doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.01.003

基于亚马逊热带雨林的微波辐射计定标基准分析

钱承君, 李铜基*, 黄骁麒
(国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘 要: 亚马逊热带雨林作为稳定地物目标, 适合进行星载微波辐射计的外定标。但近些年亚马逊热带雨林受人为破坏严重, 植被覆盖面积减少, 植被覆盖率降低, 适合进行外定标的区域较往年发生了变化。文中依据亚马逊热带雨林近些年的归一化植被指数(*NDVI*)的变化情况, 发现纬度位于 3° S~2° N, 经度位于 74° W~69° W 范围内的区域植被覆盖率高, 适合进行星载微波辐射计外定标。文中以 AMSR2 L1R 亮温数据为基准, 对比分析了该区域在 2015-2017 年 3 a 的亮温变化趋势, 并以此作为该区域的定标基准。分析发现, 该区域在非厄尔尼诺事件期间的亮温变化趋势呈现出特定的季节变化规律: 在每年的 6-7 月, 亮温值达到最低; 在 11 - 12 月, 亮温值达到最高, 7 - 11 月波动上升, 12 - 6 月波动下降。在厄尔尼诺事件发生期间会出现亮温值异常现象。

关键词: 微波辐射计; 外定标; 亮温; 亚马逊热带雨林; AMSR2
中图分类号: TP732.1　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-2029(2020)01-0019-06

星载微波辐射计的工作波长一般在 1.5 ~300 mm 之间, 频率在 1~200 GHz 之间。相对光学遥感器, 星载微波辐射计的波长较长, 除了降雨形式的液态水会对其观测产生影响之外, 大气分子、气溶胶、雾霾(干雾)、尘埃或云层中微小水粒不会影响其观测, 因此微波辐射计为有效的全天候遥感器[1]。星载微波辐射计获取的亮温数据, 可以用来反演海温、水汽、海表面风速等地球物理参数, 影响着全球环境数值预报系统、全球气候变化监测以及海洋学其他的相关研究[2-3]。星载微波辐射计的定标精度对定量化遥感产品的应用有着至关重要的意义。

以往的研究表明, 亚马逊热带雨林作为地球表面最大的平坦区域之一, 其覆盖区域大, 温度变化趋势以及辐射率稳定, 适合于作为定标场进行星载微波辐射计的外定标[4]。Shimada M 等[5]曾利用亚马逊热带雨林数据对 Palsar(Ⅱ)进行了定标和检验。Mo T[6-7]利用 AMSU-A 和 AMSU-B 观测得到的亚马逊热带雨林的亮温数据, 证明了亚马逊热带雨林可用于微波辐射计定标。Brown S T 等[8]建立了以亚马逊热带雨林为热定标源的定标模型。Li 等[9]以亚马逊热带雨林为高亮温地面观测目标, 进行星载辐射计交叉定标。

虽然亚马逊热带雨林是理想的外定标场, 但由于近些年亚马逊热带雨林受人为影响破坏严重, 亚马逊热带雨林的植被覆盖率降低, 导致适合于进行微波辐射计定标的区域不断改变。本文重新分析了近些年亚马逊热带雨林植被覆盖情况, 并重新选取了适合于进行星载微波辐射计外定标的目标区域。在此基础上以 AMSR2 L1R 亮温数据为基准, 分析了 2015-2017 年目标区域的月平均亮温变化趋势以及日平均亮温变化趋势, 总结变化规律, 提出了以目标区域为定标场的微波辐射计定标基准。

1 数据源

1.1 AMSR2 L1R 亮温数据

本文以日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA)发布的 AMSR2 L1R 亮温数据作为基准, 进行了亚马

收稿日期: 2019-09-02
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0504900, 2018YFB0504904)
作者简介: 钱承君(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: chengjunqian1994@163.com
通讯作者: 李铜基(1969-), 男, 研究员, 主要从事海洋水色遥感研究。E-mail: rsresearch@163.com

