

FY-3D微波成像仪非线性特征及计算方法优化

董克松¹, 谢鑫新¹, 李雪¹, 刘伟亮²

1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

2. 上海航天技术研究院, 上海 201109

摘要: 风云三号D星(FY-3D)微波成像仪采用10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz和89.0 GHz双极化通道对地表辐射信息进行测量, 定标精度会直接影响遥感数据的准确性。影响定标精度的主要因素之一是成像仪系统的非线性特征, 用物理参数—非线性系数表示。所以准确计算非线性系数是地面热真空定标试验的主要目的之一, 在95—298 K范围内设置不同变温源温度点, 每一个温度点对应一个非线性系数, 这些非线性系数的平均值即是系统最终的非线性系数值。受系统原理和试验条件的限制, 计算平均值时需要确定变温源温度的有效范围, 目前使用的范围确定方法是设计师首先依据经验提出几组可能的温度范围, 然后对比每个范围的定标结果, 选出最优的温度范围。显然, 这种方法很容易受到人为因素的影响, 而且由于不具备遍历所有温度范围的试验条件, 无法确定每个变温源温度点的有效性。为了准确获得非线性系数值, 首先通过分析热真空定标试验数据证明非线性系数与场景亮温无关, 然后提出了一种优化计算方法, 采用t准则确定有效范围得到非线性系数值。对比优化前后两种方法的结果表明, 新方法的非线性亮温拟合残差的平均值和标准差值以及非线性亮温的最大拟合值都减小了。由此可见, 新方法在计算非线性系数时可以获得更准确的变温源温度范围, 可以优化非线性亮温的拟合效果, 并且将定标精度提高0.04 K, 优化效果在10 GHz接收机以及环境温度较高时尤为明显。

关键词: 微波遥感, 微波成像仪, 辐射计定标, 非线性系数, 非线性亮温, t分布检验准则

引用格式: 董克松, 谢鑫新, 李雪, 刘伟亮. 2020. FY-3D微波成像仪非线性特征及计算方法优化. 遥感学报, 24(3): 226-232

Dong K S, Xie X X, Li X and Liu W L. 2020. Nonlinear characteristics of FY-3D microwave radiation imager and an optimal calculation method. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(3): 226-232[DOI:10.11834/jrs.20208274]

1 引言

风云三号系列卫星是中国第二代极轨气象卫星。微波成像仪作为风云三号D星(FY-3D)的主要微波探测载荷之一, 采用了10.65 GHz、18.7 GHz、23.8 GHz、36.5 GHz和89.0 GHz等5个频率双极化探测方式, 且其在轨定标精度优于2 K(乔木等, 2012), 在高精度探测地表辐射信息的任务中发挥着非常重要的作用(Yang等, 2011; 张森等, 2018)。

微波成像仪在轨运行时能否取得准确有效的地表亮温遥感数据, 主要取决于微波成像仪的定标精度。为了保证微波成像仪在轨运行时的定标精度, 必须在发射之前进行地面热真空定标试验

(陈卫英等, 2016)。地面定标方法包括两类: 分步定标法和整机定标法, 其区别在于是否将天线和接收机作为整体进行定标(肖志辉等, 2000)。分别对接收机和天线进行定标的方法即为分步定标法, 可以采用金属斗技术和致冷负载技术分别标定天线和接收机(乌拉比等, 1988); 将接收机与天线视为整体, 直接对整体系统进行定标即为整机定标法, 包括液氮定标法(Hardy, 1973)、倾斜曲线定标法(叶辉, 2012)以及增量基准定标法(彭树生和李兴国, 1997)等。

FY-3D微波成像仪的地面定标采用液氮定标法。在地面热真空定标过程中, 定标精度受到成像仪系统非线性的影响较大(刘高峰等, 2014)。

收稿日期: 2018-07-02; 预印本: 2018-09-06

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); 2017年上海市浦江人才计划(编号:17PJ1403400)

第一作者简介: 董克松, 1994年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为星载微波辐射计系统仿真以及遥感数据应用。E-mail: dslexwpg@163.com

