

文章编号: 0253-2239(2005)05-609-5

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

李 双 王 骥 章骏平 吴浩宇 郑小兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 合肥 230031)

摘要: 报道了可见-近红外波段(488~944 nm)基于低温辐射计的光谱辐射功率定标和标准传递实验和研究,并对测量结果的各个不确定因素进行了测量和分析。首先低温辐射计采用电替代方法测量单个波长激光绝对光功率,测量不确定度低于 0.016%。然后利用低温辐射计定标作为标准传递探测器的硅陷阱探测器,从而建立可见-近红外波段陷阱探测器的绝对光谱响应率标准,其不确定度小于 0.028%。结果证明了在此波段以探测器为基础建立和传递高精度光辐射标准的合理性和可行性。

关键词: 探测器; 辐射定标; 低温辐射计; 陷阱探测器; 不确定度分析

中图分类号: O432 文献标识码: A

Highly Accurate Calibration of Optical Radiation Based on Cryogenic Radiometer at Visible and Near Infrared Spectrum (488~944 nm)

Li Shuang Wang Ji Zhang Junping Wu Haoyu Zheng Xiaobing

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

Abstract: Report the research on highly calibration and standard transfer is based on cryogenic with analyzing the component uncertainties which contribute to total uncertainty associated with the measurement results. Firstly, the laser power was measured by cryogenic radiometer in visible and near infrared spectral regions (488~944 nm), uncertainty of power measurement is less than 0.016%. Secondly, Si transfer standard detectors were directly calibrated against the cryogenic radiometer using laser source, therefore the absolute spectral responsivity scale is established at this spectral regions (488~944 nm) at uncertainty less than 0.028%.

Key words: detectors; radiometric calibration; cryogenic radiometer; trap detector; uncertainty analysis

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可见-近红外波段的遥感仪器搭载在卫星上送入了太空。传感器所获取数据的分析旨在为科研提供资料,为自然资源的管理以及农业环境等规划提供决策信息。现在很多空间计划的任务是在世界范围内长期地协同了解全球环境的变化,比如地球辐射收支平衡观测,地球臭氧层的监测等。传感器能否为这些应用目的提供有价值的资

料,取决于数据的精度、有效性和可靠性,而传感器辐射定标的精度是决定数据质量的关键因素之一。

遥感定量化的研究对光辐射定标的精度提出了更高的要求,而传统基于黑体辐射源的定标方法已不能适应当前的要求^[1]。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^[2,3]。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

作者简介: 李 双(1976~),男,河北唐山人,中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室博士生,主要从事辐射高精度定标研究工作。E-mail: shli@aiofm.ac.cn。

收稿日期: 2004-05-11; 收到修改稿日期: 2004-10-08

到了前所未有的精度^[4,5]。基于探测器的绝对定标方法正逐步在传感器光辐射定标中得到应用^[6],对提高和保障光谱辐射的测量精度起了重要作用。

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,中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室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^[1]。以硅光电二极管陷阱探测器为传递标准探测器,建成了可见波段高精度绝对光谱响应率标准。本文在前期工作基础上,建立了可见-近红外高精度光谱响应率标准。定标实验表明在可见-近红外(488~944 nm)低温辐射计测量激光绝对功率的不确定度低于0.016%,陷阱探测器绝对光谱响应率测量不确定度低于0.028%。

2 实验原理

低温辐射计利用电替代原理测量激光功率。首先入射激光功率被吸收腔吸收导致腔体温度升高,腔体达到热平衡后挡住入射光,然后利用电加热器使腔体产生同样温升,测量温升所需电加热功率即得到实际入射光功率值。实际测量过程如图1所示。

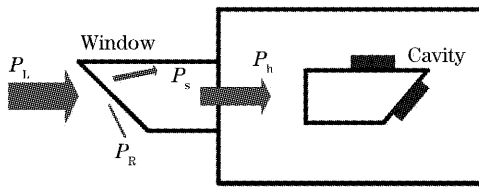


图1 低温辐射计光功率测量示意图。 P_L :入射光功率; P_s :透过窗口未进入吸收腔部分入射光功率; P_R :由于窗口反射损失的入射光功率;Cavity:低温辐射计吸收腔; P_h :吸收腔接收到的入射光功率;
Window:低温辐射计窗口

