

基于低温辐射计的红外辐射定标方法

Calibration of Infrared Radiation Based on Cryogenic Radiometer

林志强 郑小兵 张磊 王骥

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室,合肥 230031)

LIN Zhiqiang ZHENG Xiaobing ZHANG Lei WANG Ji

(Remote Sensing Department, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

摘 要 在比较国际上基于低温辐射计的红外辐射定标技术的基础上,提出了以红外光源结合单色仪为辐射源,及以腔式热电堆探测器和低温辐射计为标准探测器的红外辐射定标方案。介绍了其结构和工作原理并给出了初步的定标结果。

关键词 红外辐射定标;低温辐射计;腔式热电堆探测器;单色仪

Abstract After comparing different infrared calibration methods based on cryogenic radiometer, We propose an infrared calibration method based on cryogenic radiometer using infrared source in combination with a monochromator as radiation source, cavity thermopiles detector and cryogenic radiometer as primary standard detectors. We present the working principle and a schematic description of the new facility. A status report is also given on the development of this facility.

Key words infrared radiometric calibration; cryogenic radiometer; cavity thermopiles detector; monochromator

中图分类号 P422.6*1

1 引言

近年来随着传感器技术的发展,包括我国在内的很多国家已经把红外波段的遥感仪器搭载在气象、资源、测绘、海洋、环境监测等遥感卫星上送入了太空。遥感平台上的这些红外传感器能否为各种应用目的提供有价值的信息,不仅仅取决于传感器的设计和性能,还取决于其光辐射准确测量能力,这就需要对传感器进行绝对辐射定标。

随着遥感应用逐渐广泛,深

度逐渐加深以及近些年定量化遥感的提出,对于传感器的辐射定标精度要求越来越高,传统方法已难以满足卫星遥感对高精度辐射定标的要求。基于此,从20世纪90年代开始,国际标准化组织和一些发达国家开始了以低温辐射计为初级标准的高精度光辐射定标和标准传递的研究。由于低温辐射计综合利用了电替代、液氮液氦双层冷屏蔽和超导等先进技术,其光辐射测量达到了前所未有的精度^[1]。

为适应我国空间遥感和星上有效载荷定标的要求,提高遥感数据可靠性及应用的有效性,中科院安徽光学精密机械研究所遥感研究室于1996年开展了基于低温辐射计的高精度光辐射定标和标准传递技术的研究。经过十余年的发展,目前已经能够在0.4~1.6 μm波段对标准传递探测器进行绝对光功率响应率定标,其定标不确定度已达到 10^{-4} 水平^[1-4]。

随着红外探测器技术的发展及遥感应用的需求,国内在轨或

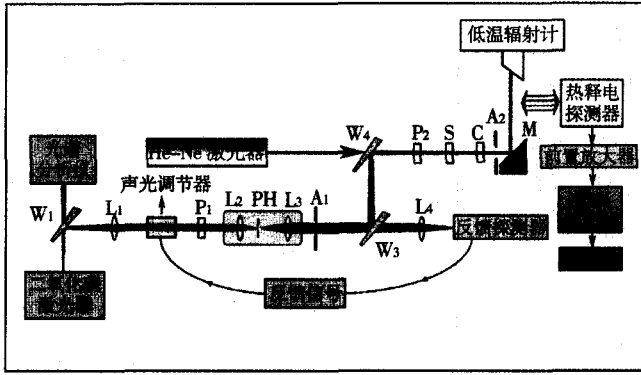


图1 NIST 可调谐 CO₂ 激光器定标系统(L₁, L₂, L₃, L₄-ZnSe: 透镜; W₁, W₃, W₄-ZnSe: 楔形窗; P₁, P₂: 起偏器; A₁, A₂: 光阑; S: 快门; C: 斩波器; M: 反射镜; PH: 针孔)

