

星载微波成像仪灵敏度稳定性分析

董克松, 谢鑫新, 何嘉恺, 李雪, 孟婉婷, 王平凯

上海航天测控通信研究所, 上海 201109

摘要: 微波成像仪是中国第二代极轨气象卫星风云三号卫星的主要载荷之一, 灵敏度是评价成像仪系统性能的关键参数之一, 可以衡量辐射探测精度, 因此该参数的准确计算及其长期稳定性会直接影响遥感数据业务应用效果。经过地面及在轨数据验证, 与传统均方根标准差方法相比, 利用Allan标准差方法计算星载微波成像仪的在轨灵敏度, 首先获得每条扫描线的遥感电压数据, 然后分析相邻扫描线之间的电压偏差, 最后再结合微波成像仪系统增益, 即可获得在轨灵敏度参数。利用Allan方法分析灵敏度, 可以有效去除环境噪声的影响, 有助于反应星载微波成像仪在轨灵敏度的长期稳定性, 更加真实地反映仪器本身的在轨性能演变。分析结果表明: 3台微波成像仪在轨性能稳定, 长时间观测过程中, FY-3 C/D星成像仪在轨灵敏度的标准差 ≤ 0.01 K, FY-3 B星成像仪灵敏度标准差 ≤ 0.012 K; 3台仪器在10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz及36.5 GHz频点8个通道的灵敏度均优于0.5 K; 对于89 GHz频点的两个接收通道, FY-3 C/D星微波成像仪的灵敏度优于0.5 K, B星微波成像仪优于0.6 K。本文利用Allan方法获得了风云三号微波成像仪的在轨灵敏度参数, 证明该方法适用于微波辐射计在轨灵敏度的计算, 同时针对微波成像仪的相关分析结果为国产星载微波成像仪在轨定量应用奠定了基础。

关键词: 风云三号微波成像仪, 灵敏度, 均方根标准差, Allan标准差, 长期稳定性

引用格式: 董克松, 谢鑫新, 何嘉恺, 李雪, 孟婉婷, 王平凯. 2021. 星载微波成像仪灵敏度稳定性分析. 遥感学报, 25(10): 2076-2082

Dong K S, Xie X X, He J K, Li X, Meng W T and Wang P K. 2021. Long-term sensitivity stability of space-borne microwave imager using the Allan method. National Remote Sensing Bulletin, 25(10): 2076-2082 [DOI: 10.11834/jrs.20219492]

1 引言

风云三号(FY-3)卫星是中国第二代极轨气象卫星, 目前已经成功发射FY-3 A、B、C、D共4颗卫星, 微波成像仪(MWRI)作为主要微波载荷之一, 装载在这4颗卫星上。微波成像仪接收来自大气和地表的辐射信息, 工作频段包括10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz以及89 GHz 5个频点, 均为双极化通道, 其数据应用产品包括降水、非降水云、大气水汽含量以及土壤湿度、温度和风速等, 在灾害预报预防、环境监测等方面发挥重要作用(杨虎等, 2013; 乔木等, 2012)。

微波成像仪数据产品精度受仪器性能稳定性的影响, 而灵敏度是衡量成像仪系统性能的重要参数之一, 所以在评估成像仪整体性能稳定性方

面, 灵敏度的长期稳定至关重要。灵敏度是成像仪接收机可以测量的最小亮温变化, 即接收机系统噪声的标准差(Ulaby等, 1988)。在实验室环境下, 令接收机观测辐射亮温恒定的目标, 此时接收机输出电压的波动就是由接收机系统噪声引起的, 统计此时输出信号的标准差和与之对应的接收机系统增益即可获得灵敏度(Skou和Le Vine, 2006), 这也是目前国内外微波成像仪常用的灵敏度计算方法。然而微波成像仪在轨运行时, 星上热定标环境复杂, 热定标源观测受到接收机温度变化、地表辐射信号等环境噪声的影响(Yang等, 2011), 因此采用该方法统计的灵敏度结果也受环境噪声影响。本研究采用Allan标准差方法表示辐射计灵敏度, 直接统计热源相邻观测数据之间的

收稿日期: 2020-01-21; 预印本: 2020-09-30

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: 41805024); 上海市青年科技英才扬帆计划(编号: 21YF1417200)

