Imager (MWRI), calibration

1 引言

风云三号卫星 (FY-3) 为我国新一代极轨系列气象卫星, 装载有11个遥感仪器, 光谱覆盖范围从紫外到微波, 观测数据主要用于定量天气预报、灾害和环境保护以及气候变化研究, 为我国国民经济发展服务。FY-3计划发射10颗卫星, 任务持续至2020年。目前为止分别于2008年5月和2010年10月发射了A (上午星, FY-3A) 和B (下午星, FY-3B)。卫星以近极地

太阳同步轨道围绕地球运行, 轨道标称高度836km, 轨道倾角98.75°, 轨道周期101.6min。FY-3A降交点地方时在上午10:20, FY-3B升交点地方时在下午1:40。由于轨道进动, FY-3A/B卫星标称轨道回归周期大约为6d。双星运行能够每天4次获取全球覆盖遥感观测数据, 大大提高了卫星数据的应用时效。

微波成像仪 (MWRI) 是装载于FY3卫星上的重要遥感仪器, 该仪器为全功率双极化微波成像仪器, 以圆锥扫描方式进行观测, 天线视角45°, 刈幅宽度1400km。中心频点设置为10.65, 18.7, 23.8, 36.5和89GHz, 每个频点有垂直 (V) 和水平 (H) 两种极化探测模式。MWRI天线头部包括尺寸为977.4mm×897.0mm的二维偏置抛物面反射镜和4个独

收稿日期: 2013年5月11日; 修回日期: 2013年6月23日
第一作者: 杨虎 (1976—), Email: yanghu@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); 科技部国际科技合作专项 (2010DFA21140)

表 1 MWRI设计指标要求

中心频率 (GHz)	10.65	18.7	23.8	36.5	89
极化状态	V/H	V/H	V/H	V/H	V/H
带宽 (MHz)	180	200	400	400	3000
灵敏度 (K)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8
定标精度 (K)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
动态范围 (K)	3~340				
扫描点/行	240/254* ¹				
主波束效率	>90%				
空间分辨率 (km)	51×85	30×50	27×45	18×30	9×15
扫描模式	Conical scanning				
轨道刈幅宽度 (km)	1400				
视角 (°)	45				
扫描周期	1.7s/1.8s* ²				

注: *1. FY-3A MWRI为每行240个扫描点, FY-3B MWRI为每行 254个扫描点;
*2. FY-3A MWRI为1.7s扫描周期, FY-3B MWRI为1.8s扫描周期

立的馈电喇叭组成, 其中18.7和23.8GHz这两个频率接收器共享一个馈源。MWRI定标系统设计为端对端的全光路定标, 两个直径为860mm和1300mm的准光学反射镜分别安装在热源和冷空观测位置, 用于获取冷/热定标观测数据。MWRI扫描周期为1.8s, 在每个扫描周期内, 获取6个冷/热源观测数据以及254个来自地球场景的观测数据。MWRI采样时间间隔根据不同通道分别为2.08, 11和5ms, 观测积分时间从10~89GHz分别为15.0, 10.0, 7.5, 5.0和2.5ms。有关仪器和发射前地面实验室定标的更多介绍, 可参见参考文献[1]。为参考方便, 表1给出了FY-3A/B MWRI的性能指标。由于仪器动平衡设计问题, FY-3A MWRI设置成安全操作模式, 没有连续观测数据。FY-3B MWRI解决了动平衡问题, 自发射以来运行稳定, 而且在仪器性能方面, 如灵敏度, 非线性都优于A星。表2给出了FY-3A/B MWRI等效噪声温度值和非线性测量值。

2 MWRI定标精度评价

MWRI的在轨定标精度和偏差特性是数据定量应用的关键。MWRI定标包括地面和在轨两个方面。地面定标主对定标系统本身各项误差来源进行逐项分析测试, 建立误差模型, 基于地面测试数据对仪器定标精度进行评价; 在轨定标主要依靠辐射传输模式和同类仪器的交叉定标, 对仪器整体定标精度进行客观评价。下面对这两个方面分别进行介绍。

2.1 MWRI 地面定标分析

仪器的定标精度是通过地面定标标准源传递到星上。对MWRI而言, 地面定标分析包括定标黑体发射率的测定和误差分析, 冷空反射镜发射率测定和误差分析, 非线性测定和误差分析, 以及热源辐射效率测定和误差分析。经过发射前地面分析测试, MWRI定标误差来源主要由5项组成: 热定标源的不确定性,

表 2 FY-3A/B MWRI灵敏度和非线性

通道	89V	89H	36V	36H	23V	23H	18V	18H	10V	10H
FY-3A 灵敏度 (K)	0.67	0.58	0.31	0.33	0.38	0.44	0.43	0.45	0.43	0.43
FY-3B 灵敏度 (K)	0.55	0.64	0.26	0.24	0.36	0.35	0.35	0.37	0.30	0.31
FY-3A非线性 (K)	1.07	0.99	1.34	1.30	1.18	0.99	1.22	0.57	1.03	1.95
FY-3B非线性 (K)	0.98	0.69	1.10	1.01	0.99	1.01	1.37	1.24	0.99	0.28

