

多源遥测参数质量控制的FY-3C MWHTS 观测亮温质量评分

郭杨, 陆其峰, 卢乃锰, 谷松岩, 李小青, 漆成莉,
窦芳丽, 吴琼, 刘辉

1. 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 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心),
北京 100081;
2. 许健民气象卫星创新中心 中国气象局, 北京 100081

摘要: 微波湿温探测仪(MWHTS)是中国第二代极轨气象卫星风云三号C星(FY-3C)的主要传感器之一,其观测资料的同化受到国内外科学家的广泛关注。卫星观测资料的精度和稳定性是决定其能否被同化及同化效果好坏的关键之一,而卫星平台环境变化和星上到地面进行数据传输时的误码都会直接影响观测资料精度和稳定性,从而影响资料的同化效果。为了解决这一问题,建立了多源遥测参数质量控制模型。首先从星上直接获取的FY-3C MWHTS原始数据包出发,对解码后影响仪器性能的各类遥测参数进行长时间(5年半)序列时变特征分析,建立质量控制方案,完成了多源遥测参数质量控制技术的开发;再从仪器定标原理和观测机理出发,提取直接影响MWHTS定标精度的5个关键参数(热源黑体温度、仪器温度、热源黑体观测计数值、冷空计数值和扫描周期),利用MWHTS实际观测亮温和快速辐射传输模式RTTOV正演模拟结果(O-B)对关键参数敏感性进行分析。结果表明,扫描周期质控对O-B结果影响最大,仪器温度质控的影响最小。基于敏感性分析结果得到五个关键参数对仪器定标质量的评分准则,用百分制对FY-3C MWHTS逐通道逐扫描线逐像元观测亮温进行评分,构建了MWHTS质量评分体系来刻画仪器观测数据的定标质量以保证数据的定量应用。该质量控制模型已经用于FY-3C MWHTS业务数据处理中,逐条扫描线逐通道逐像元的评分结果也写入到仪器L1级数据中对全球实时业务发布。

关键词: 风云三号C星, MWHTS, 质量控制, 观测亮温评分, 遥测参数

中图分类号: P2

引用格式: 郭杨,陆其峰,卢乃锰,谷松岩,李小青,漆成莉,窦芳丽,吴琼,刘辉.2022.多源遥测参数质量控制的FY-3C MWHTS观测亮温质量评分.遥感学报,26(11): 2147-2161

Guo Y, Lu Q F, Lu N M, Gu S Y, Li X Q, Qi C L, Dou F L, Wu Q and Liu H. 2022. FY-3C MWHTS observed brightness temperature quality score based on the multi-source telemetry parameter quality control. National Remote Sensing Bulletin, 26(11): 2147-2161 [DOI: 10.11834/jrs.20220130]

1 引言

卫星观测资料在数值天气预报系统中的直接同化应用是天气预报质量快速提高的最重要原因之一(薛纪善, 2009; 卢乃锰和谷松岩, 2016),分析预报对各种卫星遥感资料的敏感性表明,星载微波资料的同化对数值预报精度改进的贡献显著(Kelly和Thépaut, 2007)。中国第二代极轨气

象卫星风云三号系列卫星于2008年开始发射,风云三号卫星作为全球极轨探测卫星的重要组成部分,其观测资料在全球数值天气预报和气候监测等方面发挥重要作用(Dong等, 2009; 杨军等, 2009)。中国气象局数值预报中心,英国气象局和欧洲中期天气预报中心ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)对风云三号上装载的微波温度计MWTS(MicroWave Temperature

收稿日期: 2020-06-11; 预印本: 2021-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504900, 2018YFB0504902); 国家自然科学基金(编号: 42005105, 41775020, 41975034); 气象公益性行业专项(GYHY201206002)

第一作者简介: 郭杨,研究方向为星载微波仪器定标、微波资料应用。E-mail: guoyang@cma.gov.cn

通信作者简介: 陆其峰,研究方向为气象卫星资料同化、卫星探测资料观测系统偏差诊断、订正及卫星观测系统性能优化。E-mail: luqf@cma.gov.cn

Sounder) 和微波湿度计 MWHS (MicroWave Humidity Sounder) 数据质量进行研究发现: 对于 MWTS 资料而言, 在欧洲数值天气预报和中国 GRAPES (Global-Regional Assimilation and Prediction System) 系统中同化能够取得和 AMSU-A 可比的效果, 但这需要对仪器在轨工作时频点漂移和非线性问题进行订正才能得到 (陆其峰, 2011); 而对于微波湿度观测资料来说, MWHS 观测资料同化可有效改善其它微波湿度探测资料 (如 MHS) 的真值逼近, 且利用 ECMWF 业务模式的分析场资料进行验证分析表明, 同化 MWHS 资料后十天内的天气预报得到了轻微改善。有鉴于此, FY-3B MWHS 数据已经于 2014 年 9 月 24 日在 ECMWF 业务天气预报系统中同化 (Chen 等, 2015)。

2013 年 9 月 23 日成功发射的风云三号 C 星 (FY-3C) 是风三系列的首发业务应用卫星, 其上装载的微波湿温探测仪 MWHTS (MicroWave Humidity and Temperature Sounder) 与 FY-3A/B 上的第一代 5 个通道的 MWHS 相比, 新设置了一组 118 GHz 大气温度探测通道, 同时增加了两个 183 GHz 湿度探测通道, 仪器总通道数增加到 15 个。118 GHz 作为目前国际业务卫星首次使用的大气探测频点, 尤其受到国内外学者广泛关注。118 GHz 的 8 个温度探测通道可获得高精度的大气温度廓线信息, 与 183 GHz 的 5 个大气湿度探测通道联合探测, 提高了大气参数廓线探测精度和数值预报精度 (贺秋瑞 等, 2017; Lawrence 等, 2015)。该仪器在 183 GHz 的 5 个湿度探测通道和 ATMS 上相应通道的 O-B 偏差在偏差订正后比较一致, 为 MWHTS 资料同化提供了信心 (Lawrence 等, 2018)。FY-3C MWHTS 资料已经于 2016 年 3 月 15 号在英国气象局业务同化; 4 月 4 号, 欧洲中心业务同化了该资料; 2016 年 4 月, 中国气象局数值预报中心在 GRAPES 模式中业务同化了 FY-3CMWHTS 资料。

然而, 在利用仪器观测亮温和背景场模拟亮温 (O-B) 进行长时间偏差统计时发现 FY-3B MWHS 资料存在异常极大值数据, 这种异常值是由于数据定标异常所致 (Chen 等, 2015)。虽然经过同化系统质量控制能剔除极端异常值, 但微小的定标误差会被噪声淹没从而对偏差订正产生潜在的影响。对 FY-3C MWHTS 进行长期 O-B 分析也发现, MWHTS 数据也存在由定标处理异常导致

的偏差。

本文将从 FY-3C MWHTS 定标原理和扫描观测机制出发, 基于星上直接下传的仪器源包数据, 分析源包数据解码后的各类遥测参数的时变特征, 研究数据定标过程中影响数据质量的物理机理, 建立多源遥测参数质量控制方法和观测亮温质量评分体系, 从源头对 MWHTS 资料进行质量控制, 为数据定量应用提供支撑。

2 定标原理、数据与模式

2.1 FY-3C MWHTS 辐射定标原理及观测机制

FY-3C MWHTS 辐射定标的本质是将仪器原始遥测计数值转化成微波辐射物理量的过程。仪器在轨辐射定标如式 (1)–(5) 所示 (JPL, 2000):

$$R = a_0 + a_1 C_s + a_2 C_s^2 \quad (1)$$

$$a_0 = R_w - \frac{C_w}{g} + \frac{\mu C_w C_c}{g^2} \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{1}{g} - \frac{\mu(C_w + C_c)}{g^2} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{\mu}{g^2} \quad (4)$$

$$g = \frac{C_w - C_c}{R_w - R_c} \quad (5)$$

式中, C_s 、 C_c 和 C_w 分别表示仪器观测地物目标, 宇宙冷空和内部热源黑体的电压计数值; R 、 R_c 和 R_w 分别表示仪器对地观测, 对宇宙冷空和内部热源黑体观测的辐射量; μ 是由仪器温度决定的仪器非线性订正系数 (JPL, 2000), 该系数通过发射前仪器地面热真空试验确定; a_0 、 a_1 和 a_2 分别是定标公式的常数项、一次项系数和二次项系数; g 是增益。

FY-3C MWHTS 在每条扫描线上都能实现在轨实时定标。其一个扫描周期用时 8/3 s, 在每个扫描周期中, MWHTS 对内部热源黑体进行 3 次匀速采样, 然后加速运行到冷空观测的起始位置, 开始对宇宙背景进行 3 次匀速采样, 接着再加速运行到对地观测起始位置, 匀速获取 98 个地球目标观测, 最后扫描镜加速运行到热源观测起始位置进行下一个扫描周期的观测 (Gu 等, 2012; 谷松岩 等, 2010; 郭杨 等, 2015)。

从 MWHTS 定标原理和扫描机制可以看出, 参与定标计算的基础参数的质量直接对定标精度有

决定性作用,而仪器采样的准确性决定了基础参数获取的正确性。因此,对这些基础参数进行质量控制可以在定标源头保证MWHTS资料质量。

2.2 FY-3C MWHTS数据

卫星向地面应用系统传输的原始数据包中包含的遥测数据和科学数据种类丰富。对于FY-3C MWHTS而言,原始数据包中包含的遥测参数有近百个。本文所用数据是从2014年1月1日—2019年5月31日5年半时间内MWHTS的数据。