第一作者简介: 董克松, 1994年生, 男, 助理工程师, 研究方向为星载微波辐射计系统设计、在轨定标以及遥感数据应用。E-mail: Kcsong_dong@163.com

偏差,不考虑观测数据与平均值之间的差异,这样可以有效排除环境噪声对在轨灵敏度的干扰,从而准确评估成像仪的在轨灵敏度。

国外已经在轨运行的微波成像类仪器中,与微波成像仪工作频段接近的仪器包括SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder)、GMI (Global Precipitation Measurement Microwave Imager)等,其中SSMIS的主要成像通道的频率及对应灵敏度分别为19.35 GHz通道0.33 K, 22.235 GHz通道0.43 K, 37 GHz通道0.25 K以及91.655 GHz通道0.33 K (Kunkee等, 2008); GMI的通道频率及对应灵敏度分别为10.65 GHz通道0.96 K, 18.7 GHz通道0.84 K, 23.8 GHz通道1.05 K, 36.5 GHz通道0.65 K, 89 GHz通道2.2 K, 166 GHz通道1.5 K, 183.31 GHz通道1.5 K (Draper等, 2015)。国内在轨运行的微波辐射计除了微波成像仪,还包括FY-3卫星上搭载的微波湿度计(MWHS)以及微波温度计(MWTS)。MWHS的通道频率及对应的灵敏度分别为150 GHz通道1.1 K, 183.31 GHz通道1.2 K (王振占等, 2013); MWTS的通道频率及对应的灵敏度分别为50.3 GHz通道0.55 K, 53.596 GHz、54.94 GHz以及57.29 GHz通道均为0.4 K (陈文新等, 2013); MWRI的通道频率及对应的灵敏度分别为10.65 GHz通道0.43 K, 18.7 GHz以及23.8 GHz通道均为0.45 K, 36.5 GHz通道0.33 K, 89 GHz通道0.67 K (乔木等, 2012)。

2008-05中国第二代极轨气象卫星风云三号A星(FY-3A)发射成功,后续又陆续成功发射了B、C和D星,作为FY-3系列卫星的主要载荷之一,微波成像仪已在轨运行超过9 a,获取了长期亮温观测数据以及仪器状态遥测数据(张鹏等, 2012; 高浩等, 2018)。本文采用Allan标准差算法对FY-3卫星微波成像仪多年在轨观测数据进行分析,获得了微波成像仪灵敏度的长期稳定性,并分析影响微波成像仪在轨灵敏度波动情况以及导致灵敏度发生变化的原因,为FY-3微波成像仪的数据长期业务化应用提供了重要依据。

2 Allan方法原理

假设辐射计观测固定亮温目标时共得到 N 个观测电压值 $\{V_A^k\}, (k=1, \dots, N)$,则灵敏度理论上为这组电压数据的均方根标准差,但是实际情况

中微波成像仪输出信号会受到仪器温度变化、地面信号干扰等环境因素的影响,导致均方根灵敏度存在环境偏差。本文选择Allan标准差统计灵敏度,来排除环境噪声对灵敏度参数的影响。

Allan标准差统计方法的具体计算过程为:假设测试数据量为 N ,首先将测试数据按间隔 M 进行分组,共 $K=N/M$ 组, $1 \leq M \leq (N-1)/2$;然后计算第 k 组观测数据的平均值 $\bar{y}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=1+(k-1)M}^{kM} y_i$;最终得到Allan标准差。Allan标准差(Allan, 1987)的表达式为

$$\sigma_{\text{allan}} = \sqrt{\frac{1}{2M^2(N-2M+1)} \sum_{j=1}^{N-2M+1} \left(\sum_{i=j}^{j+M-1} (y_{i+M} - y_i) \right)^2} \quad (1)$$

由上式可知,应用Allan标准差方法需要先确定分组间隔 M 和总数据量 N ,微波成像仪的输入信号包括观测目标的辐射亮温以及白噪声信号,所以确定分组间隔和总数据量时必须满足两个条件:(1)保证成像仪观测数据的Allan标准差与白噪声信号的均方根标准差一致;(2)总数据量足够多,保证Allan标准差统计结果的有效性。

