文章编号：1001-9014(2026)01-0077-13

DOI：10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2026. 01. 009

星载微波辐射计定标源辐射亮温计量校准技术方案研究

高青松[1]， 李得天[1]， 陶 院[1]， 杨 雷[1]， 张虎忠[1]， 马动涛[1]， 彭苗苗[2]， 金 铭[2*]，
郭 强[3]， 江世臣[4]， 李一楠[5]， 程春悦[6]， 李 雪[7]

（1. 兰州空间技术物理研究所，甘肃 兰州 730000；
2. 北京化工大学，北京 100029；
3. 国家卫星气象中心，北京 100081；
4. 上海卫星工程研究所 上海 201109；
5. 中国空间技术研究院西安分院 陕西 西安710000；
6. 北京无线电计量测试研究所 北京 100854；
7. 上海航天测控通信研究所 上海 201109）

摘要：针对星载微波辐射计热定标源的亮温校准应用需求，基于定标源吸波涂层温梯特性和亮温偏差产生机理，结合工程可实施的温度测量方法和实验手段，研究可在轨应用的亮温计量校准技术方案。基于当前定标源高发射率设计和测定技术基本完善的背景，重点研究归纳了定标源涂层温梯特性的测定方法，目标构建在轨可用的，以定标源金属内锥温度测值、定标源辐射口面附近温度测值等多参量输入的亮温校准技术。基于可行的电磁仿真技术、热仿真技术、铂电阻和红外温度测量技术，初步归纳了星载定标源亮温校准技术体系的实现路径，即首先构建考虑均匀背景亮温的亮温校准基本模型，完善从定标源内锥和等效背景亮温到涂层纵向温梯的映射关系；进而构建考虑安装环境的亮温校准应用模型，完善从定标源内锥和辐射口面附近温度测值到定标源亮温偏差的映射关系；最后讨论亮温校准模型的验证和应用。星载定标源亮温校准研究，是进一步提高定标源亮温准确度、乃至发展空间微波辐射测量基准的关键技术基础和参考。

关 键 词：微波辐射计；微波定标源；辐射亮温；在轨定标；亮温校准

中图分类号：TN98　　**文献标识码**：A

Research on the metrological calibration technology scheme of brightness temperature for the space-borne microwave radiometer calibration target

GAO Qing-Song[1]， LI De-Tian[1]， TAO Yuan[1]， YANG Lei[1]， ZHANG Hu-Zhong[1]， MA Dong-Tao[1]，
PENG Miao-miao[2]， JIN Ming[2*]， GUO Qiang[3]， JIANG Shi-Chen[4]， LI Yi-Nan[5]，
CHENG Chun-yue[6]， LI Xue[7]

（1. Lanzhou Institute of Physics，Lanzhou 730000，China；
2. Beijing University of Chemical Technology，Beijing 100029，China；
3. National Satellite Meteorological Center，Beijing 100081，China；
4. Shanghai Institute of Satellite Engineering，Shanghai 201109，China；
5. China Academy of Space Technology Xi'an，Xi'an 710000，China；
6. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement，Beijing 100854，China；

收稿日期：2024-12-20，**修回日期**：2025-01-25　　**Received date**：2024-12-20，**Revised date**：2025-01-25

基金项目：甘肃省科技重大专项计划项目（22ZD6GA011）、国家自然科学基金面上项目（62371031）

Foundation items：Sponsored by the Major Science and Technology Special Project of Gansu Province（22ZD6GA011），and the National Natural Science Foundation of China（62371031）.

作者简介（Biography）：高青松（1983-），男，甘肃陇南人，工学硕士学位，研究员，主要研究领域为星载微波定标源技术、空间电子测量技术，E-mail：gqs_21@163. com

* **通讯作者**（Corresponding author）：E-mail：jinming@mail. buct. edu. cn

7. Shanghai Spaceflight Institute of TT&C and Telecommunication, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the application requirements for brightness temperature calibration of spaceborne microwave radiometer thermal calibration targets, based on the temperature gradient characteristics of the absorptive coating and the generation mechanism of brightness temperature bias, and combined with engineering-feasible temperature measurement methods and experimental approaches, this study focuses on researching an on-orbit applicable brightness temperature metrology calibration technical solution. Given the current background of high emissivity design and determination technology of the calibration target being basically perfected, this work focuses on summarizing the methods for determining the temperature gradient characteristics of the calibration target coating. The goal is to construct an in-orbit available brightness temperature calibration method that uses multiple parameters, such as the measurable temperature values of the metal inner core of the calibration target and that near the radiation aperture of the calibration target. Based on feasible electromagnetic simulation technology, thermal simulation technology, platinum resistance and infrared temperature measurement techniques, the paper preliminarily summarizes the implementation path of the brightness temperature calibration technology system for space-borne calibration targets. This involves first constructing a basic brightness temperature calibration model considering uniform background brightness temperature and improving the mapping relationship from the inner core temperature of the calibration target and the equivalent background brightness temperature to the longitudinal temperature gradient of the coating. Subsequently, an application model for brightness temperature calibration considering the installation environment is constructed, improving the mapping relationship from the temperature measurements of the inner core and that of the radiation aperture area of calibration target to the overall brightness temperature deviation. Finally, the validation and application of the brightness temperature calibration model are discussed. The research on brightness temperature calibration of space-borne calibration source is an important technical basis and reference for further improving the accuracy of brightness temperature of calibration target and even developing space microwave radiation measurement standards.

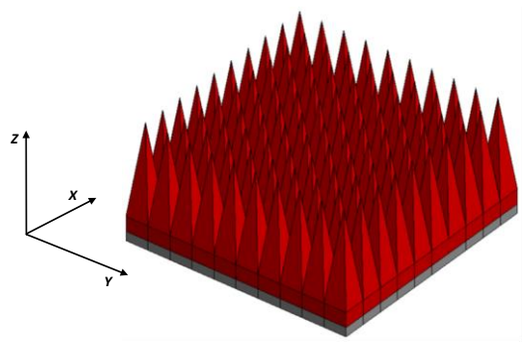
Key words: microwave radiometer, microwave calibration target, radiant brightness temperature, in-orbit calibration, brightness temperature calibration

引言

星载微波辐射计载荷作为对地遥感观测体系中的重要环节,通过从厘米段到毫米波、亚毫米波、太赫兹波段的多频点多通道组合观测,可实现对地球表面和大气层纵剖面的全天候立体观测能力,因此在气象气候观测中发挥着独一无二的作用[1-2]。随着星载微波辐射计载荷的大量在轨应用,其观测数据质量的稳定性、跨载荷间的数据一致性愈发受到重视[3-6]。星载微波辐射计载荷运行期间,其观测值经由周期性两点定标进行标定(高亮温和低亮温参考观测点定标),进而完成观测数据定量化[2,7-8]。其中,载荷携带的热定标源提供高亮温参考点的亮温标定值,而低亮温参考点的亮温则由宇宙冷空背景提供。相对而言,热定标源的精准亮温辐射在轨实现难度更大,这也是当前辐射计载荷高精度定标技术发展的重点和难点[7,9-15]。

针对微波成像仪体制的辐射计载荷应用,需热定标源结构紧凑,因此常采用涂覆尖锥阵列的结构形式。其借助吸波涂层和吸波锥结构实现电磁低反射,借助金属内锥基底提供高导热性,进而兼顾高发射率和高均温性(低温度梯度)的应用要求[7,9-17]。尽管阵列型定标源具备结构紧凑、辐射特性类朗伯(宽角高发射率,天线适用面宽[18-19])的优点,但其相比于尺寸更大、窄角高发射率的腔体源而言[20-23],存在锥尖高度向温度梯度的问题[9-14],会引入亮温偏差。定标源的涂层温梯和亮温偏差近年来成为学术研究重点关注的问题。

