

文章编号: 1003-501X(2005)06-0059-04

采用单片式探测器实现辐射通量定标

周 磊^{1,2}, 章骏平¹, 郑小兵¹

(1.中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感室, 安徽 合肥 230031;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在基于双单色仪的辐射通量定标中, 为了克服陷阱探测器视场小、孔径小的缺点, 提出了采用单片式探测器替代陷阱探测器进行辐射通量定标的方法。采用只与光路垂直的一片硅探测器, 使其光敏面与孔径光阑几乎重合, 以增大探测器的孔径角。同时为了保证测量精度, 采用偏置电流极低的运算放大器 OPA128, 并且增大了反馈电阻, 以增强对弱信号的响应。采用单片式探测器对 400-1000nm 波长范围内进行辐射通量定标, 系统不确定度包括: 探测器响应拟合不确定度 7‰, 从陷阱探测器到单片探测器的传递不确定度 3.14‰, 光源波动小于 1‰, 系统重复性的不确定度 3‰, 最终合成不确定度为 8.3‰, 测量结果符合要求。

关键词: 辐射通量定标; 陷阱探测器; 单片式探测器; 单色仪

中图分类号: TN247

文献标识码: A

Radiation flux calibration performed by a single chip detector

ZHOU Lei^{1,2}, ZHANG Jun-ping¹, ZHENG Xiao-bing¹(1. Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: For radiation flux calibration based on double-monochromator, in order to overcome the faults of small viewing field and small aperture of trap detector, a radiation flux calibration method with a one-diode detector in stead of trap detector is proposed. A piece of silicon detector vertical to light path is adopted, thus making its photo-sensitive surface nearly overlap with aperture stop and aperture angle of the detector can be enlarged. An OPA128 operational amplifier with extreme low bias current and big gain is adopted for enhancing the response to weak signals. Radiation flux calibration is carried out within the wavelength range between 400nm-1000nm. System uncertainties include: fitting uncertainty 7‰ of the detector response, transfer standard uncertainty 3.14‰, light source fluctuation less than 1‰, uncertainty 3‰ of the system repeatability and the final synthetic uncertainty 8.3‰.

Key words: Radiation flux calibration; Trap detector; Single chip detector; Monochromators

引 言

通常激光的发散角很小, 光束能量大, 完全可以用陷阱探测器进行高精度测量, 而且测量光路很容易调整。但对于实验室双单色仪系统的出射光, 其最大特点就是能量小, 且经过接收部分后, 光束并不是准直的, 而是有一定的锥角。在对其进行标定和测试时, 要求探测器灵敏度高, 接收孔径大。由于陷阱探测器接收孔径小、视场小, 在调整系统光路时很难保证探测器和光路垂直, 而且双单色仪出射的光不能被探

收稿日期: 2004-08-13, 收到修改稿日期: 2005-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60378027)

作者简介: 周磊(1978-), 男(汉族)、江苏扬州人, 博士生, 研究方向为宽带细分光谱的高精度光辐射测量与定标应用。

E-mail: lzhou@aiofm.ac.cn

探测器完全接收, 系统杂散光增大, 因此测量精度受到很大影响。为了能高精度定标系统辐射通量, 我们提出了采用单片式探测器替代陷阱探测器, 其结构上抛弃了三片式探测器 Trap 复杂的空间正交立体结构, 只保留与光路垂直的一片探测器。即采用一片硅探测器, 使其光敏面和孔径光阑重合, 让探测器接收更多的光通量。孔径光阑的几何尺寸是根据单色仪出射光斑的几何尺寸来设计的, 作用是限制光斑的边缘部分, 同时也削弱杂散光对测量的影响。单片式探测器的后续电路是在原来 Trap 探测器电路基础上进行改进, 采用了偏置电流极低的运算放大器 OPA128, 增大了反馈电阻, 这样主要是针对双单色仪出射的光强很弱, 需要增加对弱信号的响应, 但增大探测器放大倍率的同时, 背景噪声也被放大了, 最终通过实验将原来探测器 50K Ω 的反馈电阻增加到 10M Ω 。通过重新设计的探测器完全可以对弱信号进行检测和标定。对单片探测器的标定可以参考文献[1]。通过参考文献[1], 我们得知从低温辐射计到 Trap 探测器的总的不确定度为 10^{-4} 量级, 从 Trap 探测器到单片探测器总的不确定度为 10^{-3} 量级。因此, 单片式探测器成为与单色仪系统相匹配的主要标准传递探测器, 可以对单色仪系统进行辐射通量定标。