研制中的遥感卫星上的红外通道不断增多, 对红外高精度辐射定标的需求与日俱增, 因此建立一套基于低温辐射计的红外辐射定标系统是目下一项迫切的科研任务。

2 基于低温辐射计的红外辐射定标系统国外研究进展

英国国家物理实验室(NPL)是国际上最早开展基于低温辐射计的红外辐射定标系统研究的机构之一, 于20世纪90年代初建立了400 nm~20 μm 波段基于低温辐射计的光谱响应率标准^[5]。随后美国国家标准和技术研究所(NIST)和荷兰计量研究院(NMI-VSL)相继建立了基于低温辐射计的红外光谱响应率标准^[6,7], 德国耶拿高技术物理研究院(PTB)和加拿大国家研究委员会(NRC)也加入了这一研究行列, 并取得了一定成果^[8,9]。

目前国际上基于低温辐射计的红外辐射定标系统根据辐射源的不同主要有以下结构: 1) 基于调谐激光器的低温辐射计红外辐射定标系统; 2) 基于黑体的低温

辐射计红外辐射定标系统; 3) 基于单色仪的低温辐射计红外辐射定标系统。

2.1 基于调谐激光器的低温辐射计红外辐射定标系统

目前在基于激光器的低温辐射计红外辐射定标系统研究方面处于领先水平的是NPL和NIST^[10-12]。

图1为NIST采用光栅可调谐CO₂激光器的低温辐射计定标系统。CO₂激光器的功率控制是通过反馈回路来实现的。由于CO₂激光器的功率比低温辐射计的使用功率范围高4个量级, 系统中利用3个ZnSe楔形窗(W₁,

W₃, W₄)进行反射来实现光功率衰减。由于红外光路不易准直, 系统利用He-Ne激光器来进行可见光准直。

NIST使用该系统得到钽酸锂热释电探测器在10.6 μm的定标不确定度约为0.48%, 并且指出还可以通过探测器镀上金黑薄膜来提高不透明度^[11]。

2.2 基于黑体的低温辐射计红外辐射定标系统

NIST的中等背景红外设备(MBIR)(如图2)是一套基于黑体的低温辐射计红外辐射定标系统。它可提供在一个在80 K环境温度进行辐射功率测量的条件。而环境温度为80 K的辐射测量对于许多空间遥感仪器的定标是很重要的。

在1998年建立之初, 只有大面积黑体源(LABB)被安装到低温真空腔中, 随后低温辐射计(ACR)和热红外传递辐射计(TXR)相继装入。在所有设备安装后, MBIR可以进行辐射源和探测器的定标和表征^[13]。