表3 MWRI地面定标精度误差汇总表 (单位: K)

通道	10V	10H	18V	18H	23V	23H	36V	36H	89V	89H
ΔT_H	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.22	0.22
ΔT_{IC}	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04
ΔNL	0.23	0.32	0.33	0.69	0.54	0.30	1.69	1.18	0.84	1.30
ΔBL	0.68	1.02	0.49	1.07	0.24	0.65	0.12	0.24	0.04	0.06
ΔNet	0.3	0.31	0.35	0.37	0.36	0.35	0.26	0.24	0.55	0.64
ΔTB	0.84	1.16	0.76	1.36	0.77	0.86	1.74	1.27	1.03	1.46

冷定标源的不确定性, 热反射镜背瓣影响不确定性, 仪器灵敏度和非线性偏差。

定标精度计算及各误差项计算模型为

$$\Delta TB = \sqrt{\Delta T_H^2 + \Delta T_C^2 + \Delta NL^2 + \Delta BL^2 + \Delta Net^2}$$

其中, ΔT_H 为热定标源不确定性; ΔT_C 为冷定标源不确定性; ΔNL 非线性偏差; ΔBL 热反射镜背瓣影响不确定性; ΔNet 为仪器灵敏度。

热定标源不确定性 ΔT_H 由两项组成: 热定标源温度分布不确定性和热定标源发射率不确定性。

ΔT_H 的计算公式为

$$\Delta T_H = \sqrt{\Delta Em^2 + \Delta T_g^2}$$

$$\Delta Em = \Delta e \times T_H$$

其中, Δe 为热定标黑体发射率不确定性; T_H 为热定标黑体物理温度; ΔT_g 为热定标黑体的温度不均匀性;

ΔT_C 的计算公式为

$$\Delta T_C = \Delta T_{coldmirror} \times e_{coldmirror}$$

ΔNL 非线性偏差的计算公式为

$$\Delta NL = \Delta U \times (150 - 3) \times (150 - 300)$$

$\Delta U = \Delta T_{instrument} \times \Delta U_K$ 其中 ΔU_K 为T-U关系式求导后在仪器工作范围内最大的值。

$$U = aT_{instrument}^2 + bT_{instrument} + c$$

$$\Delta U_K = \max(aT_{instrument} + b)$$

ΔB_L 热反射镜背瓣影响不确定性的计算公式为

$$\Delta BL = nt \times BackLopeStd$$

其中, nt 为热反射镜背瓣, $BackLopeStd$ 为背瓣亮温不确定性。MWRI各通道地面定标的各项误差统计见表3。

2.2 MWRI 在轨定标分析

对MWRI在轨定标精度评价包括两个方面: 一是通过与晴空海表条件下辐射传输模式计算MWRI观测亮温进行比对, 在全球范围对MWRI观测亮温偏差特性进行定量评价; 二是通过与同类微波仪器时空匹配

表4 MWRI, AMSR-E和SSMIS观测与模式比较的偏差

通道	FY3B-MWRI		AQUA-AMSR-E		F18-SSMIS	
	BIAS (K)	STD (K)	BIAS (K)	STD (K)	BIAS (K)	STD (K)
10V	-0.91	2.56	1.62	1.99		
10H	-2.57	3.08	1.61	2.35		
18V	0.64	2.99	1.56	2.41	0.28	4.71
18H	-2.32	4.75	1.7	4.13	-2.59	2.64
23V	-1.8	2.83	0.66	2.3	-2.08	2.29
23H	0.38	4.52	3.27	4.01		
36V	-3.21	3.71	-0.60	3.01	5.67	4.98
36H	1.74	4.74	3.04	4.56	-1.52	3.04
89V	-0.53	2.07	-1.09	1.67		
89H	3.03	3.97	3.25	3.37		

观测数据交叉比对进行定标精度评价。

模式比对方面, 利用CRTM辐射传输模式计算仪器观测亮温^[2]。模式输入大气和地表参数数据来自美国国家环境预报中心的全球资料同化系统再分析数据。由观测亮温反演得到的云中液态水含量 (cloud liquid water, CLW) 用于进行晴空判别^[3]: CLW低于0.06g/cm³为晴空数据。为提高模式计算精度, 模式计算范围限定为南北纬45°之间的海表, 观测(O)和模拟(B)之间的差异记为“O-B”。FY-3B MWRI “O-B”的偏差和标准差列于表4。为了便于比较, 表4同时给出了AMSR-E和F18 SSMIS “O-B”的统计结果。

与全球晴空海表模式计算亮温比较结果表明, FY-3B MWRI偏差特性与同类微波遥感仪器相当。37GHz以下的低频通道偏差小于高频通道, 可能的原因是高频通道观测亮温数据更容易受到云雨的影响, 而在模式输入再分析数据中由于缺少水凝物变量, 模式模拟的结果不能反映云和降水对观测亮温的影响。模式计算得到的仪器观测亮温偏差特性反映了仪器整体定标情况, 但由于辐射传输模式本身计算精度的限制, 云和降水的影响, 以及输入数据自身的误差特性, 使得“O-B”偏差不能作为评价仪器定标精度的唯一手段。而且, 模式计算局限于海表, 计算亮温动态范围受到限制, 尤其对低频通道, 亮温在200K以内。“O-B”的结果不能反映整个仪器观测动态范围的亮温偏差特性。