1 实验原理

1.1 恒定光谱分辨力工作模式

因为在测量过程中使用了 DK-242 双单色仪的恒定光谱分辨力模式, 下面就介绍一下单色仪提供的恒定光谱分辨力工作模式(即 Constant Spectrum Resolution 模式)。

它是根据光栅方程和选定的波谱位置, 计算出当前的线色散系数, 然后通过用户选定所需要的光谱分辨力, 计算出狭缝的宽度并调节到相应位置, 来保持光谱分辨力不变。下面以 2 号光栅为例计算在 CSR 模式下狭缝的大小。根据光栅方程可计算出 500nm 时对应的角度

$$k \cdot \lambda = 2d \cdot \sin(\theta - \varphi) \cos \varphi \quad (1)$$

其中 λ 为波长; θ 为入射光与光栅法线的夹角; φ 为入射光与当前波谱光夹角的一半。已知 2φ 为 15° ^[4], 即可求出此时 θ 为 25.113° 。而根据光栅线色散系数计算公式

$$\frac{1}{D_l} = \frac{1}{f \cdot D_\theta} = \frac{1}{f \cdot \delta\theta / \delta\lambda} \quad (2)$$

式中 D_l 和 D_θ 分别为线色散本领和角色散本领, 而对光栅方程两边同时求导数, 可得到

$$\frac{\delta_\theta}{\delta_\lambda} = \frac{1}{2d \cos(\theta - \varphi) \cos \varphi} \quad (3)$$

当 DK-242 在加模式下运行时, 焦距应是两段焦距相加, 即 480mm。因此, 可计算出此时的线色散系数的倒数为 3.28nm/mm。

此时光栅就根据该值调节入射狭缝和出射狭缝, 例如此时若在 1.5nm 恒定分辨力下, 入射狭缝和出射狭缝就应为: $1.5\text{nm}/(3.28\text{nm/mm}) = 457\mu\text{m}$ 。经与单色仪自身狭缝参数 428.5 μm 比对, 有微小的出入, 作者认为是系统标称参数和实际参数有微小差别所致。

由于单色仪中的三组光栅自身参数不同, 波谱覆盖范围也不同, 所以所能提供的波谱分辨力也不尽相同, 表 1 是系统软件所支持的分辨力。

1.2 标定单色仪辐射通量

系统在 CSR 的工作方式下为三组光栅提供了很多种分辨力, 本次标定单色仪辐射通量的实验者就常用的 2 号光栅在 3nm 分辨力状态下进行了测试。

由于系统的其它部分如反射镜和光栅在反射、衍射效率理论上不变化, 所以认为对系统整体的稳定性和一致性的影响主要来源于光源。在定标和日常使用过程中, 要求光源的功率变化非常小。通过外接监视电路实时监控电源的变化, 每次测试中电压变化均小于 1‰。因此, 认为光源的稳定性满足我们的要求。

综合考虑目前探测器定标的范围和实验室应用中经常使用的波段, 选取了 400-1000nm 范围进行辐射

表 1 三种光栅在恒定光谱分辨力方式下的分辨力

Table 1 Resolution of three kinds of grating under constant spectral resolution

Number of gratings	Spectral range /nm	Constant spectral resolution /nm
1	180-680	1.5, 0.75, 0.38, 0.19, 0.1
2	330-1500	3, 1.5, 0.75, 0.38, 0.19
3	800-3000	6, 3, 1.5, 0.75, 0.38

通量的标定。图1是单片探测器经过标准传递得到的响应率及其线性拟合线，由于标准传递过程得到的响应率只有9个波谱位置，因此在这里我们用线性拟合值作为探测器的真实响应曲线。

