

星载微波辐射计周期定标技术的综述¹

吕 颖 张祖荫 郭 伟 漆兰芬

(华中理工大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 本文从周期定标方式、定标方程和定标误差分析等几个方面全面系统地阐述了星载微波辐射计周期定标技术,介绍了国外的最新动态。这对我们设计自己的星载辐射计周期定标系统是大有裨益的。

关键词 星载微波辐射计, 周期定标, T/V 定标实验

中图分类号 TM931, TN62

1 引 言

为了使星载微波辐射计能在太空长期稳定地工作,需要采用周期定标技术。又由于从无源微波遥感数据反演地物大气参量的精度要求不断提高,促使定标技术不断完善。一个例子是在利用微波辐射计测量大气中的水汽含量以修正雷达高度计的湿对流层路径延迟时,对反演湿对流层路径延迟的精度要求:从 SMMR 的要求达到 2.5cm, ERS-1 上 ATSR/MWR 的要求达到 2cm,直至最近 TMR 的要求达到 1.2cm;而它们各自于地面得到的天线温度剩余误差则分别为 0.38—0.76K、小于 0.5K 和 0.19—0.24K。

2 周期定标方式概述

由于辐射计输出指示与天线温度之间的线性关系,需要两个参考点以实现定标。对于星载辐射计,常用的有两种定标方式。

(1) 利用铁氧体环行器构成开关决定辐射计接收机是连接正确的极化通道待测信号输入或是连接定标信号。由定标信号的不同形成方式,又可有不同的定标电路结构:(a) 最早的 SMMR(1978 年)^[1]、日本的 MSR(1987 年)^[2]、欧空局的 ATSR/MWR (1991 年)^[3] 以及美国的 TMR(90 年代初)^[4] 采用一指向冷空的喇叭天线与一处于环境温度的射频终端构成两点的定标系统,冷空喇叭设计为一多频率馈源喇叭。针对 SMMR 定标中出现的问题:波束效率不很高、日晒、仪器内温度变化不均匀等, TMR 又作了一些改进:降低 MFFH 渐变的角度;在 MFFH 与冷空喇叭上加装 3/8 英寸(一英寸=2.54cm)厚的泡沫聚苯乙烯进行隔热;冷空喇叭臂上接一小段热传导率低的波导,减小喇叭温度变化对定标网络的影响;调整冷空喇叭的位置,使太阳不会进入天线主瓣以及 $\pm 30^\circ$ 的旁瓣等。(b) 另一种可行的结构是用定向耦合在天线输入通路的标准噪声源与一接在环形开关上的参考负载构成两点定标系统^[5]。这种电路结构只需要一个微波开关,无需冷空喇叭天线,但增加了一个定向耦合器和一个标准噪声源,且噪声源输出须十分稳定。(c) 为进一步简化电路结构,还可采用有源噪声源作为定标负载^[6]。当噪声源不

¹ 1996-06-13 收到, 1996-12-03 定稿

工作时, 输出噪声温度为室温; 噪声源工作时, 输出的噪声温度将高出室温约 300K 左右, 这样取得两个定标参考点。

(2) 前一种定标方式中, 待测信号、冷定标信号、热定标信号分由不同的通路进入辐射计, 使得定标方程对不同通路的温度变化都敏感, 不可能完全补偿所有的损耗。再者, 该方式对铁氧体开关的可靠性要求也很高。有鉴于此, SSM/I(1986年)^[7]、MIMR(1997年)^[8]以及美国构想的 AMSR(90年代末)^[9]采用另一种不同的定标方式。在这些系统中, 辐射计天线反射面、馈源、接收机以及其他一些子系统一起被安置于一转台上, 由扫描机构驱动旋转实现扫描。另有一小反射镜和一外部热定标吸收体放置于转台上馈源与反射面之间, 它们不随馈源、天线反射面一起转动。在每一个扫描周期中, 馈源都会有一段时间被由反射镜反射过来的天空背景辐射或热吸收体辐射遮挡, 就实现了周期定标。这种方式克服了前一种定标方式的缺点, 定标方程的形式十分简单。但也带来了一些技术上需要考虑的问题: 如反射镜、热源位置的放置, 馈源旁瓣在定标时的影响等等。采用前一种方式定标的几乎都是 Dicke 辐射计, 因为 Dicke 辐射计本身就需要一个微波开关; 而这种定标方式则主要是全功率辐射计采用。

