

文章编号: 2095-4980(2016)06-0843-05

星载辐射计接收定标系统灵敏度测试与分析

姜丽菲, 乔 洋, 王 芸, 孙彦龙, 姚崇斌

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 灵敏度是衡量星载微波辐射计性能好坏的重要指标, 直接影响着成像质量。为验证星载辐射计是否满足观测需求, 利用两点定标方法测试了接收及定标系统灵敏度, 分析影响接收及定标系统灵敏度的主要因素和灵敏度测试精确度。结果表明接收定标系统在 D 波段 F 频点灵敏度优于 0.86 K, 测试精确度优于 0.1 K, 可通过优化准光学馈电网络设计, 减小通道插入损耗, 进一步提高接收及系统灵敏度。

关键词: 星载微波辐射计; 灵敏度; 两点定标

中图分类号: TN925⁺.91

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0843

Measurement and analysis on sensitivity of receiving and calibration system of space-borne microwave radiometer

JIANG Lifei, QIAO Yang, WANG Yun, SUN Yanlong, YAO Congbin

(Shanghai Aerospace Electronics Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Sensitivity is an important index to judge the performance of receiving and calibration system, which would affect the image quality of space-borne microwave radiometer directly. In order to verify whether the space-borne radiometers meet the requirements of observation or not, hot and cold calibration methods are adopted to test the receiving and calibration system sensitivity; the factors affecting sensitivity of receiving and calibration system and the measurement accuracy are analyzed. The results prove that the sensitivity of receiving and calibration system is better than 0.86 K, and the accuracy is higher than 0.1 K for F frequency. The system sensitivity can be improved by optimizing the design of quasi-optical feed network and minimizing channel insertion loss.

Keywords: space-borne microwave radiometer; sensitivity; two-point calibration

近年来, 人类的生存和发展总是受到台风、海啸、洪水和山体滑坡等重大自然灾害的威胁, 这些自然灾害造成了巨大的经济和财产损失。据统计我国是灾害频发国之一, 近几年轻因台风造成的年平均经济损失就高达 300 亿元以上。因此, 实时有效的气象预报在人们的日常生活中扮演者重要角色。为了更准确地预报天气, 需要用更小时间分辨力和更高空间分辨力的地球静止微波辐射计探测大气要素和相关环境场。微波辐射计能够不受云、雨和雾的限制, 实现全天候、全天时连续监测及大气三维探测, 典型时间分辨力为 30 min, 局部为 5 min, 为灾害性天气预报提供实时有效监测。灵敏度作为星载微波辐射计的主要技术指标之一, 直接影响着成像质量^[1]。

1 接收及定标系统组成

某星载微波辐射计工作在毫米波和亚毫米波频段、大孔径反射面天线、二维波束扫描、在轨两点周期定标和全功率型接收^[2-3], 探测频段包括 54 GHz, 118 GHz, 183 GHz, 380 GHz 和 425 GHz。接收及定标系统主要由五频点准光学馈电网络、接收机、热定标辐射源和扫描镜组等组成, 组成框图见图 1。

接收及定标系统是微波辐射计的重要组成部分, 接收定标系统不仅要辐射计反射面天线接收到的对地观测场景辐射信号按频率与极化要求转换成数字量, 发送给中央处理器, 还要为反射面天线接收到的地球辐射信号进行高精度定标。