逊热带雨林目标场区的定标基准分析。AMSR2 搭载于 2012 年 7 月 4 日成功发射的极轨卫星 GCOM-W1 上,其天线尺寸为 2 m,刈幅宽度为 1 450 km,升交点地方时为 1:30 PM, 降交点地方时为 1:30 AM, 回访周期为 16 d[10-11]。它采用圆锥式扫描方式,工作频率为 6.93 GHz,7.3 GHz,10.65 GHz,18.7 GHz,23.8 GHz,36.5 GHz,89.0 GHz, 所有频率均对垂直极化和水平极化进行测量。表 1 列出了 AMSR2 各通道的详细参数。

表 1 AMSR2 通道特征

通道	中心频率 /GHz	极化方式	带宽 /MHz	空间分辨率 /km	灵敏度 /K
1	6.93	H/V	350	62×35	0.34
2	7.30	H/V	350	62×35	0.43
3	10.65	H/V	100	42×24	0.70
4	18.70	H/V	200	22×14	0.70
5	23.80	H/V	400	19×11	0.60
6	36.50	H/V	1 000	12×7	0.70
7	89.00	H/V	3 000	5×3	1.20

JAXA 针对 AMSR2 发布了 2 种亮温数据,L1B 亮温数据和 L1R 亮温数据[12]。L1R 数据是 L1B 数据经过重采样和质量控制的数据产品, 分辨率更高,数据质量更好。L1R 数据中包含不同空间分辨率的数据产品,为了简化起见,本文选择 L1R 数据集中与 6.93 GHz 分辨率匹配并储存的 6.93 GHz,10.65 GHz,18.7 GHz,23.8 GHz,36.5 GHz 通道(含水平极化与垂直极化)数据集进行数据质量分析。

为了确保 AMSR2 L1R 亮温数据的数据精度,在南太平洋海区(135° W~120° W,15° S~0°)范围内,以微波辐射传输模型(RTM)模拟亮温为参考值[13],对 2015-2017 年 3 a AMSR2 L1R 亮温数据进行质量分析。图 1 显示了各个通道升轨和降轨的剩余偏差以及标准差随日期变化的情况。由图可见,标准差的范围在 0.270~1.694 K 之间,相比于同类遥感器[14],标准差较小,稳定性好;模拟亮温与 AMSR2 L1R 亮温各个通道升轨与降轨的偏差和标准差随周期变化的趋势基本相同, 昼夜变化对卫星数据影响较小;各个通道的偏差波动范围小, 均在±0.5 K 以内,误差趋势稳定,可以用于分析亮马逊热带雨林目标场区的定标基准。

1.2 MOD13C2 数据

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发布的三级数据产品 MOD13C2 数据,是由搭载于 terra 卫星

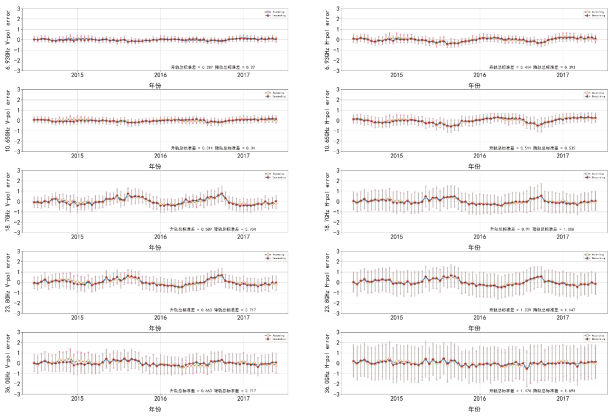

图 1 2015-2017 年 AMSR2 L1R 亮温数据与模拟亮温数据偏差时序图

的中分辨率成像光谱仪(MODIS)观测反演得到的。MOD13C2 数据是 MOD13A2 的无云空间组合,提供了月平均归一化植被指数 (*NDVI*)、环境植被指数(*EVI*)、红光波段反射率、蓝光波段反射率以及近红外波段反射率[15]。MOD13C2 数据的空间分辨率为 0.55 km,其蓝色、红色和近红外反射率分别以 469 nm、645 nm 和 858 nm 为中心,用于确认植被指数。本文选用 2013 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日的 MOD13C2 数据来进行亚马逊热带雨林微波辐射计定标场的选取与验证。