在这种定标方式中使用的外部热定标负载以及星载辐射计地面热/真空定标实验(T/V实验)中的低温定标负载、可控温的目标负载均由发射率接近于1的宽带高吸收材料构成^[10], 它们的辐射输出亮温接近于本身的物理温度。负载结构的设计经历了从单一一块吸收材料(通常是角锥材料)^[11]到由两块吸收材料构成“V”字形结构^[12]的发展; 低温的实现也从直接将材料浸泡在致冷剂中, 发展到在装有吸收材料的金属架上附着的金属管道中通气、液两态的氮。AMSU'B^[13]T/V实验中用的温度可控目标负载前端口还加装了屏蔽罩, 以减少吸收材料表面与周围环境的热量交换。

3 天线温度的标定

3.1 定标方程

定标方式的不同决定了定标方程的不同。对于第一种定标方式, 由于测量信号和定标信号是经由不同的通路进入辐射计的, 所以需要对三条通路建立起各自的辐射传递方程。在方程的建立过程中, 考虑因素的不同将导致最后得到的定标方程的不同。

SMMR 只考虑了辐射计前端各组成部分的欧姆损耗, 得到天线温度的定标方程如下^[14]:

$$T_A = \left(\frac{C_A - C_H}{C_H - C_C} \right) \frac{T_3 \alpha_3 - T_C \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 - T_1 (1 - \alpha_1) \alpha_2 \alpha_3 - T_2 (1 - \alpha_2) \alpha_3}{\alpha_6 \alpha_7 \alpha_8} + \frac{T_3 - T_6 (1 - \alpha_6) \alpha_7 \alpha_8 - T_7 (1 - \alpha_7) \alpha_8 - T_8 (1 - \alpha_8)}{\alpha_6 \alpha_7 \alpha_8} \quad (1)$$

与 SMMR 相比, ATSR/MWR 再考虑了铁氧体环行器不完全隔离的影响, TMR 更考虑了辐射计前端各部分不完全匹配引起的反射的影响, 以致运用辐射传递理论后得到的定标方程各不相同。

在第二种定标方式中, 测量信号与定标信号由同一通路进入辐射计, 定标方程形式十分简单。SSM/I 的定标方程为^[15]

$$T_A = (T_w - T_{Bc}) / (C_h - C_c) C + (T_{Bc} C_h - T_w C_c) / (C_h - C_c) \quad (2)$$

运用叠加原理可以很方便地将微波辐射计前端联接网络中各有耗元件热噪声的影响计算出来, 得到定标方程的通用表达式^[16]。

$$T'_A = (C_A - C_H) / (C_H - C_C) (T'_H - T'_C) + T'_H \quad (3)$$

其中 $T'_A = AT_A + \sum_n A_n T_{An}$, $T'_H = HT_H + \sum_k H_k T_{Hk}$, $T'_C = CT_C + \sum_p C_p T_{Cp}$. T_{An} , T_{Hk} , T_{Cp} 分别为测量、热定标、冷定标通路中有耗元件的物理温度。

3.2 T/V 定标实验

为模拟星载辐射计在太空的工作环境, 导出定标方程的各个系数, 尤其是第一种定标方式的定标方程与辐射计物理温度关系很大, 需要对星载辐射计进行地面的 T/V 实验。其主导思想是, 在不同的物理温度下, 辐射计测量辐射亮温在一定范围内变化的目标负载输出, 将用定标方程计算得到的天线温度与目标负载物理温度 (认为是真实的输入天线温度) 相比较, 对定标方程进行考验, 并可线性回归出定标方程的各个系数。