早在2013年,美国贝尔航天科技公司针对GMI成像仪载荷的定标需求,基于定标源内铂电阻和载荷底板的温度测值,通过实验室辐射计观测拟合经验公式的方式,探索了辐射亮温补偿方法[9]。2017年,瑞士伯尔尼大学Murk研究组归纳了远场条件下基于电磁-热综合仿真的定向辐射亮温计算方法,分析了Metop-SG上的热定标源(OBCT, Onboard Calibration Target)辐射亮温偏差[10]。其分析方法中一方面从单锥的角度归纳定标源涂层温梯与亮温偏差之间的关系,另一方面根据反射面天线的波束照射情况作为加权,来计入定标源口径面横向的温度不均匀性。2022年,意大利电信研究所基于理论和仿真,分析了地面实验中,开放式液氮衬底冷定标源的辐射亮温偏差[11],虽然辐射亮温分析推导的出发点有所不同,但最终的分析框架与2017年的报



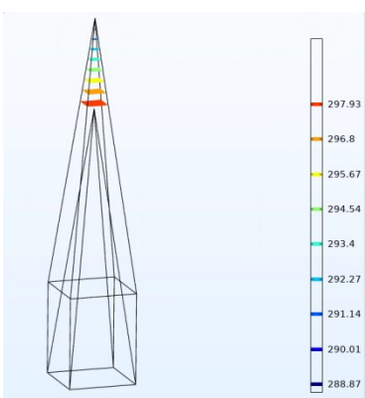


图 1　定标源涂层内的温度等值面分布示意图 (展示其纵向温度梯度特性) (6 mm 周期,均匀涂覆锥体,高宽比 4:1,底部温度 300 K,辐射口面面向环境亮温背景 3 K)

Fig. 1　Configuration of the iso-temperature surfaces in the coating layer of microwave calibration target (MCT for short). (For demonstrating the temperature gradient in the height direction) (Parameters: period of the unit: 6 mm; uniformly coated pyramid; height to period ratio: 4:1; bottom temperature: 300 K, background brightness temperature: 3 K)

道相类似。2022 年北京化工大学和兰州空间技术物理研究所提出了以温梯改善为核心,兼顾宽带高发射率的新型锥体结构设计[12],并讨论了高频段小尺寸设计的优化原则[13]。2023 年,兰州空间技术物理研究所在对目前已应用的风云三号、海洋二号等气象与海洋观测卫星热定标源,围绕其热特性和电磁特性计量测试方法,系统性进行了研究与总结,并指出了未来热定标源亮温基准传递和评定的技术发展方向,以及实现微波亮温直接计量的技术途径[14]。

综上,针对定标源的研究重心,已经从早期围绕宽带发射率的设计[24-25]、测定方法研究[26-28],演进到当前围绕温度场分布的综合亮温分析[10-13],国外已经从实验估计、仿真分析等不同角度研究确定定标源的亮温偏差的方法。同时也应看到,以上列举的定标源辐射亮温分析研究,或以实验归纳予以初步分析,或以理论仿真为手段分析机理,尚未构建理论仿真与实测相结合,进而闭环验证的完整技术链条。因此,面对星载微波定标源在轨热环境条件的复杂性,和我国高精度被动遥感观测应用的需求,需要进一步探讨和构建基于实测的亮温计量与校准技术路线。

本文围绕星载微波热定标源的亮温计量与校准需求,根据辐射亮温定量化原理,基于工程可实现的温度测量方式,探讨基于实测与仿真相结合的亮温校准技术路线与方案。本文的方案研究旨在构建可工程应用的定标源亮温校准技术,直接面向航天辐射计载荷定标精度系统性提升的迫切需求,同时本身也是支撑微波亮温基准和标准构建的基础性工作。本文所研究的亮温校准技术,将结合风云 4 号微波辐射计载荷超宽带定标源(23-430GHz)的研制过程开展,目标基于地面阶段充分的实验验证,最终实现在轨应用。

1　微波定标源辐射亮温定量化原理

1.1　定标源定向亮温辐射理论

对于涂覆尖锥阵列型定标源,其沿阵列正前方的辐射亮温,工程上常用的简化描述为:

$$BT = e \times T + (1 - e) \times BT_{环境} \quad , \quad (1)$$

其中,e 表示定标源向正前方的发射率,T 表示定标源等效温度,$BT_{环境}$ 代表环境背景亮温。如果假设定标源是均温的,则 T 可认为是定标源的物理温度。实际上定标源是非均温的,这意味着,分析定标源的整体亮温,或者等效温度,需要计入定标源局部位置各自的不同贡献。

根据平面波条件下的互易关系,考虑定标源涂层内温度分布的,朝向正前方辐射的亮温计算公式如下[10, 11]。此公式中的假设条件是定标源所处的环境背景亮温是均一的,即 $BT_{环境}$:

$$BT = e\int_{\text{Coating}} \tilde{A}(x,y,z)T(x,y,z)dxdydz + (1 - e)BT_{环境} \quad , \quad (2)$$

定标源涂层内部的温度梯度是由定标源金属基底温度和环境背景亮温之间的差距造成的。从单锥结构的角度来看,定标源涂层内的温度梯度主要体现在高度向上,如图 1 中所示。具体而言,定标源锥尖处由于缺乏传热补偿,因此主要在高度向上产生温梯[9-15]。基于此,式(2)可进一步简化为式

(3)。文献[10]中的计算结果表明这一步降维近似在大幅降低计算量的同时,造成的精度损失小于0.01 K。

$$BT = e\int_{\text{Coating}} \tilde{A}(z)T(z)dz + (1-e)BT_{\text{环境}} \quad , \quad (3)$$

其中$\tilde{A}(z)$为定标源在正前方平面波入射条件下,归一化的高度向的涂层内局部电磁吸收率分布。$T(z)$表示为特定环境温度$BT_{\text{环境}}$条件下的z向温度梯度。需要指出的是,前期研究表明,$\tilde{A}(z)$是随频率变化的,即不同频率下涂层内局部位置的亮温贡献比率不同。将式(3)的完整依赖关系给出,则为下式:

$$BT(f,T_{\text{环境}}) = e(f)\int_{\text{Coating}} \tilde{A}(f,z)T(z,T_{\text{定标源金属基底}},BT_{\text{环境}})\mathrm{d}z + (1-e(f))BT_{\text{环境}} \quad , \quad (4)$$

由上可见,要校准定标源的辐射亮温,从电特性角度需要确定的物理量包括发射率e、局部吸收率$\tilde{A}(z)$,从温度角度要确定的则是$T(z)$,其又是定标源金属基底温度和环境背景亮温的函数。

1.2 定标源定向亮温偏差机理分析

考虑定标源定向辐射亮温与定标源金属基底温度(简写为$T_{\text{基底}}$)的偏差,在式(4)的基础上可将亮温偏差分解为两项,其中ΔBT_1为由于定标源温度梯度造成的亮温偏差,ΔBT_2为定标源发射率不理想性引起的亮温偏差(反射引入的环境干扰)。

$$\begin{aligned}\Delta BT(f,BT_{\text{环境}}) &= BT(f,BT_{\text{环境}}) - T_{\text{基底}} \\ &= \Delta BT_1 + \Delta BT_2 \\ &= \left(e(f)\int_{\text{Coating}} \tilde{A}(f,z)T(z,T_{\text{基底}},BT_{\text{环境}})dz - T_{\text{基底}}\right) \\ &+(1-e(f))(BT_{\text{环境}} - T_{\text{基底}})\end{aligned} \quad (5)$$

以已有的仿真研究案例[9],当均一背景亮温$BT_{\text{环境}}$与定标源基底温度T_0之间的差距在50 K时,由于定标源温梯问题造成亮温偏差(ΔBT_1)可达0.5 K左右,而在0.999的发射率条件下,定标源反射引入的亮温偏差ΔBT_2则在0.05 K。显然前者ΔBT_1造成的亮温偏差成为主要因素,且比发射率不理想引起的ΔBT_2高出一个数量级,这也是近年来国内外围绕定标源的研究一致转向电磁-热综合分析的重要原因[10,13]。并且在定标源发射率性能逐步向0.9999级别演进的背景下,这种差距会更为显著,换言之ΔBT_2的影响将进一步接近于可忽略。因此,国内外近期的研究报道中都将温度梯度造成的亮温偏差ΔBT_1作为研究的重点[10-11],这也是本文中定标源亮温校准技术中考虑的核心要素。