通信作者简介: 谢鑫新, 1984年生, 女, 高级工程师, 研究方向为主动和被动微波遥感。E-mail: xinxinxiexie@ymail.com

在成像仪系统中,用系统非线性亮温值表示系统非线性引入的误差大小,用接收机的物理参数—非线性系数 u 表示系统的非线性特征 (Yang 等, 2011),所以非线性亮温值是定标精度的关键指标之一。要想得到非线性亮温值,就要先在地面定标过程中确定接收机的非线性系数。因此,研究系统非线性的变化规律,优化非线性系数的计算方法对于提高定标精度来说是非常必要的。

目前国内外针对接收机非线性特征的分析方法常用的是加利福尼亚喷气动力实验室提出的经典小U非线性订正方法 (NASA, 2006),国内外的同类仪器如国内风云气象卫星系列的 MWRI、MWTS 以及美国的 SSM/I (Hollinger 等, 1990) 和 GMI (2016) 等在定标过程中均采用此方法。安大伟等 (2016) 针对 FY-3C 微波温度计提出的利用高次项定标方程进行非线性定标的新方法适用于辐射计接收机线性度很差的情况。

本文首先分析了 FY-3D 微波成像仪地面定标试验结果,证明接收机的非线性系数与输入亮温无关,并且检波模块引入的高次谐波是影响非线性的主要原因。然后,对地面试验的非线性系数进行统计分析,并提出了一种基于 t 分布检验准则 (费业泰, 2015) 的非线性系数优化方法。最后通过对比优化前后的拟合非线性亮温值及其残差的统计特征,证明 t 分布检验方法可以优化拟合效果、提高定标精度。

2 微波成像仪非线性定标原理

成像仪定标原理图如图 1,其中 T_{lin} 表示场景亮温的线性部分,简称为线性亮温。 T_A 表示实际的场景亮温值,简称为实际亮温。 T_H 表示热定标源的亮温值, T_C 表示冷定标源的亮温值, V_H 表示热源对应的输出电压, V_C 表示冷源对应的输出电压, V_A 表示实际亮温对应的输出电压。

微波成像仪采用“两点定标”原理:设置热定标源和冷定标源两个定标点,则定标增益 G 表示如下

$$G = \frac{T_H - T_C}{V_H - V_C} \quad (1)$$

因此线性亮温部分可以表示为线性定标方程的形式,如下

$$T_{lin} = T_H + G(V_A - V_H) \quad (2)$$

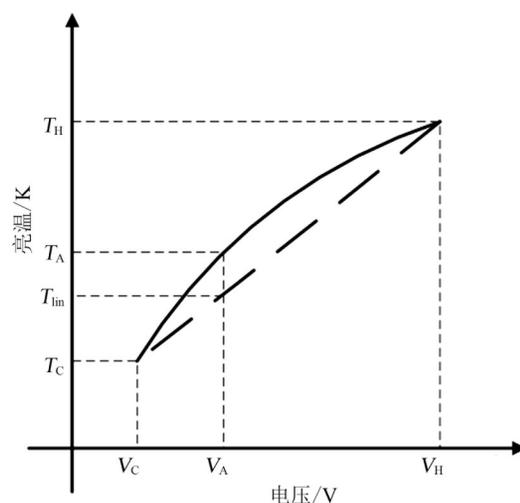


图1 定标原理示意图

Fig.1 The figure of calibration principle

然而,受接收机状态、工作环境等因素影响,输入亮温与输出电压之间并非严格的线性关系。 T_{min} 表示实际亮温与线性亮温之间的差值,即系统的非线性亮温,是影响成像仪系统定标精度的主要因素之一。

$$T_{min} = T_A - T_{lin} \quad (3)$$

式 (3) 给出了非线性亮温 T_{min} 的计算原理。在地面真空定标试验过程中, T_A 用变温源的物理温度代替; T_{lin} 由线性定标方程计算得到。

非线性亮温的主要来源是检波模块中的非线性元器件,包括检波二极管、高频滤波电容等。同时检波模块以外的其他模块也包含有非线性电路元件,也会引入非线性偏差。因此非线性亮温是接收机的固有属性,只能通过调节工作状态来抑制,而不能彻底消除。根据平方律检波原理,对线性定标方程进行二次项修正得到 (刘新, 2009)

