

引用格式: Zeng Ziqian, Jiang Gengming. Intercalibration of the Microwave Radiation Imager on Fengyun 3C[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(3): 682-691. [曾子倩, 蒋耿明. FY-3C MWRI在轨交叉辐射定标[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 682-691.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.3.0682

FY-3C MWRI在轨交叉辐射定标

曾子倩, 蒋耿明

(复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 精确辐射定标是定量遥感的基础。以搭载在全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星上的微波成像仪(GPM Microwave Imager, GMI)为辐射基准, 用双差异(Double Difference, DD)方法对搭载在我国风云三号C星(Fengyun 3C, FY-3C)上的微波成像仪(Microwave Radiation Imager, MWRI)进行在轨交叉辐射定标。首先, 将FY-3C MWRI数据、GMI数据和第五版欧洲中尺度天气预报中心再分析(European Centre for Medium-Range Weather Forecast Re-Analysis V5, ERA5)数据重采样至 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的全球规则格网空间; 其次, 根据匹配条件收集晴空海面上的匹配观测点, 用海洋微波辐射传输模型分别模拟FY-3C MWRI和GMI各个通道大气顶亮温; 然后, 根据匹配的观测值和模拟值计算DD值和FY-3C MWRI的理论观测值; 最后, 确定交叉辐射定标系数, 并完成对FY-3C MWRI数据的定标重处理。结果表明: 相对于GMI, FY-3C MWRI观测值被低估, 特别是低频通道, 但随着频率的增大, 定标误差逐渐变小。FY-3C MWRI升轨(MWRIA)的定标误差比降轨(MWRID)小1.0~2.0 K。在全球天基交叉辐射定标系统(Global Space-based Inter-Calibration System, GSICS)所定义的标准场景亮温下, 对于10V/H、18V/H、23V、36V/H和89V/H共9个通道, MWRIA的辐射定标误差分别为 -6.7 ± 0.3 K、 -8.7 ± 0.7 K、 -2.9 ± 0.7 K、 -2.0 ± 0.8 K、 -2.4 ± 0.7 K、 -4.0 ± 0.8 K、 -2.4 ± 1.4 K、 -1.3 ± 1.0 K和 -0.4 ± 1.8 K; 而MWRID的辐射定标误差分别为 -7.9 ± 0.7 K、 -9.7 ± 0.9 K、 -4.3 ± 0.9 K、 -3.0 ± 0.8 K、 -3.5 ± 0.9 K、 -5.1 ± 0.8 K、 -3.0 ± 1.1 K、 -2.4 ± 0.6 K和 -1.0 ± 2.1 K。

关键词: 交叉辐射定标; FY-3C MWRI; GMI; 双差异法; 海洋微波辐射传输模型

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)03-0682-10

1 引言

风云3号(Fengyun 3, FY-3)系列是我国第二代极轨气象卫星, 其第三颗卫星, FY-3C于2013年9月23日从太原卫星发射中心发射升空。微波成像仪(Microwave Radiation Imager, MWRI)是搭载在FY-3C上的重要遥感仪器。FY-3C MWRI为全功率双极化圆锥扫描微波成像仪, 它在中心频率为10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz、89 GHz下各有垂直(V)极化和水平(H)极化共计10个波

段, 在下文中分别简称为10V/H、18V/H、23V/H、36V/H和89V/H通道。各个通道的地面分辨率取决于通道频率, 从 $9 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 到 $51 \text{ km} \times 85 \text{ km}$ 不等, 等效噪声温差(灵敏度)介于0.5~1.0 K之间(表1)。FY-3C MWRI以大约 53.2° 的地球入射角(Earth Incidence Angle, EIA)观测地球表面和大气层, 其扫描幅宽约为 $1400 \text{ km}^{[1-2]}$ 。FY-3C MWRI具备探测恶劣天气的能力, 例如台风、晴天和阴天中的对流云。低频波段可以穿透云层, 并为数值天气预报提

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2021-01-29

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: 曾子倩(1994—), 女, 湖北省荆州人, 硕士研究生, 主要从事微波遥感仪器定标研究。E-mail: zqzeng17@fudan.edu.cn

通讯作者: 蒋耿明(1975—), 男, 湖南省永州人, 副教授, 主要从事定量遥感和图像处理研究。E-mail: jianggm@fudan.edu.cn

供全天候的测量结果。在更高的波段,例如89V/H通道,可以探测来自云层和降水的散射特征,同时它们也是检测陆地和海洋降雨的良好指标。FY-3C MWRI观测数据还可以用来获取海表温度(Sea Surface Temperature, SST)、土壤湿度、土壤温度、洪涝干旱、积雪深度以及大气含水量等丰富信息。尽管FY-3C MWRI具有端到端的在轨定标系统,但根据先前的研究,各个通道或多或少存在定标偏差^[2]。Wu等^[2]使用FY-3B MWRI、SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder, SSMIS)以及TRMM TMI (Tropical Rainfall Measuring Mission's Microwave Imager, TMI)分别与FY-3C MWRI进行了在轨交叉辐射定标,但并未考虑这些仪器之间的光谱和角度差异,而这些参数差异对观测亮温有较大影响。因此,需要对FY-3C MWRI的在轨辐射定标进行深入和精确的评估,为后续应用奠定基础。

与FY-3C MWRI具有相似通道参数的另一台仪器是搭载在全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)卫星上的微波成像仪(GPM Microwave Imager, GMI)。GMI也是一台多通道圆锥扫描微波辐射仪,在GPM近乎全球覆盖(65°S~65°N)和频繁重访的任务中起着至关重要的作用。该仪器既可以作为降水测量的标准,也可以作为GPM其他卫星成员的辐射标准^[3]。GMI拥有13个微波通道,频率范围从10 GHz到183 GHz。除了在23.8 GHz、183.31±7 GHz和183.31±3 GHz这3个频点仅有V极化通道外,在10.65 GHz、18.7 GHz、36.64 GHz、89.0 GHz和166 GHz共5个频点均有V极化和H极化通道(表2)。GMI是第一个同时使用内部和外部定标系统的微波成像仪,双重在轨定标系统使得GMI能够捕捉和测量在轨仪器的非线性响应。最近的研究表明,GMI对海洋观测区域在一倍标准方差范围内的绝对定标精度约为0.25 K,并表现出卓越的长期辐射稳定性^[4-5]。因此,GMI在遥感界被广泛用作微波辐射定标基准。