与同类微波遥感仪器观测亮温进行比较是评价MWRI定标精度的另一种方法。通过选取时空匹配观测数据, 交叉定标能够利用已得到广泛应用和验证的同类微波遥感仪器对FY-3B MWRI进行定标精度评价。实际当中我们选取了搭载于美国AQUA卫星上的AMSR-E仪器观测数据作为参考亮温数据, 用以进行交叉定标。AMSR-E自2002年入轨以来, 已经在轨稳定运行10年时间, 观测数据得到了广泛应用。选

表5 AMSR-E与MWRI观测亮温偏差均值和方差

通道	89V	89H	36V	36H	23V	23H	18V	18H	10V	10H
偏差均值(K)	-2.19	-0.93	-0.97	-2.00	0.66	0.13	0.29	1.98	0.45	1.38
方差(K)	1.82	3.51	2.95	3.81	2.48	3.48	2.45	2.28	2.95	2.45

取AMSR-E作为参考仪器的原因有两个: AQUA卫星与FY-3B同为下午1时升交点轨道, 容易找到时空匹配数据; AMSR-E仪器频点设置与MWRI相近, 覆盖所有MWRI观测通道。本文选取2010年11月1—5日的AMSR-E和MWRI观测数据进行交叉定标分析。观测数据时空匹配条件为观测像素中心距离小于10km, 观测时间差异小于10min。对获取的匹配数据分陆表和海表分别进行亮温偏差特性分析。由于AMSR-E和MWRI观测波束地面入射角有2°的差异, 对海表时空匹配数据进行亮温偏差特性分析时必须考虑入射角的差异。本研究中, 对海表观测数据利用“二重差”方法(Double Difference)进行交叉定标偏差特性分析, 这种方法的优点是交叉定标中可以忽略模式误差, 消除仪器中心频点和入射角差异对观测亮温的影响。如图1所示, MWRI和AMSR-E观测亮温之间的差异服从高斯分布, 这两个传感器之间的平均偏差介于-2.19~0.45K, 并且依赖于通道频率值和极化方式变化(见表5)。需要注意的是, 陆地上的平均偏差接近于0, 而在海洋上, 来自MWRI垂直极化通道下的亮温比来自AMSR-E的系统性偏低。这可以由海洋表面的发射率辐射传输模式来解释: 在海洋上, MWRI和AMSR-E之间的2°入射角差异, 就会导致较低频率如10.65GHz垂直极化通道下6K大小的亮温差异。但是, 对于较高的频率和陆地条件来说, 入射角度对亮温的影响可以忽略。对于MWRI环境数据记录产品, 地球物理参数检索算法的发展必须考虑入射角度的影响。

交叉定标和模式对比结果表明, FY-3B MWRI的定标精度符合设计需求, MWRI观测资料能够为地球物理参数的反演提供足够高的精度。

3 MWRI业务产品介绍

利用MWRI观测数据可以得到大气和陆/海表多种地球物理参数信息。在MWRI的观测通道设置当中, 不同通道对不同大气和地表地球物理参数敏感性不同。对降水和云的反演, 89GHz对降水比较敏感, 主要用以反演降雨率信息。对非降水云, 36GHz观测亮温的敏感性最强, 当液水含量从0增加到1mm时, 相应的36GHz垂直极化观测亮温会有70~80K的吸收增温^[4, 5]。当液水含量继续增加, 该通道亮温会达到饱和, 然后随液水含量的增加出现散射降温情况。