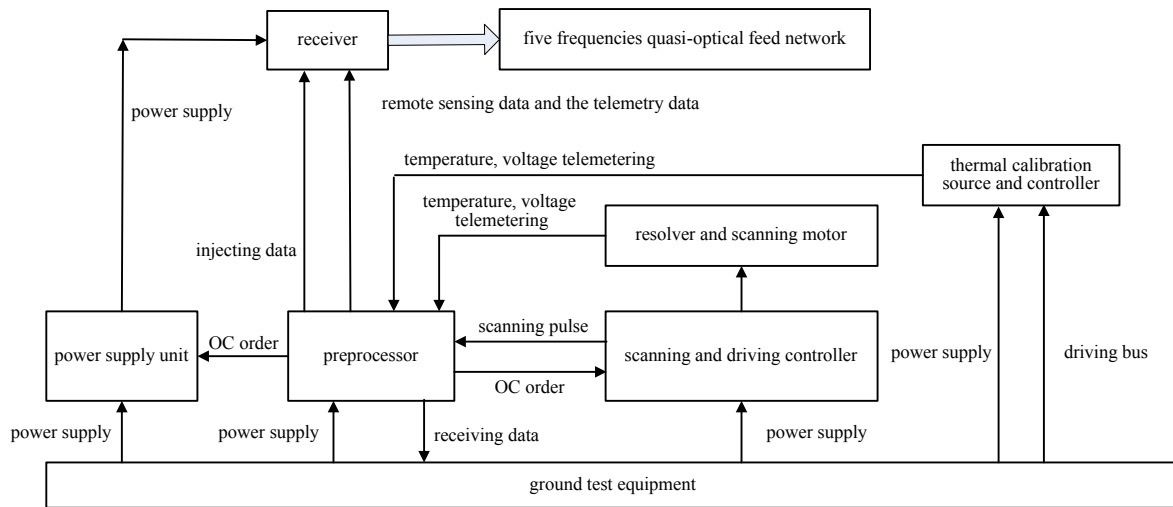


Fig.1 Block diagram of space-borne microwave radiometer receiving and calibration system prototype

图 1 星载辐射计接收及定标系统原理样机组成框图

准光学馈电网络将扫描镜组接收到的观测场景辐射和冷、热定标辐射源信号分极化、分频段馈送至各对应通道接收机输入端口。接收机接收准光学馈电网络送来的 5 个频段的信号, 经变频、放大, 获得带宽为 B 、增益为 G 的多路中频信号, 经平方律检波器检波和低频放大处理并传送至预处理器。预处理器完成接收机通道遥感、定标和运动部分遥测数据的采集处理, 并实现接收机通道的增益控制; 与扫描驱动控制器及热定标源控制器通信, 对辐射计运动部分的工作状态进行测量和控制; 与中央处理器通信, 接收内部指令及数据注入和发送编排成帧的遥感信息和遥测信息^[4]。

2 接收及定标系统灵敏度测试

灵敏度是衡量接收及定标系统好坏的重要指标, 也是辐射计主要技术指标之一。灵敏度亦即温度分辨力, 指辐射计可检测到的最小辐射亮温, 检测的辐射亮温越小, 意味着辐射计分辨力越高, 成像越清晰。根据气象需求, 要求接收及定标系统灵敏度在 D 波段的某频段 F 内优于 1.0 K。

全功率微波辐射计, 灵敏度由系统噪声 T_s 和增益起伏 ΔG_0 两部分引起, 其中由系统噪声起伏引起的灵敏度 ΔT_s 为^[5]:

$$\Delta T_s = T_s / \sqrt{B\tau} \quad (1)$$

式中: B 为检波前带宽; τ 为积分时间。

由系统增益起伏引起的灵敏度 ΔT_G 为:

$$\Delta T_G = T_s \frac{\Delta G_0}{G_0} \quad (2)$$

式中 G_0 为系统增益。

由于噪声不确定性 ΔT_s 和增益不确定性 ΔT_G 的形成机理是没有关系的, 因此可以认为它们在统计上是相互独立的, 可组合起来定义噪声起伏和增益起伏状态下的全功率辐射计灵敏度^[6], 即

$$\Delta T = \left[(\Delta T_s)^2 + (\Delta T_G)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

根据全功率辐射计灵敏度经验公式可知, 影响辐射计系统灵敏度的主要因素为:

1) 系统噪声特性(主要是系统噪声温度): 系统噪声温度主要由 2 部分组成, 一部分是接收机本身的噪声温度, 常温下砷化镓器件已很难降低噪声温度, 若采用低温超导接收机, 会增加低温制冷设备, 从而增加体积、重量、功耗, 影响扫描运动对平台的干扰, 增加技术难度^[4]; 另一部分是系统链路损耗等效噪声温度, 系统链路损耗主要来自准光学馈电网络, 可以通过优化通道插入损耗来提高系统灵敏度。

2) 系统带宽和积分时间: 系统带宽由应用需求确定, 当前 5 个频段均为大气探测频段, 且倾向采用窄带宽通道, 难以提供增加带宽 B 来提高灵敏度; 增加积分时间可提高灵敏度, 但积分时间受到扫描速度、天线波束等影响, 特别是用户对扫描区域重访周期的限制, 不能无限地增加积分时间^[7]。