遥测参数中对MWHTS定标精度和观测稳定性有影响的参数有14个,可分成两类:第一类是直接参与定标计算的关键参数,包括:仪器冷空观测计数值、内部热源黑体观测计数值、内部热源黑体温度和仪器温度;第二类是和仪器工作及扫描特性相关的参数,包括:部件温度、观测角度和扫描周期。参数的名称和物理意义如表1所示。

表1 FY-3C MWHTS 遥测参数列表
Table 1 Parameters of FY-3C MWHTS telemetry parameter

序号	参数名	物理意义
1	仪器温度	PRT测得的仪器温度
2	黑体温度	PRT测得的内部热源黑体温度
3	黑体观测计数值	仪器观测热源黑体时的计数值
4	冷空观测计数值	仪器观测冷空时的计数值
5	黑体观测角	仪器观测黑体时的扫描角
6	冷空观测角	仪器观测冷空时的扫描角
7	数控单元温度	数控单元温度
8	电源单元温度	电源单元温度
9	马达温度1	电机温度
10	天线罩温度1	天线罩温度
11	射频前端温度	前端温度
12	扫描周期	表征仪器一个扫描周期所用时间
13	对地观测起始角	仪器对地扫描的第1个像元观测角
14	对地观测终止角	仪器对地扫描的第98个像元观测角

2.3 辐射传输模式RTTOV

本研究中所用的辐射传输模式是RTTOV (Radiative Transfer for TOVS),该模式是一个可以模拟卫星仪器天底被动可见光、红外和微波观测的快速辐射传输计算模型。该模型最早由欧洲中期天气预报中心针对TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder)观测模拟,目前可以进行包括ATMS、IASI、CrIS等90多种卫星气象探测仪器的

观测模拟。除了正向大气辐射传输计算外,RTTOV还可以计算切线线性矩阵、伴随矩阵和雅可比矩阵(即假设给定大气状态的大气定辐射量对温度、湿度廓线等大气状态参量的线性变化关系)(Matricardi, 2010; Matricardi等, 2018; Saunders等, 2018)。基于该模型可以进行卫星遥感产品的物理反演算法开发、数值天气预报中卫星观测资料的直接辐射同化以及未来卫星探测仪器参数设置的模拟等研究(孟翔晨等, 2018; 杨以坤等, 2019; 张森等, 2019),目前已广泛用于欧洲、英国、日本、中国等多家气象预报中心的卫星资料业务同化运行。

在得到大气吸收透射率的基础上,RTTOV可以进行晴空(不考虑大气粒子散射效应)条件的快速辐射传输计算,微波波段模拟精度优于0.05 K,红外波段基本控制在0.1 K以内(Saunders等, 2018)。

3 数据结果处理与分析

3.1 遥测参数长时间序列时变性分析

FY-3C MWHTS内部热源黑体温度和仪器温度在2014年—2019年5年半时间内的变化趋势如图1所示,其中蓝色点表示89 GHz和118 GHz对应的黑体温度,绿色点表示150 GHz和183 GHz对应的黑体温度。总体来看,MWHTS内部热源黑体温度和仪器温度的变化范围为277—287 K,两组频点的温度变化趋势一致。MWHTS没有温度控制装置,因此仪器各个测温单元采集的温度直接受卫星平台热力变化影响。内部热源黑体温度2014年稳定在285 K附近,2015年3月2—19日由于微波温度计交替开关机影响平台环境温度使得热源温度下降,2015年5月31日—7月11日受平台供电影响仪器关机,2015年7月12日MWHTS重开机以后热源温度下降,到2015年9月份受FY3C其他仪器开机影响,温度有所变化;2016年下半年到2019年,热源温度就在282 K附近起伏变化。仪器温度的变化趋势和热源温度一致。同时,可以从图1中发现一两个离群的温度点。由式(5)可知,热源温度转换的辐射量直接参与定标计算,仪器温度决定非线性定标系数的取值,这两个温度出现异常,直接导致定标偏差变大,因此应该对异常数据进行标识和剔除,保证MWHTS数据质量。

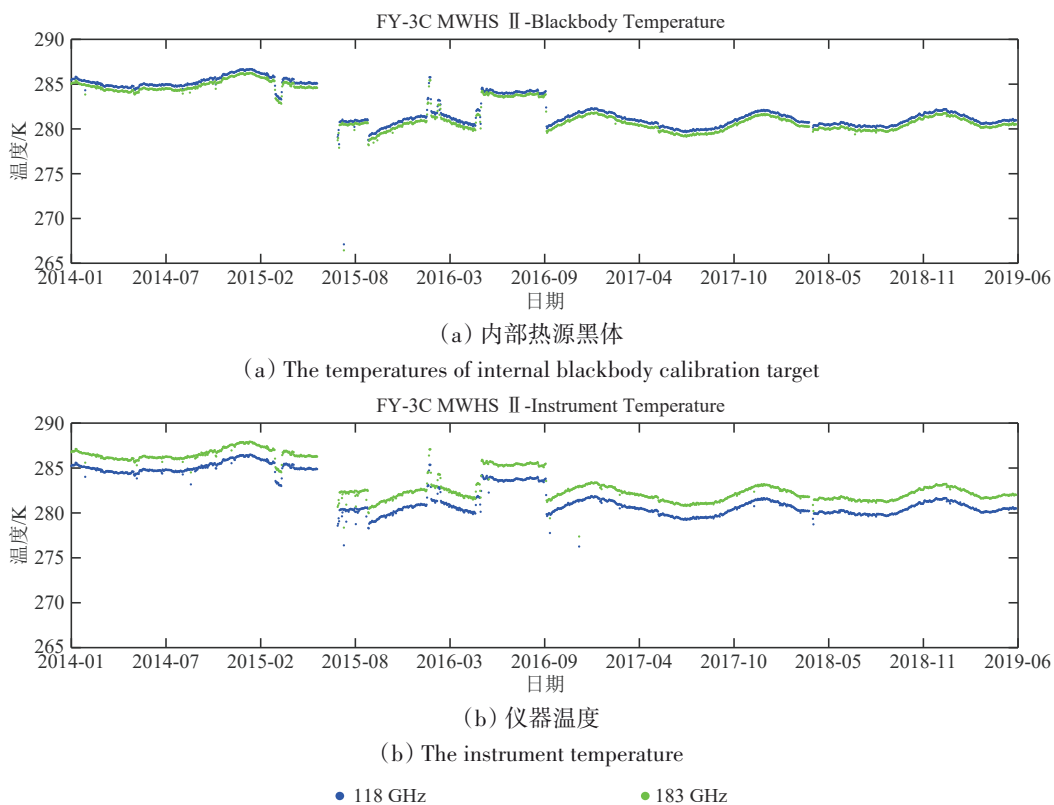
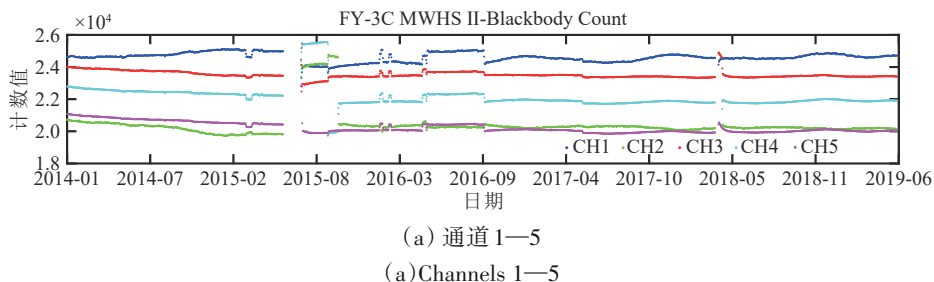


图1 2014年1月1日—2019年5月31日MWHTS内部热源黑体温度和仪器温度
Fig. 1 Temperatures of internal blackbody calibration target and instrument of MWHTS during the period of January 1, 2014 to May 31, 2019

FY-3C MWHTS的15个通道对内部热源黑体和宇宙冷空的观测计数值的长期变化曲线分别如图2和图3所示。MWHTS的15个通道每5个一组分别在各自图中的(a)、(b)和(c)上用不同颜色的点表示。结合图1(a)可以看出,仪器热源黑体观测计数值随黑体温度的改变而产生变化,相应的冷空计数值也发生改变,说明了MWHTS接收机对目标温度的响应比较一致,这也是MWHTS这类全光路定标仪器的一大优势。需要指出的是,仪器观测计数值的大小除了与目标温度有关之外,也受自动增益调整(AGC)的影响。AGC决定了输出电压的放大倍数,从而决定仪器观测输出大

小。从定标式(1)–(5)可知,黑体和冷空观测计数值直接决定了定标亮温,而长时间序列图中存在计数值发生跳变的点,对这些数据进行质量控制和标识,可以去除由于计数值异常导致定标偏差增大的亮温数据,对保证MWHTS定标精度有直接作用。

仪器部件(数控单元、电源单元、电机、天线罩、前端和中频)的温度对MWHTS观测过程中仪器各部分工作温度也会有指示作用。MWHTS在固定位置分别对热源、冷空和地球目标进行观测,仪器记录的观测角度能够表征扫描状态是否正常。