精确定标是定量遥感的基础。评估在轨仪器的定标情况主要有两种:外场定标和交叉定标。交叉定标通过将目标传感器的观测数据与具有相似参数的参考传感器的观测数据进行一系列分析从而实现目标传感器辐射定标的校准^[6-7]。由于其经济、高效和易于实施等优点,交叉辐射定标被广泛应用。国内外学者发展了多种交叉定标方法,例

如光线匹配法(Rays Matching, RM)^[8-15]、单差异(Single Difference, SD)方法和双差异(Double Difference, DD)方法^[16-18]等。光线匹配法对目标传感器和参考传感器的时空匹配观测值进行直接比较,从而将参考传感器的在轨定标参数传递给目标传感器。但是在大多数情况下,不同卫星搭载的传感器参数,例如中心频率、带宽、极化方式以及观测角度是不同的,而观测值是这些参数的函数。因此,对不同传感器的观测值进行直接比较会导致较大的误差。如果结合辐射传输模型(Radiative Transfer Model, RTM)则可以从理论层面解决这些参数差异的影响。单差异和双差异方法均采用了辐射传输模型进行交叉辐射定标。单差异方法首先对无降雨区域提取其环境参数,利用RTM计算大气顶模拟亮温,然后对传感器的每个通道计算其观测亮温与模拟亮温之间的差值。单差异方法虽然充分考虑了中心频率、带宽、极化方式以及观测角度的影响,但是由于辐射传输模型的不完善以及环境参数的不确定性仍会导致一定的误差。双差异方法将两个传感器对相同晴空区域的观测亮温差异和模拟亮温差异相减,消除了辐射传输模型的误差以及传感器参数差异导致的误差。由于其出色的性能,DD方法已被GPM卫星间定标工作组(XCAL)内的各团队用于对GPM搭载的各类仪器进行交叉辐射定标^[3]。

实验以GMI作为在轨交叉辐射定标的参考传感器,用海洋微波辐射传输模型与背景环境参数结合,同时模拟与卫星观测时空匹配的FY-3C MWRI和GMI亮温,进而用DD方法将GMI的在轨定标参数传递给FY-3C MWRI各个通道。

表1 FY-3C MWRI仪器参数

Table 1 Instrument parameters of FY-3C MWRI

序号	名称	中心频率 /GHz	带宽 /MHz	极化 方式	灵敏度 /K	地面分辨率 /km
1/2	10V/H	10.65	180	V, H	0.5	51×85
3/4	18V/H	18.7	200	V, H	0.5	30×50
5/6	23V/H	23.8	400	V, H	0.8	27×45
7/8	36V/H	36.5	900	V, H	0.5	18×30
9/10	89V/H	89.0	4 600	V, H	1.0	9×15

2 交叉辐射定标方法

在晴空条件下,若已知与实际卫星观测时空匹配的SST、海面风速、海面风向、海水盐度以及大气温度和湿度廓线等背景环境参数,可用海洋微波辐

射传输模型^[19]计算得到较精确的模拟亮温,进而用DD方法实现在轨辐射定标参数从参考传感器到目标传感器的传递。海洋微波辐射传输模型由大气辐射传输方程、大气吸收模型和海表发射率模型组成,下面分别介绍。

2.1 微波辐射传输方程

在晴空条件下,卫星微波传感器对海洋表面的极化观测亮温可用如下辐射传输方程表示:

$$\begin{aligned} T_{B,p} &= T_{BU} + \tau \cdot E_p \cdot T_s + \tau \cdot T_{B\Omega} \\ T_{B\Omega} &= R_p \cdot [T_{BD} + \tau \cdot T_{cold}] + T_{B,scat,p} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: T_s 为SST, E_p 表示 p 极化海表发射率, $R_p=1-E_p$ 表示海表反射率, τ 表示大气透过率, T_{BU} 和 T_{BD} 分别表示大气上行辐射和大气下行辐射, $T_{B\Omega}$ 表示大气及宇宙背景下行辐射经海面反射, T_{cold} 为消除了瑞利-金斯近似偏差后的等效冷空亮温, $T_{B,scat,p}$ 为大气下行路径辐射散射校正项。

当EIA小于 60° 时,在海拔高度 h_1 至 h_2 之间的大气透过率可表示为:

$$\tau(h_1, h_2) = \exp \left[-\sec \theta \int_{h_1}^{h_2} \alpha(h) dh \right] \quad (2)$$

其中: θ 为EIA, $\alpha(h)$ 为海拔高度 h 处的大气吸收率。

大气上行辐射和下行辐射可分别表示为:

$$\begin{aligned} T_{BU} &= \sec(\theta) \int_0^{TOA} \alpha(h) T(h) \tau(h, TOA) dh \quad (3-a) \\ T_{BD} &= \sec(\theta) \int_0^{TOA} \alpha(h) T(h) \tau(0, h) dh \quad (3-b) \end{aligned}$$

其中:TOA(Top of Atmosphere)表示大气顶层高度, $T(h)$ 为 h 处的大气温度。

需要指出的是,无论是FY-3C MWRI还是GMI,各个通道均具有一定的带宽,所以上述公式中的 T_{Bp} 、 T_{BU} 、 T_{BD} 、 E_p 、 τ 、 α 和 $T_{B\Omega}$ 等参数是通道的平均值。

2.2 大气吸收模型

大气透过率、大气上行辐射和大气下行辐射是海洋微波辐射传输方程中的3个关键参数。这3个参数由大气中的氧气、水汽和悬浮水滴或冰晶粒子的大气吸收所决定^[20-22]。根据电磁波理论,频率为 ν 的平面无线电波传播距离 z 后的相位和幅度可用场强表示,即:

$$E(z) = \exp[ikz(1+N \times 10^{-6})] E(0) \quad (4)$$

其中: $E(0)$ 是初始值, $k=2\pi\nu/c$ 是自由空间波数, c 是真空介质中的光速。 N 是大气介质的复折射率,由如下公式表示:

$$N = N_0 + N' + iN'' \quad (5)$$

在上式中,复折射率的实部由频率无关项 N_0 和色散折射 $N'(\nu)$ 组成,决定电磁波的传播速率;而复

折射率的虚部 N'' 与大气吸收系数的关系如下:

$$\alpha(h) = 0.04191 \times \nu \times N'' \quad (6)$$

在100 GHz以下的微波频谱中,大气吸收归因于3种成分:氧气、水汽以及悬浮水滴或冰晶粒子^[23]。这3个分量的总和即为大气总吸收系数(单位:Np/km)。许多学者研究了氧气和水汽系数与频率、温度、压强以及水汽密度的关系^[22,24],并且将适用的微波频率扩展到1 000 GHz^[22]。借助实验室测量,Liebe等于1993年提出了毫米波传播模型(Millimeter-wave Propagation Model, MPM93)来描述大气在1~1 000 GHz频率范围内的传播特性。当已知频率、大气压强、大气温度、大气相对湿度、水汽密度、降雨率等大气参数,就可以通过毫米波传播模型计算出干燥空气、水汽(相对湿度)、悬浮水滴和冰晶粒子的复折射率,从而计算得到大气吸收系数 α ,再进一步计算得到各个微波通道的大气透过率、大气上行和下行辐射亮温。实验将采用MPM93大气吸收模型计算大气的吸收系数。