$$T_A = a_0 + a_1 V_A + a_2 V_A^2 \quad (4)$$

式中, a_i 表示定标方程系数。定标方程的 3 个定标系数可以表示成定标增益 G 和非线性系数 u 的变量

$$a_0 = T_H - V_H \cdot G + u V_H V_C G^2 \quad (5)$$

$$a_1 = G - u(V_H + V_C)G^2 \quad (6)$$

$$a_2 = uG^2 \quad (7)$$

通过式 (1) — 式 (7),可以得出系统非线性系数 u 与非线性亮温 T_{min} 之间的关系。式 (8) 即为非线性系数的计算原理。

$$u = \frac{T_{min}}{G^2(V_A - V_H)(V_A - V_C)} \quad (8)$$

微波成像仪地面热真空定标试验的实施方案是：将成像仪接收机的工作温度分别设置为 10°C 、 15°C 、 20°C ，在变温源温度循环过程中保证工作温度的稳定。冷定标源温度设定为 95 K ，热定标源温度设定为 298 K 。变温源温度测试点选择 $95\text{—}298\text{ K}$ 区间共19个值，用变温源温度表示观测场景亮温。记录成像仪不同变温源温度下的观测数据，包括辐射源的温度以及相应的接收机输出电压值，即可计算非线性系数 u ，取变温源温度在 $110\text{—}270\text{ K}$ 范围内的非线性系数均值 \bar{u} 作为非线性系数的真值；最后根据 \bar{u} 和式(8)拟合非线性亮温曲线。在不同的接收机工作温度下，非线性系数计算方法和系统非线性特征一致，所以下面以接收机工作温度为 15°C 为例进行说明。

3 非线性特征分析

图2为接收机工作温度为 15°C 时，各通道非线性系数与变温源温度的关系曲线。由图2可知， 18.7 GHz 、 23.8 GHz 、 36.5 GHz 和 89.0 GHz 共4个通道的非线性系数曲线呈一条平行于横轴的水平线形式，说明非线性系数只与接收机的工作状态（包括环境温度、噪声系数、工作动态范围等）相关，与场景亮温无关。 10.65 GHz 接收机非线性系数值随变温源温度上升而上升，说明该接收机线性度较差，受系统非线性亮温影响较大。原因可能是 10.65 GHz 接收机噪声系数比较小，同时检波模块输入、输出动态范围比较大，在保证最佳工作点偏差最小的前提下，检波工作区域内引入了高次谐波。此外，变温源温度接近两个定标点温度时，非线性系数的标准偏差较大。这是由于在地面定标试验中，当变温源温度接近定标源温度时，非线性系数会趋于无穷，导致非线性系数的标准偏差值较大。

图3是非线性亮温曲线，其中图3(a)是真空定标试验得到的实际非线性亮温曲线，图3(b)是拟合非线性亮温曲线。由图3可知， 10.65 GHz 通道的非线性亮温值要大于其他通道，说明该频率接收机的线性度较差，系统非线性对定标精度的影响较大，这与图2中非线性系数的变化规律一致。

图4为各接收通道非线性亮温拟合残差曲线。

残差曲线规律近似正弦曲线，表明在接收机的检波过程中，确实引入了高次谐波。高次谐波对所有通道的非线性都有影响，其中 10.65 GHz 通道受影响最大约为 0.5 K ，其余4个频率的影响均小于 0.3 K ，说明图3的非线性亮温拟合曲线与试验曲线特征一致，并且高次谐波的引入是影响系统非线性的主要原因。

4 非线性系数计算方法优化

地面试验的非线性系数计算方法中，用变温源温度 $110\text{—}270\text{ K}$ 范围内非线性系数的均值表示非线性系数的真值。变温源温度范围确定依据有两个，第一是根据非线性参数计算原理，当变温源温度接近定标点温度时，输出电压接近冷热定标源对应的输出电压，所以应去除冷热两个定标点；第二是根据设计师的丰富经验选择拟合效果较优的 $110\text{—}270\text{ K}$ 变温源温度范围。

在处理地面试验数据的过程中，通过分析非线性系数的标准偏差验证了第一个依据，即两个定标点的数据可以直接去掉。此外，在定标点温度附近的标准偏差也较大，因此在此基础上提出了一种基于t分布检验准则的优化方法，t分布检验系数如表1所示，可以通过分析非线性系数的标准偏差来选择合适的变温源温度范围。