2.3 基于单色仪的低温辐射计红外辐射定标系统

基于单色仪的低温辐射计红

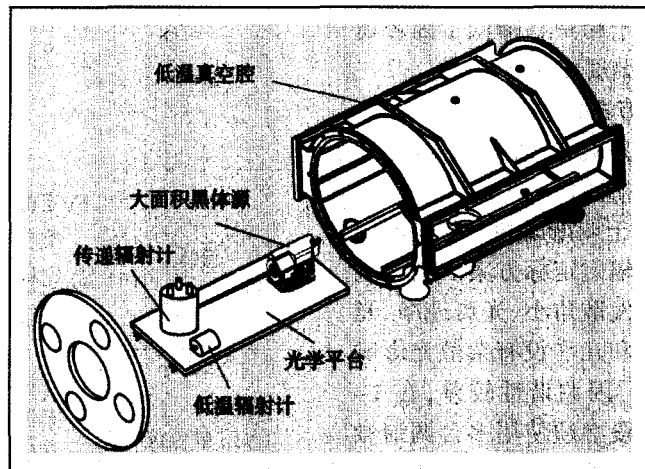


图2 NIST 中等背景红外设备结构简图

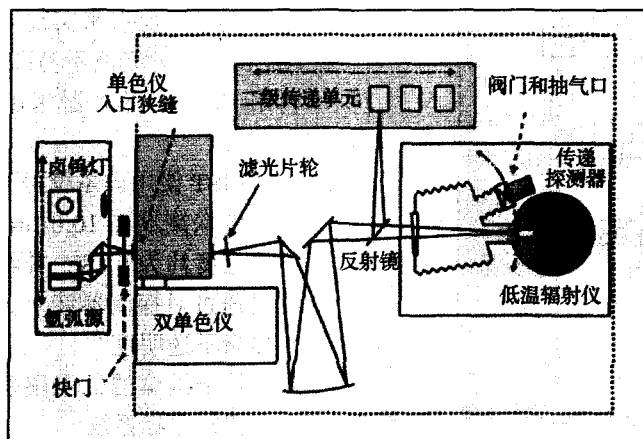


图3 NMI-VSL 光谱定标设备示意图

外辐射定标系统是国际上研究最早,也是目前应用最为广泛的低温辐射计红外辐射定标系统。NIST、NPL、NMI-VSL 等研究机构都建立了基于单色仪的低温辐射计红外辐射定标系统,目前技术已经较为成熟。

图3为NMI-VSL的 $1\sim 20\ \mu\text{m}$ 的基于单色仪的光谱定标设备示意图,在大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时使用一个氩弧和单光栅单色仪作为红外辐射源;小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,使用一个石英的卤钨灯和一个双光栅的单色仪作为光源。三个反射镜组成的光学系统被用来匹配单色仪和低温辐射计的 F 数,只有极小可忽略的象差。除组成光源外,整个设备密封于箱中,降低了因环境而产生的温度变化^[6]。

2.4 定标方案比较

以上定标方案各有其优缺点,如表1所示。

1) 基于调谐激光器的低温辐射计红外辐射定标方案。调谐激光器具有发散角小、光斑纯净、光功率稳定和几乎没有杂散光影响等优点,但因调谐性较差,在 $1\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段必须使用多台调谐激光器,而红外波段的调谐激光器目前国际上鲜有商品化产品且价

格昂贵,故基于调谐激光器的低温辐射计红外辐射定标方案非最佳选择。

2) 基于黑体的低温辐射计红外辐射定标方案。由于关键设备大面积黑体源和低温真空腔目前市场上没有成熟的产品,研制涉及真空保持、低温控制、低温超导等技术,难度大、费用高且周期长,在目前难以实现。

3) 基于单色仪的低温辐射计红外辐射定标方案,虽然定标精度有所降低,但具有光谱覆盖范

围宽、系统可完全自动化、整体费用低等优点,而且关键设备都已商品化,技术成熟。

综上,基于单色仪的低温辐射计红外辐射定标方案具有综合优势,是目前初步开展基于低温辐射计的红外辐射定标研究的最佳方案。

3 基于低温辐射计的红外辐射定标方案

若该方案系统采用待测探测器与低温辐射计直接比对进行定标,由于入射到低温辐射计窗口的光线有 $7^\circ(f/8)$ 的发散角,而低温辐射计前面的腔体太长导致光线无法入射到接收腔底部的探测器上,因此必须将低温辐射计前的窗口和真空阀卸掉,但这要求引进真空腔以保持内部真空。但低温辐射计窗口和真空阀的拆卸必须由专业人员进行,而且真空腔的价格很高,所以目前不宜采用直接比对方式。

考虑了以上因素及实验室条件,决定采用间接比对方式定标。

表1 三种定标方案的比较

辐射源	优点	缺点
激光	1) 定位精度高; 2) 光谱辐射功率高	1) 整体费用高; 2) 激光波段有限; 3) 激光调谐难以实现自动化,实验时间长
黑体	1) 定标环境与实际应用类似; 2) 定标精度高; 3) 系统可实现自动化	1) 整体费用高; 2) 关键定标设备需要据具体要求研制,系统建立周期长; 3) 实验条件要求苛刻,保持费用高
灯+单色仪	1) 光谱覆盖范围宽; 2) 系统可完全自动化; 3) 整体费用低; 4) 技术较成熟	1) 单色仪和灯有很多固有误差 2) 整体精度不高

首先在红外光谱比较系统上利用一个平响应的腔式热电堆探测器做为初级标准,建立连续相对光谱响应率标准;然后在可见-近红外定标系统上利用单立波长激光器在几个波长上与低温辐射计比对进行绝对光谱响应率测量。这样通过计算即可得出待测探测器在各波长上的绝对光谱响应率。采用这种定标方案虽然定标精度略低,但大大降低了系统费用并充分利用了现有设备,是进行红外辐射定标初步研究的最好方案。