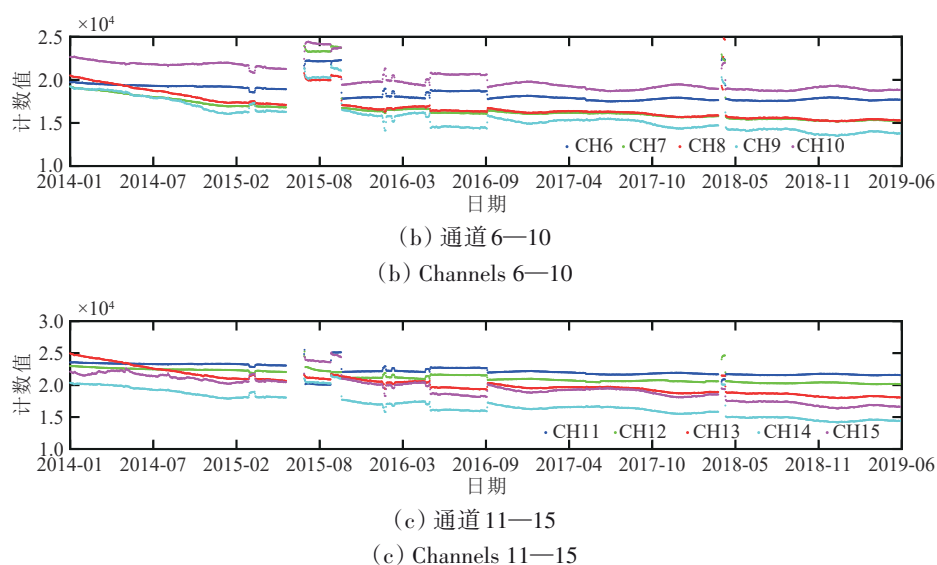


图2 2014年1月1日—2019年5月31日MWHTS的15个通道内部热源黑体观测计数值

Fig. 2 The internal blackbody calibration target counts of MWHTS channels during the period of January 1, 2014 to May 31, 2019

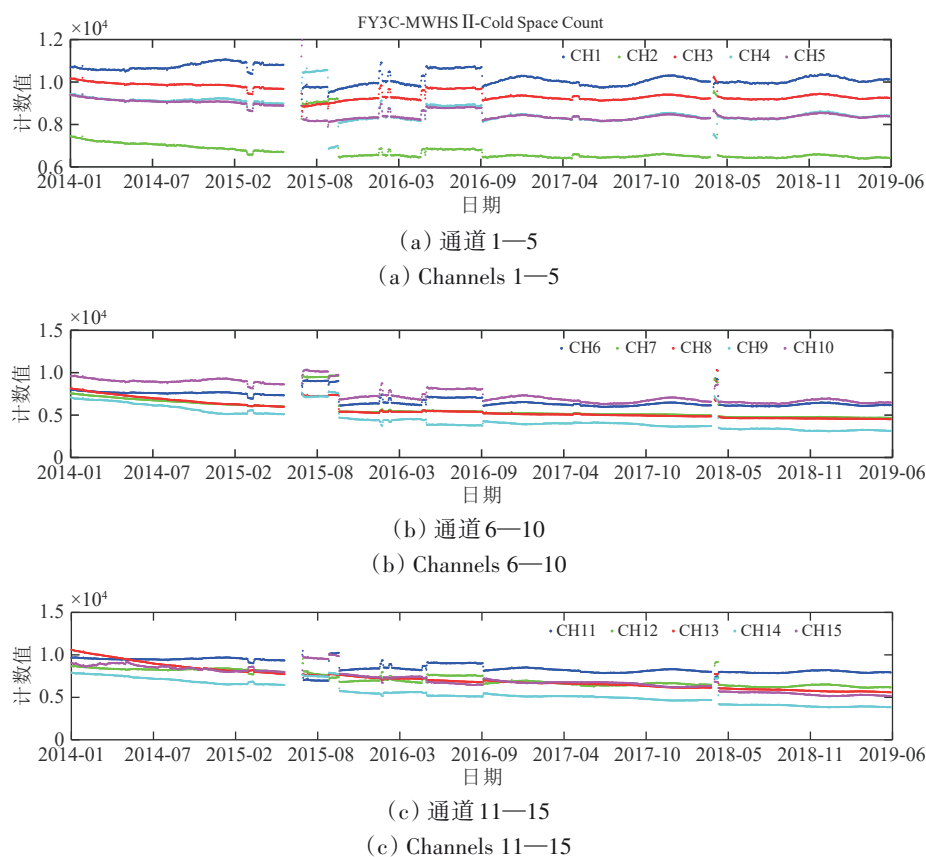


图3 2014年1月1日—2019年5月31日MWHTS的15个通道冷空观测计数值

Fig. 3 The cold space counts of MWHTS channels during the period of January 1, 2014 to May 31, 2019

MWHTS 每一个扫描周期用时 $8/3 \pm 5$ ms，仪器是一个实时定标的系统，一个扫描周期即是一个定标周期，该周期也代表了仪器的采样位置是否准确。图4给出MWHTS扫描周期长时间序列变化图，仪器扫描周期在2667 ms左右，从图4上可以看到离群点的存在，这可能和仪器状态有关，

也可能和星上数据下传过程中的错误有关。

3.2 遥测参数质量控制

根据2.1节中MWHTS定标公式，热源黑体温度、仪器温度、热源黑体观测计数值和冷空计数值是直接参与定标计算并最终影响定标精度的关

键遥测参数；同时，从仪器扫描方式可以看出，扫描周期决定了仪器对定标参数进行采样的准确性，也应该作为影响定标结果的一个关键遥测参数。从图1—图4中这5个遥测参数在5年半的状态变化可以发现存在奇异值点，这些异常数据和仪器状态、数据采集、数据传输和数据汇集中发生的错误有关，数据异常将对仪器定标精度和稳定性产生直接影响，因此，需要对异常数据进行标识和剔除以保证MWHTS数据质量。

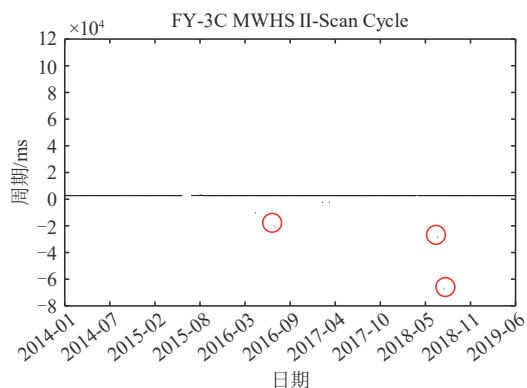
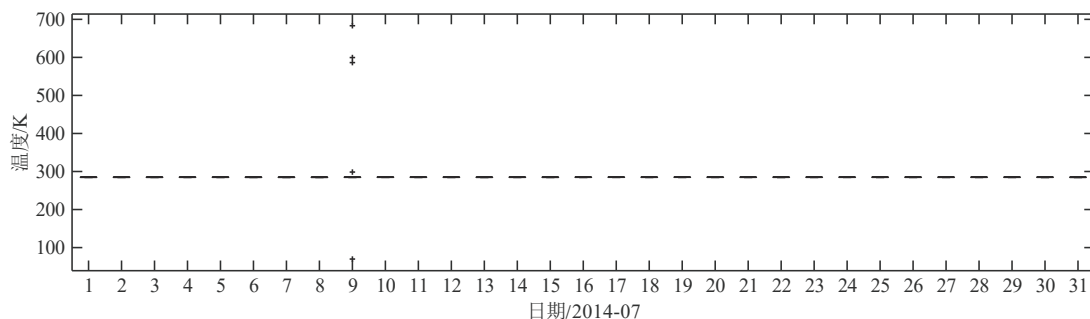


图4 2014年1月1日—2019年5月31日MWHTS扫描周期
Fig. 4 The scan period of MWHTS channels during the period of January 1, 2014 to May 31, 2019

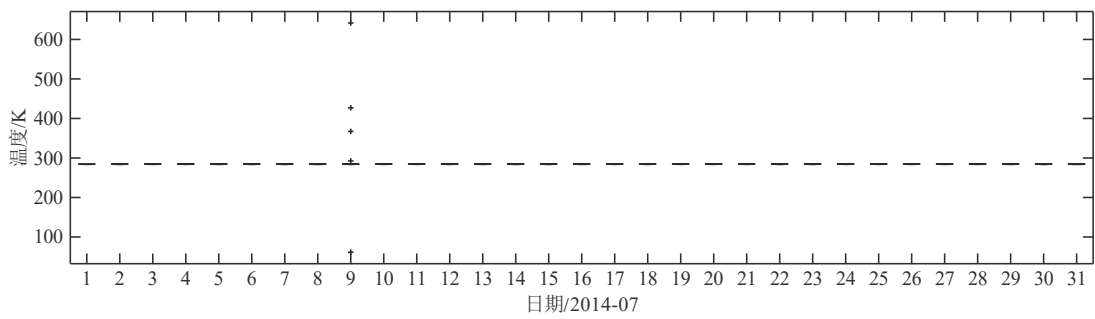
选择2014年7月一个月内的源包数据作为质量控制的基础数据。FY-3C MWHTS内部热源黑体温度数据质控前和质控后的箱线图分别如图5和图6所示。从图5可以看出，7月9日离群数据最多，由于异常数据的存在，使得表示数据分布水平的“箱子”压缩成了图中红线，可见异常数据与最大最小值偏离的非常远。在MWHTS在轨定标过程中，利用埋嵌在内部热源黑体上的5个PRT测量值加权计算得到黑体温度，在加权计算前会对5个PRT测值进行阈值检验和线间线内的一致性