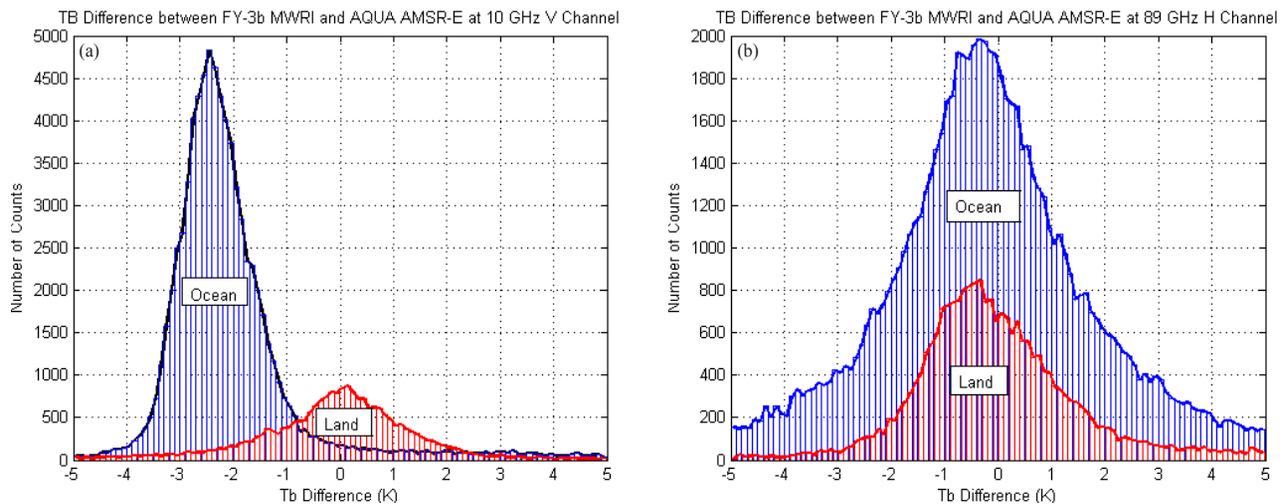


图1 陆表和海表MWRI和AMSR-E观测亮温差直方图特性：(a) 10.65GHz V通道；(b) 89GHz H通道

23GHz是水汽吸收峰，主要用以反演大气水汽含量信息。10.65GHz亮温基本不受云雨大气影响，可以用来反演陆表和海表信息，如土壤湿度、陆表温度、海表温度和风速。综合利用各通道信息，还可以反演得到包括积雪、海冰等多种地球物理参数。在利用MWRI亮温数据进行产品反演之前，还需要对各通道亮温数据进行空间分辨率匹配，无线电干扰识别等质量控制处理，这些都包含在MWRI二级产品当中。

本文重点介绍已经投入业务运行的几种MWRI业务产品，包括降水和云水含量，海上大气可降水，海冰覆盖度和雪深雪当量。

3.1 降水和云水产品

MWRI降水和云水产品包括地面降水率和云水含量。MWRI降水和云水产品是根据MWRI观测亮温数据，通过质量控制（剔除质量有问题或太阳耀斑角太小的像元）、像元降水筛选（分陆地、洋面、冰面和海陆边界四种情况），判别出降水和非降水区域后，再利用统计和物理相结合的方法进行降水和云水反演。

3.1.1 降水筛选

微波降水判识在不同的地表类型基础上进行，包括陆地、水体、海岸、冰。通过扫描像元的经纬度信息来查找该像元对应的地面类型，即给定像元一个初始的下垫面信息。由于在陆地上降水产生的散射信息与一些散射较强的下垫面散射的信息极为相似，因此在反演降水之前，根据MWRI微波辐射亮温对这些散射信息进行判识，确定降水像元是非常必要的。下垫面检测的信息主要依据Grody提出的“吸收类物质”与“散射类物质”区分的理论以及Ferraro对“散射类物质”的具体划分方法^[6,7]。根据各类下垫面不同频率的亮温信息，对其进行判识。其中陆地包括对沙漠、半

干旱土地和积雪（分为3种状态：干雪、湿雪/融雪、冻雪）3种下垫面的检测，海洋包括对海冰、非降水云、海面风速和冷洋面4种下垫面降水情况的检测。

3.1.2 降水反演

微波遥感降水算法概括起来可分为两大类：统计反演法和物理反演法。统计算法不考虑微波亮温和降水间复杂的物理机制，仅用统计方法建立两者之间的经验关系。其优点是回避了许多微波遥感中不确定的因素，简单易行，直观地显示亮温与降水之间的关系。该方法有助于直接认识、探索遥感和降水之间的关系；不足之处是由于统计样本的差异及其分析区域的不同，统计算法的效果差异较大，具有一定的局限性。MWRI降水反演产品的反演采用的是统计反演方法。通过用TRMM卫星上微波降水雷达PR、微波辐射计TMI资料和2002年6—7月120个气象站点的雨量计每小时降水记录，在数据匹配的基础上，采用了TMI各通道的亮温以及8种组合因子作为进行统计反演的回归因子，并参考国际上成熟的统计算式，形成了中国地区的降水反演算法。

图2a和b分别给出了用MWRI和AMSR-E资料对台风“桑达”的地表降水率反演结果。如图2，MWRI和AMSR-E的观测时间差大约只有10min。可以看出，除了从AMSR-E仪器反演得到的远低于3mm/h地表降水率之外，两个传感器的降水率反演结果空间分布类型十分一致。图3给出了MWRI升轨数据反演海洋表面云液态水含量的全球分布图以及MWRI和AMSR-E反演云液态水含量的散点图。可以看出，云液态水含量的最大值出现在中国东南海岸附近的台风区域。云液态水含量和总降水量的均方根误差分别为0.15和2.5。