依据统计学方法，当测量次数较少时，按照t分布的实际误差分布来判别粗大误差较为合理，t检验准则又被称为罗曼诺夫斯基准则。其特点是首先剔除一个可疑的测得值，然后按t分布规律检验被剔除的测量值是否含有粗大误差。根据t检验准则原理（费业泰，2015），t分布检验计算方法要满足两个使用条件：(1)变温源温度数目（不包含冷热定标点温度） n 满足 $10 \leq n \leq 30$ ；(2)测量过程中成像仪有效扫描线条数要足够多，目前FY-3D微波成像仪热真空定标过程中扫描线条数是100条。

地面定标试验时，共设置了 $95\text{—}298\text{ K}$ 范围内19个变温源温度。对应每个变温源温度，计算其非线性系数的标准偏差，可以得到代表非线性系数标准偏差的19个测量值。由于计算原理本身的限制，变温源温度为 95 K 和 298 K 的两个数据直接去掉，对剩余的17个测量值做t分布检验。

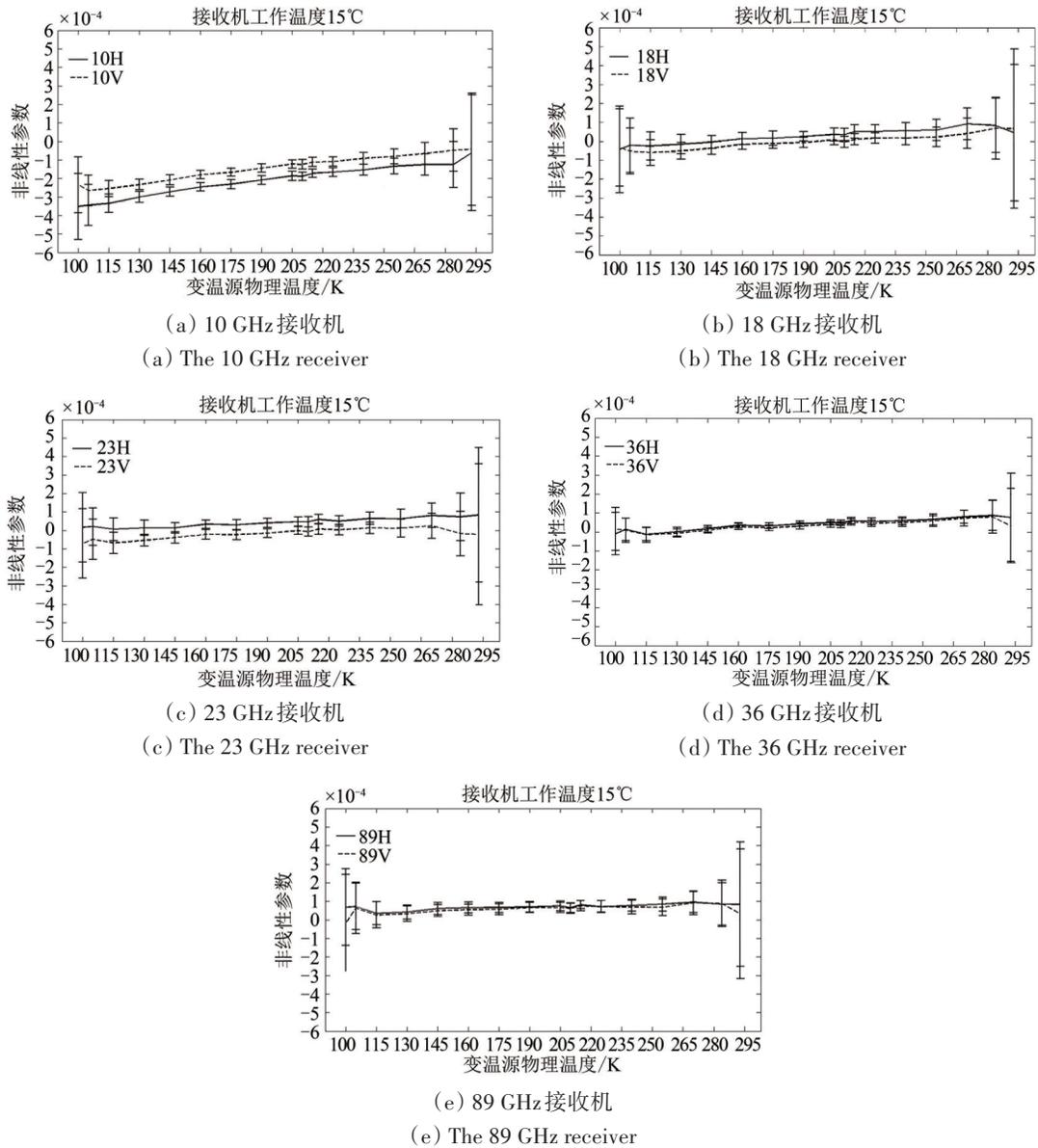


图2 接收机工作温度为15°C时各接收机通道每个变温源温度点对应的非线性系数及其标准偏差
 Fig.2 Nonlinear parameter and its standard deviation at all channels when receivers' temperature is 15°C