检验，计算出黑体温度后也会进行阈值判断，温度阈值范围设为270—300 K，一致性检验阈值为1 K。如果黑体温度超出该阈值范围，则认为这条扫描线上的黑体温度异常，会用临近扫描线上通过质检的黑体温度来替代。由于黑体温度是直接参与定标系数计算的关键参数，对于扫描线间的黑体温度采用 3σ 法则剔除温度突跳的数据(Kim等, 2010; Choi等, 2017)，即对50条扫描线上的黑体温度求标准差 σ ，如果某条扫描线上黑体温度大于3倍 σ 时则认为该黑体温度出现异常，用临近扫描线上通过质检的黑体温度来替代。从质控后的图6可以看出，30 d内黑体温度会有起伏变化，但变化范围不超过1.5 K，中位数在0.1 K以内变化。每天“箱子”长度几乎一致，也就是说黑体温度正常值的集中趋势几乎一致。

同一时间段内FY-3C MWHTS仪器温度数据质控前和质控后的箱线图分别如图7和图8所示。从图7可以看出，仪器温度有18 d都存在离群数据且7月10号的离群数据最多，极端异常数据与正常数据的偏离程度很大。MWHTS仪器温度和黑体温度都受到平台环境影响，仪器温度异常个数多于黑体温度的一个可能原因是仪器中频只有一个PRT测量，数据异常风险高于由5个PRT加权得到的黑体温度。对仪器温度的质量控制和黑体温度质控方法一致，首先进行阈值检验，温度阈值范围设为270—300 K，然后采用 3σ 法则对其进行质量控制。如果出现异常，则在定标过程中用临近扫描线上通过质检的仪器温度来替代。质控后仪器温度30天内仪器温度起伏变化范围不超过1.5 K，中位数在0.1 K以内变化。每天“箱子”长度几乎一致，也就是说仪器温度正常值的集中趋势几乎一致。



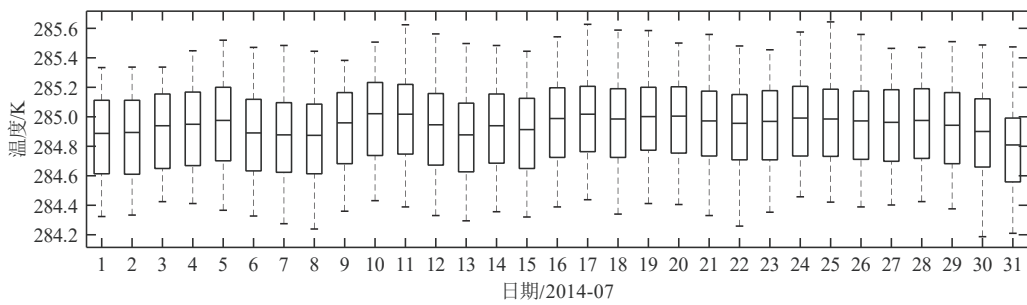
(a) 89 GHz & 118 GHz



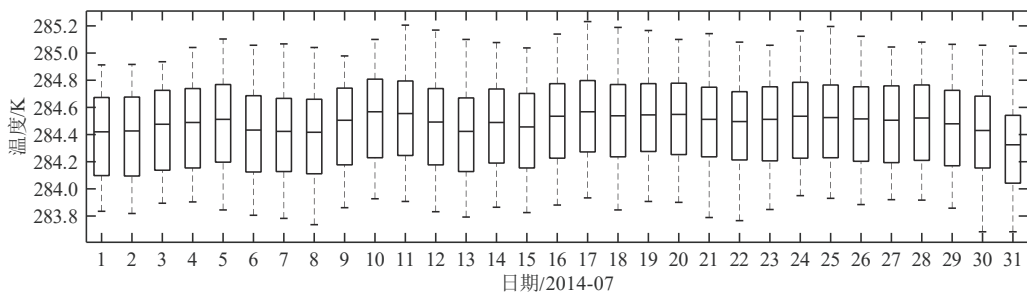
(b) 150 GHz & 183 GHz

图5 2014年7月MWHTS的89 GHz & 118 GHz和150 GHz & 183 GHz热源黑体温度质控前箱形图

Fig. 5 Boxplots of MWHTS 89 GHz & 118 GHz and 150 GHz & 183 GHz internal blackbody calibration target temperature before quality control in July 2014



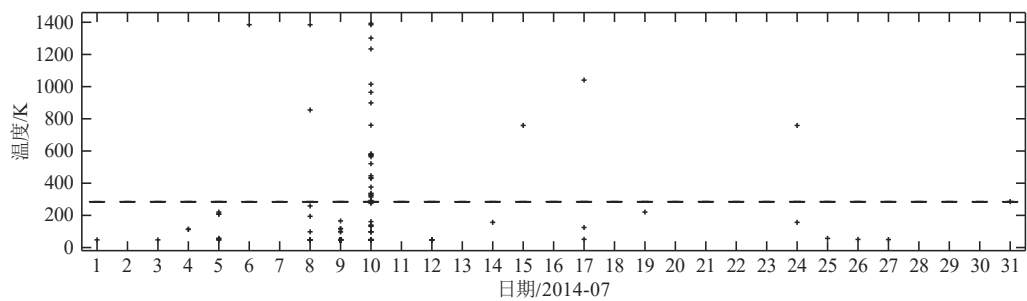
(a) 89 GHz & 118 GHz



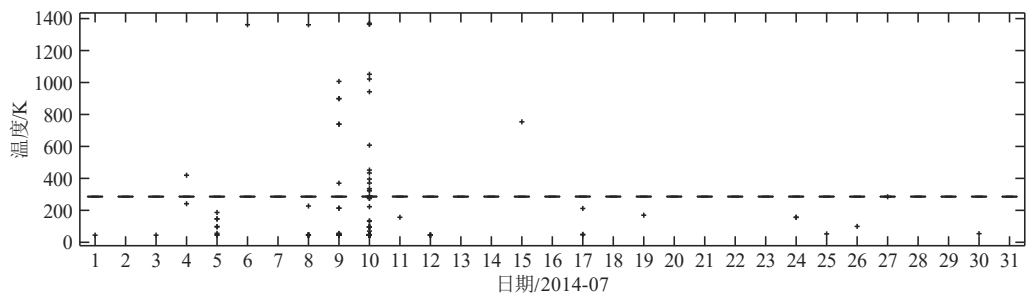
(b) 150 GHz & 183 GHz

图6 2014年7月MWHTS的89 GHz & 118 GHz和150 GHz & 183 GHz内部热源黑体温度质控后箱形图

Fig. 6 Boxplots of MWHTS 89 GHz & 118 GHz and 150 GHz & 183 GHz internal blackbody calibration target temperature after quality control in July 2014



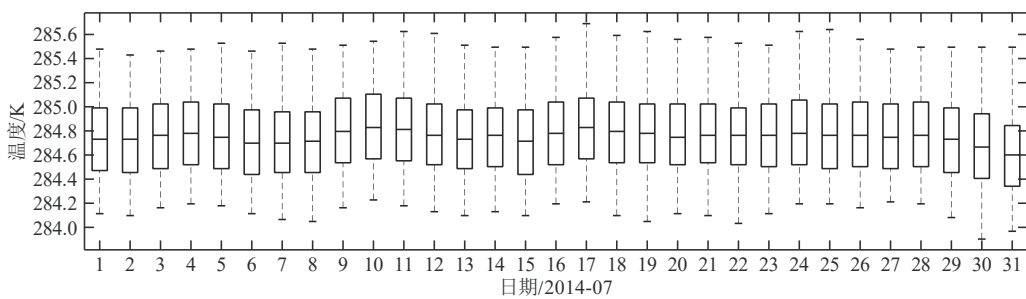
(a) 89 GHz & 118 GHz



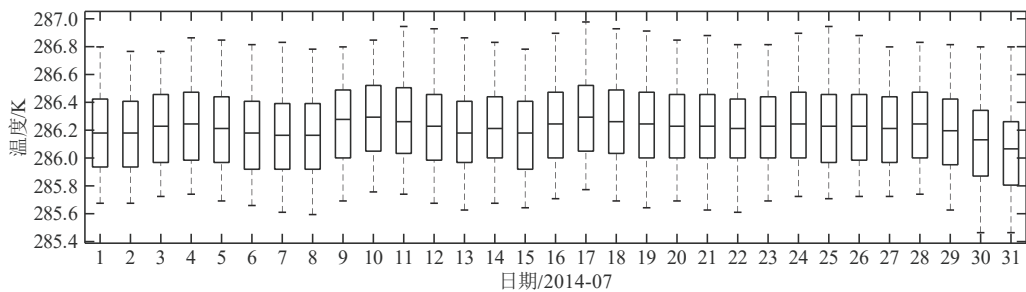
(b) 150 GHz & 183 GHz

图7 2014年7月 MWHTS 的 89 GHz & 118 GHz 和 150 GHz & 183 GHz 仪器温度质控前箱形图

Fig. 7 Boxplots of MWHTS 89 GHz & 118 GHz and 150 GHz & 183 GHz instrument temperature before quality control in July 2014



(a) 89 GHz & 118 GHz



(b) 150 GHz & 183 GHz

图8 2014年7月 MWHTS 的 89 GHz & 118 GHz 和 150 GHz & 183 GHz 仪器温度质控后箱形图

Fig. 8 Boxplots of MWHTS 89 GHz & 118 GHz and 150 GHz & 183 GHz instrument temperature after quality control in July 2014