图 2 为 2013 年 1 月 1 日-2017 年 12 月 31 日,位于(3° S~2° N,74° W~69° W)范围内的 MOD13C2 *NDVI* 数据图。

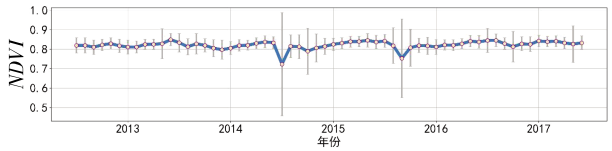

图 2 2013 2017 年 *NDVI* 时序变化曲线

从图 2 中可以发现 *NDVI* 在 2015 年 1 月及 2016 年 3 月出现异常值, 且数据的标准差波动较大, 为了进行数据质量控制, 基于 *NDVI* 的计算公式,在亚马逊热带雨林一定范围内,以红光波段反射率以及近红外波段反射率来推导相应区域的 *NDVI*,验证该区域 *NDVI* 的准确性。

图 3 为 MOD13C2 *NDVI* 与推导得到的 *NDVI* 差值的误差图。可以发现,MOD13C2 *NDVI* 数据存在异常数据,因此,本文重新基于 *NDVI* 计算公式,以近红外波段反射率和红光反射率计算相应区域的 *NDVI* 值,替换数据差值大于 0.01 的 *NDVI*,从而进行数据质量控制。

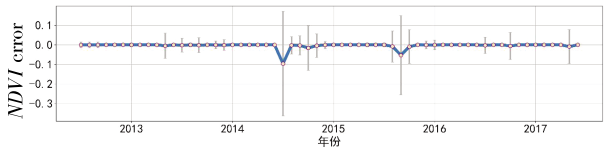

图 3　2013–2017 年 MOD13C2 *NDVI* 数据偏差时序图

图 4 为数据质量控制后的 *NDVI* 时序图，从图中可以发现,数据波动趋于稳定,没有明显异常值,标准差波动较小。

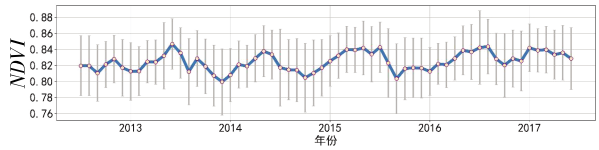

图 4　2013–2017 年 *NDVI* 时序变化曲线

2　定标区域选取

归一化植被指数可以反映植被的覆盖度,其计算公式为:

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \tag{1}$$

式中:*NIR* 为近红外波段反射率;*R* 为红光波段反射率。$-1\leqslant NDVI\leqslant 1$,当 *NDVI* 为负值时,表示地面覆盖为云、水、雪等,对可见光反射高;当 *NDVI* 为正值时,表示为有植物覆盖,当 $NDVI\geqslant 0.55$ 时表示植被覆盖茂盛。