假设微波成像仪的观测数据是信号(余弦信号或者恒定信号)叠加一个白噪声,则白噪声的均方根标准差即表示微波成像仪的理论灵敏度 σ_{ideal} ,当分组间隔 $M=1$ 时,观测数据的Allan标准差 σ_{allan} 与理论灵敏度 σ_{ideal} 最接近(Tian等, 2015)。结合风云三号微波成像仪实际在轨数据,当总数据量 $N \geq 400$ 时,观测数据的Allan标准差 σ_{allan} 有效 $M=1$ 。因此,本文令 $M=1, N=400$,风云三号微波成像仪的Allan灵敏度公式可以转化为

$$\sigma_{\text{allan}} = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{j=1}^{N-1} \left(\frac{V_A^{j+1} - V_A^j}{\bar{G}_j} \right)^2} \quad (2)$$

式中, V_A^j 表示第 j 个热源观测电压值, $\bar{G}_j = (G_{j+1} + G_j)/2$ 表示相邻两个增益的均值。

3 Allan方法有效性验证

分别利用微波成像仪的地面真空定标试验数据及在轨数据,对比分析均方根标准差及Allan标准差,验证Allan方法计算星载微波成像仪在轨灵敏度的有效性。地面真空定标试验中,成像仪工

作环境稳定, 其热源观测数据的均方根标准差即接收机灵敏度, 对比发现 Allan 标准差与均方根标准差结果基本一致, 说明 Allan 方法可以准确计算微波成像仪灵敏度。微波成像仪在轨运行时受环境噪声干扰, 分析发现不同观测区域下的 Allan 标准差结果相同, 且与观测海面时的均方根标准差基本一致, 说明 Allan 标准差可以排除环境噪声的干扰, 更适用于计算微波成像仪的在轨灵敏度。因此, 本研究采用 Allan 方法计算 FY-3 微波成像仪的在轨灵敏度。

3.1 地面真空定标数据验证

结合 FY-3D 星微波成像仪真空定标试验数据, 验证 Allan 标准差计算灵敏度的准确性。真空定标试验采取高精度温控措施保证测试环境稳定, 成像仪温度变化范围在 0.2°C 以内, 对应的热源电压波动范围在 ± 10 mV 内。因此真空定标试验环境下, 热源观测数据的均方根标准差即为系统白噪声的标准差, 此时可以用均方根标准差表示微波成像仪灵敏度, 通过对比真空试验环境下的 Allan 标准差结果与均方根标准差结果之间的差别, 即可验证 Allan 方法计算微波成像仪灵敏度参数的准确性。采用均方根标准差和 Allan 标准差得到的灵敏度结果见图 1, 两种方法所得结果的差值 ≤ 0.03 K, 证明在地面真空定标的理想实验室环境下, Allan 方法是计算微波成像仪灵敏度的有效方法。

3.2 在轨数据验证

结合 FY-3D 星微波成像仪在轨数据, 验证 Allan 方法可以排除环境噪声对灵敏度的影响。本文

选择了 FY-3D 星微波成像仪 2018-04-12 T 08:00—08:51 期间共 1825 条扫描线数据, 每条扫描线获得热源的一个观测电压值, 数据量满足 Allan 方法总数据量 ≥ 400 的要求。同时在这段时间内, 微波成像仪各接收通道的工作温度均变化了 4—6 K, 为了与传统均方根标准差方法的灵敏度结果进行对比, 进一步验证 Allan 标准差可以排除环境噪声对计算结果的影响, 本文将数据分为 4 组, 每组数据量 $N = 400$, 这 4 组数据对应不同的地面观测区域以及不同的接收通道工作温度, 其中第 1 组数据覆盖南极地区, 第 2 组数据位于印度洋区域, 第 3 组数据覆盖海陆交界区域, 第 4 组数据覆盖陆地及北极区域。因为第 2 组目标辐射特征均匀稳定, 对均方根结果的地面干扰较少, 所以均方根标准差结果以第 2 组为准, 各组数据得到的均方根标准差与 Allan 标准差结果见表 1。