FY-3C MWHTS 的 15 个通道 2014 年 7 月内部热源黑体的观测计数值质量控制前箱线图见图 9, 由左至右从上到下依次给出 15 个通道的结果。总的来看, 各通道都存在黑体观测计数值异常的数据, 从而导致表示数据分布的“箱子”不明显, 15 个通道在 7 月 10 号的异常数据最多。MWHTS 在轨实际观测过程中, 15 个通道在每一个定标周期都分别对内部热源黑体进行 3 次采样, 对这 3 次采样分别进行阈值检验和 3σ 法则判识, 每个通道的阈值设置各不相同, 通过分析 3 个月内黑体计数值

的变化得到。同时注意如果 AGC 变化导致黑体计数值发生跳变情况下阈值的变化。通过质检的采样数据参与平均得到各通道该条扫描线的黑体观测计数值。在计算定标系数过程中, 一条扫描线上的黑体观测观测计数值还需要经过前后 3 条线三角权重加权得到, 然后对最终参与定标计算的黑体观测计数值再进行阈值检验和 3σ 法则判识。质量控制以后 MWHTS 的 15 个通道黑体观测计数值的箱线图见图 10, 质控后的黑体观测计数值剔除了异常数据, 受通道响应和 AGC 的影响, 15 个通

道的黑体观测计数值变化范围各不相同。具体来看，通道1、6、11—14的中位数接近下四分位，即这些通道黑体计数值分布偏态性强；其他通道的中位数位于“箱子中间”，即这些通道黑体观测

计数值接近正态分布。通道1、7—10和通道13—15的黑体计数值在7月份的起伏变化最大。通道2的“箱子最短”即黑体计数值最集中。

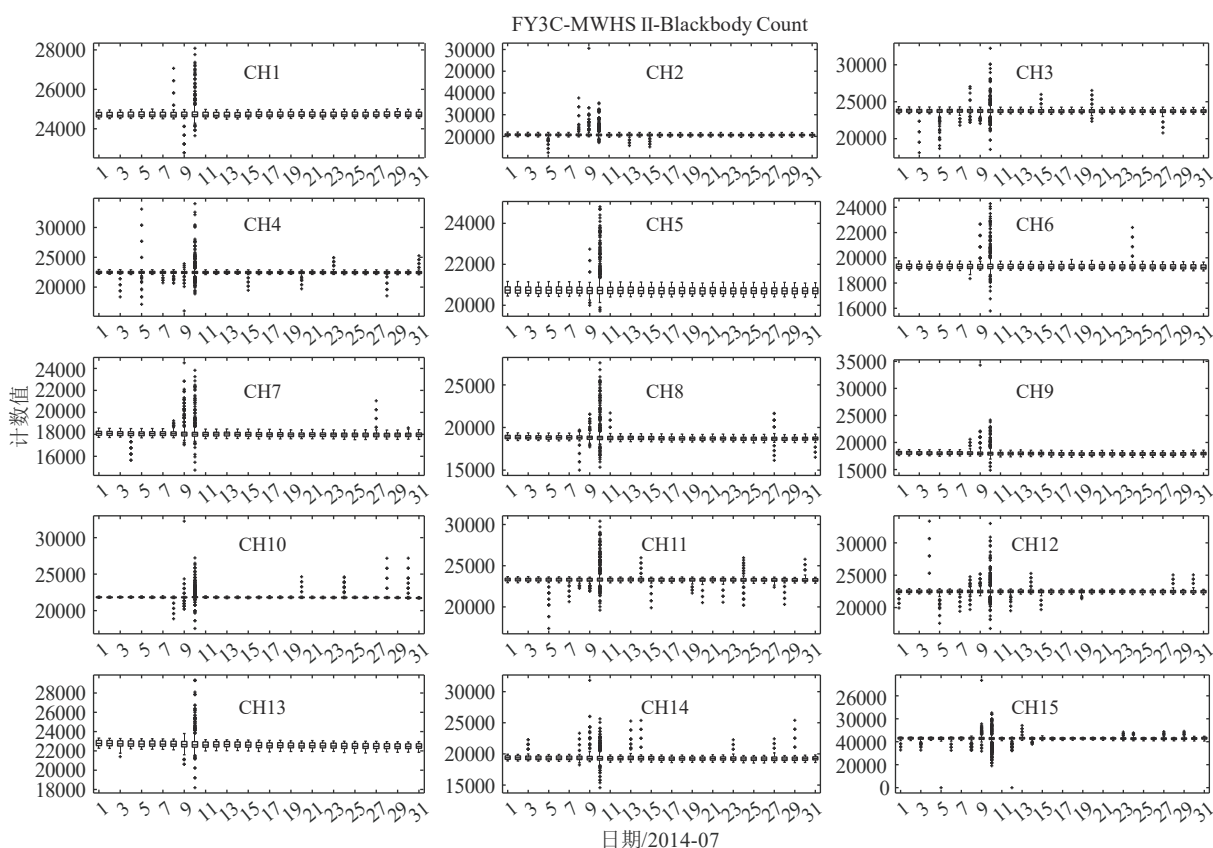
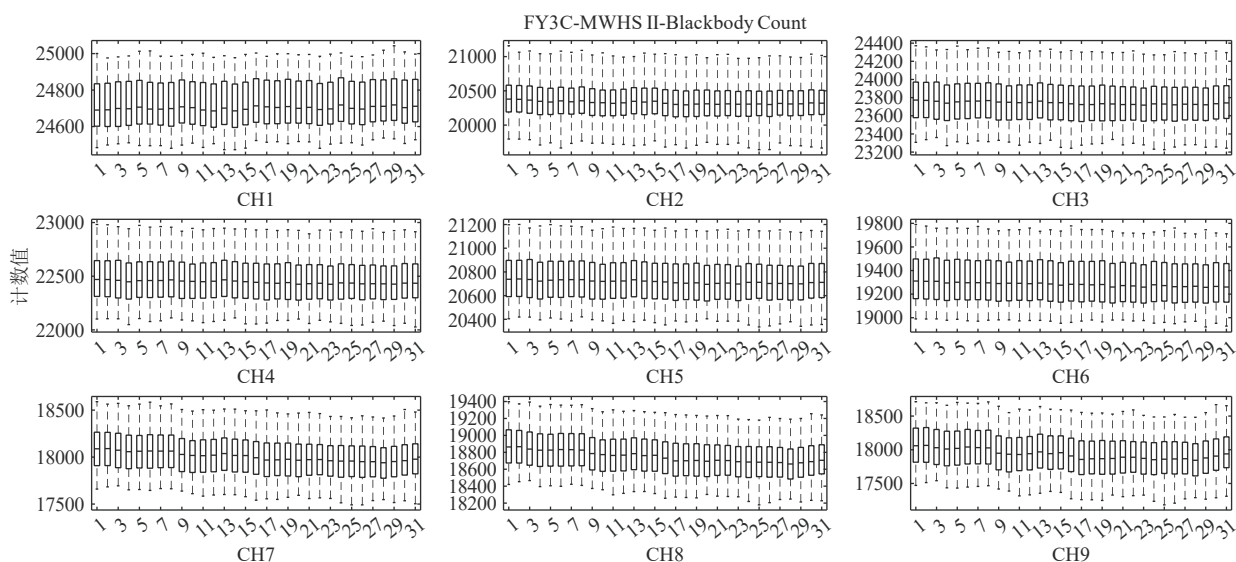


图9 2014年7月MWHTS的15个通道黑体计数值质控前箱形图

Fig. 9 Boxplots of MWHTS internal blackbody calibration target counts before quality control in July 2014



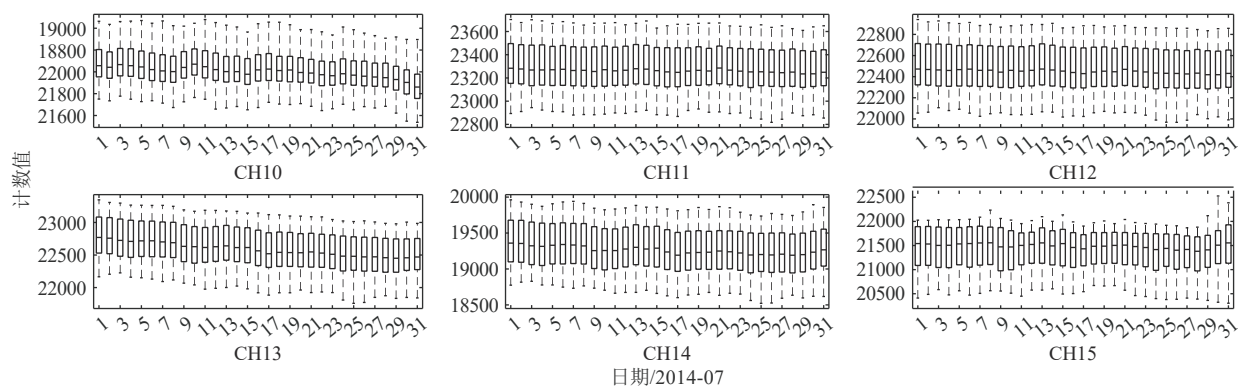


图10 2014年7月MWHTS的15个通道黑体计数值质控后箱形图

Fig. 10 Boxplots of MWHTS internal blackbody calibration target counts after quality control in July 2014