如果进一步考虑定标源在星载应用时,背景环境热边界的复杂分布,即非均一背景亮温,则定标源在阵列横向维度上也可能存在显著的温度变化。换言之阵列中各个单元的温度梯度特性可能存在差异。对此,文献[10-11]中的分析思路是,以阵列在复杂温度边界条件下得到的温度分布特性为基础,以每个阵元单锥作为单元分别计算辐射亮温,然后依据天线在阵元上的照射范围,对每个单元的辐射亮温进行加权求和,得到计入阵列横向温度变化的定标源整体辐射亮温(天线接收亮温),如公式(6)所示[9]:

$$BT_{\text{Array}} = \sum_{l=1}^{M} BT_l \frac{P_l^{\text{inc}}}{P^{\text{inc}}}, \quad 有: \sum_{l=1}^{M} \frac{P_l^{\text{inc}}}{P^{\text{inc}}} = 1 \quad , \quad (6)$$

由此可见,其中理论分析的核心思路仍然基于:在单锥维度上构建温梯与亮温的对应关系。而对于星载定标源的在轨校准应用,则需要首先在单锥维度上构建、验证温度测值与亮温的对应关系。因此,在文献[10-11]仿真研究的范畴之外,本文需要进一步探讨结合工程实际如何形成仿真-实测闭环验证的完整可靠技术路径。

2 定标源亮温校准参量获取方案研究

2.1 亮温校准所需参量的获取可行性分析

根据定标源定向亮温辐射模型式(5),为确定定标源实际辐射亮温,需要获知的直接参量包括:定标源发射率e,定标源涂层内的归一化电磁吸收率分布$\tilde{A}(z)$,定标源涂层内温度梯度分布$T(z)$;而决定$T(z)$的间接参量包括:定标源金属基底温度$T_{\text{基底}}$,等效背景环境亮温$BT_{\text{环境}}$。下面针对获取方式分别对其进行讨论。

(1) 电磁直接参量-定标源发射率e

针对定标源发射率e的分析和测定,是定标源亮温校准技术最早的切入点。基本原理是基于基尔霍夫热平衡定律,基于发射率e和反射率r的互补性(e+r = 1),通过散射测量确定反射率r,进而得到发射率e (e=1-r)。前期已有大量基于单站和双站散射测量方法研究[26-28],目前较为常用的是基于单站后向散射系数r_0结合散射校准因子C_g的方式,C_g可采用仿真计算或者双站测量的方式得到[27]

$$r = r_0 \times C_g \quad , \quad (7)$$

(2) 电磁直接参量-定标源涂层局部吸收率$\tilde{A}(z)$

涂层内部的局部电磁吸收率$\tilde{A}(z)$则难以通过测试的方式获得,但是可以通过数值仿真予以确

定。对$\tilde{A}(z)$进行数值仿真的输入为涂层材料的电磁参数介电常数和磁导率,其可以通过波导法、自由空间法等测得[19,29-30]。仿真获取$\tilde{A}(z)$的计算场景如下图中所示,在平面波入射条件下,记录涂层内部局部的电磁吸收率。该仿真方式已经广泛应用于定标源的设计和亮温理论分析的报道中[10-13]。

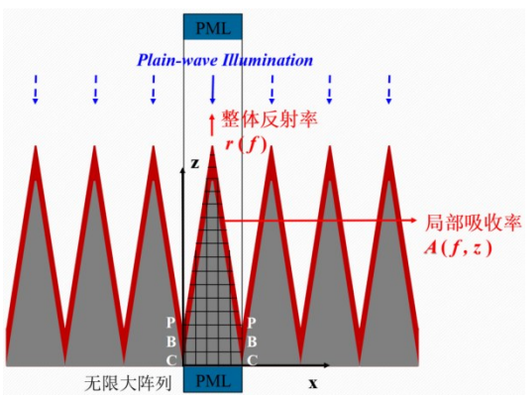


图2　针对定标源涂层局部吸收率的电磁仿真场景设置示意图

Fig. 2　Configuration of the electromagnetic simulation for the local absorption rate distribution in the coating layers of the MCT

(3) 温度直接参量-定标源涂层内温度梯度分布$T(z)$

定标源涂层内的温度梯度分布可通过温度场仿真方式得到,其典型仿真场景如下图中所示。针对星上环境,需考虑的传热机理包括定标源内部结构的热传导,以及定标源与亮温边界之间的热辐射。进行热仿真的输入包括:定标源金属内锥和涂层材料的热参数,包括导热率和表面发射率;定标源金属内锥基底温度T_0、定标源上方口面边界辐射亮温BT_e。定标源中金属和涂层材料的热参数可由材料测试得到。

(4) 温度间接参量-定标源金属基底温度$T_{基底}$

针对定标源金属基底温度$T_{基底}$,可沿用已在星载定标源中广泛使用内设铂电阻,如图4中所示。经长期应用证明,铂电阻的温度测值精度稳定可靠。因此,基于定标源金属锥内部的测温可以可靠的提供亮温定量分析中的$T_{基底}$[9,14]。前期针对风云4号辐射计载荷OBCT,在初样鉴定件阶段,通过测温误差自校准,复杂外热流下大口径辐射源温度均匀性控制等技术攻关,可以达到测温精度0.02 K,温度不均匀度0.07 K。稳定和高精度的定标源内锥温度测量技术,是本文探讨的亮温校准技术的重要基础。

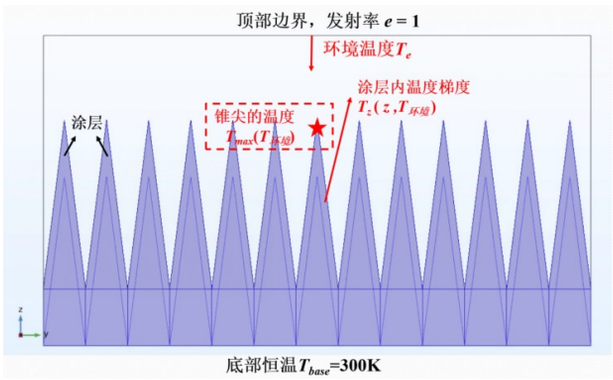


图3　针对定标源涂层内温度分布的热仿真场景设置示意图

Fig. 3　Configuration of the thermal simulation for the temperature distribution in the coating layers of MCT

(5) 温度间接参量-等效背景环境亮温$BT_{环境}$

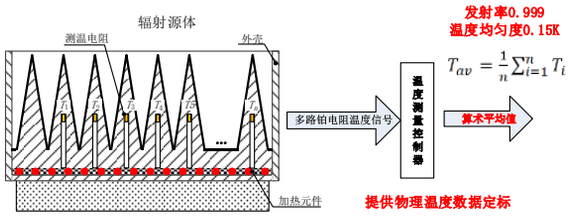
定标源在星上载荷应用时往往面对半开放环境,因此需要借助合理的载荷温度监测和环境背景信息估计环境亮温$BT_{环境}$。在地面阶段,可以通过实验手段验证仿真模型,共同构建由外部温度可测值和环境亮温信息推知等效环境亮温的$BT_{环境}$的模型。

经过以上逐项分析,可知在整个亮温校准技术的链条中,难点在于温度因素,具体为等效背景亮温$BT_{环境}$及其决定的$T(z)$。

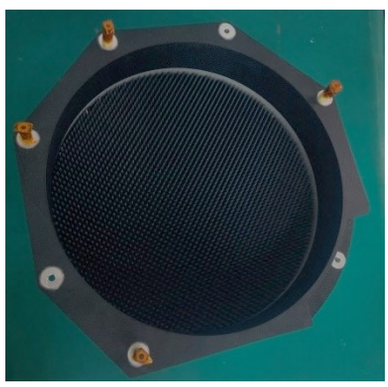
2.2　围绕亮温偏差$\triangle BT_1$与$T(z)$分布的仿真研究