在第一个阶段,用腔式热电堆探测器做为标准探测器,TS-76探测器和扩展 InGaAs 探测器作为传递探测器,建立 1~3 μm 的绝对光谱响应率标准;在第二个阶段,利用腔式热释电探测器做为标准探测器,InSb 探测器和 HgCdTe 探测器做为传递探测器,完成 3~12 μm 的绝对光谱响应率标准。

3.1 红外光谱比较系统

图 4 为红外光谱比较系统的光路图,这套系统可实现 1~12 μm 的相对光谱响应率定标。在 1~3 μm 采用卤钨灯作为红外光源,在 3~12 μm 用陶瓷红外元件,红外光源出射的光线经过椭圆反射镜会聚后成像在焦距为

300 mm、 F 数为 $f/4$ 的光栅单色仪的入口狭缝处,采用椭圆反射镜是为了最大限度地利用光源能量。

光源的辐射经过光栅单色仪分光后从出口狭缝处出射,波长的变化由软件控制闪耀光栅转动实现。离轴抛物镜 M_1 、 M_2 分别用来匹配单色仪和探测器的 F 数,从而使象差可忽略,在实际应用中为了简化光路调整步骤,对两个离轴抛物镜采用整体式设计,组成离轴抛物镜反射系统。在探测器前端,通过一个滤光片轮将截止滤光片移到光束中,用来抑制光栅的高级光谱。标准探测器和待测探测器的水平和垂直定位是通过软件控制的电动平移台来实现的。为了降低由于房间杂散光引起的背景信号产生的影响,整个系统除光源和单色仪外,都放置在一个内表面都涂上黑漆的密封箱中。

在红外区域大多数光源输出能量较弱,导致在红外光谱辐射定标中系统信噪比太低。为了尽量降低光在传输过程中的损耗,提高探测器接收到的光谱辐射通量,对红外光谱比较系统中所有反射镜进行镀金,并采用效率更高的光栅。通过以上设计及使用椭圆反射镜,可将系统的光谱辐

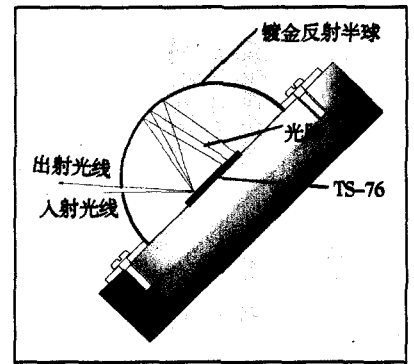


图 5 腔式热电堆探测器截面图

射通量提高一个量级。

3.2 探测器

腔式热电堆结构如图 5 所示,图中采用的薄膜热电堆探测器是从 PTB 引进的。薄膜热电堆由 76 个热电耦结合而成,响应面直径 7 mm,响应波段 1~3 μm ,表面涂有银黑吸收层,具有相对较高的吸收率。将薄膜热电堆探测器与入射光线成 47° 安装在一个直径为 25 mm 的镀金半球反射器中心,加上反射器的作用是没有一个单独的吸收层能够完全吸收红外辐射。辐射线被探测器反射后又通过反射器反射回。此设计增加了对光线的吸收,使腔式热电堆探测器的响应率在很宽的光谱范围内可以认为是不变的^[9]。

扩展 InGaAs 探测器(如图 6)采用了日本 Hamamatsu 的 G5853-23 作为响应元件。探测器响应面直径为 3 mm,响应波段为 1.2~2.55 μm 。通过在探测器响应元件前加入积分球提高了响应面的均匀性并增大了接受面。积分球作为一个散射腔,把入射光经各方向上的多次反射而均匀分布。探测器置于球的内部表面,以接受均匀的光辐射通量。由于固定的机械设计,响应片所接受的光功率与入射积分球的光功率成正比。