图11给出了2014年7月FY-3C MWHTS的15个通道观测宇宙冷空的计数值质量控制前箱线图, 由左至右从上到下依次给出15个通道的结果。从图11中可以看出, 各通道的冷空观测计数值都存在异常数据, 对比图9可以看出, 冷空观测计数值也在7月10号的异常数据最多, 只是黑体计数值和冷空计数值出现异常的日期略有不同。MWHTS在轨扫描时, 15个通道在每一个定标周期对冷空观域也进行3次采样。因此, 与对内部热源黑体观测计数值的质量控制一样对3次采样结果进行阈值检验和 3σ 法则判识, 各通道的阈值也是由分析3个月冷空计数值变化得到, 除了注意AGC变化的影响外, 同时需要考虑月亮进入冷空观域时对计数值的影响。通过质检的采样数据参与平均得到各通道该条扫描线的冷空观测计数值, 最后对经过前后3条线三角权重加权得到的冷空观测计数值进行阈值检验和 3σ 法则判识, 图12是质量控制以后MWHTS的15个通道冷空观测计数值的箱线图。利用质量控制方法去除冷空观测计数值中异常数据后, 总体上看15个通道的冷空观测计数值变化范围在1000个计数值左右, 受通道响应和AGC的影响而各有不同。具体而言, 通道2—6和通道12的冷空计数值在2014年7月一个月内的变化不大, 其他通道的冷空观测计数值存在起伏, 且通道2的冷空观测计数值数据最集中即“箱子最短”。通道1、6、11—14冷空观测计数值分布的偏态性强, 其中位数接近下四分位; 其他通道的“箱子”关于中位数对称, 也就是说这些通道冷空观测计数值接近正态分布。对比图10来看, 冷空观测计数值和黑体观测计数值的分布和变化相似, 说明MWHTS每条扫描线中的通道响应一致。

通过对MWHTS其他遥测参数的分析发现, 扫

描周期的异常和仪器原始观测数据的误码有直接关系。MWHTS扫描时间的采集受自身计时器和星上授时共同影响, 一个扫描周期为 $8/3$ s, 约2667 ms, 如果扫描周期大于 2667 ± 10 ms, 则有坏线数据汇集到MWHTS原始观测中。图13(a)是2014年7月质量控制前扫描周期箱线图, 可以看出, 极端异常数据和扫描周期正常值相差很远; 经过阈值控制以后的扫描周期箱线图见图13(b), 可以看出扫描周期非常稳定, 中位数在2667 ms, “箱子”的长度, 最大最小值都很稳定。

通过以上对FY-3C MWHTS的5个直接影响定标精度的关键参数的箱线图分析可以看出, 质量控制以后遥测参数中异常数据被标识和剔除, 有利于分析各类参数的变化特征。

3.3 FY-3C MWHTS 观测亮温质量评分

在FY-3C MWHTS之前的业务L1级数据中, 与定标数据质量相关的质量标识数据集有两个: 一个是表示扫描线预处理质量的数据集“QA_Scan_Flag”, 该数据集用5位质量码表示MWHTS每条扫描线在定标预处理过程中定标定位是否成功, 冷空是否受到月球污染; 另一个是表示通道数据完整性的数据集“scnlin_qc”, 表示MWHTS的15个通道原始观测计数值是否完整。但对于资料定量应用而言, 并没有直接表征数据定标质量的参数。因此, 本节将在分析关键遥测参数质量控制效果敏感性的基础上, 对MWHTS观测亮温质量进行逐条扫描线逐通道逐像元评分, 为数据定量应用过程中资料原始定标精度的评估提供参考依据。

分析热源黑体温度、仪器温度、热源黑体观测计数值、冷空观测计数值和扫描周期这5个关键遥测参数质控前后对2015年8月份一整个月内FY-3C MWHTS观测亮温和RTTOV模拟亮温偏差

(O-B) 标准差的影响, 结果图 14 所示。图 14 中 NobtQC 表示没有考虑热源黑体温度质量控制的情况, NorxtQC 表示没有考虑仪器温度质量控制的情况, NoprdrQC 表示没有考虑仪器扫描周期质量控制的情况, NobcnQC 表示没有考虑热源黑体计数值质量控制的情况, NoccnQC 表示没有考虑冷空计数值质量控制的情况。不同颜色的柱表示分别忽略这 5 种关键参数的质量控制后, 对 O-B 标准差的影响情况。从图 14 中可以看出, 对绝大多数通道而言 (除通道 1 和 12), 扫描周期质量控制对 O-B 的影响最大, 即 O-B 结果对扫描周期最敏感。这是因为扫描周期错误和仪器获取原始观测计数值

的采样位置直接相关, 也和数据传输中误码信息有关, 扫描周期的异常会非常极端, 从而导致仪器观测计数值出现极端异常值; 扫描周期异常对各通道观测结果的影响具有随机性, 如图 14 所示通道 5 在这个月受的影响最大。仪器温度的质控对各通道的 O-B 结果影响最小, 这是因为仪器温度决定非线性订正系数的大小, 而 MWHTS 的非线性订正系数在 3 个仪器温度下的变化不大, 如果仪器温度出错, 由插值得到的非线性订正系数改变也不会很大。其他 3 个关键参数会对 O-B 标准差产生不同程度的影响。

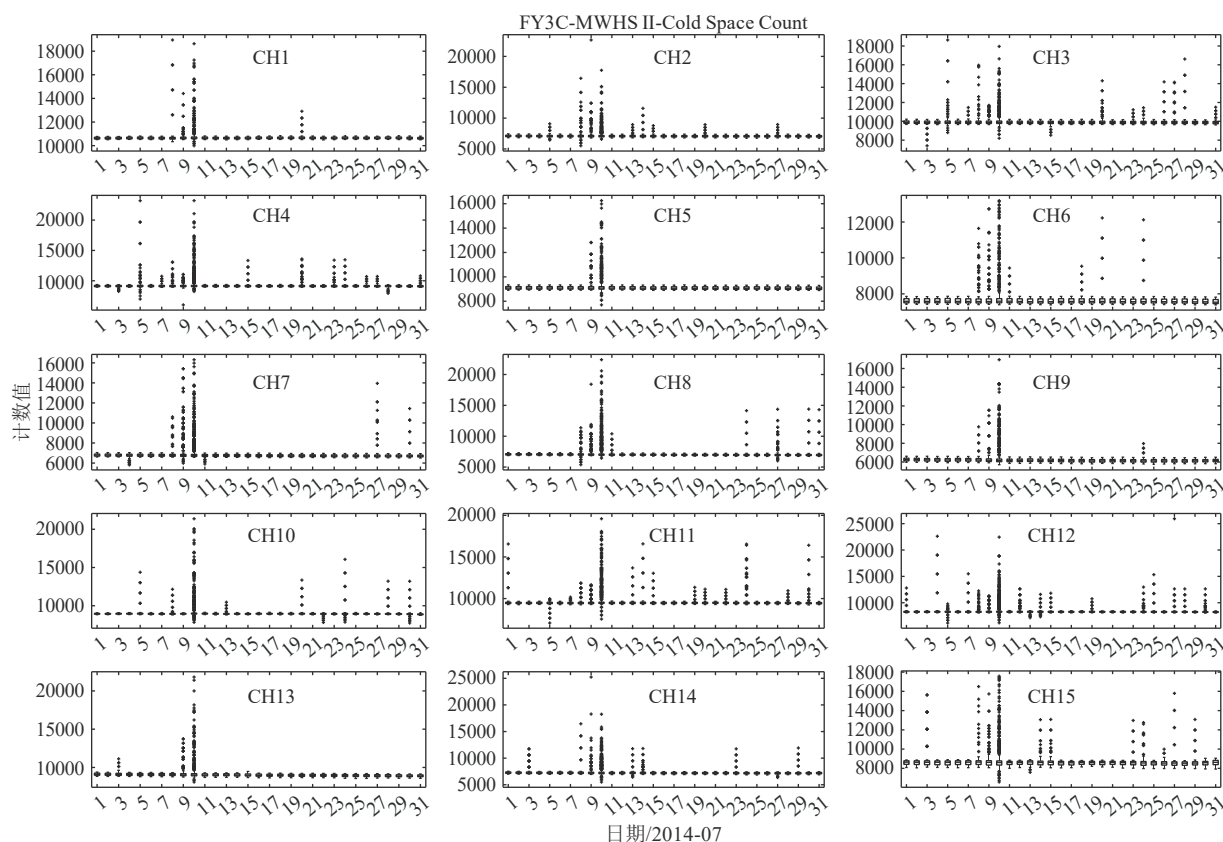


图 11 2014年7月MWHTS的15个通道冷空计数值质控前箱形图

Fig. 11 Boxplots of MWHTS cold space counts before quality control in July 2014

通过分析遥测参数对 FY-3C MWHTS 各通道 O-B 结果的敏感性大小, 并计算 5 种遥测参数对 O-B 标准差变化大小的比例关系, 结合仪器在轨观测和采样的特征, 采用百分制的方式为 MWHTS 逐条扫描线逐通道逐像元上的观测亮温进行评分。5 种遥测参数的在百分制中所占的权重比例即评分准则见表 2。扫描周期质量对定标精度影响最大, 其权重在百分制中占 50%; 直接参与定标计算的 4 个遥测参数中, 黑体温度的测量值由 5 个 PRT 测

值决定, 在计算过程中会对无法通过质量控制的 PRT 进行剔除, 认为 5 个 PRT 全通过质检为最优, 每少一个 PRT 参与平均则最终黑体温度质量有所降低, 每个 PRT 所占权重为 3%; 仪器温度只由一个 PRT 测值决定, 所占权重为 5%; 仪器对冷空和内部热源黑体的观测都有 3 次采样, 每次采样的数据质量共同决定了最终冷空和黑体计数值的质量, 所占权重为 5%; 满分数据即是仪器定标过程中 5 种遥测参数均无异常的数据。