SMMR 由于定标不够充分, 未能充分补偿辐射计温度变化带来的影响, 以致从它成象数据得到的海面温度 (SST) 呈现出系统的误差。针对这一点, TMR 进行了更充分的温度循环变化 T/V 实验。SMMR 和 ATSR/MWR 的定标方程中, 绝大多数与辐射计前端元件有关的定标系数都是通过网络分析仪分析各元件的传输和损耗, 建立物理模型推导得到的, T/V 实验只确定少数与全局有关的参数。而 TMR 的 T/V 实验中, 辐射计前端的各个关键点都装有加热片, 单独控制其温度, 定标方程中所有的系数都由 T/V 实验获得, 从而避免了物理模型有可能出错而对定标方程产生的重大影响。

3.3 非线性修正

在 SMMR、ATSR/MWR 以及 TMR 的 T/V 实验中发现, 天线温度的剩余误差随着天线温度的不同呈二次曲线变化, 曲线的曲率、基底和垂直偏移都与辐射计的物理温度有关。因为在所有物理温度下这种非线性都很小, 所以可以只用物理温度的线性模型表征。出现这种现象可能的原因是, 放大器增益的压缩以及检波器非平方律引起的辐射计接收机非线性; 铁氧体环形器的反向泄漏造成定标时有部分测量信号进入辐射计接收机。TMR 用如下公式修正辐射计非线性造成的影响:

$$T_A = T_{A0} + a_1(T_{A0} - a_2)^2 + a_3, \quad (4)$$

其中 $a_i = b_{i1}T_I + b_{i2}$, $i = 1, 2, 3$, T_{A0} 是未考虑辐射计非线性影响得到的天线温度, T_I 是辐射计的物理温度。

4 误差分析

4.1 T/V 实验的误差

T/V 实验中天线温度的剩余误差定义为目标负载物理温度与定标方程计算得到的天线温度之差。它反映了在 T/V 实验条件下, 定标模型代表实际辐射计的响应的能力以及在若干天内实验测量的可重复性, 包括: (1)T/V 实验操作中存在的误差, 如热平衡条件可能不满足、目标负载温度存在非均匀、辐射计与目标之间有热耦合等等; (2)T/V 实验条件下天线温度的有限分辨率 (精度), 由定标方程中包含的各个输入量的不确定性决定; (3) 定标方程数学模型的误差。SMMR T/V 实验天线温度精度公式为

$$\delta T_A^2 \approx S_{tt}^2 + S_{ss}^2 + S_{ii}^2 + [S_A / (G\sqrt{n_A} - 1)]^2 + [S_C / (G\sqrt{n_C} - 1)]^2 + [S_H / (G\sqrt{n_H} - 1)]^2, \quad (5)$$

其中 S_{tt} , S_{ss} , S_{ii} 分别为目标负载物理温度、冷定标负载温度以及辐射计温度的标准差; S_A , S_C , S_H 分别为辐射计接通目标、冷定标负载、热定标负载时数值输出的标准差; G 为辐射计的功率因子, 是 $(\partial T_A / \partial C_A)^{-1}$ 的均值, 单位为 K^{-1} 。

4.2 星上辐射计天线温度精度

通过观察定标方程, 可以看到影响天线温度精度的因素有: 辐射计观测地物时的灵敏度, 指向定标负载时的灵敏度, 天空背景的不稳定度, 以及辐射计输出信号的量化误差。对于第一种定标方式, 还有辐射计前端各辐射元件物理温度不稳定带来的影响。以均方形式表示:

$$\begin{aligned} \Delta T_A^2 = & \Delta T_a^2 + \Delta T_h^2 + \Delta T_c^2 + \left[\left(\frac{\partial T_A}{\partial C_A} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial C_H} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial C_C} \right)^2 \right] \Delta C^2 \\ & + \left(\frac{\partial T_A}{\partial T_C} \right)^2 \Delta T_C^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial T_H} \right)^2 \Delta T_H^2 + \sum_i \left(\frac{\partial T_A}{\partial T_i} \right)^2 \Delta T_i^2. \end{aligned} \quad (6)$$