针对在整个亮温基准技术中的核心要素,涂层内温度分布$T(z)$,可借助仿真手段首先获得规律性信息。在此之前,首先讨论本文讨论的亮温校准技术相对于传统定标源亮温赋值的概念性差异。具体而言,如式(1)中,对定标源辐射亮温的传统分析方法,其概念是为定标源赋一个等效温度T_e,再乘以发射率e得到定标源自身的辐射亮温。然而基于式(4)分析一具体定标源结构的定向辐射亮温,结果见图5中所示,分析场景和方法对应于图2~3和文献[13]。从中可以看到,在基底温度$T_{基底}$=300 K,等效背景亮温BT引入相对低温的温差的情况下,进而导致的亮温偏差(偏离于$T_{基底}$=300 K)出现明显的随频率变化现象[10-13]。其本质原因是定标源涂层内的局部吸收率分布$\tilde{A}(z)$是随频率变化的,进而对不同高度处涂层内的温度赋以不同的权值,再贡献于定标源整体辐射亮温。

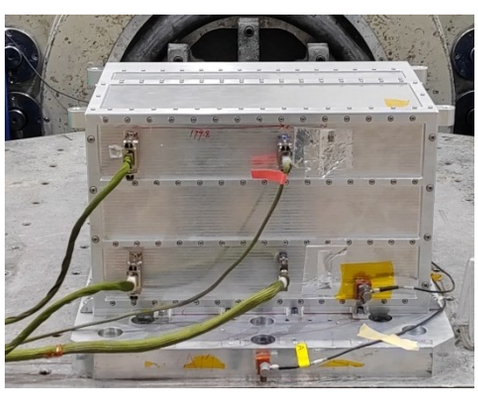
此讨论强调,不能利用定标源单一温度测值或者“等效温度”的概念来估计定标源的实际亮温。从公式(4)的使用角度,必须利用$T(z)$的分布,也就



(a)



(b)



(c)

图4 针对定标源金属内锥基底温度的测量方式:(a)内锥的铂电阻安装及测温方式示意; (b)风云4号OBCT初样鉴定件实物; (c)高精度温度控制器实物。

Figure 4 The measurement configuration for the temperature of OBCT inner metal core; (a) platinum resistor temperature (PRT for short) installing and measuring configurations; (b) the initial appraisal of the OBCT of Fengyun-4 microwave radiometer; (c) High-precision temperature controller

是利用温梯或者温差来估计亮温偏差。文献[10]中的仿真讨论,提出了通过大量数值仿真,将亮温偏差估计简化到基于锥尖锥底之间温差(仿真值),甚至基于等效背景亮温$BT_{环境}$与金属基底T_0之间温差的直接估计。本文所探讨的基于温度实测的亮温校准技术,概念上也即:通过实测、校准亮温偏差$\triangle BT_1$与($T_{基底}$-$BT_{环境}$)之间的关系,进而建立$\triangle BT_1$与(金属内锥$T_{基底}$,其他温度载荷/环境检测点T_1,T_2,T_3)的量值对应关系,从而实现亮温计量校准。

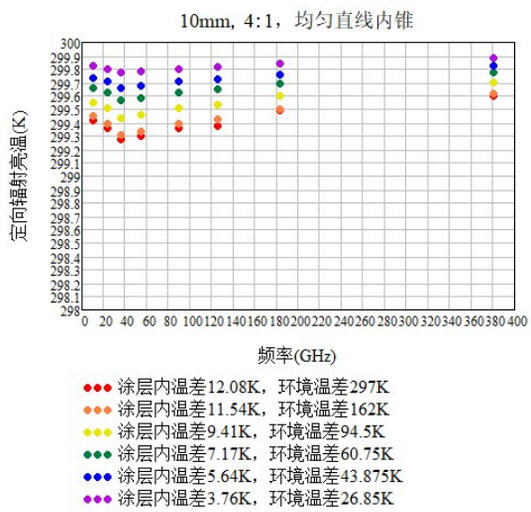


图5 不同环境温度条件下,均匀涂覆锥体定标源的定向辐射亮温 10 mm周期锥体(基底温度$T_{基底}$=300 K,环境背景亮温低于定标源基底温度,因此定标源辐射亮温值偏低。)

Fig. 5 The directional brightness temperature of the MCT at different frequencies, of 10mm period, 1mm uniformly coated pyramids, in cases of different brightness temperature background. (The bottom temperature of the pyramids are 300 K, and the background brightness temperature is 300 K, therefore, the MCT give a *BT* lower than 300 K)

接下来,回到对涂层内平均温度$T(z)$分布的讨论。本质上,涂层内部的温度分布是难以直接测得的,分布特性本身需要仿真获得。有意义的是,通过在热仿真中进行参数敏感性分析,包括不同涂层热参数、环境温差的条件(结果在图6中给出。将$T(z)$分布进行变化量最大值归一化处理),发现其相对分布本身保持稳定。这一方面意味着热仿真可以为亮温校准提供稳定$T(z)$分布的信息,另一方面也意味着经实测比对校准过的$T(z)$对同型定标源而言具备任意工况下的适用性。

进一步,分析温度量之间的对应关系,基于图3中的仿真设置,讨论定标源锥尖-锥底温差(简称锥尖温梯)与环境亮温-目标温度差之间的定量关系。图7给出了一组典型参数条件下,环境温差与定标源锥尖温梯的定量结果。从中可看出,环境温差到定标源涂层锥尖温梯的对应体现出大值推小值的特点,同时,已有研究[10-13]表明定标源涂层锥尖温梯

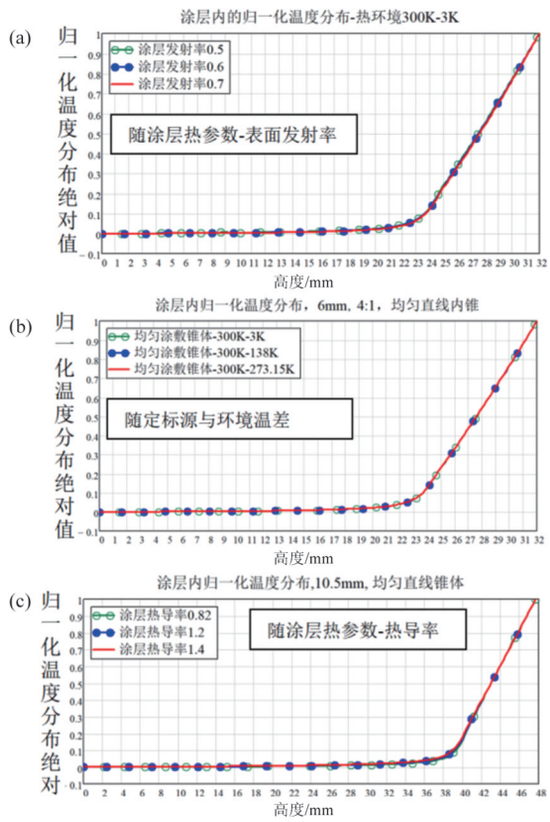


图 6　涂层内归一化温度梯度仿真结果:(a) 考虑不同涂层表面发射率;(b) 考虑不同定标源与环境温差;(c) 考虑不同涂层材料热导率

Fig. 6　The simulation results of maximum normalized temperature distribution in the coating layer along the height direction; (a) different surface emissivity of the coating layer; (b) different temperature difference between the bottom temperature of MCT and the background brightness temperature; (c) different thermal conductivity

再到亮温偏差的量值对应同样体现为大值推小值。因此可推知,在给定亮温偏差校准精度要求下,对涂层尖点温梯和环境温差的测定精度要求可以适当放宽,这一结论对于后续的测温方案讨论具有重要的参考价值。例如在本算例中的 54 GHz,环境温差处于 30 K 附近时,1 K 的环境估计误差所导致的亮温偏差估计误差大约在 0. 018 K 左右。