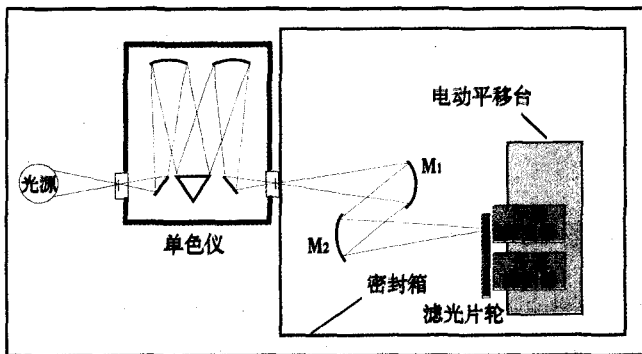


图 4 红外光谱比较系统光路图

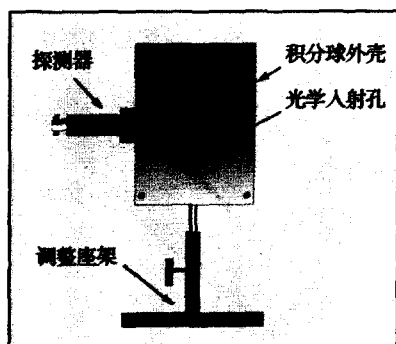


图6 扩展InGaAs探测器装配示意图

4 绝对光谱响应率不确定度分析

采用上述的方法对 TS-76 探测器进行了绝对光谱响应率定标,其绝对光谱响应率曲线如图7所示。

TS-76 探测器不确定度结果主要由两部分组成:测量系统本身的不确定度和探测器本身参数的测量不确定度。

测量系统本身的不确定度包括:1) 低温辐射计功率测量的不确定度包括窗口透过率、非等效因子、电加热功率、腔体吸收率等,此项的评估引用了之前的测量结果,不确定度优于 0.02%^[4]。2) 腔式热电堆的光谱响应率并不是固定值,不同波长的光谱响应率差异小于 0.1%。3) 在光谱比较系统中采用了单色仪,这比采用激光器带来了更多的不确定因素。主要有:杂散光,波长不确定度,带宽效应,几何效应,输出稳定性等,在 1~3 μm 波段内不确定度小于 0.1%。

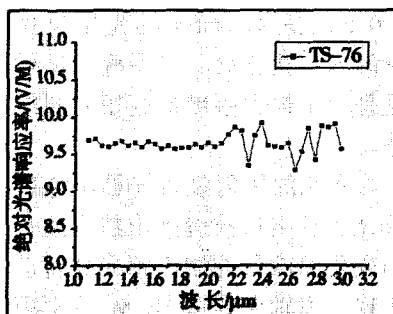


图7 TS-76 绝对光谱响应率

TS-76 线性通过电替代方法测出,线性优于 0.2%。探测器的均匀性是圆对称的,中心和边缘的差异小于 0.5%。

依据国际通用规范考察测量中不确定度因素来源,不确定度均采用测量过程中的最大值,得到了如表1所示的 TS-76 探测器绝对光谱响应率的不确定度分析结果。

从表2看出,影响 TS-76 探测器最终不确定度结果的最主要因素是线性、空间均匀性等探测器本身参数测量的不确定度。

5 结论

提出了 1~12 μm 的红外辐射定标新方法并初步建立了红外辐射定标的光谱响应率标准。本文介绍了标准的传递过程、定标设备的原理及改进探测器的结构并利用建立的系统对 TS-76 在 1~3 μm 的绝对光谱响应率进行了测量,其不确定度优于 0.63%,不确定度主要取决于探测器本身特性。实验结果表明采用上述方法

表2 TS-76 探测器绝对光谱响应率的不确定度

不确定度来源		不确定度
定标系统	低温辐射计功率测量	0.02
	腔式热电堆	0.1
	单色仪	0.1
TS-76	重复性	0.1
	线性	0.2
	均匀性	0.5
	输出功率	0.03-0.28
联合不确定度		0.57-0.63

进行绝对光谱响应率定标的可行性,指出可以通过采用性能更好的探测器来改善绝对光谱响应率的不确定度,下一步实验中将采用性能更好的扩展 InGaAs 探测器进行绝对光谱响应的测量。

收稿日期:2006-09-07

作者简介:林志强(1982-),男,福建人,中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室硕士研究生,主要从事红外辐射定标方法、自动化光辐射测量仪器等方面研究工作。