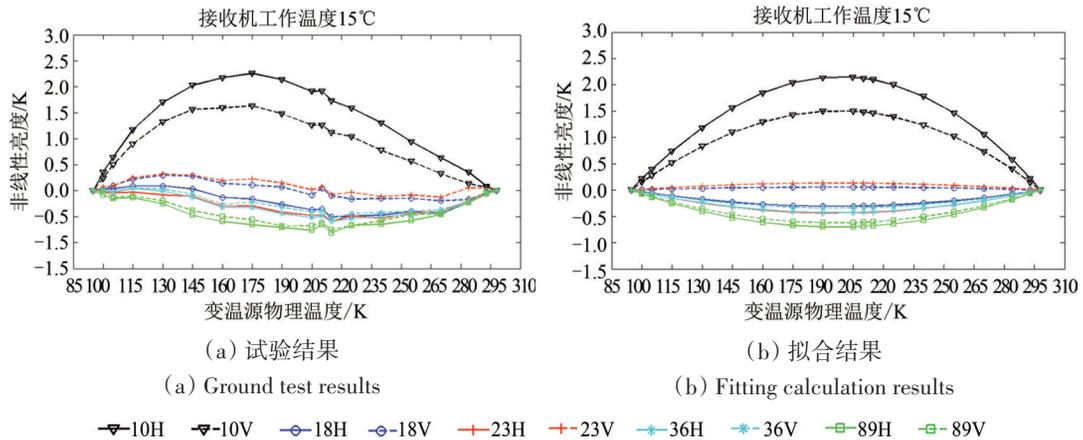


图3 接收机通道试验测量的非线性亮度曲线和非线性亮度拟合曲线

Fig.3 Nonlinear brightness temperature at all channels obtained from ground tests and fitting calculation

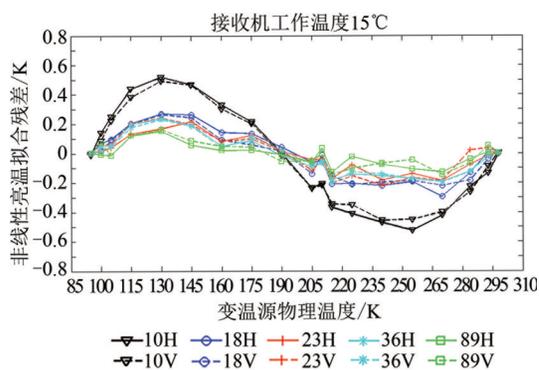


图4 各接收机通道非线性亮温拟合残差曲线

Fig.4 Residual error of nonlinear brightness temperature at all channels

判别法流程图见图5，具体步骤如下。

- (1) 计算 n 个测量值的平均值 \bar{x}_{ori} ，以及每个测量值与平均值差的绝对值 $v_j = |x_j - \bar{x}_{ori}|$ ；
- (2) 找到最大的绝对值 $\max(v_j)$ ，将对应的测量值 x_j 视为可疑数据；
- (3) 求剔除掉 x_j 之后的剩余测量列数据的平均值 \bar{x}_{sub} 及其标准差 σ ；
- (4) 检验判定时，显著度 $\alpha = 0.05$ ，接收机工作温度为 15°C 时，测量次数 $n = 17$ ，根据表1选择检验系数 $K(17, 0.05)$ ，比较 $|x_j - \bar{x}_{sub}|$ 与 $K\sigma$ 的大小；
- (5) 若 $|x_j - \bar{x}_{sub}| > K\sigma$ ，将 x_j 剔除掉是正确的，