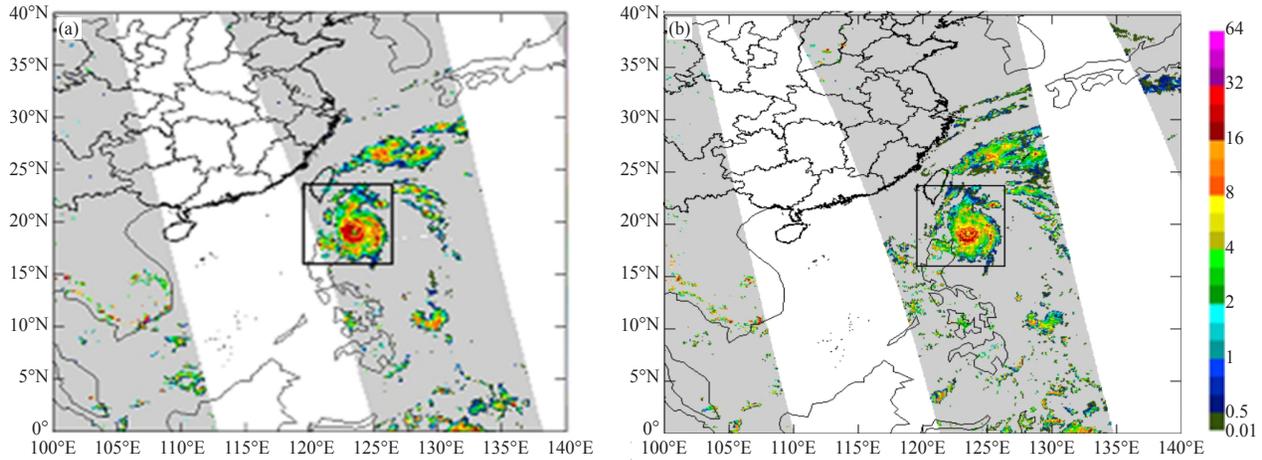


图2 2011年5月27日台风“桑达”降雨率反演结果(单位: mm/h): (a) MWRI反演结果; (b) AMSR-E反演结果
(图中黑框内区域为选取的定量对比样本区, 白色为没有观测数据区域, 灰色为不进行反演区域)

3.2 海上大气可降水产品

海上大气可降水是指海上大气柱中水汽总含量。MWRI海上大气可降水轨道产品是基于MWRI观测亮温以及极区海冰覆盖度反演产品, 对扫描视场进行海陆、海冰覆盖以及降水判别, 利用MWRI各通道观测亮温与大气可降水之间的统计关系计算海上非降水像元的大气可降水, 算式如下:

$$TPW_0 = a_0 + a_1 T_{B19V} + a_2 T_{B22V} + a_3 T_{B37V} + a_4 T_{B22V}^2 \quad (\text{kg/m}^2)$$

$$TPW = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i TPW_0^i \quad (\text{kg/m}^2)$$

式中, $a_i(i=1,2,3,4)$ 和 $b_i(i=1,2,3)$ 为统计系数。

图4是MWRI资料(图4a)和AMSR-E资料(图4b)分别得到的海洋总降水量一个月的平均分布。MWRI反演的总降水量与AMSR-E的反演结果比较一致。

3.3 海冰覆盖度

海冰覆盖度主要利用MWRI的37和19GHz通道观测亮温获得。算法当中利用旋转极化率和谱梯度比差作为变量反演冰浓度^[8,9]。旋转极化率和谱差梯度定义

如下:

$$PR_R(18) = -GR(37v, 18v) \sin \varphi + PR(18) \cos \varphi$$

$$\Delta GR = GR(89h, 18h) - GR(89v, 18v)$$

这里 φ 是旋转角, PR 和 GR 分别是极化和谱梯度, 定义如下:

$$PR(18) = \frac{TB_{18v} - TB_{18h}}{TB_{18v} + TB_{18h}}$$

$$GR(37v, 18v) = \frac{TB_{37v} - TB_{18v}}{TB_{37v} + TB_{18v}}$$

$$GR(89h, 18h) = \frac{TB_{89h} - TB_{18h}}{TB_{89h} + TB_{18h}}$$

$$GR(89v, 18v) = \frac{TB_{89v} - TB_{18v}}{TB_{89v} + TB_{18v}}$$

海冰覆盖度分以下3步计算: (1) 利用辐射传输模式在不同大气状况下模拟7种不同地表类型下MWRI的亮温数据(如北极海冰, 南极海冰, 北极一年海冰, 南极一年海冰, 有强烈地表散射的北极海

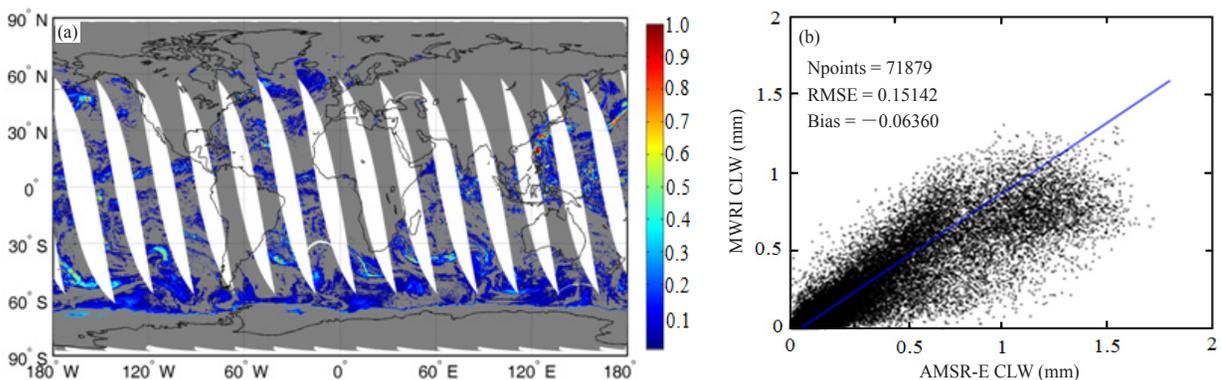


图3 全球 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 日云水反演产品(a, 单位: mm, 白色表示没有观测数据, 灰色为反演无效区)以及MWRI和AMSR-E反演云水产品的散点图比较结果(b)