E-mail: zqlin@aiofm.ac.cn

导师简介:郑小兵(1969-),安徽人,研究员、博士生导师,主要从事光辐射测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和光学海洋学等方面的研究。

E-mail: xbzhen@aiofm.ac.cn

参考文献

- 1 郑小兵,吴浩宇,章俊平等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. 光学学报, 2001, 21(6):749-752
- 2 李双,王骥,章俊平等. 可见-近红外(488-944 nm)基于低温辐射计的高精度光辐射绝对定标研究[J]. 光学学报, 2005, 25(5):609-613

- 3 李双, 吴浩宇, 李照州 等. 近红外高精度光辐射标准探测器的实验研究[J]. 光学技术, 2004, **30**(4):498~501
- 4 李双, 王骥, 陈凤 等. 基于低温辐射计的 InGaAs 陷阱探测器高精度光辐射定标研究[J]. 光学技术, 2006, **32**(增刊):64~66
- 5 D.H.Nettleton, T.R.Prior, T.H.Ward. Improved spectral responsivity scales at the NPL, 400 nm to 20 μm [J]. *Metrologia*, 1993, **30**(4):425~432
- 6 C. A. Schrama, P. Bloembergen, E. W. M. van der Ham. Monochromator-based cryogenic radiometry between 1 μm and 20 μm [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5):567~570
- 7 Alan L. Migdall, George P. Eppeldauer. Spectroradiometric detector measurements: part III-infrared detectors [M]. USA: NIST Special Publication, 1998
- 8 R. Friedrich, J. Fischer, M. Stock. Accurate calibration of filter radiometers against a cryogenic radiometer using a trap detector[J]. *Metrologia*, 1995, **32**(6):509~513
- 9 L. P. Boivin, K. Gibb, Monochromator-based cryogenic radiometry at the NRC[J]. *Metrologia*, 1995, **32**(6):565~570
- 10 S. W. Brown, G. P. Eppeldauer, K. P. Lykke. NIST facility for spectral irradiance and radiance responsivity calibrations with uniform sources[J]. *Metrologia*, 2000, **37**:579~582
- 11 T. R. Gentile, J. M. Houston, G. Eppeldauer *et al.*. Calibration of a pyroelectric detector at 10.6 μm with the NIST high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(16):3614~3621
- 12 E. Theocharous, T. R. Prior, P. R. Haycocks *et al.*. High-accuracy infrared spectral responsivity scale [J]. *Metrologia*, 1998, **35**:543~548
- 13 Joel B. Fowler, B. Carol Johnson, J. P. Rice *et al.*. The new cryogenic vacuum chamber and black-body source for infrared calibration at the NIST's FARCAL facility[J]. *Metrologia*, 1998, **35**:323~327

(上接第 77 页)

Allen Ashmead 作了“激光器设计及制造方式的革新: 工业激光器如何得益于最先进的光通讯器件技术”的报告。这些报告向与会听众展示了激光的前沿技术在各个领域的最新应用。

光学期刊联合编辑部盛装参展

中科院上海光学精密机械研究所光学期刊联合编辑部作为本次展会的重要支持媒体应邀参展, 作为国内光电媒体的领军单位, 光学期刊联合编辑部在本次展会中成为焦点展位, 受到广大从事光电行业设计研发、市场调研、产品销售等人员的大力关注。

在本次展会期间, 编辑部向广大观众免费派发了《激光与光电子学进展》、《中国激光》、《光学学报》、*Chinese Optics Letters* 等国内著名光电期刊 1600 余份, 收到近 200 份的读者索阅信息表。同时, 我们利用本次展会的大平台, 走访了与我们长期合作的企业, 如肖特、相干、科艺、普爱纳米、上海瀚宇、晨辉日升、长春新产业等, 向他们赠送相关资料, 并就产品宣传以及市场调研方面进行了深层次的沟通, 达成众多的合作意向。

另外, 展会期间我们还受到很多外国媒体、企业的关注, 大家就期刊出版、产品宣传、期刊国际化发展等方面的合作交换了意见。