亚马逊热带雨林区域植被分布密集,覆盖范围广，图 5 为 2017 年 1 月亚马逊热带雨林区域的月平均 *NDVI* 分布图。

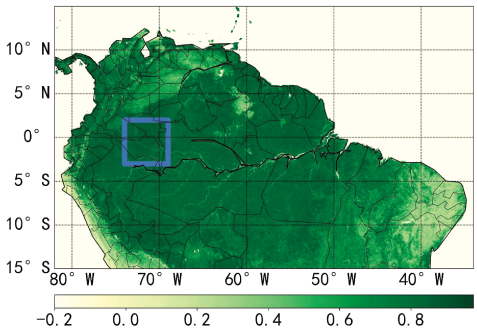

图 5　亚马逊热带雨林 *NDVI* 分布图

从图中可以看出,亚马逊热带雨林 *NDVI* 较高,植被覆盖密集，尤其位于亚马逊河两岸的区域,植被覆盖率更高。考虑到星载辐射计的天线波束宽度、扫描几何等因素,需要定标区域足够大。因此本文以 5°× 5°为网格，选取 *NDVI* 最小值大于 0.5 且平均值大于 0.8 的区域作为定标场区。根据上述条件，选取 3° S~2° N,74° W~69° W 之间区域作为定标场区，图 5 中蓝框所标记的区域即为选定区域。图 6 显示了该区域 2012 年 1 月–2017 年 12 月的 *NDVI* 均值的变化趋势。

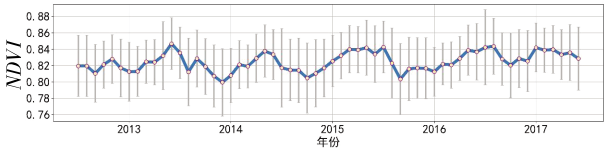

图 6　2013–2017 年 *NDVI* 时序变化曲线

由图 6 可以看出，该区域 5 a 内的 *NDVI* 均值均大于 0.8,且标准差均小于 0.05,植被覆盖密集,不存在河流以及大面积裸露土壤的干扰,存在一定的季节变化趋势,但最低不低于 0.8,季节变化趋势不会产生大量裸露土壤,不会对微波辐射计的定标产生较大影响。可能受到厄尔尼诺事件的影响,相较与其他年份，该区域 2015–2016 年的 *NDVI* 变化趋势有些许不同,其 2015 年后半年的 *NDVI* 相较其他年份增速较快，且后半年 *NDVI* 偏高,2016 上半年其 NDVI 降幅较大。

3　亮温基准分析

在确定了定标场的基础上,对 2015–2017 年 3 a 的 AMSR2 L1R 亮温数据进行了时间序列分析。本文首先分析了目标场区内 2015–2017 年 3 a 的月平均亮温变化趋势，考虑到 AMSR2 升降轨过境目标场区的时间不同,升轨过境该场区的时间约为 UTC 时间 18:00 左右,降轨过境该场区的时间约为 UTC 时间 6:00 左右,因此本文将分升降轨进行讨论。图 7~图 8 分别显示了在目标场区内 2015–2017 年 3 a 的升轨和降轨月平均变化趋势。

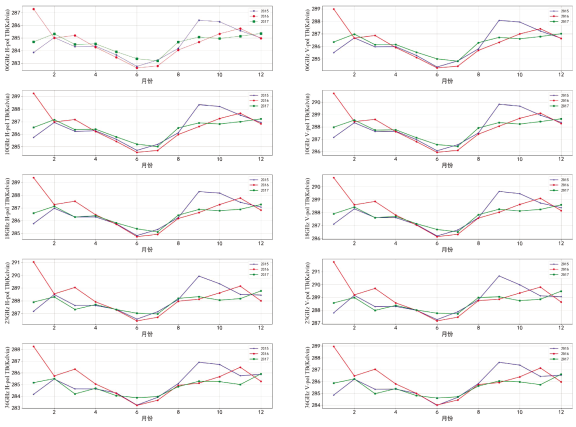

图 7　2015–2017 年升轨月平均亮温时序变化曲线

从图 7 中可以看出，在目标区域内，除了在 2015 年底以及 2016 年年初出现异常值外，在 AMSR2 升轨过境期间，其余时间各个频率以及极化方式的亮温变化趋势基本相同，亮温变化呈现出一定的变化规律：在每年的 6–7 月，亮温值达到最低；在 11–12 月，亮温值达到最高；12 月–转年 1 月期间，亮温值会出现明显的降低并回升的过程；在 1–6 月期间亮温值波动下降；7–11 月期间亮温值波动上升。考虑到观测亮温值与物体表面的实际温度呈正比关系[1]，因此该趋势与亚马逊热带雨林全年温度变化趋势相似。其频率变化以及极化方式的变化，对变化趋势影响较小。2015 年与 2016 年年初的亮温值异常可能与 2015 年发生的超强厄尔尼诺事件有关[16]，厄尔尼诺事件导致东太平洋东部的热带海洋的海水温度异常变暖，使南美太平洋沿岸的降水增多，因而对目标区域的气候造成一定影响，致使所选区域的亮温值在厄尔尼诺事件发生时产生异常，导致亮温变化趋势不同于正常的年份。