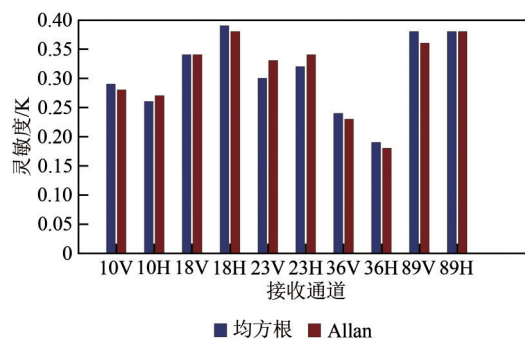


图 1 地面真空定标数据得到的均方根灵敏度和 Allan 灵敏度

Fig. 1 The sensitivities calculated by RMS and Allan methods based on the ground test

表 1 FY-3D 星微波成像仪的均方根灵敏度及 Allan 灵敏度

Table 1 The sensitivities obtained by RMS and Allan methods based on FY-3D MWRI measurements

接收通道	第 1 组		第 2 组		第 3 组		第 4 组	
	均方根	Allan	均方根	Allan	均方根	Allan	均方根	Allan
10V	0.53	0.30	0.31	0.30	1.01	0.30	0.56	0.30
10H	0.67	0.31	0.27	0.31	1.37	0.31	0.67	0.31
18V	0.48	0.39	0.30	0.39	0.58	0.39	0.56	0.39
18H	0.55	0.41	0.36	0.41	0.70	0.41	0.70	0.41
23V	0.32	0.33	0.30	0.33	0.40	0.33	0.43	0.33
23H	0.48	0.36	0.42	0.36	0.39	0.36	0.50	0.36
36V	0.23	0.23	0.27	0.23	0.40	0.23	0.36	0.23
36H	0.28	0.21	0.28	0.21	0.54	0.21	0.54	0.21
89V	0.41	0.49	0.46	0.49	0.46	0.49	0.53	0.49
89H	0.42	0.47	0.52	0.47	0.50	0.47	0.49	0.47

由表1可知,不同组Allan标准差计算的灵敏度结果完全一致,并且与第2组数据得到的均方根标准差结果接近,偏差不超过0.1 K。这说明Allan标准差方法可以准确表示在轨灵敏度,使用Allan标准差可以排除在轨运行过程中环境噪声对灵敏度的影响。同一通道用传统标准差方法时,不同组的灵敏度存在明显差别,这是因为所有接收通道的热源电压均受到来自地球辐射的影响,且低频通道影响最严重。因此,利用传统均方根方法计算不同组的灵敏度时,10.65 GHz通道差别最大。

综上所述,在真空定标试验环境下,微波成像仪的工作环境稳定,接收通道温度变化范围在0.2℃以内,此时利用两种标准差方法得到的灵敏度结果偏差 ≤ 0.03 K,因此Allan标准差方法可以准确计算微波成像仪的灵敏度参数。同时,FY-3D星微波成像仪在轨遥感数据的验证结果证明,与均方根标准差方法相比,Allan标准差可以排除接收机温度变化、地面信号干扰等因素引起的接收机灵敏度误差,更准确的计算微波成像仪在轨运行时的灵敏度参数,这是因为Allan标准差方法统计的是相邻数据之间的偏差,而非观测数据与平均值之间

的偏差,有效消除了观测数据之间的相关性,从而去除环境噪声的影响。通过验证地面定标及在轨遥感数据结果证明Allan方法可以用于分析风云三号微波成像仪在轨灵敏度的长期稳定性。

4 微波成像仪灵敏度长期稳定性分析

由于FY-3A星微波成像仪在轨运行时间太短,所以不在本文中进行讨论,而FY-3B星微波成像仪由于运行年限超出设计寿命已经永久关机,所以FY-3B星微波成像仪数据覆盖2011-05—2019-05, FY-3C星微波成像仪数据覆盖2013-09—2019-11, FY-3D星微波成像仪数据覆盖2017-11—2019-11。

首先采用Allan方法得到每台微波成像仪每一轨的灵敏度,再求出一天中所有轨道灵敏度的均值作为当天的灵敏度。上述时间范围内FY-3B/C/D这3台微波成像仪的长期灵敏度分别如图2至图4所示,由这3幅图可知,3台微波成像仪的各接收通道灵敏度在轨运行期间稳定性良好,在上述运行时间内,各接收通道在轨灵敏度变化 ≤ 0.02 K。