Fig.1 Optical power measurement of cryogenic radiometer.
 P_L : incident optical power; P_s : a part of incident optical power which passes the window but doesn't enter the cavity; P_R : reflected incident optical power by window; Cavity: cavity of cryogenic radiometer; P_h : absorbed incident optical power; Window: window of cryogenic radiometer

从图1看出入射激光(P_L)在窗口表面有一部分被反射(P_R);一部分(P_s)由于窗口材料中的缺陷和气泡等原因被散射不能进入吸收腔;剩余部分(P_h)进入吸收腔被低温辐射计利用电替代方法测量。根据上述工作流程得到如下的测量方程:

$$P_L = \frac{1}{T} \left(\frac{NP_h}{\alpha} + P_s \right), \quad (1)$$

式中 P_L 为入射激光功率; P_s 为未进入吸收腔的部分入射激光功率; N 为光加热和电加热等效因子; P_h 为电加热功率(即腔体接收到的入射光功率); α 为腔体吸收率; T 为窗口透过率。

(1)式中电加热功率 P_h 利用低温辐射计内部的精密电桥测量。低温辐射计锥管形吸收腔内壁涂高吸收率材料,入射光在其中多次反射后接近完全吸收,腔体处于液氮(77 K)和液氦(4 K)双层冷屏蔽下,隔绝了环境热辐射,低温环境下导线和接头均处于超导状态,其欧姆损耗可以忽略,这样使光和电加热过程达到了极高的等效性;等效因子 N 由低温辐射计内部等效因子电路测量,并直接给出测量结果和不确定度;腔体吸收率 α 在低温辐射计出厂前由美国国家标准与技术研究院(NIST)进行了测量;入射功率在窗口的反射部分很难被评估,是测量过程中主要的不确定因素之一。为了避免窗口反射给测量带来的不确定度,图1所示辐射计窗口被精密调节至并保持布儒斯特角,而且入射激光首先通过格兰-泰勒(Glan-Taylor)棱镜(消光比优于 10^{-5})得到垂直偏振(P偏振光),根据布儒斯特定律,理论上此时的入射激光经过布儒斯特窗的反射部分可以忽略;除上述参量外,为得到入射激光绝对功率 P_L ,我们还需要测量窗口透过率 T 和杂散光 P_s 。由(1)式可以得到

$$P_L T = \frac{NP_h}{\alpha} + P_s, \quad (2)$$

(2)式表示入射功率 P_L 透过窗口以后分为两部分 NP_h/α 和 P_s 。式中 P_s 的准确评估比较困难,本次实验中采取有效透过率方法解决此问题,具体测量过程如图2所示。

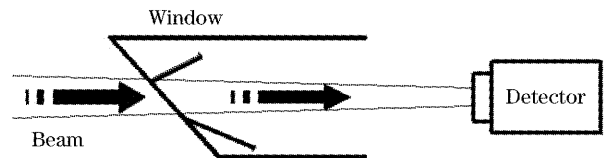


图2 窗口透过率测量示意图

Fig.2 Measurement of window transmittance

透过率测量过程中图3(见3节)所示定标光路不变,将窗口从低温辐射计拆下,移开低温辐射计,将图2所示窗口精确地恢复到低温辐射计测量时的位置,而探测器入瞳精确地定位于低温辐射计腔体入瞳位置,并使探测器的入瞳等于吸收腔的入瞳,这样保证低温辐射计测量时未进入吸收腔的 P_s 同样不能进入探测器,探测器分别测量有窗口与无窗口