2.3 海表微波发射率模型

海洋微波辐射传输方程中的另一个重要参数是海表发射率 E_p 。该参数主要受3种类型的海面粗糙尺度的影响:大尺度重力波、毛细重力波和海洋泡沫。结合前两个粗糙尺度,已有许多理论尝试对风驱粗糙海面进行建模^[25-29]。但是,理论建模结果与实际存在较大差异,难以满足定标的精度要求。基于WindSat和SSM/I观测数据,Meinssner和Wentz发展出一个6~90 GHz的海表发射率模型,适用的最大风速达到40 m/s,适用的最大EIA为 65° 。该模型将海表发射率分解成平静海面发射率 E_0 、各向同性风致海面发射率 ΔE_w 和风向信号的斯托克斯参数 ΔE_φ ^[30],即:

$$E_p = E_0 + \Delta E_w + \Delta E_\varphi \quad (7)$$

其中: E_0 是频率 ν ,地球入射角 θ_i ,海表温度 T_s 和海表盐度 S 的函数,其贡献占比最大。 E_0 可以根据菲涅尔反射公式计算。

ΔE_w 是海表温度 T_s ,海面风速 W 、海面盐度 S 和地球入射角 θ_i 的函数:

$$\begin{aligned} \Delta E_w^{p,f}(\theta_i, W, T_s, S) &= \Delta E_w^{nad,f}(W, T_s, S) + \\ &[\Delta E_w^{p,f}(\theta_{ref}, W, T_s, S) - \Delta E_w^{nad,f}(W, T_s, S)] \cdot \left(\frac{\theta_i}{\theta_{ref}} \right)^{xp} \\ \Delta E_w^{nad,f}(W, T_s, S) &= \frac{1}{2} [\Delta E_w^{v,f}(\theta_{ref}, W, T_s, S) + \\ &\Delta E_w^{h,f}(\theta_{ref}, W, T_s, S)] \Delta E_w^{p,f}(\theta_{ref}, W, T_s, S) \\ &= \delta_{ref}^{p,f}(W) \cdot \frac{E_0^{p,f}(\theta_{ref}, T_s, S)}{E_0^{p,f}(\theta_{ref}, T_{ref}, S)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\theta_{\text{ref}}=55.2^\circ$ 是参考入射角, $\Delta E_{\text{w}}^{\text{nad},f}$ 是垂直观测时的各向同性风致海面发射率, 可以通过取入射角为 θ_{ref} 时的 V 极化和 H 极化 ΔE_{w} 进行算术平均得到。 δ 是风速依赖系数, 由一个五阶多项式拟合得到, 其具体取值见文献[30]中的表2。

表2 GMI 仪器参数
Table 2 Instrument Parameters of GMI

序号	名称	中心频率 /GHz	带宽 /MHz	极化 方式	灵敏度 /K	地面分辨率 /km
1/2	10V/H	10.65	100	V, H	0.96	19×32
3/4	18V/H	18.7	200	V, H	0.84	11×18
5	23V	23.8	400	V	1.05	9.2×15
6/7	36V/H	36.64	1 000	V, H	0.65	8.6×14
8/9	89V/H	89.0	6 000	V, H	0.57	4.4×7.2
10/11	166V/H	166.0	4 000	V, H	1.5	4.4×7.2
12	$183 \pm 7\text{V}$	183.31 ± 7	2 000	V	1.5	4.4×7.2
13	$183 \pm 3\text{V}$	183.31 ± 3	2 000	V	1.5	4.4×7.2

ΔE_{φ} 是地球入射角 θ , 海面风速 W 与海面相对风向 φ 的函数, 可以展开成二阶傅里叶函数的形式, 即:

$$\Delta E_{\varphi}^{p,f}(\theta_i; W, \varphi) = \begin{cases} A_1^{p,f}(\theta_i; W) \cdot \cos(\varphi) + \\ A_2^{p,f}(\theta_i; W) \cdot \cos(2\varphi), p=v, h \\ A_1^{p,f}(\theta_i; W) \cdot \sin(\varphi) + \\ A_2^{p,f}(\theta_i; W) \cdot \sin(2\varphi), p=S3, S4 \end{cases} \quad (9)$$

其中: A_1 和 A_2 分别是一阶和二阶谐波系数, 与极化方式和频率有关, 同样由一个五阶多项式拟合得到, 其具体取值见文献[30]、表3和表4。

文献[30]对 E_0 、 E_{w} 和 E_{φ} 以及式(7)~(9)中各变量、系数进行了更为详细的介绍与描述。

验证结果表明, 该模型与独立观测值非常吻合, 并能提供定标所需的精度^[30]。因此, 实验将采用 Meinssner 和 Wentz 的海表发射率模型。

2.4 双差异定标方程

在晴空条件下, 获取 FY-3C MWRI 与 GMI 的时空匹配观测亮温, 同时提取与 FY-3C MWRI 和 GMI 观测时空匹配的 SST、海面风速、风向以及大气温度和湿度廓线等背景环境参数, 代入海表微波发射率模型、MPM93 大气吸收模型和辐射传输方程, 计算得到与 GMI 和 FY-3C MWRI 实际观测值时空匹配的大气顶微波模拟亮温。

如上文所述, DD 方法不仅可以消除中心频率、带宽、观测角度等参数差异的影响, 而且可以消除辐射传输模型和背景环境参数误差的影响。本文以 GMI 作为辐射定标参考传感器, DD 值即为 FY-

3C MWRI 相对于 GMI 的辐射定标偏差。首先, 计算 FY-3C MWRI 和 GMI 之间的观测亮温差值 (Observation Temperature Difference, OTD) 和模拟亮温差值 (Simulation Temperature Difference, STD), 进而计算 DD 值, 即:

$$\begin{aligned} \text{OTD} &= (\text{MWRI}_{\text{obs}} - \text{GMI}_{\text{obs}}) \\ \text{STD} &= (\text{MWRI}_{\text{sim}} - \text{GMI}_{\text{sim}}) \\ \text{DD} &= (\text{OTD} - \text{STD}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中: MWRI_{obs} 和 GMI_{obs} 分别为 FY-3C MWRI 和 GMI 时空匹配的实际观测值, 而 MWRI_{sim} 和 GMI_{sim} 分别为 FY-3C MWRI 和 GMI 的模拟亮温。