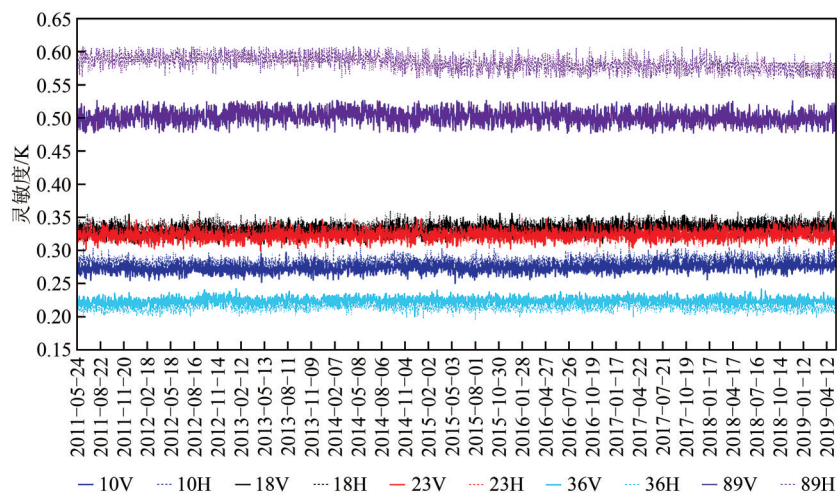


图2 FY-3 B星微波成像仪灵敏度

Fig. 2 FY-3 B MWRI on-orbit sensitivities

需要注意的是, FY-3C星微波成像仪有两次关机操作,分别是2015-05-30—2015-07-11, 2018-03-24—2018-04-01,所以这两段时间内没有观测数据,同时由于关机重启导致微波成像仪接收通道工作状态发生变化,工作状态复位到仪器发射入轨之前的状态,导致成像仪各接收通道检波模块的工作范围偏离在轨运行时的最佳工作状

态,最终导致重新开机后灵敏度下降,2015-10和2018-09分别通过地面遥测指令将检波模块调整到在轨状态最佳工作状态之后,灵敏度也恢复正常。此外,C星微波成像仪36V接收通道由于元器件损坏,导致灵敏度在2016-10左右开始异常。D星微波成像仪在2018-05-16进行接收机工作状态调整,导致10.65 GHz、18.7 GHz接收通道灵敏度抬升。