虽然上述仿真分析已经可以为校准方案的实施提供第一步的量值参考,但是整个校准技术体系必然需要建立在温度可测值的基础之上,因此,在下一节中将详细讨论温度的测量方式。

2. 3　定标源涂层温度测量方式研究

对定标源涂层温度测量是整个亮温校准技术体系的重要支点。本小节首先围绕红外测温方式展开讨论,包括红外热成像仪和红外测温仪等手

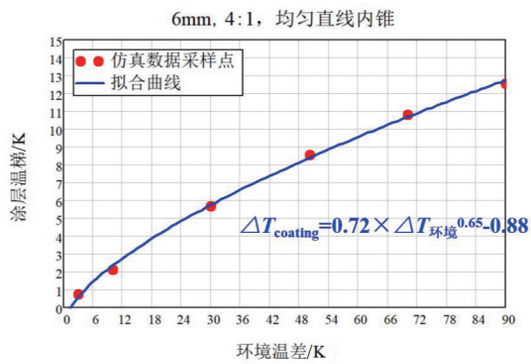
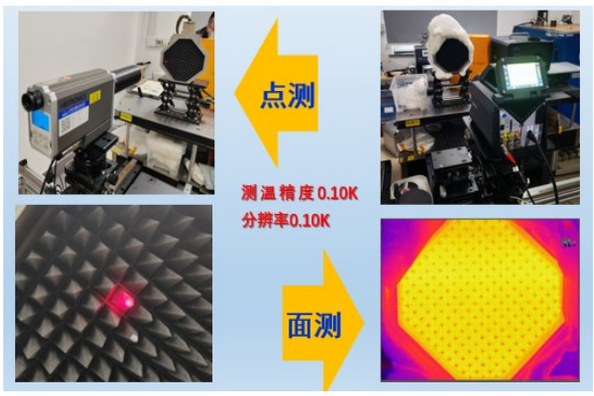


图 7　环境温差、定标源尖点温梯的量值对应关系:(6 mm 周期均匀涂覆方锥,MF117 涂覆 1 mm,4:1 高宽比)

Fig. 7　The calculated relationship between the target-background temperature difference and the MCT bottom-tip temperature difference. (6 mm period uniformly coated pyramids, 1 mm MF117 coating, height to period ration of 4:1)

段。在实验室常温环境下,对定标源进行了初步测试(图 8)。测试场景如图 8 中所示,此时定标源通过加温方式比环境温度升高 10 ℃左右。从红外热成像结果中,可以显著观测到锥尖锥底之间的温度差,也即意味着通过图像信息处理直接获取涂层表面锥尖-锥体温梯具备可行性。红外成像仪测试中体现出的测温灵敏度在 0. 1 K 左右。此外,红外测温仪则可对于一个局部温度点形成更高精度的温度测量,也可通过测温焦点调节实现涂层表面锥尖-锥底温梯测量。需要指出的是,锥尖的温度梯度对应到实际亮温偏差是一个量值缩小的对应关系[10-13],这意味着 0. 1 K 的涂层温梯折算到亮温偏差时的精度水平将显著提高。

然而,尽管针对定标源涂层的红外测温方式有诸多应用优势,但是其难以在卫星载荷平台上直接应用,特别是难以满足长期稳定监测需求。因此基于红外测温方式,需要在地面实验中完成星上热真空环境的模拟,在此条件下实现与仿真结果的对验。为模拟星上真空环境,在热真空环境下的实验方案设计如图 9 中所示。其中真空实验舱内可通过罐体内液氮热沉模拟不同的环境温度背景,而红外测温仪可通过观测窗直接观测定标源的表面涂层温度。结合定标源内部的铂电阻测值和环境温度信息,实现如图 7 中所示的,修正环境温差与定标源涂层温梯之间的量值传递关系,作为定标源辐射亮温校准技术方案的关键验证手段。此外,对于定标源涂层表面温度测值,还可采用涂层接触式的薄膜铂电阻方案,如图 10 中所示,作为与红外测温方案



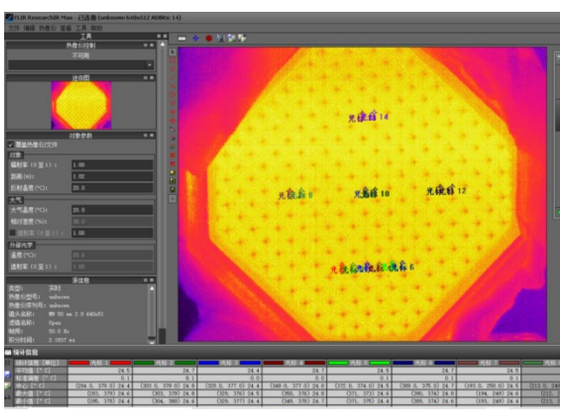


图8 基于红外测量的定标源表面涂层测温方法效果示意(实验室环境)

Fig. 8 Surface temperature measurement of the MCT coating layer by the infrared temperature measuring method, in laboratory environment.

的对比验证。

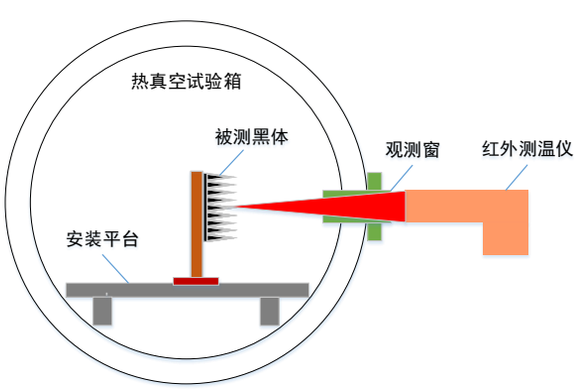
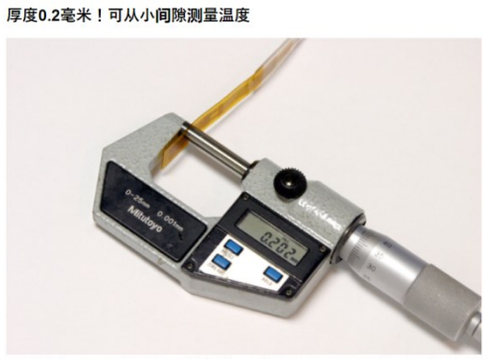


图9 热真空试验箱内的定标源涂层表面温梯实测方案(基于红外测温仪,关注定标源锥尖位置)

Fig. 9 Surface temperature measurement configuration of the MCT surface temperature in the thermal-vacuum facility. (By infrared thermometer, focusing on the tip position of the MCT)



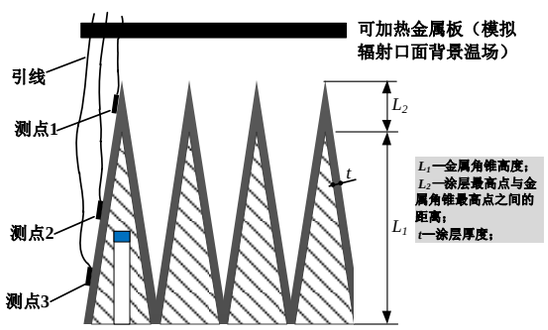


图10 定标源涂层表面温梯的薄膜铂电阻贴敷方案

Fig. 10 Thin PRT measurement upon the surface of coating layers of MCT.