然后, FY-3C MWRI 的实际观测亮温减去相应的 DD 值得到其理论观测参考值:

$$\text{MWRI}_{\text{theoretic}} = \text{MWRI}_{\text{obs}} - \text{DD} \quad (11)$$

最后, 假设 FY-3C MWRI 理论观测值是实际观测值的一元二次函数, 即:

$$\text{MWRI}_{\text{theoretic}_i} = A_i + B_{1,i} \cdot \text{MWRI}_{\text{obs}_i} + B_{2,i} \cdot \text{MWRI}_{\text{obs}_i}^2 \quad (12)$$

其中: A_i 、 $B_{1,i}$ 和 $B_{2,i}$ 为第 i 通道的交叉辐射定标系数, 可用大量的匹配数据回归计算得到。一旦式(12)中的未知系数确定, 即可实现 FY-3C MWRI 的在轨交叉辐射定标。

3 数据源与处理

实验主要使用了 2017 年全球的 GMI L1C 数据、FY-3C MWRI L1 数据和第五版本欧洲中尺度天气预报中心再分析 (European Centre for Medium-Range Weather Forecast Re-Analysis V5, ERA5) 数据。GMI 和 FY-3C MWRI 数据提供大气顶观测亮温、经纬度坐标以及观测角等参数。FY-3C MWRI L1 数据分为两组: 升轨数据和降轨数据, 后文将分别称之为 MWRIA 数据和 MWRID 数据。MWRIA 和 MWRID 数据采用的是不同的定标系数。需要说明的是, GMI L1C 数据产品不提供观测的入射方位角信息, 我们根据卫星和观测点的位置计算得到入射方位角参数。

ERA5 数据提供每天 24 个格林威治 (Coordinated Universal Time, UTC) 时刻的大气、陆地和海洋气候参数, 并用 37 层数据解析从地球表面到 80 km 高度大气层, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (<https://www.ecmwf.int>)。根据海洋微波辐射传输模型的输入要求, 从 ERA5 数据中选取了 3 种单层数据: SST、海拔 10 m 处的海表风速 (Wind

Speed, WS)和风向(Wind Direction, WD);3种37层数据:位势高度廓线(Geopotential)、大气温度(Temperature)廓线和大气相对湿度(Relative Humidity, RH)廓线参数。

由于DD方法需要GMI与FY-3C MWRI时空匹配区域的观测亮温数据和模拟亮温数据,为了获取满足要求且足够数量的匹配点,需要进行如下数据处理:

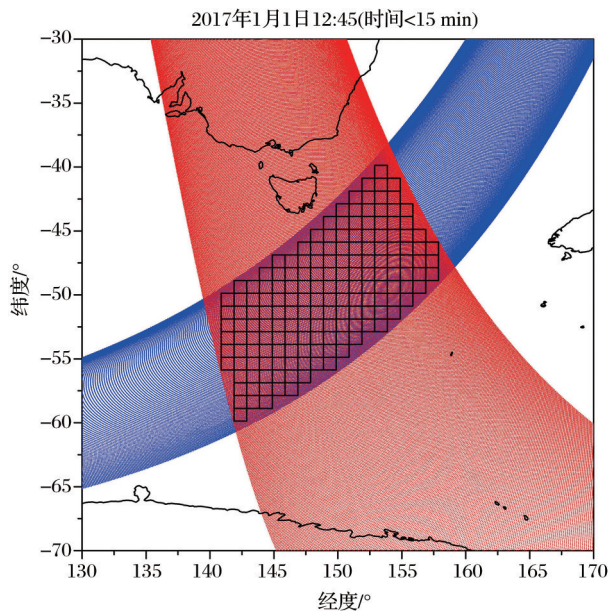
(1)数据重采样。将FY-3C MWRI和GMI卫星数据(主要包括亮温、EIA和RAA)、ERA5参数分别重采样至经纬度分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的标准网格空间。由于DD方法一般采用较大的时间匹配窗口(典型值为30~60 min),因此只采用0、3、6、9、12、15、18和21点8个UTC时刻的ERA5数据。

(2)晴空判别。虽然ERA5的总云覆盖率(Total Cloud Cover, TCC)数据可用于晴空的判别,但是如果用TCC等于零去判别晴空,只有极少数格网点满足晴空要求。因此,采用RH廓线重新判别晴空:对于一个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格网点,如果组成这个格网点的16个原始ERA5格网点($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)的所有层的相对湿度小于95%,则标记这个 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的格网点为晴空,否则标记为有云。

(3)数据匹配。为了获取足够数量且时空分布均匀的匹配点,实验选取如下匹配条件:①离陆地至少50公里的晴空海面;②SST大于275.0 K;③FY-3C MWRI和GMI观测时间绝对差小于60 min,且两个传感器观测与同一时刻的ERA5数据在时间上最邻近。

根据上述匹配条件,逐格网点搜索,收集FY-3C MWRI、GMI和ERA5之间的时空匹配点。图1显示的是2017年1月1日在澳大利亚东南洋面上的FY-3C MWRI与GMI之间的重叠区域,黑色格网为满足匹配条件的格网点。在匹配的基础上,用海洋微波辐射传输模型与ERA5数据和传感器参数相结合分别计算FY-3C MWRI和GMI的模拟亮温。

图2给出了数据处理的流程图,主要由3部分组成。第一部分是数据重采样。将GMIL1C数据、FY-3C MWRI L1数据以及ERA5数据重采样至经纬度分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的标准网格中,然后对这三者进行时空匹配。第二部分是使用海洋微波辐射传输模型结合ERA5数据计算FY-3C MWRI和GMI大气顶模拟亮温。第三部分是利用DD方法进行交叉辐射定标,得到FY-3C MWRI的在轨交叉辐射定



(GMI:蓝色;MWRI:红色;时间:2017年1月1日12:45)

图1 FY-3C MWRI观测与GMI观测时空匹配图

Fig.1 An overpass between FY-3C MWRI and GMI observations

标系数,进而生成再定标后的FY-3C MWRI数据。

4 结果与讨论

根据上述数据匹配条件,得到了2017年全年GMI与MWRIA、GMI与MWRID的匹配点分别有70 156和57 577个。如图3所示,匹配点主要分布在印度洋、太平洋和大西洋纬度 $\pm 65^{\circ}$ 之间,中纬度地区的匹配点多于热带地区。在高纬度地区,例如北冰洋,匹配点较少或没有,主要是由于GMI的低轨道倾角、较低的海表温度以及冰的存在。