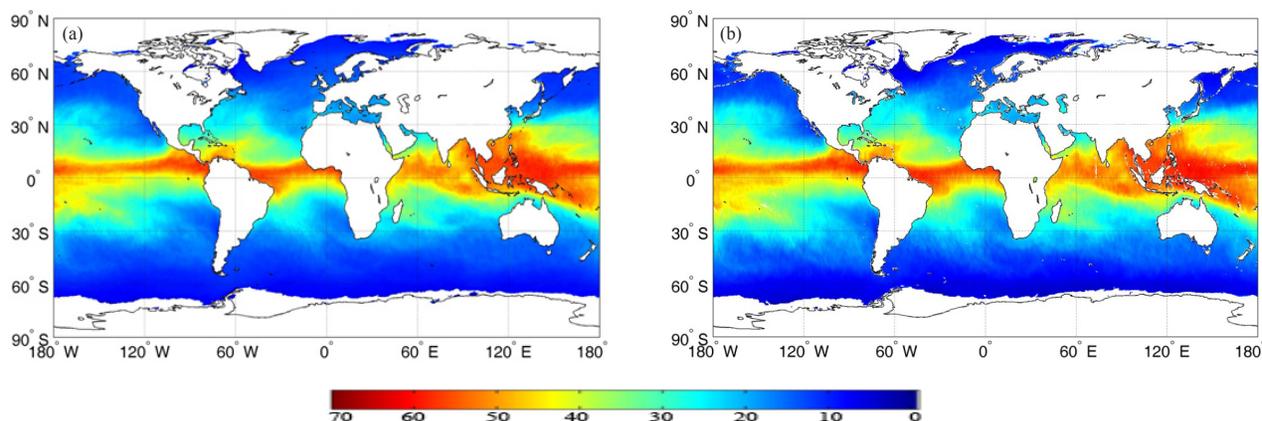


图4 MWRI (a) 和AMSR-E (b) 反演月平均海上大气可降水产品 (单位: mm, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 白色区域为反演无效区)

冰, 有强烈地表散射的南极海冰和薄海冰)。(2) 对所有海冰覆盖度在不同的大气条件下以1%间隔从0%~100%的组合中, 计算前面定义的极化率、梯度比、旋转极化率和谱梯度的模式值。(3) 用MWRI的观测亮温对同样的一组比率进行计算, 并和步骤2中模式计算的结果相比较。最终得到一个像素点的海冰覆盖度是不同地表类型下冰盖率的总和。反演过程

中, 所有满足下面条件的像素点不能进行反演:

$$GR(37v, 19v) < 0.05 \quad GR(23v, 19v) < 0.045$$

用MWRI和AMSR-E资料对北极和南极地区的冰浓度反演结果见图5。对比结果表明, 两种海冰产品当中海冰分布和覆盖度的反演结果比较一致。

3.4 雪深和雪水当量产品

利用MWRI资料反演雪深有两种算法: 一种是全

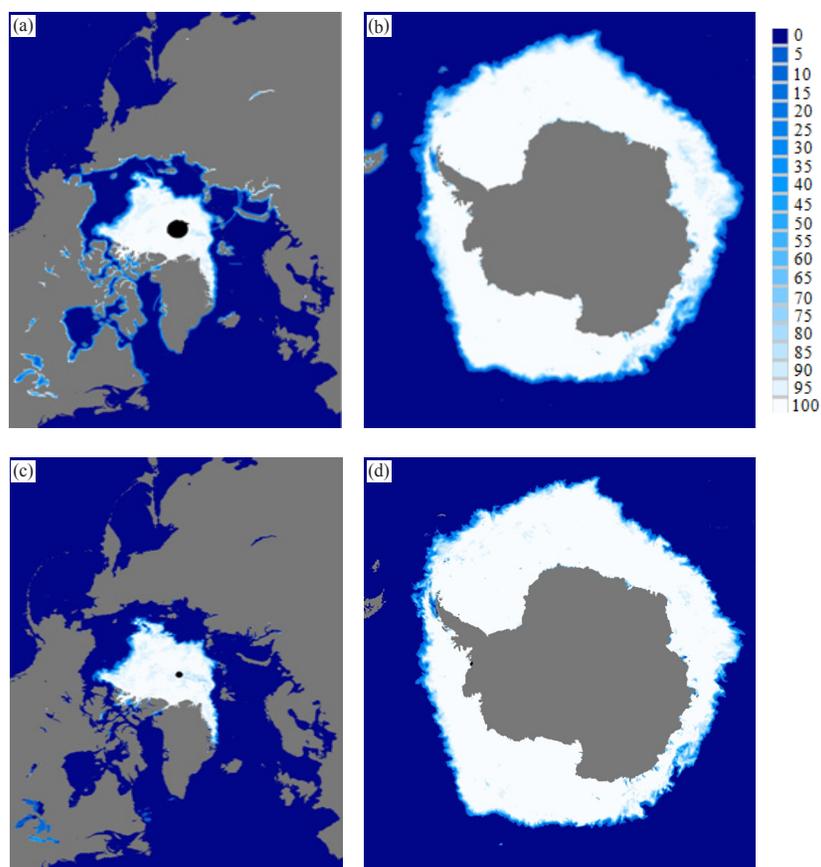


图5 (a) 和 (b) 为MWRI反演2011年1月1—5日5 d合成南北极海冰覆盖度 (空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$); (c) 和 (d) 为相应时间AMSR-E反演结果 (单位: %, 蓝色表示水体, 灰色为无海冰覆盖区域)