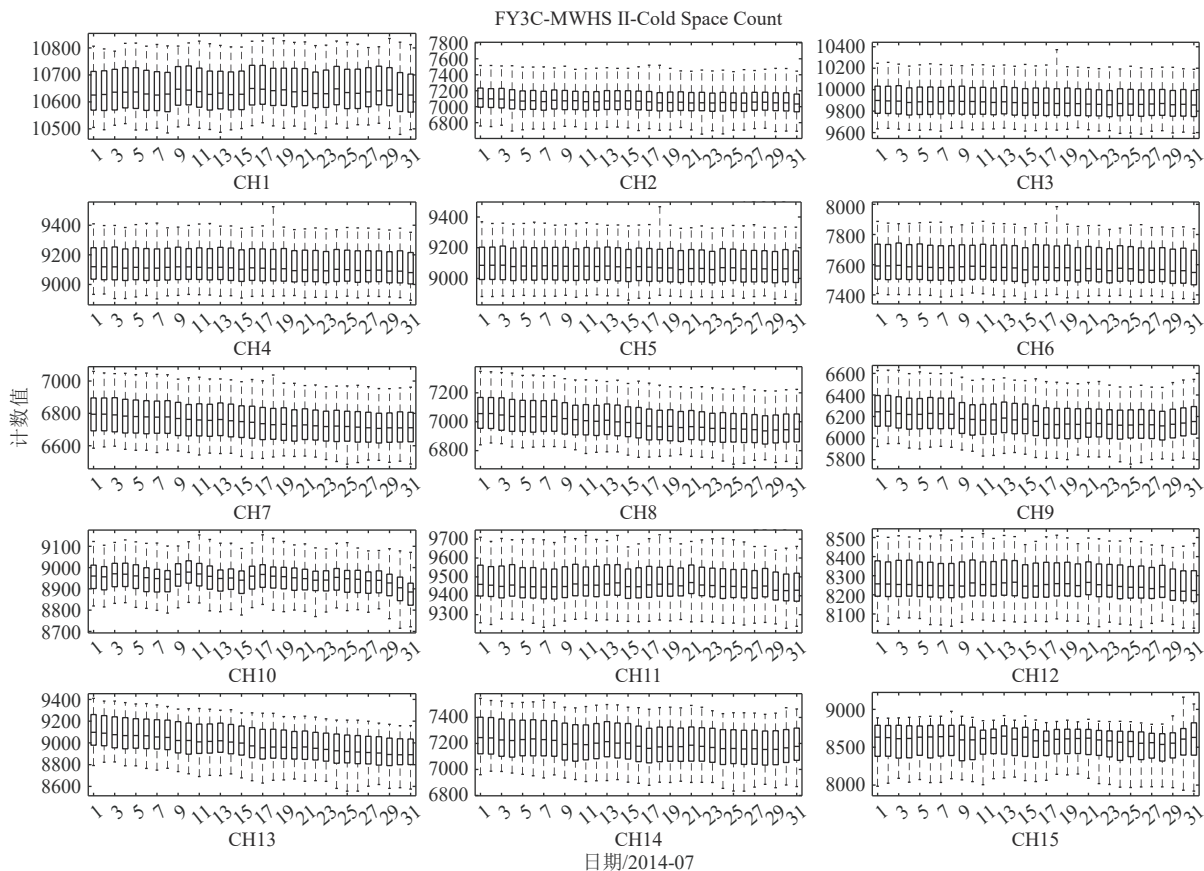
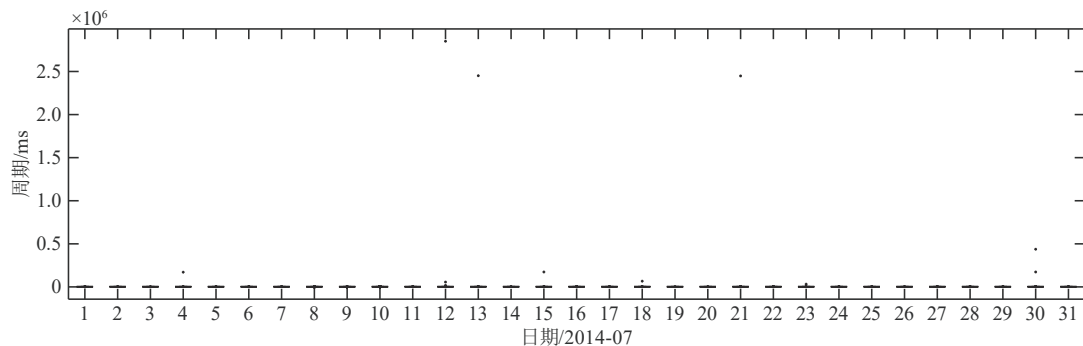
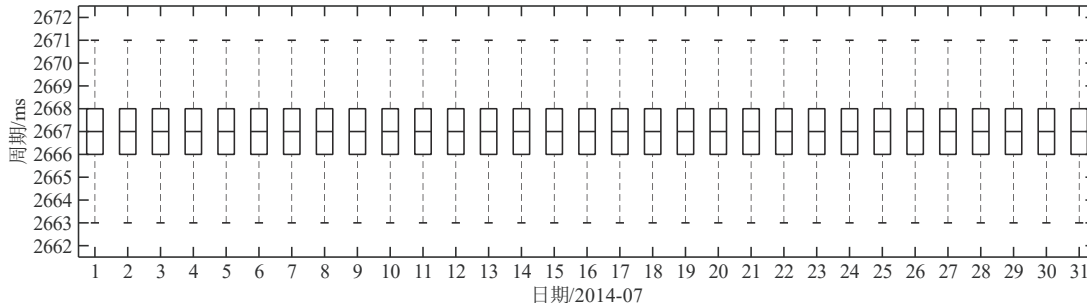


图 12 2014年7月 MWHTS 的15个通道冷空计数值质控后箱形图
Fig. 12 Boxplots of MWHTS cold space counts after quality control in July 2014



(a) 扫描周期质控前

(a) Scan period before quality control



(b) 扫描周期质控后

(b) Scan period after quality control

图 13 2014年7月 MWHTS 扫描周期质控前和质量控制后的箱形图
Fig. 13 Boxplots of MWHTS scan period before and after quality control in July 2014

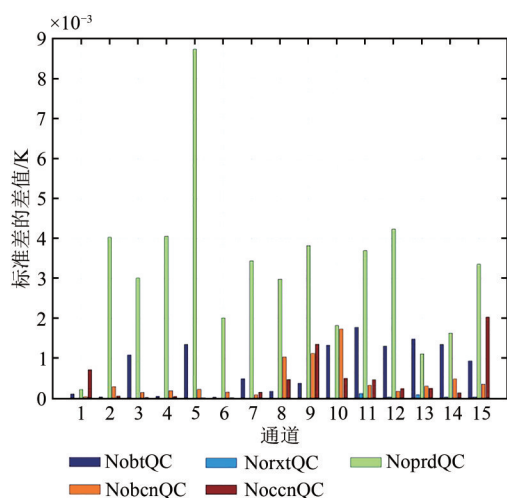


图 14 5种关键遥测参数对O-B标准差的影响

Fig. 14 Effects histogram of five key telemetry parameters on O-B standard deviation

表 2 质量标识评分准则

Table 2 The criterion of quality score

质控参数 $qc(i)$	权重 $W(i)/\%$	数据质量评分 QC_Score
黑体温度(BBT)	15(每个PRT占3)	$QC_Score=100-qc(i) \cdot W(i)$
仪器温度(RXT)	5	
扫描周期(PRD)	50	
黑体计数值(BCN)	15(每次采样占5)	
冷空计数值(CCN)	15(每次采样占5)	

4 结论

国产气象卫星资料特别是微波资料在全球数值天气预报中的业务同化,为资料本身的精度和稳定性提出了更高的要求。有鉴于此,本文直接从星上直接下发的FY-3C MWHTS原始观测包数据出发,分析了仪器开机工作以来5年半的在轨实际遥测数据的长期时变特征,发现了各遥测参数的长时间序列变化过程中存在的异常值,这些异常值的出现可能会对仪器最终定标亮温质量产生影响。因此,基于仪器定标原理和在轨观测特性,提取了直接参与定标计算的4个遥测参数(热源黑体温度、仪器温度、热源黑体观测计数值、冷空观测计数值)和1个与仪器扫描采样准确性相关的遥测参数(扫描周期)作为影响观测数据定标精度的关键遥测参数,建立了多源遥测参数质量控制方案,对5个关键遥测参数进行质量控制和判识。最后通过敏感性分析构建了MWHTS观测亮温数据质量评分体系,实现了对逐条扫描线逐通道逐像元上仪器定标亮温的质量评价。该评分体系

把辐射观测结果和仪器工作状态结合在一起从源头上实现了对观测数据质量的控制,为MWHTS资料定量应用提供了先验信息。FY-3C MWHT评分体系的研究表明,扫描周期的稳定至关重要,是星载微波辐射计设计中必须考虑的重要参数。另一方面,目前仪器温度只有一个PRT测值,将来的仪器设计中如果能够增加对仪器温度的测量会减小该参数对定标精度产生的误差。

目前,该多源遥测参数质量控制方案已经在2016年12月13日用于仪器业务数据处理中,FY-3C MWHT逐条扫描线逐通道逐像元的评分结果也写入到对全球实时业务发布的L1级数据中。

文中所用的质量控制方案依赖于在轨实际遥测数据本身的变化特征,受到平台环境的影响,如果平台供电情况发生变化时,遥测参数的阈值范围也需要进行调整。另一方面,目前的质量评分体系是基于5个关键遥测参数,今后将逐步分析更多的参数组合来对仪器定标质量进行精细化评分。