为了展示交叉辐射定标的过程,以2017年1月份为例进行说明。在2017年1月,分别获得了7 401个和6 278个GMI与MWRIA和MWRID的匹配点。根据这些匹配点的观测值和模拟值计算OTD和STD,进而计算DD和FY-3C MWRI的理论观测值。以FY-3C MWRI实际观测值为 x 轴,FY-3C MWRI的理论观测值和DD值分别为 y 轴,图4绘制了FY-3C MWRI理论观测值和DD值随FY-3C MWRI实际观测值变化的散点图,红色表示升轨,黑色表示降轨。FY-3C MWRI的理论观测值与实际观测值之间的相关性非常好。当FY-3C MWRI实际观测值从动态范围的最小值变化至最大值时,DD值呈现出单调变化,对于10V/H、18V/H、23V、36V/H和89V/H通道,升轨DD平均值的变化范围分别为 $[-6.7, -6.4]$ K, $[-8.7, -9.0]$ K, $[-3.9, -2.0]$ K、

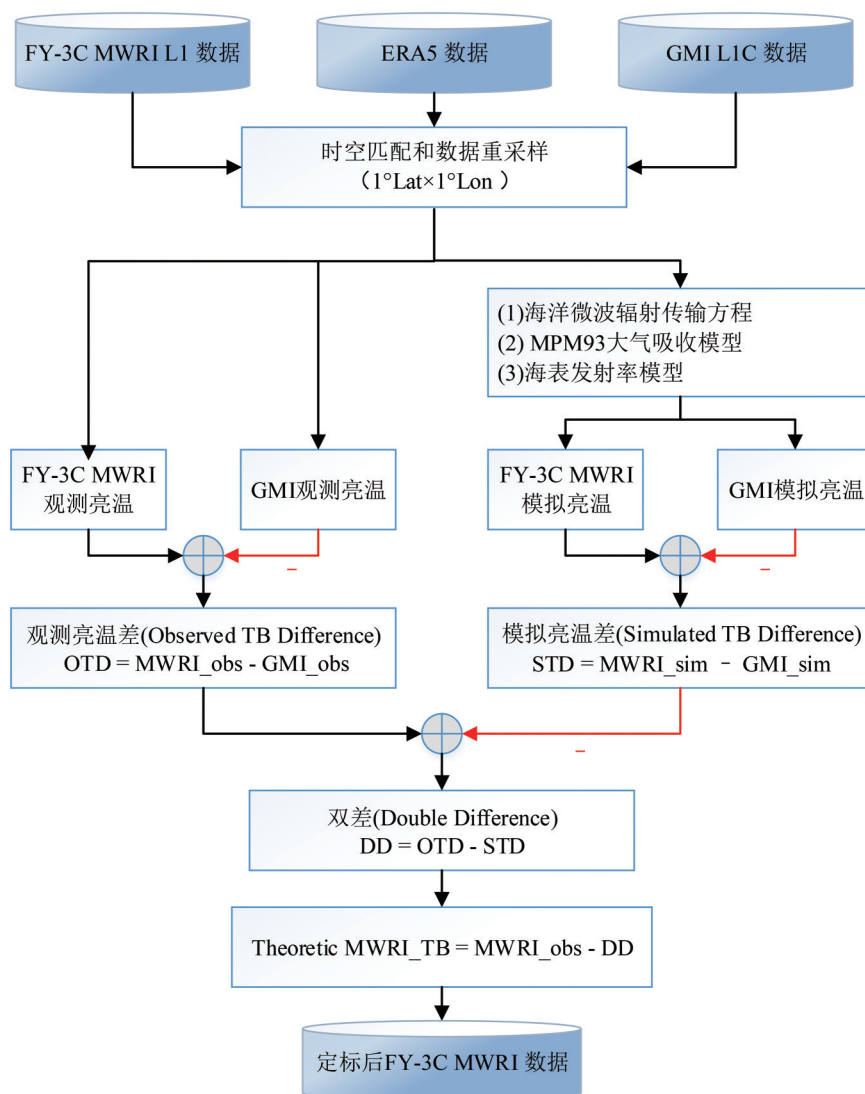


图2 FY-3C MWRI在轨交叉辐射定标流程图

Fig.2 Chart-flow of FY-3C MWRI in-orbit calibration

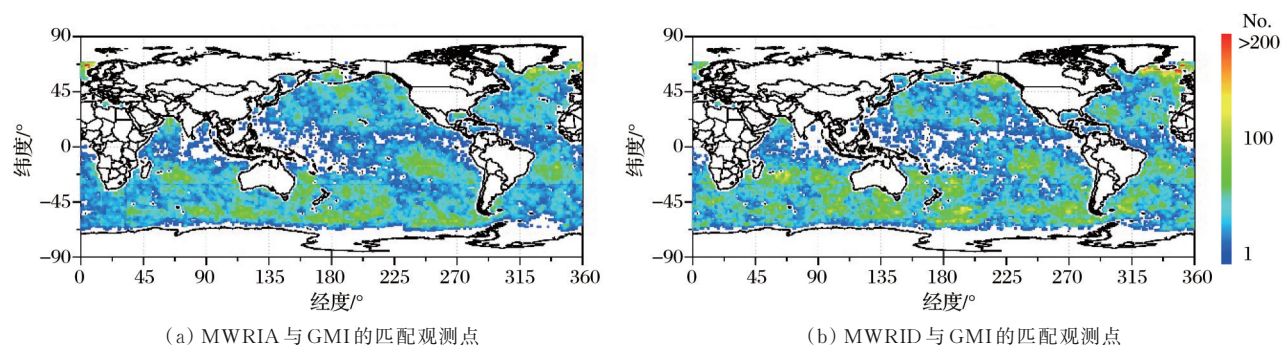


图3 FY-3C MWRI与GMI的匹配观测的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of matching observations between FY-3C MWRI and GMI

$[-2.4, -1.3]$ K、 $[-3.2, 1.0]$ K、 $[-4.1, -3.2]$ K、 $[-2.7, -2.3]$ K、 $[-1.3, -0.6]$ K、 $[-0.7, -0.3]$ K,而降轨DD平均值的变化范围分别为 $[-8.9, -7.5]$ K、 $[-9.9, -8.9]$ K、 $[-4.7, -3.2]$ K、 $[-2.9, -2.4]$ K、 $[-3.8, -2.4]$ K、