时的入射光功率而得到窗口的透过率,此时测量的窗口透过率不是真正布儒斯特窗透过率 T ,而是除去 P_s 影响的有效透过率 T_e ,因此低温辐射计测量方程(2)式化简为

$$P_L T_e = \frac{NP_h}{\alpha}, \quad (3)$$

低温辐射计测量入射激光绝对功率以后,将陷阱探测器切入到光路中,测量其输出,在考虑了陷阱探测器响应的线性、光敏面上的响应均匀性、偏振敏感性以及测量过程中的稳定性因素后,陷阱探测器的绝对光谱响应率 R 可以用下式所示的测量方程表示:

$$R = U \cdot p \cdot N_L \cdot C \cdot (V_o/P_L), \quad (4)$$

其中 P_L 为入射激光功率, U 为光敏面上的响应均匀性因子, N_L 代表响应的线性, p 为偏振敏感性因子, V_o 为实测的输出电压, C 代表稳定性。

3 实验装置

由于近红外不能为肉眼所见,这将给近红外光束准直调整、光路调整、低温辐射计窗口布儒斯特角调整以及近红外光斑调节到探测器腔体中带来困难。为解决上述困难,建立一套如图 3 所示的光路。

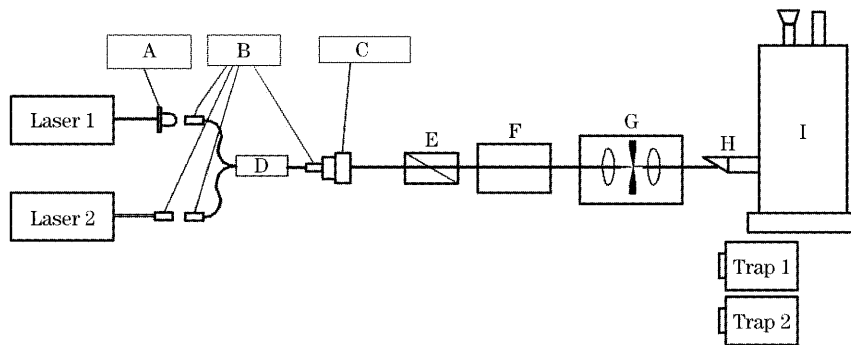


图 3 定标光路示意图。Laser1,2:分别为可见光或近红外激光器;A:显微物镜;B:FC 光纤连接器;C:光纤准直器;D:2×1 光纤耦合器;E:起偏器;F:激光功率稳定器;G:空间滤波器;H:布儒斯特窗;I:低温辐射计;Trap1,2:硅陷阱探测器
Fig.3 Experimental setup of calibration. Laser1,2: visible laser or near infrared laser; A: object lens; B: FC connector; C: collimator; D: 2×1 fiber coupler; E: polarizer; F: Laser power controller; G: Spatial filter; H: Brewster window; I: Cryogenic radiometer; Trap1,2: Si trap detector

此光路利用光纤耦合器将可见光和近红外光联系起来,达到了利用可见光调节近红外光路的目的。利用 2×1(二进一出)光纤耦合器实现可见光和近红外波段的两束激光的共轴输出;从耦合器出射的发散光经过准直器和偏振器得到平行、垂直偏振的光束;激光功率控制器(Laser power controller, LPC)可以调节定标时探测器接收的激光功率,并将其起伏稳定到 8×10^{-5} /h;为了消除激光束高阶模式对测量精度的影响,采用空间滤波器 G 来保证只有良好的基模光束进入低温辐射计和陷阱探测器。由于光路利用可见光调节,而进行近红外测量,故对不同波长之间由于色散效应造成对测量的影响进行了分析和估算^[7],并在光路调节中加以考虑和适当修正。这些影响包括显微物镜焦距的变化、光斑尺寸的变化和光束准直性的变化等。

4 不确定度评估

4.1 低温辐射计测量激光功率的不确定度

从测量方程(3)式可以看出,低温辐射计测入射

绝对激光功率时,不确定度主要来源分别为:1)窗口等效透过率测量不确定度 u_T ;2)等效因子测量不确定度 u_N ;3)腔体吸收率测量不确定度 u_a ;4)电加热功率测量不确定度 u_{P_h} 。我们对上述四个不确定度因子进行测量和分析,对于测量方法和过程以及分析方法在文献[8]有详细描述,由于篇幅的限制在这里就不赘述了。根据不确定度传递定律^[9],激光绝对功率测量的联合不确定度的平方为

$$u_{P_L}^2 = \left(\frac{1}{T_e} \cdot \frac{NP_h}{\alpha}\right)^2 u_T^2 + \left(\frac{1}{T_e} \cdot \frac{P_h}{\alpha}\right)^2 u_N^2 + \left(\frac{1}{T_e} \cdot \frac{NP_h}{\alpha^2}\right)^2 u_a^2 + \left(\frac{1}{T_e} \cdot \frac{N_h}{\alpha}\right)^2 u_{P_h}^2, \quad (5)$$