当然,需要指出的是,定标源在轨实际遇到的热边界条件远比图3中的场景更为复杂,属于非均匀复杂热边界。因此,对于星上热环境的地面模拟实验,以及对比仿真都需要进一步展开细致的设计和分析工作,才能最终满足定标源星上在轨校准的应用需求。

通过以上讨论,可归纳针对热定标源在轨应用需求,可获取的输入参量归纳如表1中所示。其中仿真和地面实测的工作目标为构建和验证亮温校准模型。而在轨校准时,最终的直接测量输入量为辐射口面热边界环境温度和角锥内部温度测量两个方面的温度测值,进而通过亮温校准模型得到定标源的辐射亮温校准值。

3 微波定标源辐射亮温计量校准技术路线与方案研究

3.1 总体技术路线

综合上述讨论,基于准确获取微波热定标源辐射亮温的概念方法,结合可行的仿真、测量技术手段,形成星载微波定标源辐射亮温计量校准技术总

表1　亮温校准输入参量

Table 1　Input Parameters for the Brightness Temperature Calibration

序号	数据名称	数据获取方式	环境
1	局部吸收率$\tilde{A}(z)$	电磁仿真	/
2	涂层内外温度相对分布$T_0(z)$	热仿真	/
3	微波发射率测试e	地面实测	大气下
4	红外非接触测量涂层表面温度数据	地面实测	真空下
5	铂电阻粘贴直接测量涂层表面温度数据	地面实测	真空下
6	辐射口面热边界环境温度	地面/在轨实测	真空下
7	角锥内部温度测量	地面/在轨实测	真空下

体路线如图11中所示。在此路线中,总体思路是解决亮温校准的关键问题–基于温度测定值的亮温校准,通过仿真–实测对验校准的方式,形成第1步地面充分实验,第2步验证亮温模型,第3步星上应用的链条。

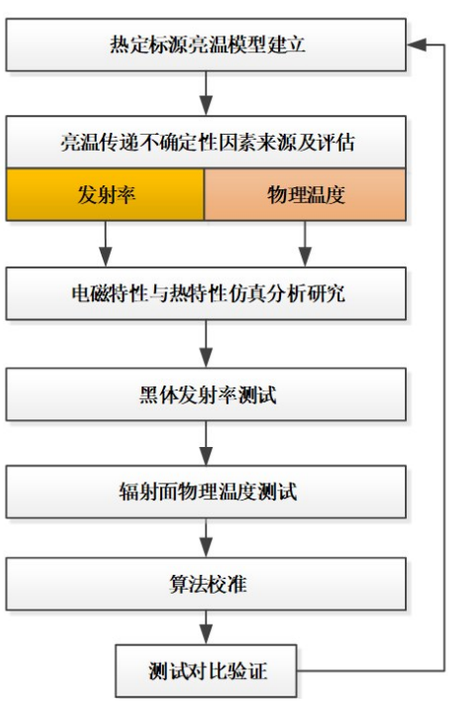


图11　微波辐射计热定标源辐射亮温校准技术路线

Fig. 11　Technical routine of the brightness temperature calibration for the MCT

接下来,探讨总体技术路线中的两个层面的技术研究工作的方案。首先是仿真+温度实测的亮温校准基本模型构建,针对以辐射面口面等效亮温、定标源基底温度为输入的亮温校准模型。然后是面向星载应用的亮温校准应用模型,针对以星载辐射口面处可测温度值、定标源基底温度为输入亮温校准模型。采取两级模型构建的意义在于两个方面,一是逐步通过实测–仿真对验初步改善仿真量值的准确性,二是完成以简单场景校准为基础扩展到实用场景下的准确校准模型。

3.2　亮温校准基本模型构建

首先构建亮温校准的基本模型,即完整建立给定辐射面背景亮温条件下的计量亮温校准技术,如图12中所示,需要实测和仿真同步开展。对于辐射口面的等效亮温,在实验环境下可通过红外波段的高发射率控温板实现(近乎均匀),对应图3中的仿真场景。实验中的观测要点是锥体涂层的锥底–锥尖温差,以及涂层表面的温度分布,作为验证数据来修正仿真中的场景设置、参数设置等。最终,利用完成实测校准的温度仿真可以得到涂层内部的温度分布,用于具体计算亮温偏差,即完成以$T_{基底}$,$BT_{环境}$为输入的亮温校准基本模型。

在当前定标源电磁测试与仿真技术已基本完善的技术背景下,对定标源温度梯度的计量校准是最需要突破的要点。具体在此步骤中,实测的作用是创造定标源高度向温梯为主的简单温度边界条件,通过涂层表面温度测值验证和修正仿真模型;而热仿真的作用是完成涂层表面温度测值到涂层内部温度的递推,再经具体计算得到由均一等效背景亮温和金属基底温度(温度差输入),到亮温偏差(输出)的定量关系。在此基础上,才可演进到星载应用时的复杂温度边界条件情况。

3.3　亮温校准应用模型构建

由于星上载荷应用条件下,定标源所处的背景亮温是动态变化的和开放的,因此其背景温度分布可能是非均匀的。也即,不能认为星上定标源面对均一的背景亮温,同时,星上应用时也不可能通过红外测温方式测得涂层表面温度。因此,3.2小节中建立的亮温校准基本模型不能直接满足应用的需求。此时,定标源所面对的背景亮温信息需要借助辐射口面附近的温度实测值来提供。为此,基于实测–仿真手段,设计的亮温校准应用模型的构建方案如图13中所示。其主要思想是,在热真空环境中和载荷应用条件(安装状态)下,完成辐射口面附近的温度测量(PRT测温点)、定标源内锥温度测量作为模型输入量;完成定标源的涂层表面温度测量,为仿真提供验证数据。而在同步的热仿真中,可将仿真过程分为两个边界问题:

首先是模拟实验场景下,进行大尺度的热仿真,得到定标源辐射口面处的等效亮温分布,作为

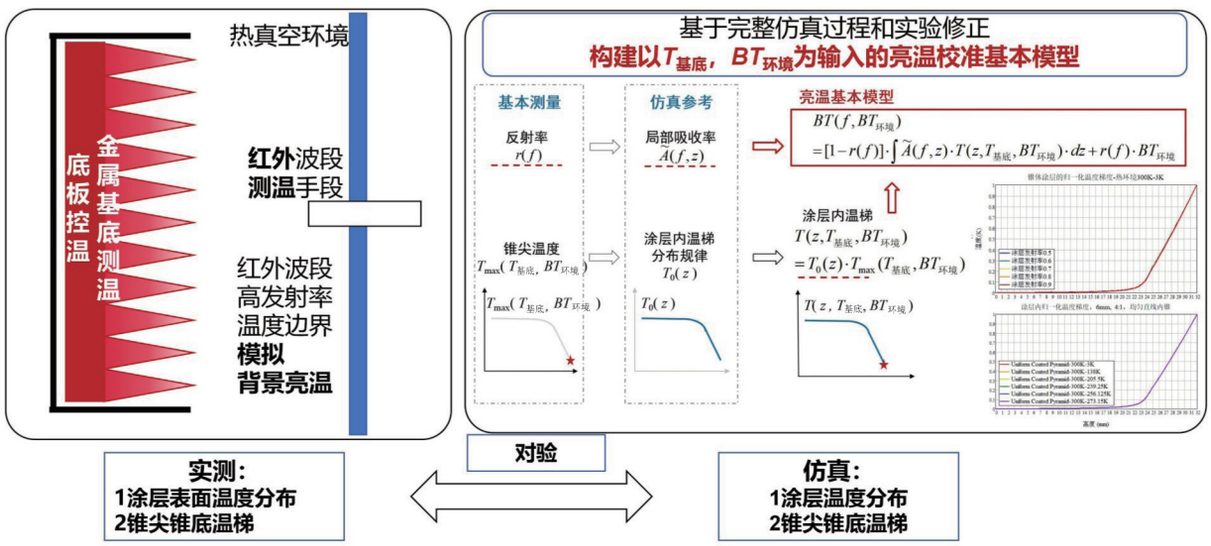


图12 亮温校准基本模型构建方案设计

Fig. 12 Scheme design for the fundamental model of brightness temperature calibration

下一步分析的输入条件。此步骤中与实验测得的辐射口面附近温度测值完成比对验证。

然后是针对定标源具体结构，进行小尺度的热仿真，得到定标源结构内外温度分布，用于与实验比对，进而进行模型修正。此时不仅要关注定标源结构在高度向的温度梯度，也要计入由于非均匀背景亮温所导致的定标源阵列横向温梯。同时，针对定标源和接收机馈源照射关系同步开展电磁仿真，基于近场互易理论得到定标源的局部亮温贡献分布[18-19]，从而计算定标源在馈源视角下的传递亮温偏差$\triangle BT_1$。