$[-5.1, -4.4]$ K、 $[-2.7, -2.6]$ K、 $[-2.3, -2.4]$ K、 $[-1.0, -1.8]$ K。总的来说, FY-3C MWRI观测值被低估,特别是10V/H两个低频通道;随着频率变大,定标偏差逐渐缩小。MWRIA的定标偏差比MWRID小

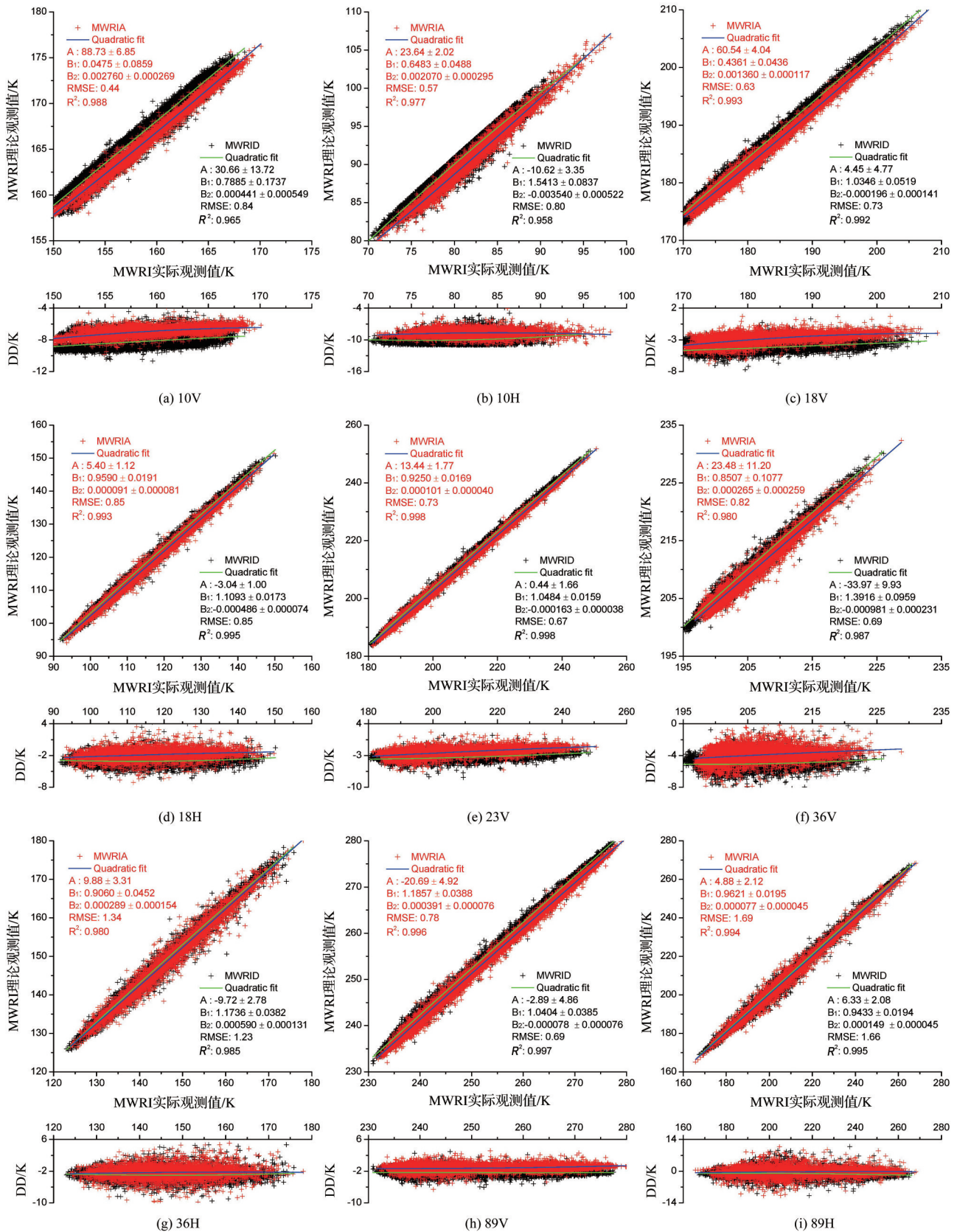


图 4 FY-3C MWRI理论观测值和DD值随实际观测值变化的散点图及回归分析结果

Fig.4 Scatter plots of theoretical observations and DDs varying with actual observations in FY-3C MWRI channels, and the regression analysis results

1.0~2.0 K。

进一步观察发现,理论观测值和实际观测值存在一定的二次函数关系。因此,用公式(12)的二次

函数进行回归分析是合理的。回归分析结果列举在表3中。大多数通道的拟合均方根误差小于1.0 K,决定系数(R^2)大于0.97。

表3 FY-3C MWRI 交叉辐射定标结果(2017年1月)

Table 3 Intercalibration results of FY-3C MWRI (January 2017)

仪器	名称	A_i	$B_{1,i}$	$B_{2,i}$	RMSE/K	R^2
MWRIA	10V	88.73 ± 6.85	$0.047\ 5 \pm 0.085\ 9$	$0.002\ 760 \pm 0.000\ 269$	0.44	0.988
	10H	23.64 ± 2.02	$0.648\ 3 \pm 0.048\ 8$	$0.002\ 070 \pm 0.000\ 295$	0.57	0.977
	18V	60.54 ± 4.04	$0.436\ 1 \pm 0.043\ 6$	$0.001\ 360 \pm 0.000\ 117$	0.63	0.993
	18H	5.40 ± 1.12	$0.959\ 0 \pm 0.019\ 1$	$0.000\ 091 \pm 0.000\ 081$	0.85	0.993
	23V	13.44 ± 1.77	$0.925\ 0 \pm 0.016\ 9$	$0.000\ 101 \pm 0.000\ 040$	0.73	0.998
	36V	163.48 ± 11.20	$-0.494\ 8 \pm 0.107\ 7$	$0.003\ 490 \pm 0.000\ 259$	0.81	0.980
	36H	9.88 ± 3.31	$0.906\ 0 \pm 0.045\ 2$	$0.000\ 289 \pm 0.000\ 154$	1.34	0.980
	89V	-20.69 ± 4.92	$1.185\ 7 \pm 0.038\ 8$	$0.000\ 391 \pm 0.000\ 076$	0.78	0.996
	89H	4.88 ± 2.12	$0.962\ 1 \pm 0.019\ 5$	$0.000\ 077 \pm 0.000\ 045$	1.69	0.994
MWRID	10V	30.66 ± 13.72	$0.788\ 5 \pm 0.173\ 7$	$0.000\ 441 \pm 0.000\ 549$	0.84	0.965
	10H	-10.62 ± 3.35	$1.541\ 3 \pm 0.083\ 7$	$-0.003\ 540 \pm 0.000\ 522$	0.80	0.958
	18V	4.45 ± 4.77	$1.034\ 6 \pm 0.051\ 9$	$-0.000\ 196 \pm 0.000\ 141$	0.73	0.992
	18H	-3.04 ± 1.00	$1.109\ 3 \pm 0.017\ 3$	$0.000\ 486 \pm 0.000\ 074$	0.85	0.995
	23V	0.44 ± 1.66	$1.048\ 4 \pm 0.015\ 9$	$-1.633\ 333 \pm 0.000\ 038$	0.67	0.998
	36V	-33.97 ± 9.93	$1.391\ 6 \pm 0.095\ 9$	$-0.000\ 981 \pm 0.000\ 231$	0.69	0.987
	36H	-9.72 ± 2.78	$1.173\ 6 \pm 0.038\ 2$	$0.000\ 590 \pm 0.000\ 131$	1.23	0.985
	89V	-2.89 ± 4.86	$1.040\ 4 \pm 0.038\ 5$	$-0.000\ 078 \pm 0.000\ 076$	0.69	0.997
	89H	6.33 ± 2.08	$0.943\ 3 \pm 0.019\ 4$	$0.000\ 149 \pm 0.000\ 045$	1.66	0.995