则将剩余测量数据作为新的待判定数据，测量次数为 $n = n - 1$ ，返回第1步重新计算；

表1 t分布检验系数表

Table 1 t-distribution factors

测量次数 n	显著度 $\alpha = 0.05$	显著度 $\alpha = 0.01$
10	2.43	3.54
11	2.37	3.41
12	2.33	3.31
13	2.29	3.23
14	2.26	3.17
15	2.24	3.12
16	2.22	3.08
17	2.20	3.04
18	2.18	3.01
19	2.17	3.00
20	2.16	2.95
21	2.15	2.93
22	2.14	2.91
23	2.13	2.90
24	2.12	2.88
25	2.11	2.86
26	2.10	2.85
27	2.10	2.84
28	2.09	2.83
29	2.09	2.82
30	2.08	2.81

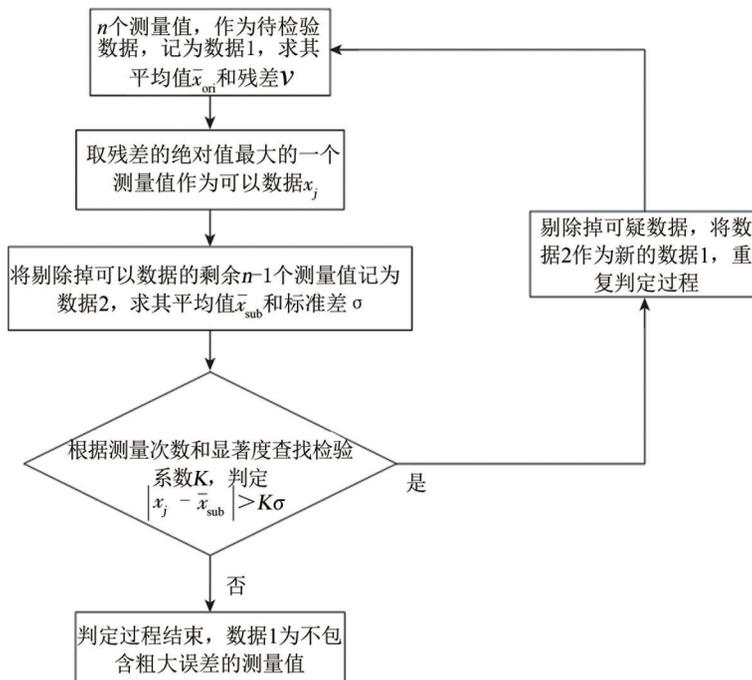


图5 检验判别关键步骤的流程图

Fig.5 The flow chart of the t-distribution method

(6) 否则保留 x_i , 判别过程结束;

(7) 保留下来的测量值对应的变温源温度范围作为非线性系数计算的变温源范围;

(8) 由图3可知, 高频通道的非线性优于低频通道, 所以判别结果以 89.0 GHz 通道为准;

(9) 取标准范围对应的非线性系数平均值作为接收机的非线性系数。

5 计算结果

根据上述说明, 本文首先利用 FY-3D 微波成像仪真空定标数据得到了接收机的非线性亮温拟合结果及残差。然后依据 t 分布检验准则优化计算方法, 获得了优化之后的非线性亮温拟合结果及残差。

表2列出了优化前后各通道绝对拟合残差的平均值、标准偏差以及非线性亮温最大拟合值, 其中优化前是原始试验结果, 优化后是使用本方法得到的结果。绝对拟合残差平均值和标准偏差的减小说明优化之后取得了更好的拟合效果, 非线性亮温最大拟合值的减小说明优化之后获得了更高的定标精度。

表2 接收机工作温度 15°C 时, 各通道绝对拟合残差的平均值、标准偏差以及非线性亮温最大拟合值

Table 2 The mean value and standard deviation of absolute residual error, and the maximum fitting results of nonlinear brightness temperature at all channels when receivers' temperature is 15°C

接收机通道	绝对拟合残差平均值		绝对拟合残差标准偏差		非线性亮温最大拟合值	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
10 V	0.262	0.258	0.1638	0.1633	1.50	1.47
10 H	0.283	0.279	0.1744	0.1710	2.15	2.11
18 V	0.123	0.122	0.0914	0.0907	0.06	0.05
18 H	0.137	0.137	0.0956	0.0959	0.31	0.30
23 V	0.112	0.111	0.0817	0.0798	0.13	0.12
23 H	0.091	0.092	0.0711	0.0712	0.43	0.43
36 V	0.102	0.101	0.0782	0.0775	0.34	0.35
36 H	0.107	0.105	0.0752	0.0759	0.43	0.44
89 V	0.068	0.067	0.0493	0.0494	0.62	0.63
89 H	0.053	0.053	0.0506	0.0502	0.70	0.71