由于实验的复杂性，不可能基于实测手段获取足够复杂的数据，进而建立亮温校准应用模型。因此，将进一步基于验证后的热仿真流程，开展大规模的仿真，比如可引入在轨运行时复杂的星外背景亮温分布特性，得到校准模型输入量$T_{基底}$（多测点均值和各测点离散值）、T_1，T_2，T_3，T_4（模拟边界温度测值），和亮温偏差$\triangle BT_1$。有了大量的数据作为支撑，则可以通过线性回归，机器学习等手段，构建亮温校准应用模型。此时不仅要考虑式(5)的单锥模型（对应均匀背景），也要引入式(6)考虑阵列上的非均匀温度分布，或直接应用式(2)进行全阵列的三维耦合积分。同时，利用此阶段的仿真分析结果，还可以进一步优化定标源辐射口面附近温度测量点的位置，优化亮温校准应用模型的精度。

3.4 亮温校准模型计量与应用讨论

由上所述，通过从简单场景到复杂场景两步走

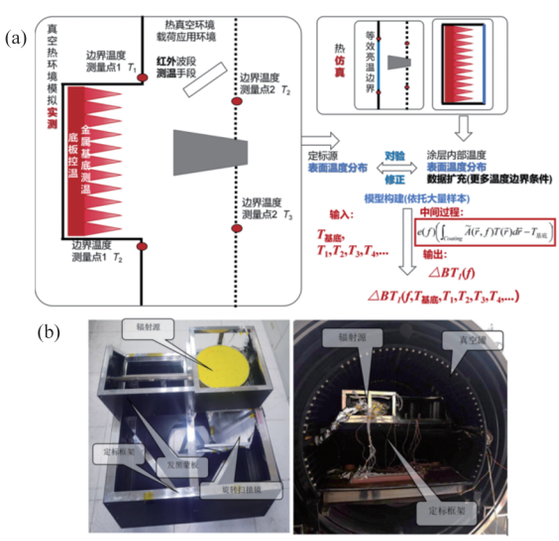


图13 亮温校准应用模型：(a) 构建方案设计; (b) 考虑安装机构的热真空罐内实验场景示意

Fig. 13 The applied model of brightness temperature calibration: (a)scheme design for model construction; (b) thermal experimental configuration considering installing structures

的方式，重点突破定标源温梯特性的定量和动态测定，并基于结合电磁特性测值和仿真结果完成从定标源辐射亮温的校准。基于定标源亮温辐射的参量关系，从计量的角度，需要从温度特性的测量误差、电磁特性测量误差、定标源材料参数离散引入的亮温定量对应误差等多个角度，来评价最终亮温校准模型的误差特性，如图14中所示。从输入量的角度，基于PRT的温度测量误差在0.03 K左右[14]，发射率测量误差在反射率量值的3 dB左右[26-27]，定

标源材料电磁参数的测量误差在5%左右[29-30],在两步走温梯模型构建和定标源发射率足够低的条件下,初步估计亮温校准模型的误差应控制在0.1 K甚至更低的水平,作为参考,文献[11]中针对地面冷源,完全依赖仿真分析所给出的亮温估计不确定度在0.22 K(k=1)。而本工作中提出的亮温计量校准模型,针对温梯问题上引入两步走的实测验证支撑,原理上规避一部分参数估计带来的误差,因此目标应实现更高的定量精度。另一方面,相比于特定状态下仿真分析得到的静态结论,本文工作所强调的基于实际物理温度测值递推亮温,关键进步在于可基于实时测值,在不同工况下动态地完成亮温校准。

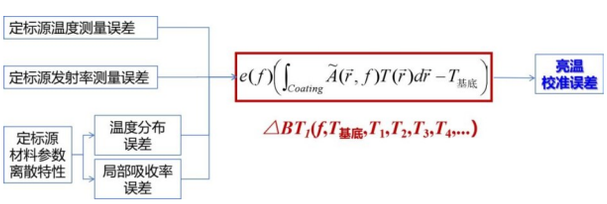


图14　亮温校准模型误差分析方案(计量评价)

Fig. 14　Scheme design for the Error analysis for the brightness temperature calibration

再进一步,对于亮温校准模型的最终产出,即定标源的辐射亮温,目前规划的测定验证方式有两种可能:(1)对于可加热变温状态下的定标源,可以作为被观测目标,采用经定标后的辐射计进行变温观测。(2)在辐射计载荷的热真空定标环节中应用亮温校准模型,观察定标精度的提升效果。其中第二种方式,是亮温校准模型直接的应用场景,即在定标过程中直接提供亮温校准值,相比以往基于发射率和温度不均匀度的量值估算将是重要的技术进步。具体,在热真空定标过程中,亮温校准模型将基于金属内锥和定标源口面附近环境温度实测值,结合发射率、局部吸收率分布等支撑数据,实时给出热定标源的辐射亮温。通过对定标过程的精度评价,验证并修正亮温校准模型,作为在轨应用前的最终调试环节。

需要指出的是,由于微波段亮温辐射极其微弱,同时亮温传递过程复杂易受环境干扰,诸多困难造成国际上微波亮温辐射基准和传递标准长期缺位。长期以来,围绕微波定标源亮温的研究都是通过电、热分解研究再合成思路的开展。而定标源辐射亮温准确性的测试验证,需通过比对或者间接验证的方式(如上面考虑的两种可行方式)。构建微波亮温辐射基准和传递标准,以服务于广泛应用的辐射计遥感观测,是国际与国内相关机构长期努力的重要目标。美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)围绕构建构建微波亮温基准开展了一系列研究工作[31-34]。我国市场监管总局于近日宣布批准新建微波亮温度国家计量基准,目标覆盖10 ~ 90 GHz,测量不确定度0.3 K(k=2),在国际上也属于领先的技术部署。新建的微波亮温度基准也有望在部分频段对OBCT的亮温量值进行验证。综上,基于温度实测值构建定标源的动态亮温校准模型,是从技术上实现定标源"发的准"的重要步骤,直接支撑载荷定标精度的系统性提升;对于微波亮温基准构建和传递标准构建,也可提供重要的技术参考。

4　总结与展望

本文围绕星载微波辐射计定标源在轨应用时的辐射亮温校准技术需求,从锥体阵列型定标源辐射亮温产生的机理出发,梳理决定亮温偏差的关键因素,以及其校准参量的确定方式,明确了实测获其绝对值,仿真提供相对分布的校准总体技术方案。同时围绕目前的难点问题,即如何获取定标源涂层表面的实际温梯,提出了基于在轨金属内锥温梯铂电阻测量,与地面红外测温方式结合所确立的内外锥温梯量值传递关系,来予以解决。至此,本文构建了完整的星载定标源辐射亮温校准技术路线,对星载微波辐射计定标精度的系统性提升提供了技术与理论基础。在进一步的具体实施中,将逐步细化定标源内外锥温梯与亮温偏差定量关系、宽范围高精度温度校准技术、综合电磁热的校准精度分析与评定等多个环节的具体研究工作。

本文工作的最迫切应用需求是风云四号静止轨道微波星载荷中的热定标源。由于风云四号轨道相比以往载荷平台更高,亮温背景变化范围更大,同时系统频带范围更宽,构成复杂,为保证观测精度,需要切实提升定标精度。经前期论证,确认热定标源的在轨亮温校准是保障定标和观测精度的核心关键技术之一。当前,由兰州空间技术物理研究所研制的风云四号载荷定标源已完成核心技术攻关和初样产品研制,其自身PRT测温精度和控温精度大幅提升,其中测温精度从由0.1 K进步到0.02 K的水平,温度不均匀度从0.15 K进步到0.07 K,为实现在轨亮温校准奠定了技术基础。在后续完成辐射亮温计量校准技术全面验证后,将首

次进行在轨应用,实现具有亮温在轨校准的新一代星载定标源产品应用。

References

[1] HE Jieying, ZHANG Shengwei, WANG Zhenzhan , et al. Prospects for Microwave Atmospheric Sounding of the New Generation of Fengyun Meteorological Satellites [J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(6): 1025-1035.
(何杰颖, 张升伟, 王振占,等.风云气象卫星微波大气探测回顾与展望 [J]. 空间科学学报), 2023, 43(6): 1025-1035.