为了进一步理解在轨辐射定标误差,计算出FY-3C MWRI在全球天基交叉辐射定标系统(Global Space-based Inter-Calibration System, GSICS)所定义的标准场景亮温下的辐射定标误差。标准场景定义为1976美国标准大气模式(US1976)、夜间、晴空、SST为288.15 K和风速为7 m/s。使用海洋微波辐射传输模型计算出FY-3C MWRI 10V/H、18V/H、23V、36V/H和89V/H通道的标准场景亮温,分别是163.5 K、86.5 K、181.5 K、110.2 K、202.9 K、206.1 K、139.9 K、247.2 K、201.5 K。表4给出了FY-3C MWRI各个通道在标准场景亮温下的辐射定标误差(偏差±标准差)。对于这9个通道,MWRIA的在轨辐射定标误差分别为 -6.7 ± 0.3 K、 -8.7 ± 0.7 K、 -2.9 ± 0.7 K、 -2.0 ± 0.8 K、 -2.4 ± 0.7 K、 -4.0 ± 0.8 K、 -2.4 ± 1.4 K、 -1.3 ± 1.0 K和 -0.4 ± 1.8 K;而MWRID的在轨辐射定标误差分别为 -7.9 ± 0.7 K、 -9.7 ± 0.9 K、 -4.3 ± 0.9 K、 -3.0 ± 0.8 K、 -3.5 ± 0.9 K、 -5.1 ± 0.8 K、 -3.0 ± 1.1 K、 -2.4 ± 0.6 K和 -1.0 ± 2.1 K。

同时也处理和分析了2017年其他月份的数据,其结果与1月份基本一致。

表4 标准场景亮温下FY-3C MWRI辐射定标偏差

Table 4 Calibration biases at the brightness temperatures of standard scene

序号	名称	标准场景 亮温/K	MWRIA 定标偏差/K	MWRID 定标偏差/K
1	10V	163.5	-6.7 ± 0.3	-7.9 ± 0.7
2	10H	86.5	-8.7 ± 0.7	-9.7 ± 0.9
3	18V	181.5	-2.9 ± 0.7	-4.3 ± 0.9
4	18H	110.2	-2.0 ± 0.8	-3.0 ± 0.8
5	23V	202.9	-2.4 ± 0.7	-3.5 ± 0.9
6	36V	206.1	-4.0 ± 0.8	-5.1 ± 0.8
7	36H	139.9	-2.4 ± 1.4	-3.0 ± 1.1
8	89V	247.2	-1.3 ± 1.0	-2.4 ± 0.6
9	89H	201.5	-0.4 ± 1.8	-1.0 ± 2.1

5 结 语

本文基于海洋微波辐射传输模型,以GMI为交叉辐射的参考传感器,采用DD方法对FY-3C MWRI开展了在轨交叉辐射定标。结果显示,相对于GMI,FY-3C MWRI的观测值被低估,特别是低频通道;但随着频率的增大,定标误差逐渐缩小。FY-3C MWRI升轨的定标误差比降轨小1.0~2.0 K。在GSICS所定义的标准场景亮温下,对于10V/H、

18V/H、23V、36V/H 和 89V/H 共 9 个通道, MWRIA 的在轨辐射定标误差分别为 -6.7 ± 0.3 K、 -8.7 ± 0.7 K、 -2.9 ± 0.7 K、 -2.0 ± 0.8 K、 -2.4 ± 0.7 K、 -4.0 ± 0.8 K、 -2.4 ± 1.4 K、 -1.3 ± 1.0 K 和 -0.4 ± 1.8 K; 而 MWRID 的在轨辐射定标误差分别为 -7.9 ± 0.7 K、 -9.7 ± 0.9 K、 -4.3 ± 0.9 K、 -3.0 ± 0.8 K、 -3.5 ± 0.9 K、 -5.1 ± 0.8 K、 -3.0 ± 1.1 K、 -2.4 ± 0.6 K 和 -1.0 ± 2.1 K。

实验仅采用了冷场(晴空海洋)进行交叉辐射定标分析,下一步工作将考虑采用暖场(例如热带森林)来进一步完善 FY-3C MWRI 的在轨交叉辐射定标。

参考文献(References):