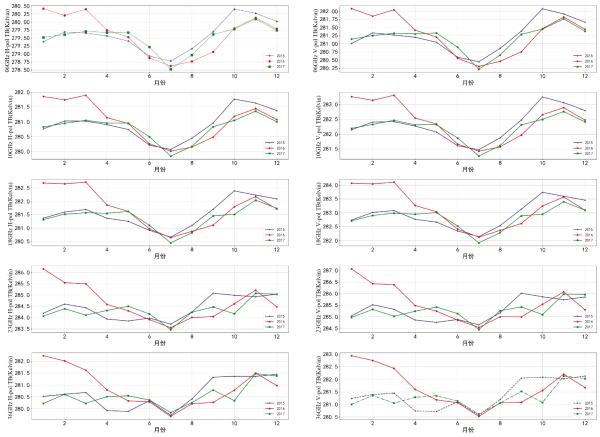

图 8　2015–2017 年降轨月平均亮温时序变化曲线

降轨过境目标区域的时间为 UTC 时间 6:00 左右，从图 8 中看出 2015 年底与 2016 年年初亮温值的出现异常升高。相较升轨过境期间，降轨过境期间的总体亮温变化趋势大致相同，极化方式对趋势影响较小，但亮温值偏低，频率变化对趋势的变化更明显。6.93 GHz，10.65 GHz，18.7 GHz 3 个频率的变化趋势基本相同，随着频率的增加，在 23.8 GHz 和 36.5 GHz，月变化大体呈相同趋势，但相较较低频率，出现较为明显的波动。

图 9 为 2015–2017 年 *NDVI* 的月平均变化时序图。虽然所选区域为植被致密覆盖区域，但考虑到植被覆盖率的不同也许会影响观测亮温，进一步分析了 *NDVI* 的月平均变化趋势与观测亮温变化趋势的异同。从图 8 中可以看出，各年的 *NDVI* 均在年末较大，在 3–5 月较低，且 *NDVI* 值出现极小或极大值的月份，对应到观测亮温并没有出现特殊值，因此，在植被致密覆盖的情况下，*NDVI* 值在 0.05 范围内波动时，对观测亮温的影响较小。

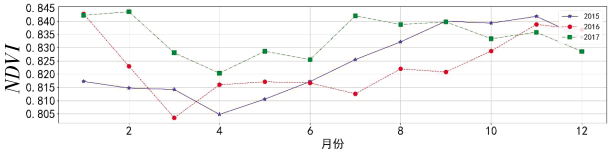

图 9　2015–2017 年月平均 *NDVI* 时序变化曲线

为了对选定区域的定标基准进行更为准确的分析，考虑到 AMSR2 3 d 可以实现地球的 99%覆盖，以 3 d 为基准，分升降轨对该区域的亮温值进行了日亮温变化趋势分析。图 10~图 11 分别显示了在选定的定标场区内 2015–2017 年 3 a 的升轨和降轨日平均变化趋势。