相对联合不确定度为

$$u_{r:P_L} = u_{P_L} / P_L = \sqrt{\frac{1}{T_e^2} u_T^2 + \frac{1}{N^2} u_N^2 + \frac{1}{\alpha^2} u_a^2 + \frac{1}{P_h^2} u_{P_h}^2} = \sqrt{u_{rT}^2 + u_{rN}^2 + u_{ra}^2 + u_{rP_h}^2}. \quad (6)$$

在可见-近红外 488~944 nm 波段的 7 个波长上低温辐射计测量了各个波长的绝对激光功率,波长分别为 488 nm、514 nm、633 nm、676 nm、

786 nm、830 nm和944 nm。每个波长在 25~250 μW 范围内以 50 μW 为间隔测量了 5 个等级的激光功率。利用(6)式计算各个波长激光绝对光功率测量的不确定度,表 1 中给出了 7 个波长激光绝对功率的不确定度值,所有不确定度均取 5 个功率等级中的最大值。从表 1 可以看出低温辐射计测量入射激光功率的不确定度相差较小,这是因为低温辐射计

综合采用了电替代方法,液氮液氮双层冷屏蔽和超导等技术。而窗口透过率测量不确定度很大程度上决定了最后的测量不确定度,所以说窗口透过率测量不确定度是低温辐射计提高测量激光绝对功率不确定度的瓶颈。我们取表中不确定度最大值作为最终测量不确定度,那么此次激光绝对光功率测量不确定度应该不大于 0.016%。

表 1 低温辐射计光功率测量不确定度估算 /(10^{-4})

Table 1 Uncertainty budget of cryogenic radiometer /(10^{-4})

Source	λ /nm						
	488	514	633	676	786	830	944
Electrical power	0.31	0.362	0.389	0.296	0.260	0.174	0.140
Window transmittance	1.525	0.609	1.529	0.437	0.453	0.521	0.520
Receiver absorptance				0.1			
Heating nonequivalence				0.087			
Total uncertainty	1.541	0.652	1.548	0.488	0.539	0.565	0.555

4.2 标准传递探测器绝对光谱响应率的不确定度

根据(4)式所示的测量方程,利用低温辐射计标定陷阱探测器的绝对光谱响应率时,不确定度因素主要有以下几项:1)低温辐射计测量激光绝对功率的不确定度 u_{PL} ;2)光敏面的响应均匀性 u_U ;3)偏振敏感性 u_P ;4)线性 u_{NL} ;5)其它因素,包括杂散光、温

度漂移、数据采集误差 u_{V_0} 等。同样对上述不确定度因子进行测量和分析,对于测量方法和过程以及分析方法在文献[8]有详细描述。

由不确定度传递定律可知,陷阱绝对光谱响应率的相对联合不确定度为

$$u_{rR} = \frac{u_R}{m_R} = \sqrt{\frac{1}{U^2}u_U^2 + \frac{1}{N_L^2}u_{N_L}^2 + \frac{1}{P^2}u_P^2 + \frac{1}{C^2}u_C^2 + \frac{1}{P_L^2}u_{P_L}^2 + \frac{1}{V_0^2}u_{V_0}^2} = \sqrt{u_{rU}^2 + u_{rN_L}^2 + u_{rP}^2 + u_{rC}^2 + u_{rV_0}^2 + u_{rP_L}^2}. \quad (7)$$

表 2 给出了利用(7)式计算得到的陷阱探测器绝对光谱响应率定标的不确定度。从表中可以看出陷阱探测器自身线性,偏振敏感性和稳定性都很好,但是空间响应均匀性不确定度偏高。低温辐射计激光绝对光功率测量不确定度和陷阱探测器响应均匀性测量不确定度决定了最后陷阱探测器光谱响应率