[2] WANG Zhenzhan, WANG Wenyu, TONG Xiaolin , et al. Progress in Spaceborne Passive Microwave Remote Sensing Technology and Its Application [J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(6): 986-1015.
(王振占, 王文煜, 佟晓林,等.星载被动微波遥感技术及其应用进展 [J]. 空间科学学报), 2023, 43(6): 986-1015.

[3] He Jieying, Dong Xiaolong, Lu Naimeng. Perspectives of Transmission and Traceability of Space Microwave Radiometric Benchmark [J]. Chinese Journal of Space Science, 2023,43(06):1016-1024.
(何杰颖,董晓龙,卢乃锰.空间微波辐射基准传递溯源展望[J].空间科学学报),2023,43(06):1016-1024.

[4] Gu S Y, Gou Y, Xie X X , et al. Recalibration of the FY-3 microwave payload historical data records [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(10):2252-2269.
(谷松岩,郭杨,谢鑫新,等.风云三号卫星微波载荷历史数据再定标[J].遥感学报),2023,27(10):2252-2269.

[5] Wang Z Z, Xiao Y W, Zhang S W , et al. Analysis on applicability of nonlinearity coefficients derived from prelaunch calibration tests to onboard calibration of Microwave Humidity Sounder (MWHS-Ⅲ) on FY-3E satellite [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(10):2327-2336.
(王振占,肖雨伟,张升伟,等.FY-3E微波湿度计发射前定标的非线性系数在星上定标中的适用性分析[J].遥感学报),2023,27(10):2327-2336.

[6] XIE Xin-xin, WU Sheng-li, XU Hong-xin, et al. Ascending-descending bias correction of microwve radiation imager on board FengYun-3C [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(6): 3126-3134.

[7] TWARONG Elizabeth, PURDY William, GASIER Peter, CHEUNG Kwok, and KELM Bernard. WindSat on-orbit warm load calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(3): 516-529.

[8] Dong K S, Xie X X, Li X, et al. Nonlinear characteristics of FY-3D microwave radiation imager and an optimal calculation method[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(03): 226-232.
(董克松,谢鑫新,李雪,等.FY-3D微波成像仪非线性特征及计算方法优化[J].遥感学报), 2020, 24(03): 226-232.

[9] DRAPER David, NEWELL David, TEUSCH Dennis, YOHO Peter. Global precipitation measurement microwave imager prelaunch hot load calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(9): 4731-4742.

[10] SCHRÖDER Arne, MURK Axel, WYLDER Richard, SCHOBERT Dennis, WINSER Mike. Brightness temperature computation of microwave calibration targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 7104-7112.

[11] VIRONE Giuseppe, ADDAMO Giuseppe, BOSISIO Ada Vittoria, ZANNONI Mario, et al. Thermal vacuum cold target for the Metop-SG microwave imager [J]. IEEE Journal of Selected Topics on Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2021, 14: 10348-10356.

[12] YUAN Rui-li, TAO Yuan, GAO Qing-song, et al. Brightness temperature analysis in the miniaturization of pyramidal calibration targets for sub-millimeter wave radiometers [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 5003505.

[13] JIN Ming, YUAN Rui-li, LI Xiang, et al. Wideband microwave calibration target design for improved directional brightness temperature radiation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 7001705.

[14] Gao Q S, Li D T, Tao Y, et al.The Study of Metrology and Measurement Technology of Spaceborne Microwave Radiometer Hot Calibration Target [J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(02): 103-110.
(高青松,李得天,陶院,等.星载微波辐射计热定标源计量测试技术研究[J].真空与低温), 2023, 29(02): 103-110.

[15] JACKSON D, GASIEWSKI A. Electromagnetic and thermal analyses of radiometer calibration targets [C]. IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120), Honolulu, HI, USA, 2000, 7: 2827-2829.

[16] ZOU Tao, SHANG Zi-qian, SHENG Yu-peng, WEN Qi-ye, LU Guang, WU Zhao, SU Yan-rui, LIU Hai-wen, YAN Fa-bao. Research on calibration targets for a 35-40 GHz millimeter-wave solar radio observation system [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 4094-4101.

[17] LIU Jie, SUN Zhen-lin, SUN Guangmin, LI Yu, CAO Tong, TANG Wen-jie. Design and implementation of a Ku-Band high-precision blackbody calibration target [J]. Micromachines, 2023, 14(1): 18.

[18] LI Xiang, BAI Ming, JIN Ming. Direct modeling of thermal-radiation reception by antenna in close range [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(2): 1757-1763.

[19] LI Xiang, JIN Ming, HUANG Da, BAI Ming. Completed near-field reciprocity relationship for brightness temperature transfer and 3D modeling investigation [J]. Submitted to IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024.

[20] HOUTZ Derek, EMERY William, GU Da-zhen, JACOB Karl, MURK Axel, WALKER David, WYLDER Richard. Electromagnetic design and performance of conical microwave blackbody target for radiometer calibration [J]. IEEE Trans on Geoscience and Technology, 2017, 55(8).

[21] JACOB Karl, SCHRÖDER Arne, MURK Axel. Design, manufacturing and characterization of conical blackbody targets with optimized profile [J]. IEEE Transactions on

Terahertz Science and Technology, 2018, 8(1): 76-84.
[22] JACOB Karl, SCHRÖDER Arne, VON WERRA Leandro, REINHARD Florian, RAIIN Philippe, Murk Axel. Radiometric characterization of a water-based conical blackbody calibration target for millimeter-wave remote sensing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(6): 1699-1696.
[23] ABLERS Roland, EMRICH Anders, MURK Axel. Antenna design for the arctic weather satellite microwave sounder [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2019, 4: 686-694.
[24] SANDEEP Srikumar, GASIEWSKI Albin. Electromagnetic analysis of radiometer calibration targets using dispersive 3D FDTD [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 2821-2828.
[25] BAI Ming, XIA Dong, JIN Ming. Effects of coating material properties on the wideband reflectivity performance of microwave calibration targets [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4909-4913.
[26] JIN Ming, LI Bin, BAI Ming. On the reflectivity measurements of microwave blackbody in bistatic near-field configuration [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 8027-8032.
[27] JIN Ming, FAN Bo-hao, LI Xiang, et al. On the total reflectivity estimation of microwave calibration targets by backscattering measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, Art no. 5223711.
[28] GAO Qing-song, TAO Yuan, YANG Lei, YUAN Rui-li, JIN Ming. On the antenna illumination effects in monostatic reflectivity determination for microwave calibration targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: Art no. 4500705.
[29] ZIVOKOVIC Irena, MURK Axel. Characterization of magnetically loaded microwave absorbers [J]. Progress of Electromagnetic Research B, 2011, 33: 288-289.
[30] Liu Xiaoming, Yu Junsheng, Chen Xiaodong, et al. A broadband quasi-optical system for measuring the dielectric properties in the terahertz band [J]. Journal of Radars, 2018, 7(1): 56 - 66.
(刘晓明, 俞俊生, 陈晓东等, 针对太赫兹波段介电参数测量的宽带准光系统, 雷达学报, 2018, 7(1): 56-66.
[31] RANDA James, COX Amanda, WALKER David. Proposed development of a national standard for microwave brightness temperature [C]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, CO, USA, 2006, 3996-3999.
[32] GU Da-zhen, WALKER David. Application of coherence theory to modeling of blackbody radiation at close range [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(5): 1475-1488.
[33] HOUTZ Derek, EMERY William, GU Da-zhen, WALKER David. Brightness temperature calculation and uncertainty propagation for conical microwave blackbody targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(12): 7246-7256.
[34] HOUTZ Derek, WALKER David, GU Da-zhen. Progress towards a NIST microwave brightness temperature standard for remote sensing [C]. 84th ARFTG Microwave Measurement Conference, Boulder, CO, USA, 2014, 1-4.