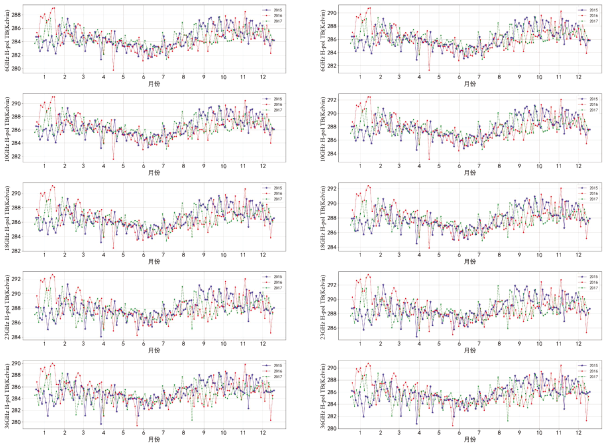

图 10　2015–2017 年升轨日平均亮温时序变化曲线

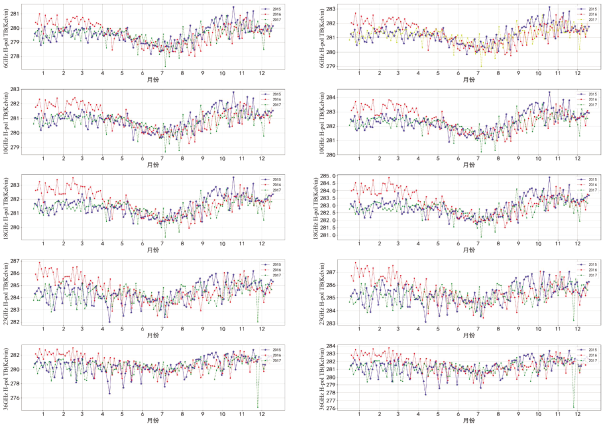

图 11　2015–2017 年降轨日平均亮温时序变化曲线

日变化趋势可以更为直观地显示出月内的亮温具体变化规律以及更为细致地展示全年的亮温变化趋势。研究发现在选定区域内，相较于升轨期

间的亮温值,降轨期间的亮温值更为集中且相对更低。排除降雨等天气因素可能产生的影响,月内的变化趋势大致相似。整体上可以发现,亮温变化趋势为:在 11-12 月期间达到峰值,6 月-7 月期间到达低谷,中间月份分别呈波动上升和波动下降的趋势。总体而言,除了可能由于降雨影响导致数据异常之外,整体上 3 a 的日变化趋势,与月平均变化趋势基本一致,同时也更直观地发现亮温的具体波动情况。

综上所述,选取范围在 3° S~2° N,74° W~69° W 之间区域作为定标场区后,通过对比在该定标场区内 AMSR2 3 a 的 L1R 亮温数据,可以给出微波辐射计在该场区内的基本定标趋势。即,在非厄尔尼诺年,亮温值应在 11-12 月达到最大值,在 12-6 月期间波动下降,在 6-7 月期间达到最低,在 7-11 月期间波动上升。在厄尔尼诺事件期间,亮温值会出现异常值。微波辐射计的观测亮温值,在该定标区域内,不满足上述趋势,则数据会有明显的误差。

4　总结与讨论

本文首先以 MOD13C2 的 *NDVI* 数据为基准,在整个亚马热带逊雨林区域选出了在 2013-2017 年期间 *NDVI* 月平均值大于 0.8,最小值大于 0.5 的植被覆盖密集区域,将(3° S~2° N, 74° W~69° W)作为定标场区。

在验证了 AMSR2 L1R 亮温数据的稳定性的基础上,以 AMSR2 L1R 亮温数据为基准,分析了在目标区域内 2015-2017 年 3 a 的月平均亮温变化趋势以及 3 d 日平均亮温变化趋势。从趋势中可以发现,在非厄尔尼诺事件期间,选定区域的亮温值在定标场区内,在 1-6 月期间亮温值波动下降,在 6-7 月期间亮温值达到最低,在 7-11 月期间亮温值波动上升,在 11-12 月期间亮温值达到最高。此规律可以作为微波辐射计在目标区域非厄尔尼诺事件期间的定标基准。在厄尔尼诺事件期间,2015 年年底以及 2016 年年初出现亮温值的异常升高,该现象可作为微波辐射计在目标区域定标的参考。

参考文献:

[1] F T 乌拉比,R K 穆尔,等. 微波遥感(第一卷). 北京:科学出版社,1987.

[2] Bell W, English S J, Candy B, et al. The assimilation of SSMIS radiances in numerical weather prediction models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 884-900.