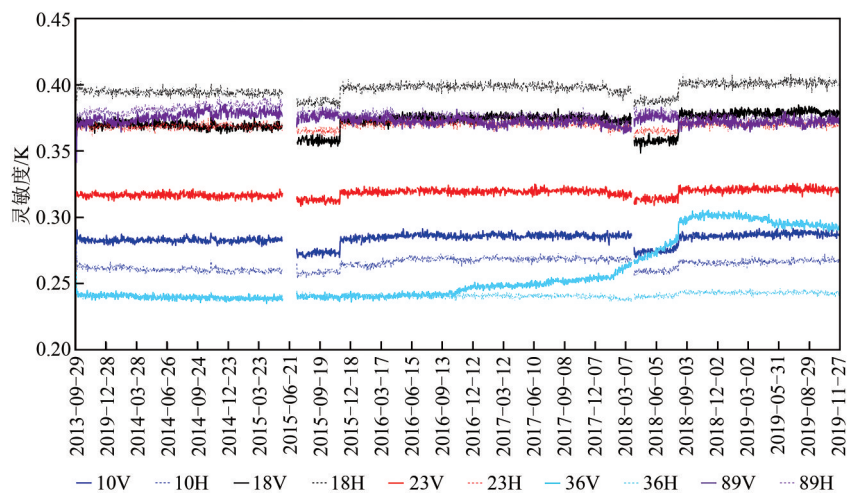


图3 FY-3 C星微波成像仪灵敏度

Fig. 3 FY-3 C MWRI on-orbit sensitivities

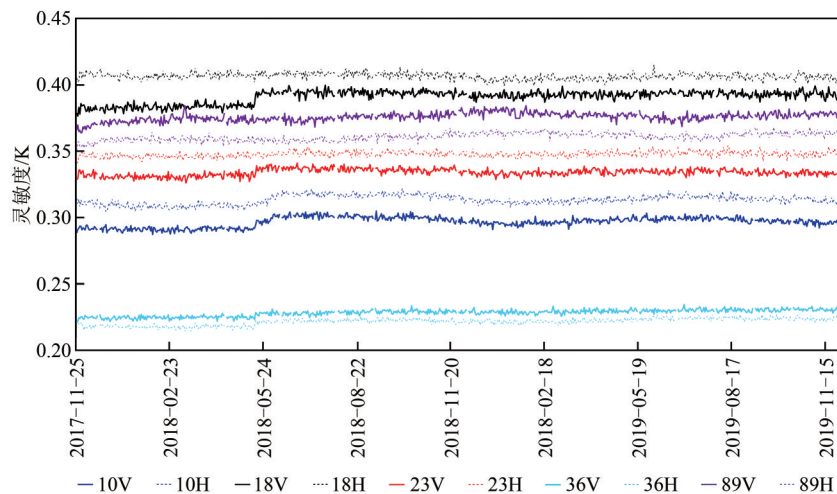


图4 FY-3D星微波成像仪灵敏度

Fig. 4 FY-3D MWRI on-orbit sensitivities

计算上述时间范围内微波成像仪各接收通道的灵敏度均值及标准差,以均值作为微波成像仪在轨运行期间的灵敏度最终性能,以标准差评估微波成像仪在轨业务运行时灵敏度的波动情况,灵敏度均值结果如图5所示,均值及标准差大小详见表2。可知3台仪器的10.65—36.5 GHz接收机灵敏度性能基本一致, FY-3 C/D星微波成像仪的89 GHz接收机明显优于FY-3 B星微波成像仪。除FY-3 C星微波成像仪36V通道外,其他接收通道的灵敏度均保持稳定, FY-3 B星微波成像仪各通道灵敏度的标准差 ≤ 0.012 K, FY-3 C/D星微波成像仪各通道灵敏度的标准差 ≤ 0.01 K。FY-3 C星微波

成像仪36 V通道因为元器件受损,导致灵敏度及其标准差发生异常。

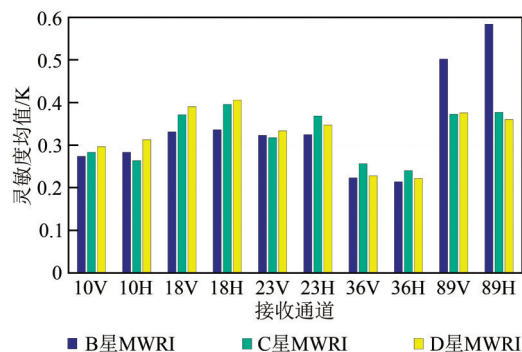


图5 FY-3 B\C\D星微波成像仪在轨灵敏度均值

Fig. 5 Mean sensitivities of the FY-3 B\C\D MWRI

表2 FY-3 B/C/D星微波成像仪在轨灵敏度均值及标准差

Table 2 The mean and standard deviation of the FY-3 B/C/D MWRI sensitivities

接收通道	灵敏度均值/K			灵敏度标准差/K		
	B星	C星	D星	B星	C星	D星
	MWRI	MWRI	MWRI	MWRI	MWRI	MWRI
10V	0.27	0.28	0.30	0.0067	0.0043	0.0038
10H	0.28	0.26	0.31	0.0073	0.0041	0.0035
18V	0.33	0.37	0.39	0.0076	0.0064	0.0048
18H	0.34	0.40	0.41	0.0079	0.0048	0.0025
23V	0.32	0.32	0.33	0.0075	0.0029	0.0026
23H	0.33	0.37	0.35	0.0074	0.0027	0.0021
36V	0.22	0.26	0.23	0.0052	0.0231	0.0025
36H	0.21	0.24	0.22	0.0058	0.0019	0.0026
89V	0.50	0.37	0.38	0.0106	0.0038	0.0075
89H	0.58	0.38	0.36	0.0117	0.0040	0.0030

5 结论

本文首先介绍了星载微波成像仪灵敏度在轨计算的常用方法,再利用地面测试数据对Allan计算方法有效性进行验证,最后利用该方法,分析FY-3 B、C、D共3台仪器的在轨观测数据,评估微波成像仪载荷灵敏度的长期在轨稳定性。最终得出以下几点结论:

(1) Allan标准差统计方法适用于计算风云三号微波成像仪在轨灵敏度参数,利用该方法能够有效滤除微波成像仪在轨运行过程中的环境干扰,可以准确评价FY-3星载微波成像仪灵敏度性能及其长期稳定性。

(2) 结合微波成像仪长期积累的在轨观测数据,计算在轨灵敏度参数,说明微波成像仪的灵敏度长期稳定性约为0.01 K,证明仪器在轨工作状态稳定,性能优异。

(3) FY-3 C、D星微波成像仪的灵敏度性能及其长期稳定性均优于FY-3 B星,说明微波成像仪载荷研制水平有了长足进步。

本文虽然初步分析了灵敏度出现抬升或下降等现象的可能原因,但是仍需要详细分析其中包含的仪器性能变化信息,后续将针对这一方向展开进一步定量研究,分析接收机工作状态调整对微波成像仪灵敏度性能的影响。

参考文献(References)

Allan D W. 1987. Should the classical variance be used as a basic mea-

sure in standards metrology? IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-36(2): 646-654 [DOI: 10.1109/TIM.1987.6312761]

Chen W X, Chi J D, Li Y M and Li H. 2013. Microwave temperature sounding(MWTS)for FY-3 meteorology satellite. Engineering Science, 15(7): 88-91 (陈文新,迟吉东,李延明,李浩. 2013. 风云三号气象卫星微波温度计(MWTS). 中国工程科学, 15(7): 88-91 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.07.013])

Draper D W, Newell D A, Wentz F J, Krimchansky S and Skofronick-Jackson G M. 2015. The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): instrument overview and early on-orbit performance. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(7): 3452-3462 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2403303]

Gao H, Xu R H and Wu S L. 2018. Accuracy evaluation of the FengYun-3C global land surface temperature products retrieval from microwave radiation imager. Meteorological and Environmental Sciences, 41(4): 1-8 (高浩,徐榕焯,武胜利. 2018. 风云三号C星微波全球地表温度产品精度评估. 气象与环境科学, 41(4): 1-8 [DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2018.04.001])

Kunkee D B, Poe G A, Boucher D J, Swadley S D, Hong Y, Wessel J E and Uliana E A. 2008. Design and evaluation of the first special sensor microwave imager/sounder. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(4): 863-883 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.917980]

Qiao M, Yang H, He J K and Lyu L Q. 2012. On-orbit performance stability analysis of microwave radiometer imager onboard FY-3 Satellite. Journal of Remote Sensing, 16(6): 1246-1261 (乔木,杨虎,何嘉恺,吕利清. 2012. 风云三号卫星微波成像仪在轨性能稳定性分析. 遥感学报, 16(6): 1246-1261 [DOI: 10.11834/jrs.20121318])

Skou N and Le Vine D. 2006. Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis. 2nd ed. Norwood: Artech House

Tian M, Zou X L and Weng F Z. 2015. Use of Allan deviation for characterizing satellite microwave sounder Noise Equivalent Differential Temperature (NEDT). IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(12): 2377-2480 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2485945]

Ulaby F T, Moore R K and Fung A K. 1988. Microwave Remote Sensing: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Beijing: Science Press

Wang Z Z, Zhang S W, Li J, Li Y and Wu Q. 2013. Thermal/vacuum calibration of microwave humidity sounder on FY-3B satellite. Engineering Science, 15(10): 33-46, 53 (王振占,张升伟,李靖,李芸,吴琼. 2013. FY-3B卫星微波湿度计热真空定标方法和结果分析. 中国工程科学, 15(10): 33-46, 53 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.10.005])

Yang H, Li X Q, You R and Wu S L. 2013. Environmental data records from FengYun-3B Microwave Radiation Imager. Advances in Meteorological Science and Technology, 3(4): 136-143 (杨虎,李小青,游然,武胜利. 2013. 风云三号微波成像仪定标精度评价及业务产品介绍. 气象科技进展, 3(4): 136-143 [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.014])

Yang H, Weng F Z, Lv L Q, Lu N M, Liu G F, Bai M, Qian Q Y, He J K and Xu H X. 2011. The FengYun-3 Microwave radiation imager on-orbit verification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11): 4552-4560 [DOI: 10.1109/TGRS. 2011. 2148200]