表2所示定标结果说明: t 分布检验计算方法可以优化非线性亮温的拟合效果, 降低非线性亮温值, 提高定标精度。其中对于低频的 10 GHz 通道优化效果最为明显, 对于高频通道的拟合效果

有优化, 而定标精度的改变不明显, 但由于高频通道本身定标精度较高, 所以认为本方法同样适用于高频通道。

6 结论

本文首先介绍了成像仪的定标原理, 利用地面热真空定标试验数据验证非线性系数特性, 然后提出基于 t 分布检验准则的非线性系数优化计算方法, 该方法适用于微波成像仪的地面热真空定标试验过程, 最终得出以下几点结论:

(1) 非线性系数是接收机本身的物理参数, 受接收机工作状态、工作环境的影响, 与观测场景亮温无关。各通道检波过程引入的高次谐波是影响系统非线性的主要因素, 尤其对 10.65 GHz 通道影响最大。要想完美刻画并有效去除高次谐波的影响, 需要从系统原理层面进行更深入分析。

(2) t 分布检验计算方法可以优化非线性亮温的拟合效果, 更好的描述成像仪系统非线性特征。同时该方法可以减小非线性亮温值, 提高成像仪系统的定标精度 0.04 K。

(3) t 分布检验计算方法得到的定标精度结果可以作为仪器设计指标, 在入轨后, 为仪器在轨定标提供支撑, 在仪器正常在轨运行的整个寿命周期内发挥作用。

总之, 微波成像仪系统的非线性亮温是影响定标精度的主要因素之一。本文的研究结论既验证了微波成像仪系统的非线性特征, 又为地面热真空定标试验提供了一种优化思路和方法。为了更好的实现定量微波遥感, 相关技术人员仍需要从成像仪的系统组成原理以及数据定标两方面着手进行更深入的研究。

参考文献 (References)

- An D W, Gu S Y, Yang Z D and Chen W X. 2016. On-orbit radiometric calibration for nonlinear of FY-3C MWTS. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 35(3): 317-321(安大伟, 谷松岩, 杨忠东, 陈文新. 2016. FY-3C 微波温度计在轨辐射非线性定标新方法. *红外与毫米波学报*, 35(3): 317-321)[DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2016.03.011]
- Chen W Y, Wang Y, Li X, Xing R X and Liu G F. 2016. The test system, method and results analysis of the vacuum calibration test of microwave radiation imager. *Journal of Microwaves*, 32(S2): 544-547(陈卫英, 王芸, 李雪, 邢瑞先, 刘高峰. 2016. 微波成像仪真空定标试验系统、方法和结果分析. *微波学报*, 32(S2): 544-547)
- Fei Y T. 2015. *Error Method and Data Processing*. 7th ed. Beijing: China Machine Press (费业泰. 2015. 误差理论与数据处理. 7版. 北