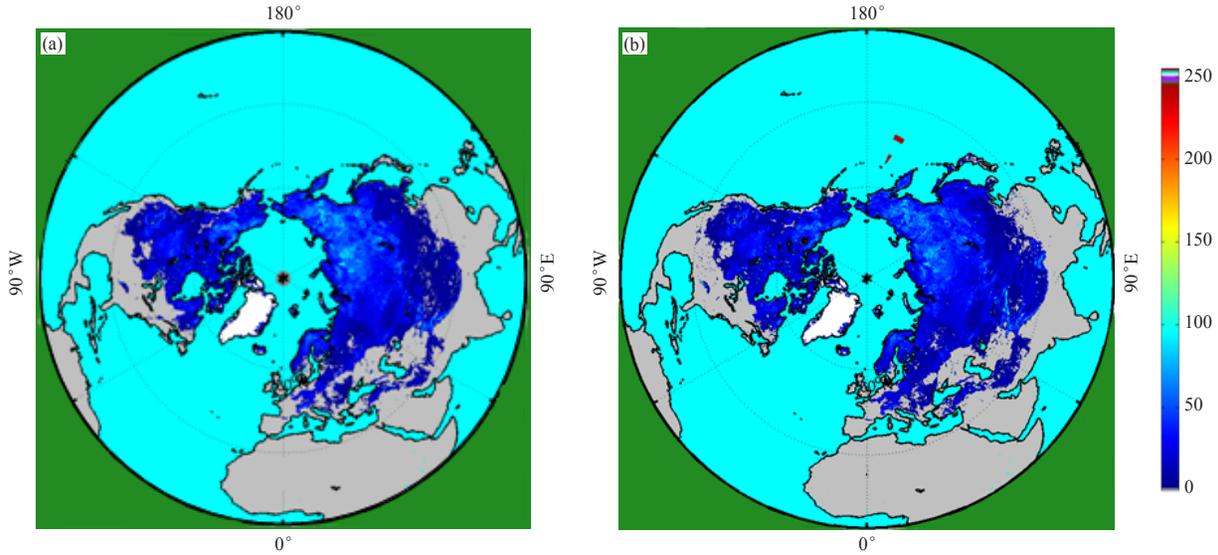


图6 MWRI (a) 和AMSR-E (b) 反演北半球雪当量产品
(单位: mm, 绿色为无观测数据区域, 白色为冰, 灰色为无积雪覆盖区域)

球算法, 另一种是区域算法。本文采用AMSR-E资料反演雪深的全球算法^[10, 11], 这是一种半经验算法, 方程定义如下:

$$SD = FF \times \frac{(A \times (T_{b_{18V}} - T_{b_{36V}}))}{1 - FD \times 0.6} + (1 - FF) \times [A \times (T_{b_{10V}} - T_{b_{36V}}) + B \times (T_{b_{10V}} - T_{b_{18V}})]$$

其中, 雪深的单位是cm, FF 是森林覆盖率, FD 是森林密度, 参数 A 和 B 按照下式计算:

$$A = \frac{1}{\log_{10}(T_b^{36V} - T_b^{36h})} \quad B = \frac{1}{\log_{10}(T_b^{18V} - T_b^{18h})}$$

雪水当量 (SWE, 单位: mm) 可以用 SD 计算:

$$SWE = 10 \times \rho_{\text{snowdensity}} \times SD$$

MWRI资料反演雪深的区域算法是一种半经验算法, 并且只适用于中国地区。用2002, 2004和2005年10月一次年3月的3年AMSR-E观测亮温资料和相应的不同天气条件下当地站点观测资料来建立雪深和卫星观测亮温之间的关系。剔除初冬和晚春季节有雪的部分资料, 减小了湿雪的影响。在区域算法中, 考虑了有雪盖下的地表情况。对于每一个卫星像素点, 其雪深是不同地表特征下雪深的加权之和, 权重系数是不同地表各自占陆地的百分比。

$$SD = F_{\text{barren}} \times SD_{\text{barren}} + F_{\text{grass}} \times SD_{\text{grass}} + F_{\text{farmland}} \times SD_{\text{farmland}} + F_{\text{forest}} \times SD_{\text{forest}}$$

其中, F_{barren} , F_{grass} , F_{farmland} , F_{forest} 是不同类型地表覆盖度。算法当中, 陆地表分成4种类型: 森林、草地、裸露土壤和耕地。对于每一种地表类型, 利用陆地覆盖率大于80%的MWRI观测点资料 (称为干净资料)