参考文献(References)

- Chen K Y, English S, Bormann N and Zhu J. 2015. Assessment of FY-3A and FY-3B MWHS observations. *Weather and Forecasting*, 30(5): 1280-1290 [DOI: 10.1175/WAF-D-15-0025.1]
- Choi Y, Cha D H, Lee M I, Kim J, Jin C S, Park S H and Joh M S. 2017. Satellite radiance data assimilation for binary tropical cyclone cases over the western North Pacific. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(2): 832-853 [DOI: 10.1002/2016MS000826]
- Dong C H, Yang J, Zhang W J, Yang Z D, Lu N M, Shi J M, Zhang P, Liu Y J and Cai B. 2009. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(10): 1531-1544 [DOI: 10.1175/2009BAMS2798.1]
- Gu S Y, Guo Y, Wang Z Z and Lu N M. 2012. Calibration analyses for sounding channels of MWHS onboard FY-3A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4885-4891 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2214391]
- Gu S Y, Wang Z Z, Li J and Zhang S W. 2010. The radiometric characteristics of sounding channels for FY-3A/MWHS. *Journal of Applied Meteorological Science*, 21(3): 335-342 (谷松岩,王振占,李靖,张升伟. 2010.风云三号A星微波湿度计主探测通道辐射特性. *应用气象学报*, 21(3): 335-342) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2010.03.009]
- Guo Y, Lu N M, Qi C L, Gu S Y and Xu J M. 2015. Calibration and validation of microwave humidity and temperature sounder onboard FY-3C satellite. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(1): 20-31 (郭杨,卢乃锰,漆成莉,谷松岩,许健民. 2015.风云三号C星微波

- 湿温探测仪的定标和验证. 地球物理学报, 58(1): 20-31 [DOI: 10.6038/cjg20150103]
- He Q R, Wang Z Z and He J Y. 2017. Retrieval of clear sky temperature and humidity profiles over land using measurements of FY-3C/MWHTS. *Journal of Remote Sensing*, 21(1): 27-39 (贺秋瑞, 王振占, 何杰颖. 2017. FY-3C/MWHTS 资料反演陆地晴空大气温湿廓线. 遥感学报, 21(1): 27-39) [DOI: 10.11834/jrs.20176006]
- JPL. 2000. Airs project: algorithm theoretical basis document part 3: microwave instruments. JPL D-17005, version 2.1, Pasadena, California, USA, 1-59
- Kelly G A and Thépaut J N. 2007. Evaluation of the Impact of the Space Component of the Global Observing System Through Observing System Experiments. *ECMWF Newsletter*: 16-28[https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2008/10435-evaluation-impact-space-component-global-observing-system-through-observing-system-experiments.pdf]
- Kim Y J, Campbell W F and Swadley S D. 2010. Reduction of middle-atmospheric forecast bias through improvement in satellite radiance quality control. *Weather and Forecasting*, 25(2): 681-700 [DOI: 10.1175/2009WAF2222329.1]
- Lawrence H, Bormann N, Geer A J, Lu Q and English S. 2018. Evaluation and assimilation of the microwave sounder MWHS-2 onboard FY-3C in the ECMWF numerical weather prediction system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6): 3333-3349 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2798292]
- Lu N M and Gu S Y. 2016. Review and prospect on the development of meteorological satellites. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 832-841 (卢乃锰, 谷松岩. 2016. 气象卫星发展回顾与展望. 遥感学报, 20(5): 832-841) [DOI: 10.11834/jrs320166194]
- Lu Q F. 2011. Initial evaluation and assimilation of FY-3A atmospheric sounding data in the ECMWF System. *Science China Earth Sciences*, 54(10): 1453-1457 (陆其峰. 2011. 风云三号 A 星大气探测资料数据在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究. 中国科学: 地球科学, 41(7): 890-894) [DOI: 10.1360/zd-2011-41-7-890]
- Matricardi M. 2010. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(652):1823-1835 [DOI: 10.1002/qj.680]
- Matricardi M, López Puertas M Funke B. 2018. Modeling of nonlocal thermodynamic equilibrium effects in the principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123: 5741 - 5761[https://doi.org/10.1029/2018JD028657]
- Meng X C, Li H, Du Y M, Cao B, Liu Q H and Li B. 2018. Retrieval and validation of the land surface temperature derived from Landsat 8 data: a case study of the Heihe River Basin. *Journal of Remote Sensing*, 22(5): 857-871 (孟翔晨, 历华, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 李彬. 2018. Landsat 8 地表温度反演及验证——以黑河流域为例. 遥感学报, 22(5): 857-871) [DOI: 10.11834/jrs.20187411]
- Saunders R, Hocking J, Turner E, Rayer P, Rundle D, Brunel P, Vidot J, Roquet P, Matricardi M, Geer A, Bormann N and Lupu C. 2018. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geoscientific Model Development*, 11(7): 2717-2737 [DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018]
- Xue J S. 2009. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(6): 903-911 (薛纪善. 2009. 气象卫星资料同化的科学问题与前景. 气象学报, 67(6): 903-911) [DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2009.06.001]
- Yang J, Dong C H, Lu N M, Yang Z D, Shi J M, Zhang P, Liu Y J and Cai B. 2009. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(4): 501-509 (杨军, 董超华, 卢乃锰, 杨忠东, 施进明, 张鹏, 刘玉洁, 蔡斌. 2009. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 67(4): 501-509) [DOI: 10.11676/qxxb2009.050]
- Yang Y K, Li H, Sun L, Du Y M, Cao B, Liu Q H and Zhu J S. 2019. Land surface temperature and emissivity separation from GF-5 visual and infrared multispectral imager data. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1132-1146 (杨以坤, 历华, 孙林, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 朱金山. 2019. 高分五号全谱段光谱成像仪地表温度与发射率反演. 遥感学报, 23(6): 1132-1146) [DOI: 10.11834/jrs.20198053]
- Zhang M, Lu Q F, Gu S Y, Hu X Q and Wu S L. 2019. Analysis and correction of the difference between the ascending and descending orbits of the FY-3C microwave imager. *Journal of Remote Sensing*, 23(5): 841-849 (张森, 陆其峰, 谷松岩, 胡秀清, 武胜利. 2019. 风云三号 C 星微波成像仪升降轨偏差问题分析及订正. 遥感学报, 23(5): 841-849) [DOI: 10.11834/jrs.20198235]

FY-3C MWHTS observed brightness temperature quality score based on the multi-source telemetry parameter quality control

GUO Yang, LU Qifeng, LU Naimeng, GU Songyan, LI Xiaoqing, QI Chengli,
DOU Fangli, WU Qiong, LIU Hui

1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. Innovation Center for Fengyun Meteorological Satellite (FYSIC), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: FengYun-3C (FY-3C) is the first satellite of the second-generation polar-orbiting operational meteorological satellite in China.

As one of the key payloads onboard FY-3C, the MicroWave Humidity and Temperature Sounder (MWHTS) is a cross-track microwave sounder and has 15 channels ranging from 89.0 GHz to 191.0 GHz, with eight (channels 2—9) located near 118.75 GHz along an oxygen absorption line, five (channels 11—15) close to the 183.31 GHz water vapor absorption line, and the remaining two window channels (1 and 10) centered at 89.0 and 150.0 GHz. This instrument's measurement allows for probing the atmospheric temperature and moisture under clear and cloudy conditions. The MWHTS attracted worldwide attention because of its special configuration. FY-3C MWHTS radiance data have already been assimilated into operational numerical weather prediction models in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, UK Met Office, and China Meteorological Administration. The calibration accuracy and stability of MWHTS can directly affect the data assimilation effects in NWP. This research establishes a quality control model and observed brightness temperature quality score for MWHTS to filter out the poor quality data during the calibration processing. The five and a half years historical raw data from MWHTS are analyzed. The telemetry parameters from the raw data considered in this study include the blackbody target temperature, instrument temperature, instrument component temperature, counts of the blackbody target and cold space, scan angles, and scan periods. These telemetry parameters thresholds were set accordingly for quality control. Then, based on the radiometer calibration transfer function and observation mechanism of MWHTS, five key parameters (instrument temperature, blackbody target temperature, blackbody view counts, cold space view counts, and scan periods) were selected to score the MWHTS calibration data quality. The sensitivity analysis of each parameter to the differences between the observations and radiance transfer simulations were carried out. The results show that the scan period has the most significant influence on the O-B results, and the instrument temperature has the least effect. The effect proportion was used as the weight to score the observed brightness temperature in centesimal system. The results show that the quality control scheme of each parameter can eliminate abnormal data, and the quality scoring system characterizes the MWHTS calibration quality, and the data application is ensured. The quality control model is established for FY-3C MWHTS to meet the application requirements of onboard microwave observation data. The threshold of the quality control mode depends on the various characteristics of the telemetry data in orbit. This model has been used in the operational calibration algorithm of FY-3C MWHTS, and the score results are included in the MWHTS L1 data to global real-time releases. The MWHTS observed brightness temperature quality score can indicate the data quality throughout the operational in-orbit radiometer calibration. The higher the score, the better the data quality. Accordingly, users can choose the score threshold for data availability according to the application requirements. The quality scoring system is based on only five key telemetry parameters, and more parameters will be analyzed to improve this system in the future.

Key words: Fengyun-3C, MicroWave Humidity and Temperature Sounder (MWHTS), quality control, observed brightness temperature score, telemetry parameters

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504900, 2018YFB0504902); National Natural Science Foundation of China (No. 42005105, 41775020, 41975034); China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (No. GYHY201206002)