通常, 辐射计灵敏度 ΔT_a , ΔT_h , ΔT_c 是主导误差源。下面将着重讨论三个误差来源及其修正措施: (1) Planck 黑体辐射公式用 Rayleigh-Jeans 公式近似的误差导致对宇宙背景辐射亮温的修正; (2) 外部定标负载发射率非 1 造成辐射的亮度温度不等于本身的物理温度, 需通过计算或测量得到精确的输出亮温; (3) 在一个定标周期内辐射计增益波动对辐射计灵敏度的影响及其修正。

(1) 天线接收功率、物体辐射功率与亮度温度成正比这一结论是在 Rayleigh-Jeans 近似下得到的。当黑体物理温度高于 30K 时, 用 Rayleigh-Jeans 公式近似计算的误差同黑体的物理温度无关。然而对于物理温度为 2.73K 的宇宙背景辐射, 其 Rayleigh-Jeans 近似计算误差与物理温度高于 30K 的地物、热定标负载的近似计算误差是不同的。为了在定标方程中统一修正这项近似计算误差, 可以人为修改宇宙背景辐射 Rayleigh-Jeans 近似。这正是 TMR 的作法。

(2) 多层媒质结构吸收体的理论分析见文献 [17]。渐变结构吸收体的分析计算, 在渐变结构周期与工作波长相比较小时, 可以用路的方法等效求解 [18]; 在渐变结构尺寸远大于工作波长时, 可以用准光学方法求解; 而在不作任何近似, 严格建立场方程求解时, 可以利用格林函数化微分方程为积分方程, 并根据吸收体结构的周期特性, 数值计算出结果 [19]。

测量吸收体反射系数常用的有波导法和拱形法 [10]。在较低频率段, 由于吸收体空间测量所需尺寸变得无法接受, 大都采用波导法测量。它测量迅速、可测频带宽 (采用网络分析仪), 同时还避免了吸收体边缘衍射效应的影响; 一大缺点是待测材料必须加工得很好。

将一发射源与一接收喇叭并置在离待测吸收体足够远的对称观察角上, 通过比较接收到的金属板反射与吸收材料反射间的差异, 可以得到吸收材料的反射系数。这就是拱形法的基本思想。为了有足够的测量精度, 吸收材料的单边尺寸要在 $6 \sim 10 \lambda$ (λ 是工作波长)。拱形法的主要优点是十分简单; 但是当环境目标反射影响很大时, 拱形法的测量精度将得不到保证。

(3) ATSR/MWR 通过 T/V 实验的结果, 建立了增益作为辐射计物理温度函数的数学模型, 又根据辐射计物理温度随时间的最大变化率, 导出了在一个定标周期内增益的波动及其对辐射计灵敏度的影响。另外, 可以利用将多次定标值进行内插的方法进一步减小增益波动的影响, 提高辐射计的灵敏度 [20]。

4.3 辐射计喇叭旁瓣的影响

对于采用冷空喇叭结构的第一种定标方式, 本项误差指的是冷空喇叭旁瓣将接收到地球以及卫星上其它仪器的辐射, 使得输出结果不准确。ATSR/MWR 估算这项误差大约为 0.5K。

对于第二种定标方式, 本项误差是指辐射计馈源旁瓣在辐射计接收定标信号时造成的影响。为此, 热定标负载和反射镜应有较大的尺寸且尽量靠近馈源。

4.4 星载微波辐射计天线温度的绝对精度

星载微波辐射计总的绝对精度是定标方程数学模型的误差、星上辐射计天线温度精度、以及辐射计喇叭旁瓣的误差的综合考虑。从 SMMR 的 3K 的绝对精度, SSM/I 的 1.5K, 直至 ASMR、MIMR 计划的 1K 左右的精度, 可见星载微波辐射计周期定标技术的不断发展完善。