测量的不确定度,如果想进一步提高陷阱探测器光谱响应率的测量不确定度,就要从这两方面考虑。同样取最大测量不确定度作为我们此次测量最后的测量不确定度,那么此次陷阱探测器光谱响应率测量不确定度不应大于 0.028%。

表 2 硅陷阱探测器绝对光谱响应率测量不确定度 /(10^{-4})

Table 2 Uncertainty of absolute responsivity of Si trap detector /(10^{-4})

Source	λ /nm						
	488	514	633	676	786	830	944
Laser power	1.541	0.652	1.548	0.488	0.539	0.565	0.555
linearity				0.434			
Spatial uniformity				1.99			
Polarization sensitivity				0.492			
Stability				0.678			
Output V_0	0.042	0.034	0.025	0.078	0.017	0.033	0.032
Total uncertainty	2.71	2.33	2.70	2.27	2.27	2.30	2.29

5 陷阱探测器的绝对光谱响应率曲线

根据低温辐射计以及陷阱探测器测量值得到了陷阱探测器的绝对光谱响应率,图 4 给出了陷阱探测器的绝对光谱响应率曲线。

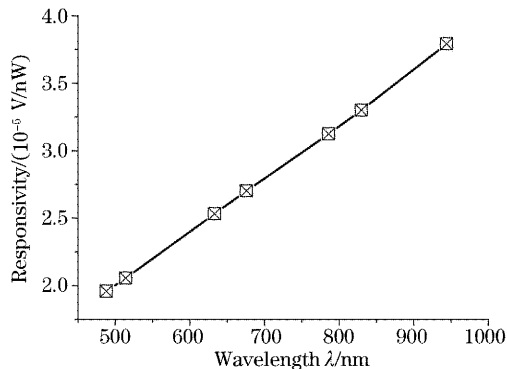


图 4 硅陷阱探测器绝对光谱响应率曲线

Fig. 4 Absolute spectral responsivity of Si trap detector

6 结 论

在可见-近红外波段对陷阱标准传递探测器的绝对光谱响应率进行了高精度定标,定标不确定度小于 0.028%。从实验结果可以看出低温辐射计的窗口透过率测量不确定度是影响整个测量不确定度的主要因素。高精度光谱响应率标准的建立,将为我国空间遥感和星上有效载荷定标提供技术基础,提高我国遥感数据可靠性及应用的有效性。在可见-近红外工作基础上,将进一步完成 1~2.5 μm 高精度定标研究。

参 考 文 献

- 1 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749~752 (in Chinese)
郑小兵,吴浩宇,章骏平等. 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 T. J. Quinn, J. E. Martin. Cryogenic radiometry, prospects for further improvements in accuracy[J]. *Metrologia*, 1991, **28**(3): 155~161
- 3 C. C. Hoyt, P. V. Foukal. Cryogenic radiometers and their application to metrology[J]. *Metrologia*, 1991, **28**(3):163~167
- 4 P. V. Foukal, C. Hoyt, H. Kochling *et al.*. Cryogenic absolute radiometer as laboratory irradiance standards, remote sensing detector and pyroheliometers[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(7): 988~993
- 5 N. P. Fox. Trap detector and their properties[J]. *Metrologia*, 1991, **28**(3): 197~202
- 6 C. J. Bruegge, V. C. Duval, N. L. Chrien *et al.*. Calibration plans for the multi-angle imaging spectro radiometer (MISR)[J]. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 213~221
- 7 Li Shuang, Wu Haoyu, Li Zhaozhou *et al.*. Highly accurate calibration of optical radiation detectors at near infrared spectrum[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4):498~501 (in Chinese)
李 双,吴浩宇,李照洲等. 光辐射标准探测器近红外高精度定标的实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 498~501
- 8 Li Shuang. *Highly Accurate Optical Radiometric Calibration Based on Cryogenic Radiometer at Near Infrared Spectrum*. Remote Sensing Department[D]. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese)
李 双. 基于低温辐射计的近红外高精度光辐射定标研究[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2003
- 9 Taylor B. N., Kuyatt C. E.. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results[J]. NIST Technical Note 1297, <http://physics.nist.gov/pubs/guidelines>