3) 系统增益起伏引起的附加温度的变化量: 全功率型辐射计对接收机的增益波动稳定性要求较高, 要求增益稳定度应优于 10^{-4} , 高增益稳定度的毫米波辐射计接收机实现较为困难。解决增益变化的方法之一是采用无射频放大器接收机, 二是周期标定, 但周期标定仅能消除比周期更小的间隔上出现的增益变化^[8]。

在实际应用中当系统温度变化量 ΔT 所引起的输出电压均值的变化量等于输出电压标准差 σ 时, 则此温度变化量 ΔT 定义为系统灵敏度, 它综合考虑了噪声和增益两种变化对灵敏度的影响^[9], 即:

$$\Delta T = \frac{\sigma}{\frac{dU}{dT}} \quad (4)$$

式中 $\frac{dU}{dT}$ 是定标直线 $U-T$ 的斜率,

在接收机定标系统中,

$\frac{dU}{dT} = \frac{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}$, 因此微波辐射计

接收及定标系统灵敏度为:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \sigma \quad (5)$$

式中: T_{hot} 为热定标辐射源辐射亮

温; T_{cold} 为冷定标辐射源辐射亮

温; U_{hot} 为系统对准热定标辐射源时输出电压;

U_{cold} 为系统对准冷定标辐射源输出电压; σ 为输出电压标准差。

根据周期两点定标方法, 测试接收及定标系统灵敏度, 测试原理框图与数据分别见图 2 和表 1。

3 灵敏度测试精确度分析

影响系统灵敏度测试精确度的主要因素有:

1) 系统输出电压 U_{hot} , U_{cold} 和方差 U_{rms} :

a) 在计算灵敏度时, U_{hot} , U_{cold} 和 U_{rms} 是多组测试数据的均值, 是一个统计量, 因此受到统计样本个数的影响;

b) U_{cold} 与冷源的辐射亮温 T_{cold} 有关, T_{cold} 越低, U_{cold} 越小, 反之, 则 U_{cold} 越大;

c) U_{cold} 与冷源口径有关, 如果冷源口径不够大, 不能完全覆盖所需的冷源信号, 则会有一部分热源信号进入到系统中, 相当于辐射亮温升高, U_{cold} 也会变大。

2) 辐射源辐射亮温

辐射源辐射亮温 T_B 与发射率 e 、物理温度 T 及环境温度 T_0 有关, 有如下关系式:

$$T_B = Te + T_0(1 - e) \quad (6)$$

经测试, 冷、热辐射源在 D 波段某频段 F 内的发射率为 0.998, 热辐射源的物理温度为室温, 变化量为 0.1 K, 冷辐射源的物理温度为 -194.7°C , 变化量为 1°C 。经分析, 热辐射源辐射亮温比冷辐射源辐射亮温对灵敏度的影响小。

假设被测值 y 通过 N 个独立测量值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 计算得到, 可表示成如下函数形式:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (7)$$

式中 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 为 N 个相互独立的测量值, 测量误差分别表示为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$ 。根据误差传递定律, 被测值 y 的误差 Δy 可表示为:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (8)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 表示函数 $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 对各个变量的偏导数。

接收及定标系统灵敏度 ΔT 是由 5 个相互独立的测量值 U_{hot} , U_{cold} , σ , T_{hot} 和 T_{cold} 计算而得到的, 因此根据式(8),