得到回归方程。对于4种地表类型的干净资料点, 雪深回归反演算法如下:

$$SD_{\text{farmland}} = -5.690 + 0.345 \cdot D_{18V36h} + 0.817 \cdot D_{89V89h}$$

$$SD_{\text{grass}} = 4.320 + 0.506 \cdot D_{18h36h} - 0.131 \cdot D_{18V18h} + 0.183 \cdot D_{10V89h} - 0.123 \cdot D_{18V89h}$$

$$SD_{\text{barren}} = 3.418 + 0.411 \cdot D_{36h89h} - 1.543 \cdot D_{10V89h} + 1.331 \cdot D_{10V89h}$$

$$SD_{\text{forest}} = 10.766 + 0.421 \cdot D_{18h36h} - 1.121 \cdot D_{18V18h} + 0.673 \cdot D_{89V89h}$$

其中, 参数 D 代表其下标所示的MWRI两个通道之间的亮温差。

为了便于对比, 图6给出了分别从FY-3B MWRI和AMSR-E资料得到的北半球5d合成雪水当量产品, 两种产品的格点分辨率都是 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间周期都是2011年1月1—5日。结果表明, 除了AMSR-E的雪水当量产品在中国区域的估计有所偏高之外, 两种雪水当量产品趋势十分一致。MWRI区域性雪算法是基于中国天气形式下多年累积雪算法下发展的, 可以认为MWRI的雪深反演结果比AMSR-E在中国区域的反演结果更精确。

4 结论

风云三号B星MWRI已在轨连续稳定运行近3年, 每天可获取两次全球覆盖对地观测微波辐射亮温数据。区别于国外同类微波仪器, MWRI定标系统设计为独特的端到端的全光路定标系统。该系统的优点是定标当中可以避免定标源的不稳定和天线反射镜对观测亮温的影响, 而这个问题是目前大多数在轨运行国

外同类微波仪器定标的主要问题。但由于定标设计复杂,而且没有先例可循,需要进行大量仿真分析和地面试验和测试。从A星开始,在仪器设计阶段和发射前测试阶段,我们针对成像仪定标系统进行了大量理论分析和数值计算,并组织开展了一系列的定标实验和测试,测定了定标黑定发射率,辐射截获效率,热定标反射镜背瓣效率等关键定标基础数据。在此基础上,建立了基于互易原理的MWRI全光路定标模型。利用该模型我们分析了成像仪定标系统的各项误差来源,计算了不同误差项的影响,最终给出了仪器地面定标精度。成像仪入轨以后,利用辐射传输模型和数值天气预报再分析场数据,在全球范围对仪器定标精度进行了评价,并通过交叉定标方法将MWRI观测亮温与在轨同类微波遥感仪器观测亮温进行了比较。发射前地面和在轨定标结果表明,仪器定标精度在2K以内,满足仪器设计指标要求。值得一提的是,由于气象卫星微波仪器高水平定标要求,相关部门已经开始建立我国自己的微波定标标准,这将对我国未来微波遥感仪器的发展和应用水平的提高起到重要的推动作用。

MWRI通道设置考虑了大气和陆/海表遥感应用需求,获取数据可用于台风暴雨预报,洪涝灾害,积雪和土壤水份等灾害和环境监测应用。积累的长时间序列数据还可应用于气候变化研究。目前MWRI已经业务运行和实时发布的产品数据包括定标亮温、降水和云水、水汽、海冰、雪深雪当量、土壤水份和陆表温度。这些数据和产品已经提供给包括欧洲数值预报

中心在内的国内外多个部门使用,在数值天气预报和灾害环境监测当中发挥了重要作用。

参考文献

- [1] Yang H, Weng F, Lv L, et al. The FengYun-3 Microwave Radiation Imager on-orbit verification. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011,49(11):4552-4560.
- [2] Weng F, Liu Q. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. Part I: Forward radiative transfer and Jacobian Modeling in cloudy atmospheres. *J Atmos Sci*, 2003, 60: 2633-2636.
- [3] Weng F, Grody N C. Retrieval of cloud liquid water using the special sensor microwave imager (SSM/I). *J Geophys Res*, 1994, 99(D12): 25535-25551.
- [4] Weng F, Zhu T, Yang B. Satellite data assimilation in numerical weather prediction models. 2 Uses of rain affected microwave radiances for hurricane vortex analysis. *J Atmos Sci*, 2007,64: 3914-3929.
- [5] Weng F, Zhao L, Ferraro R R, et al. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms. *Radio Science*, 2003, 38: 1-12.
- [6] Grody N C. Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave/imager (SSM/I). *J Geophys Res*, 1991, 96: 7423-7435.
- [7] Ferraro R R, Grody N C. Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 11: 195-209.
- [8] Markus T, Cavalieri D J. An enhancement of the NASA team sea ice algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, 38(3): 1387-1398.
- [9] Comiso J C, Cavalieri D J, Markus T. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41(2): 243-252.
- [10] Kelly R E J. The AMSR-E snow depth algorithm: Description and initial results. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 2009, 29(1): 307-317.
- [11] Kelly R E J, Chang A T, Tsang L, et al. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41(2): 230-242.