[3] Rozoff C M, Velden C S, Kaplan J, et al. Improvements in the probabilistic prediction of tropical cyclone rapid intensification with passive microwave observations[J]. Weather and Forecasting, 2015, 30(4): 1016-1038.

[4] 杨虎, 游然, 卢乃锰, 等. 星载微波辐射计交叉定标中陆面目标辐射亮温计算模型[J]. 遥感学报, 2009 (6): 979-988.

[5] Shimada M, Tanaka H, Tadono T, et al. Calibration and validation of PALSAR (II) use of polarimetric active radar calibrator and the Amazon rainforest data [C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). IEEE, 2003, 3: 1849-1851.

[6] Mo T. A study of the NOAA 16 AMSU-A brightness temperatures observed over Amazon rain forest [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110:D23102. http://doi.org/10.1029/2005JD006434.

[7] Mo T. Diurnal variation of the AMSU-A brightness temperatures over the Amazon rainforest [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(4): 958-969.

[8] Brown S T, Ruf C S. Determination of an Amazon hot reference target for the on-orbit calibration of microwave radiometers [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(9): 1340-1352.

[9] Li R, Min Q. Dynamic response of microwave land surface properties to precipitation in Amazon rainforest [J]. Remote sensing of environment, 2013, 133: 183-192.

[10] Frank J. Wentz et al. Remote Sensing Systems. [DB/OL].[2019-07-31].http://www.remss.com/missions/amsr/.

[11] 官莉, 任心怡. 东亚陆地星载微波成像仪新增通道观测质量评估[J]. 大气科学学报, 2018, v.41;No.185(04):124-130.

[12] Team of GCOM Project. GCOM-W1 "SHIZUKU" data users handbook [EB/OL]. [2019-10-11].https://gportal.jaxa.jp/gpr/assets/mng_upload/GCOM-W/GCOM-W1_SHIZUKU_Data_Users_Handbook_EN.pdf

[13] F J Wentz, T Meissner. AMSR ocean algorithm, Version 2[EB/OL].[2019-07-31] . http://www.remss.com/papers/ amsr/AMSR_Ocean _Algorithm_Version_2.pdf.

[14] Zhao Y, Li H, Chen C, et al. Verification and recalibration of HY-2A microwave radiometer brightness temperature [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(3): 968-981.

[15] Global Space Flight Center. LAADS DAAC. [DB/OL].[2019-10-11] .https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/

[16] 袁媛, 高辉, 贾小龙, 等. 2014—2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象, 2016, 42(5): 532-539.

Analysis of the Calibration Standard of Microwave Madiometers for the Amazon Rainforest

QIAN Cheng-jun, LI Tong-ji, HUANG Xiao-qi

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, *China*

Abstract: As one of the default ground object targets, the Amazon Rainforest is suitable for the external calibration of the satellite-carried microwave radiometer. In recent years, however, the Amazon Rainforest has been seriously destroyed by human activities, with the vegetation coverage area sharply reduced and the vegetation coverage decreased. The areas suitable for external calibration have been changed compared with previous years. Based on the changes of *NDVI* in recent years for the Amazon Rainforest, it is found that the region with a latitude of 3° S~2° N and a longitude of 74° W~69° W has a high vegetation coverage, which is suitable for the external calibration of the satellite-carried microwave radiometer. Hence we choose that region is selected as the default region. Based on the data of AMSR2 L1R brightness temperature, this paper compares and analyzes the changing trend of brightness temperature from 2015 to 2017, and uses it as the benchmark for the calibration for the default region. According to the analysis, the changing trends of the brightness temperature in non-El Niño years present a specific seasonal change rule for the default region: between June and July, the bright temperature archived the lowest; between November and December, the brightness temperature archived the highest; the fluctuation increased between July and November and decreased between December and June. During the El Niño event, there is an anomaly phenomenon of the bright temperature value.

Key words: microwave radiometer; external calibration; brightness temperature; Amazon Rainforest; AMSR2