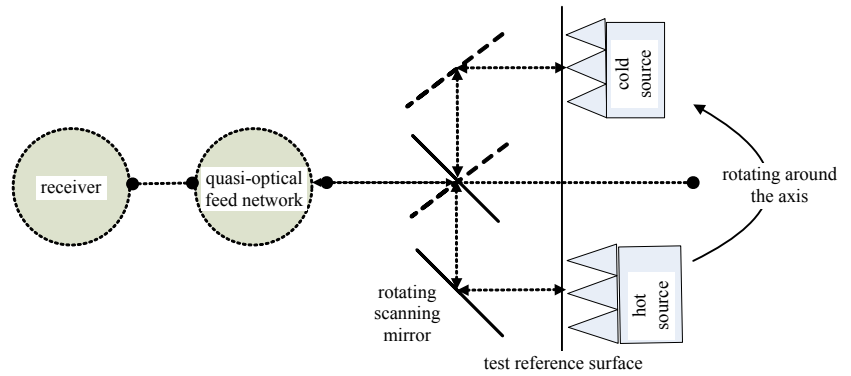


Fig.2 Sensitivity test block diagram of receiving and calibration system

图 2 接收及定标系统灵敏度测试框图

表 1 接收及定标系统 D 波段某频段 F 灵敏度测试数据

Table1 Sensitivity test data of receiving and calibration system

channel label	T_{hot}/K	T_{cold}/K	U_{hot}/V	U_{cold}/V	σ/mV	sensitivity $\Delta T/\text{K}$
channel 1	295	80	8.80	4.67	15.20	0.86
channel 2	295	80	9.36	5.27	9.90	0.57
channel 3	295	80	8.42	4.26	9.40	0.53
channel 4	295	80	8.14	4.02	9.70	0.54
channel 5	295	80	8.92	4.85	15.80	0.84
channel 6	295	80	9.06	4.76	13.18	0.65
channel 7	295	80	8.94	4.67	9.20	0.50

可以得到 ΔT 的测量误差为:

$$\Delta_{\Delta T} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_{\text{hot}}} \Delta T_{\text{hot}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial T_{\text{cold}}} \Delta T_{\text{cold}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial U_{\text{hot}}} \Delta U_{\text{hot}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial U_{\text{cold}}} \Delta U_{\text{cold}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T}{\partial U_{\text{rms}}} \Delta U_{\text{rms}}\right)^2} \quad (9)$$

由式(6)可知辐射源辐射亮温的变化量为:

$$\Delta T_B = T \Delta e + \Delta T e + \Delta T_0 (1 - e) - T_0 \Delta e \quad (10)$$

根据发射率、辐射源物理温度、环境温度的测试得到热源辐射亮温变化量 $\Delta T_{\text{hot}} = 0.1 \text{ K}$, 冷源辐射亮温变化量 $\Delta T_{\text{cold}} = 0.7 \text{ K}$ 。

因此, 灵敏度的测试精确度为:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta T} &= \sqrt{\left(\frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \Delta T_{\text{hot}}\right)^2 + \left(-\frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \Delta T_{\text{cold}}\right)^2 + \left[-\frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{(U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}})^2} \Delta U_{\text{hot}} \Delta U_{\text{rms}}\right]^2 +} \\ &\quad \sqrt{\left[\frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{(U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}})^2} \Delta U_{\text{cold}} \Delta U_{\text{rms}}\right]^2 + \left(\frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} k \Delta U_{\text{rms}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \Delta T_{\text{hot}}\right)^2 + \left(-\frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \Delta T_{\text{cold}}\right)^2 + \left[-\frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{(U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}})^2} \Delta U_{\text{rms}}^2\right]^2 + \left[\frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{(U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}})^2} \Delta U_{\text{rms}}^2\right]^2 + \left(\frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} k \Delta U_{\text{rms}}\right)^2} = \\ &= \frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \sqrt{(\Delta T_{\text{hot}})^2 + (\Delta T_{\text{cold}})^2 + 2 \frac{(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})^2}{(U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}})^2} \Delta U_{\text{rms}}^2 + (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})^2 k^2} = \\ &= \frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} \sqrt{(\Delta T_{\text{hot}})^2 + (\Delta T_{\text{cold}})^2 + 2 \Delta T^2 + (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})^2 k^2} \approx \frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{hot}} - U_{\text{cold}}} (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) k = k \Delta T \end{aligned} \quad (11)$$

式中 k 表示每次测试统计的方差与标准方差之间的偏移系数, 根据多次测试数据, k 通常小于 10%。

4 结论

本文在介绍某微波辐射计接收及定标系统组成的基础上, 分析了影响辐射计系统灵敏度的主要因素, 并进行了系统灵敏度的精确度分析及测试。测试结果表明灵敏度指标满足气象需求, 可通过优化准光学馈电网络、降低链路插入损耗、研制高增益稳定度接收机等方法进一步提高系统灵敏度。

参考文献:

- [1] 桂良启, 张祖荫, 郭伟. 对微波辐射成像质量影响因素的分析[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 432-436. (GUI Liangqi, ZHANG Zuyin, GUO Wei. Analysis on the influence factors of microwave radiometric imaging quality[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 432-436.)
- [2] BIZZARRO Bizzarri. Geostationary Observatory for Microwave Atmospheric Sounding(GOMAS)[R]. Report to the Second Call for Proposals for ESA Earth Explorer Opportunity Missions, 2002.
- [3] BIZZARRO Bizzarri, ALBIN Gasiewski, DAVID Staelin. Initiatives for millimetre submillimetre-wave sounding from geostationary orbit[C]// 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Canada: IEEE, 2002: 548-552.
- [4] 张峰, 欧详荣. 一种用于气象卫星的多通道扫描微波辐射计[J]. 空间电子技术, 1995(3): 9-12. (ZHANG Feng, OU Xiangrong. Multi channel scanning microwave radiometer for meteorological satellite[J]. Space Electronic Technology, 1995(3): 9-12.)
- [5] 帅建星. 毫米波辐射计的信息分析与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2003. (SHUAI Jianxing. Information analysis and design of millimeter wave radiometer[D]. Nanjing, China: Science & Technology of Nanjing University, 2003.)
- [6] NIELS Skou, DAVID Le Vine. Microwave Radiometer Systems[M]. Norwood, Massachusetts, US: Artech House, 1988.
- [7] 吕颖. 星载微波辐射计周期定标技术的研究[D]. 武汉: 华中理工大学, 1997. (LYU Ying. Research on the periodic calibration of microwave radiometer[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 1997.)
- [8] 张靖, 李青侠, 郭伟, 等. 带外噪声对 DSDR 辐射计灵敏度的影响[J]. 微波学报, 2009, 25(3): 82-86. (ZHANG Jing, LI Qingxia, GUO Wei, et al. Effect on sensitivity of direct RF sampling digital microwave radiometer by out-band noise[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(3): 82-86.)
- [9] 桂良启, 张祖荫, 郭伟. 提高微波辐射计灵敏度研究的综述[J]. 遥测遥控, 2004, 25(6): 1-5. (GUI Liangqi, ZHANG Zuyin, GUO Wei. Review of studies of microwave radiometer sensitivity improvements[J]. Telemeter and Telecontrol, 2004, 25(6): 1-5.)

作者简介:



姜丽菲(1983-),女,辽宁省抚顺市人,硕士,工程师,主要研究方向为微波辐射计系统设计与集成测试、准光学馈电网络.
email:jianglf2006@126.com.

孙彦龙(1989-),男,山西省临汾市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为准光学馈电网络.

乔 洋(1978-),男,湖南省益阳市人,博士,高级工程师,主要研究方向为微波辐射计总体设计等.

王 芸(1978-),女,四川省绵阳市人,硕士,工程师,主要研究方向为载荷综合电子等.

姚崇斌(1967-),男,上海市人,学士,研究员,主要研究方向为微波辐射计系统总体设计.

(上接第 832 页)

- [9] PANG Xiaodan,CABALLERO Antonio,DOGADAEV Anton,et al. 100 Gbit/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75-110 GHz)[J]. Optics Express, 2011,19(25):24944-24949.
- [10] LEBEDEV Alexander,VEGAS Olmos J J,PANG Xiaodan,et al. Demonstration and comparison study for V- and W-band real-time high-definition video delivery in diverse fiber-wireless infrastructure[J]. Fiber & Integrated Optics, 2013,32(2):93-104.
- [11] FRIIS H T. A note on a simple transmission formula[J]. Proceedings of the IRE, 1946,34(5):254-256.

作者简介:



秦超逸(1993-),男,重庆市人,2015年毕业于重庆邮电大学通信学院“卓越工程师”班,在读硕士研究生,主要研究方向为高速无线通信及光与无线融合系统.email: qcyfred@live.cn.

余建军(1968-),男,湖南省益阳市人,博士,教授,先后担任过国际杂志 IEEE/OSA J. of Lightwave Technology 和 OSA/IEEE J. of Optical Communication and Networking 编委和国际杂志 Recent Patents on Engineering 的主编.

许育铭(1986-),男,福建省漳州市人,在读博士研究生,主要研究方向为高速无线通信及光与无线融合系统.

王哈达(1992-),男,内蒙古自治区赤峰市人,在读硕士研究生,主要研究方向为高速无线通信及光与无线融合系统.