参 考 文 献

- [1] Njoku E G, Stacey J M, Barath F T. The seasat Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR): Instrument description and performance. *IEEE J. of Oceanic Eng.*, 1980, OE-2(2): 100-115.
- [2] Arai K. Results from marine observation satellite-1 (MOS-1) operation. *IEEE Trans. on GRS*, 1990, GRS-28(4): 760-763.
- [3] Bernard R, *et al.* The microwave radiometer aboard ERS-1: Part 1—Characteristics and performances. *IEEE Trans. on GRS*, 1993, GRS-31(6): 1186-1198.
- [4] Ruf G S, Keihm S J, Jassen M A. TOPEX/Poseidon Microwave Radiometer (TMR): I. Instrument description and antenna temperature calibration. *IEEE Trans. on GRS*, 1995, GRS-33(1): 125-137.
- [5] 徐培源. 微波·毫米波辐射计两项新技术. 上海市电子学会 1991 年学术年会, 上海: 1991, 1-4.
- [6] 罗忠成. 全功率辐射计周期定标技术及数据处理系统: [硕士论文]. 华中理工大学电信系, 1991.
- [7] Hollinger J P, Peirce J L, Poe G A. SSM/I instrument evaluation. *IEEE Trans. on GRS*, 1990, GRS-28(5): 781-790.
- [8] Menard Y, Reynolds M. The Design of the ESA Multiband Imaging Microwave Radiometer(MIMR). *Proc. IGARSS'91*, 1991, 2359-2363.
- [9] Le Vine D M, *et al.* A multifrequency microwave radiometer of the future. *IEEE Trans. on GRS*, 1989, GRS-27(2): 193-198.
- [10] Dixon P F. Microwave absorbers: Theory, design and test. *Microwave J.*, 1993, 36(11): 88-94.
- [11] Hardy W N. Precision temperature reference for microwave radiometry. *IEEE Trans. on MTT*, 1973, MTT-21(2): 149-150.
- [12] Goldsmith P F, Kot R A, Iwasaki R S. Microwave radiometer blackbody calibration standard for use at millimeter wavelengths. *Rev. Sci. Instru.*, 1979, 50(9): 1120-1122.
- [13] Banfield L J. Proposed design of the temperature control system for the variable temperature calibration target for the advanced microwave sounding unit B. *Proc. IGARSS'88*, Edinburgh, Scotland, 1988, 21-22.
- [14] Swanson P N, Riley A L. The seasat scanning multichannel microwave radiometer (SMMR): Radiometric calibration algorithm development and performance. *IEEE J. of Oceanic Eng.*, 1980, OE-5(2): 116-124.
- [15] Wentz F J. Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers. *IEEE Trans. on GRS*, 1992, GRS-30(5): 960-972.
- [16] 林士杰. 星载微波辐射计周期定标技术的改进. 华中理工大学微波技术教研室内部报告, 1995.
- [17] Ulaby F T, Moore F T, Fung A K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry.* Reading, MA: Addison-Wesley, 1981, 78-87.
- [18] Bucci O M, Franceschetti G. Scattering from wedged-tapered absorbers. *IEEE Trans. on AP*, 1971, AP-19(1): 96-104.
- [19] Janaswamy R. Oblique scattering from lossy periodic surfaces with application to anechoic chamber absorbers. *IEEE Trans. on AP*, 1992, AP-40(2): 162-169.
- [20] Peckham G E. An optimum calibration procedure for radiometers. *Int. J. of Remote Sensing*, 1989, 10(1): 227-236.

PERIODIC CALIBRATION OF
SPACEBORNE MICROWAVE RADIOMETER—A REVIEW

Lu Ying Zhang Zuyin Guo Wei Qi Lanfen

*(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074)*

Abstract In this paper, periodic calibration conception of spaceborne microwave radiometer is systematically described with the emphasis on calibration pattern, equation and error budget. Developments in other countries are also reviewed, understanding which is very beneficial to design our own radiometer periodic calibration system.

Key words Spaceborne microwave radiometer, Periodic calibration, T/V calibration test

吕 颖: 女, 1973 年生, 博士生, 电磁场与微波技术微波遥感研究方向.

张祖荫: 男, 1938 年生, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术微波遥感方面的研究.

郭 伟: 男, 1960 年生, 副教授, 主要从事电磁场与微波技术微波遥感方面的研究.

漆兰芬: 女, 1936 年生, 博士生导师, 电磁场与微波技术专业.