- 京: 机械工业出版社)
- Hardy W N. 1973. Precision temperature reference for microwave radiometry (Short Papers). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 21(3): 149-150 [DOI: 10.1109/TMTT. 1973. 1127954]
- Hollinger J P, Peirce J L and Poe G A. 1990. SSM/I instrument evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5): 781-790 [DOI: 10.1109/36.58964]
- JPL. 2012. AIRS Project. Algorithm Theoretical Basis Document. Level 1b, Part 3: Microwave Instruments.[s.l.]: JPL
- Liu G F, Wu S L, Chen W Y, Pan L and He J K. 2014. Calibration system and achievement of microwave radiation imager of FY-3 satellite. *Journal of Microwaves*, 30(S1): 576-579(刘高峰, 武胜利, 陈卫英, 潘莉, 何嘉恺. 2014. FY-3 卫星微波成像仪定标系统及实现. *微波学报*, 30(S1): 576-579)[DOI: 10.14183/j.cnki.1005-6122.2014.s1.164]
- Liu X. 2009. Design and Application of the Spaceborne Microwave Radiometer. Shanghai: Shanghai Jian Tong University (刘新. 2009. 星载微波辐射计的设计及应用. 上海: 上海交通大学)
- Peng S S and Li X G. 1997. Study on the calibration method of 8mm measuring radiometer. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 16(4): 279-284 (彭树生, 李兴国. 1997. 8mm 测量辐射计定标方法的研究. *红外与毫米波学报*, 16(4): 279-284)
- Precipitation Processing System (PPS). 2006. NASA Global Precipitation Measurement Microwave Imager Level 1B Algorithm Theoretical Basis Document Version 2.3. NASA's GODDARD Space Flight Center
- Qiao Mu, Yang Hu, He Jiakai and Lyu Liqing. 2012. On-orbit performance stability analysis of microwave radiometer imager on-board FY-3 Satellite[J]. *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[J]. *遥感学报*, 16(6): 1246-1261)
- Ulaby F T, Moore R K and Feng J C. 1988. *Microwave Remote Sensing (Volume I) Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Hou S C and Ma X G, trans. Beijing: Science Press (F T. 乌拉比, RK 穆尔, 冯健超. 1988. *微波遥感(第一卷): 微波遥感基础和辐射测量学*. 侯世昌, 马锡冠, 译. 北京: 科学出版社)
- Xiao Z H, Zhang Z Y and Guo W. 2000. A review: the calibration of ground-based, airborne and satellite-borne microwave radiometers. *Remote Sensing Technology and Application*, 15(2): 113-120 (肖志辉, 张祖荫, 郭伟. 2000. 地基、空基、星基微波辐射计定标技术概览. *遥感技术与应用*, 15(2): 113-120)[DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2000.02.011]
- 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]
- Ye H. 2012. Calibration and Error Analysis of Microwave Radiometer. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (叶辉. 2012. 微波辐射计定标与误差分析. 武汉: 华中科技大学)
- Zhang Miao, Wang Sujuan, Qin Danyu, Qiu Hong and Tang Shihao. 2018. The inversion and quality validation of FY-3C MWRI sea surface temperature [J]. *Journal of Remote Sensing*, 22(5): 713-722. (张淼, 王素娟, 覃丹宇, 邱红, 唐世浩. 2018. FY-3C 微波成像仪海面温度产品算法及精度检验[J]. *遥感学报*, 22(5): 713-722)

Nonlinear characteristics of FY-3D microwave radiation imager and an optimal calculation method

DONG Kesong¹, XIE Xinxin¹, LI Xue¹, LIU Weiliang²

1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China

Abstract: The Earth's radiation was observed by a microwave radiation imager (MWRI) on board FengYun-3D (FY-3D) satellite at 10.65 GHz, 18.7 GHz, 23.8 GHz, 36.5 GHz, and 89.0 GHz with dual polarization. The nonlinearity of this payload, as an important parameter in calibration algorithms, is represented by the nonlinear parameter u from vacuum calibration ground tests. Therefore, an accurate knowledge on the nonlinear characteristics of MWRI is required to achieve precise remote sensing.

The nonlinear parameter applied in the calibration algorithm is usually averaged over a set of u , which is calculated at corresponding observed brightness temperatures in the range between 95 K and 298 K. A t-distribution test method is proposed to screen u and further optimize the nonlinearity calculations in this study instead of conventional empirically filtering of u before averaging. The t-method examines the validity of u values at each observed brightness temperatures, and its effectivity is proven in this study.

Nonlinear fitting brightness temperatures, as well as means and standard deviation of residual error, were calculated using empirically filtering method and the t-method to demonstrate the results in the nonlinearity calculation. The nonlinear parameter of MWRI is a physical parameter of the instrument, and the nonlinearity of up to 2 K at 10 GHz is mainly introduced by higher-order harmonic during detection. The nonlinear brightness temperature calculated using the t-test distribution method is improved by approximately 0.04 K with better fitting results than the ground tests, especially at 10 GHz.

According to the results presented in this study, the nonlinear parameter is independent of observed brightness temperatures, and its nonlinearity is correlated to the instrument's working condition. The proposed algorithm using the t-test distribution method can improve the nonlinearity fitting results and calibration precision. This method provides accurate nonlinear parameter for on-orbit calibration and can play a role in the total life cycle of MWRI after being launched.

Key words: microwave remote sensing, microwave radiation imager, radiometers calibration, nonlinear parameter, nonlinear brightness temperature, t-distribution test method

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504900, 2018YFB0504902)