- [1] Tang F, Zou X, Yang H, *et al.* Estimation and Correction of Geolocation Errors in FengYun-3C Microwave Radiation Imager Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1): 407-420.
- [2] Wu S, Chen J. Instrument Performance and Cross Calibration of FY-3C MWRI[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 10-15 July 2016: 388-391.
- [3] Berg W, Bilanow S, Chen R, *et al.* Intercalibration of the GPM Microwave Radiometer Constellation[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, 33(12): 2639-2654.
- [4] Newell D, Draper D, Remund Q, *et al.* GPM Microwave Imager (GMI) On-orbit Performance and Calibration Results [C]// Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 26-31 July 2015: 5158-5161.
- [5] Draper D, Newell D. Global Precipitation Measurement Microwave Imager (GMI) On-orbit Calibration[C]// Proceedings of 14th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), 11-14, April, 2016: 166-169.
- [6] Butler J, Barnes R A. Calibration Strategy for the Earth Observing System (EOS)-AM1 Platform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1056-1061.
- [7] Chander G, Hewison T J, Fox N, *et al.* Overview of Intercalibration of Satellite Instruments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1056-1080.
- [8] Doelling D R, Minnis P, Nguyen L. Calibration Comparisons between SEVIRI, MODIS and GOES Data [C]// Proceedings of Second MSG-RAO Workshop, 9-10 September 2004: 149-154.
- [9] Cao C, Weng F, Goldberg M, *et al.* Intersatellite Calibration of Polar-orbiting Radiometers Using the SNO/SCO Method [C]// Proceedings of 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 25-29, July, 2005: 109-112.
- [10] Jiang G M, Li Z L. Cross-calibration of MSG1-SEVIRI Infrared Channels with Terra-MODIS Channels[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(30): 753-769.
- [11] Jiang G M, Yan H, Ma L L. Intercalibration of SIVISR/FY-2C Infrared Channels Against MODIS/Terra and AIRS/Aqua Channels[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(5): 1548-1558.
- [12] Jiang G M. Intercalibration of Infrared Channels of Polar-orbiting IRAS/FY-3A with AIRS/aqua Data[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3558-3363.
- [13] Jiang G M, Wang Z Y, Wang J. Intercalibration of VIRR/FY-3A/B Split-window Channels with AIRS/Aqua and IASI/Metop-A Measurements [J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(22): 5249-5269.
- [14] Jiang G M, Li S, Wang Z Y. Intercalibration of IRAS/FY-3B Infrared Channels with IASI/Metop-A 1C Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 99(7): 2510-2517.
- [15] Li W X, Jiang G M, Li G, Li C. Intercalibration of Advanced Himawari Imager's Infrared Channels with IASI/Metop-B 1C Data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(6): 1989-1996.
- [16] Yang J X, McKague D S. Improving Collocation-based Scan-dependent Intercalibration over the Ocean for Spaceborne Radiometry[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13: 589-593.
- [17] Biswas S K, Santos Garcia A, Jones W L. Intercalibration of the Microwave Radiometer Brightness Temperature for the Global Precipitation Measurement Mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51: 1465-1477.
- [18] Sapiaro M, Berg W, McKague D, Kummerow C. Towards an Intercalibrated Fundamental Climate Data Record of the SSM/I Sensors [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51: 1492-1503.
- [19] Wentz F J, Meissner T. AMSR Ocean Algorithm, Version 2 [R]. Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 121599A-1, 2000.
- [20] Liebe H J. An Updated Model for Millimeter Wave Propagation in Moist Air[J]. Radio Science, 1985, 20(5): 1069-1089.
- [21] Liebe H J. MPM - An Atmospheric Millimeter-wave Propagation Model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, 10(6): 631-650.
- [22] Liebe H J, Hufford G A, Cotton M G. Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies Below 1000 GHz[C]// Proceedings of AGARD Conference, 1993, 542: 3.1-3.10.
- [23] Waters J R. Absorption and Emission by Atmospheric Gases [M]. Methods in Experimental Physics, vol. 12B, Edited by Meeks M L, chap. 2.3, Academic, Orlando, 1976.
- [24] Rosenkranz P W. Water Vapor Microwave Continuum Ab-

- sorption: A Comparison of Measurements and Models[J]. *Radio Science*, 1998, 33(4): 919-928.
- [25] Wu S T, Fung A K. A Non-coherent Model for Microwave Emission and Backscattering from the Sea Surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77: 5917-5929.
- [26] Wentz F J. A Two-scale Scattering Model for Foam-free Sea Microwave Brightness Temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(24): 3441-3446.
- [27] Yueh S H. Modeling of Wind Direction Signals in Polarimetric Sea Surface Brightness Temperatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(6): 1400-1418.
- [28] Germain K S, Poe G, Gaiser P. Modeling of Polarimetric Microwave Signal Due to Ocean Surface Wind Vector[C]// *Proceedings of 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6-10 July, 1998: 2304-2306.
- [29] Johnson J. An Efficient Two-scale Model for the Computation of Thermal Emission and Atmospheric Reflection from the Sea Surface[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(3): 560-568.
- [30] Meissner T, Wentz F. The Emissivity of the Ocean Surface between 6~90 GHz over a Large Range of Wind Speeds and Earth Incidence Angles[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3004-3026.

Intercalibration of the Microwave Radiation Imager on Fengyun 3C

Zeng Ziqian, Jiang Gengming

(Key Laboratory of Information Science for Electromagnetic Waves, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Accurate radiometric calibration is the fundamental of quantitative remote sensing. In this work, the Microwave Radiation Imager (MWRI) on the Chinese meteorological satellite Fengyun 3C (FY-3C) is intercalibrated against the Microwave Imager on the Global Precipitation Measurement (GMI) using the double difference method. First, the FY-3C MWRI data, GMI data and the fifth edition of the European Centre for Medium-Range Weather Forecast Re-Analysis (ERA5) data are resampled into a $1^\circ \times 1^\circ$ regular grid space. Then, matching observations are collected according to matching criteria, and simulations in both FY-3C MWRI and GMI channels at top-of-atmosphere are calculated using the ocean microwave radiative transfer model. Next, the double differences and theoretic observations in FY-3C MWRI channels are computed. Finally, the intercalibration coefficients are determined, and the FY-3C MWRI data are re-calibrated. The results show that, against GMI, the observations in FY-3C MWRI channels are underestimated, especially for the low frequency channels, and the calibration bias decreases with the frequency increment. The calibration biases of FY-3C MWRI ascending (MWRIA) data are 1.0 K~2.0 K lower than that of FY-3C MWRI descending (MWRID) data. At the standard scene brightness temperatures defined by the Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS), in 10V/H, 18V/H, 23V, 36V/H and 89V/H channels, the calibration errors of MWRIA are -6.7 ± 0.3 K, -8.7 ± 0.7 K, -2.9 ± 0.7 K, -2.0 ± 0.8 K, -2.4 ± 0.7 K, -4.0 ± 0.8 K, -2.4 ± 1.4 K, -1.3 ± 1.0 K and -0.4 ± 1.8 K, respectively; the calibration errors of MWRID are 7.9 ± 0.7 K, -9.7 ± 0.9 K, -4.3 ± 0.9 K, -3.0 ± 0.8 K, -3.5 ± 0.9 K, -5.1 ± 0.8 K, -3.0 ± 1.1 K, -2.4 ± 0.6 K and -1.0 ± 2.1 K, respectively.

Key words: Intercalibration; FY-3C MWRI; GMI; Double difference method; Ocean microwave radiative transfer model