Zhang P, Yang H, Qiu H, Ma G, Yang Z D, Lu N M and Yang J. 2012. Advances in Meteorological Science and Technology, 2(4): 6-11 (张鹏, 杨虎, 邱红, 马刚, 杨忠东, 卢乃锰, 杨军. 2012. 风云三号卫星的定量遥感应用能力. *气象科技进展*, 2(4): 6-11) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.04.001]

Long-term sensitivity stability of space-borne microwave imager using the Allan method

DONG Kesong, XIE Xinxin, HE Jiakai, LI Xue, MENG Wanting, WANG Pingkai

The Shanghai Spaceflight Institute of TT&C and Telecommunication, Shanghai 201109, China

Abstract: The Microwave Radiation Imager (MWRI) is a main payload of the second-generation Chinese polar-orbiting meteorological satellite Fengyun-3. The MWRI observes the Earth radiation at 10.65 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 36.5 GHz, and 89 GHz with dual polarization. Sensitivity is the minimum transformation amount of the brightness temperature that can be detected by the radiometer, that is, the equivalent noise temperature of the radiometer system; it is expressed as the Root Mean Square (RMS) standard deviation of the output temperatures when the radiometer observes a target with a fixed bright temperature. Therefore, sensitivity is a key parameter for evaluating the performance of the MWRI, and the long-term stability of this parameter could directly affect the application of remote sensing data. At present, the brightness temperature data of the hot load (black body) equipped on the MWRI are used to evaluate the on-orbit sensitivity of the instrument. However, when the spaceborne microwave imager is in flight, the hot load measurements could be affected by environmental noise, such as receiver temperature and ground Radio Frequency Interference (RFI), resulting in errors in the on-orbit sensitivity obtained by the RMS method. The validity of the Allan standard deviation method is studied to calculate the sensitivity and accurately evaluate the on-orbit sensitivity of the spaceborne microwave imager, and then the Allan method is used to evaluate the long-term stability of the on-orbit sensitivity of the MWRI on board FY-3 B, C, and D satellites.

Combining the ground and on-orbit observations of the MWRI, two methods of root mean square standard deviation and Allan standard deviation were used to calculate the sensitivities of the imager. The comparison found that: (1) The deviation between the results obtained by Allan method and the ground test is less than 0.03 K, indicating that under the vacuum calibration test, the Allan method can effectively calculate the sensitivity parameters of the radiometers. (2) When the observation area of the space-borne microwave imager is different, the on-orbit sensitivity obtained by Allan method is unchanged, indicating that the Allan method can eliminate the interference of RFI. (3) The on-orbit sensitivity obtained by Allan standard deviation is unaffected by the receiver's ambient temperature change. Therefore, the Allan method could be used to calculate the on-orbit sensitivity of a space-borne microwave imager.

The Allan method was used to analyze the long-term stability of the on-orbit sensitivity of MWRI on board FY-3B, C, and D satellites, and concluded that: (1) The on-orbit sensitivities of the three microwave imagers were stable, and the stability of FY-3C and FY-3D MWRI is better than that of FY-3B MWRI. The standard deviation of the on-orbit sensitivity of the FY-3B MWRI is ≤ 0.015 K, and the standard deviation of the on-orbit sensitivity of the FY-3C and FY-3D MWRI is ≤ 0.01 K. (2) FY-3C and FY-3D MWRI sensitivities are the same, and the sensitivities of the 89 GHz receiving channels of the FY-3C and FY-3D MWRI are significantly better than that of the FY-3B MWRI. The sensitivity of each receiving channel of the FY-3C and FY-3D MWRI is better than 0.5 K, and that of the FY-3B MWRI is better than 0.6 K.

The comparison of the ground test data and on-orbit observations confirmed that the Allan method can effectively calculate the sensitivity of the spaceborne radiometers. In addition, the calculation results of the FY-3 MWRI show that the on-orbit sensitivity of the MWRI is good, and the long-term on-orbit working state is stable.

Key words: FY-3 MWRI, sensitivity, RMS method, Allan method, long-term stability

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504900, 2018YFB0504902); National Natural Science Foundation of China (No. 41805024)