线性拟合方程为

$$Y = A + BX \quad (4)$$

其中 $A = -4.82673 \times 10^{-4}$; $B = 3.35814 \times 10^{-5}$ 。标定时，将单片探测器置于双单色仪系统的出缝处，同出射光垂直，适当调节位置，保证出射的光均被探测器光敏面所接收。通过软件为单色仪选择适当的扫描速度(如 6nm/min); 然后根据测试范围(如 401-800nm)计算所需要的扫描时间(共 1 小时 6 分 40 秒)，在 CSR 命令下选择带宽 3nm; 再通过控制信号采集器的软件选择采集的时间间隔和采集次数，使其与单色仪的波谱扫描过程相一致。

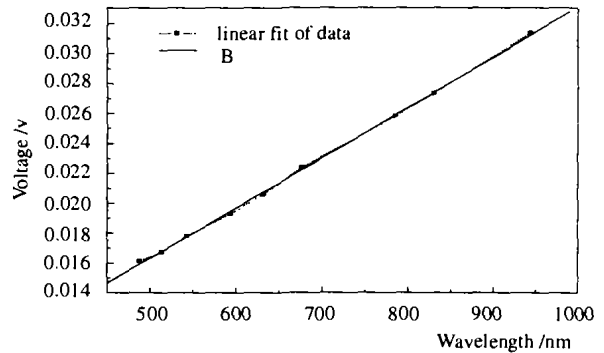


图1 单片式探测器经过标准传递的响应率和拟合线

Fig.1 Responsibility and fitting curve of the one-diode-detector through standard transmission

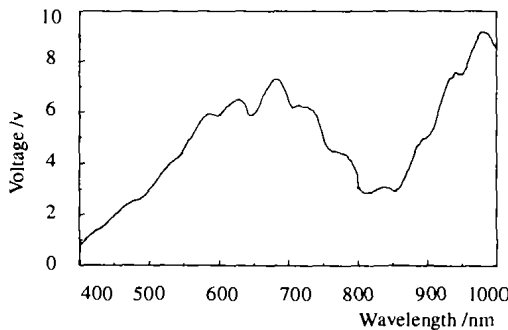


图2 实际测试得到的信号曲线
Fig.2 Signal curve measured in practical operation

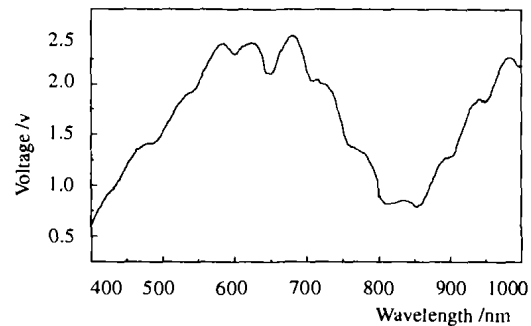


图3 系统辐射通量曲线
Fig.3 Radiation flux curve of the system

考虑到多级衍射，特别是二级光谱对测试的影响，在对 800-1000nm 的波段进行辐射通量定标时，使用了入射狭缝前面的滤光片轮，将 5 号片置于工作位，其透过范围是 580-2700nm。下面是实验测量装置流程图。

要注意的是图3中在 800-1000nm 范围的辐射通量值并不能真正代表实际的出射值，因为在对该范围测量时增加了一块消多级光谱的滤光片，这里测得的结果只能表示实际出射通量与滤光片的透过率二者乘积的结果，和实际值有一些误差。

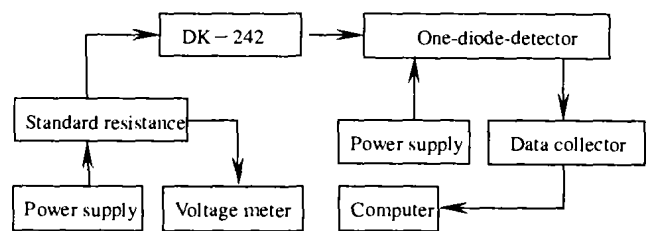


图4 标定系统辐射通量的实验装置

Fig.4 Experimental setup for calibrating radiation flux of the system

2 误差源分析

最终得到的系统分谱辐射通量是经过标准传递和波谱扫描同步测试合成的结果，该结果中包括的误差由以下因素引起。

2.1 从 Trap 到单片探测器的响应度传递

文献[1]中已经给出了在标准传递过程中引入的不确定度，它是在 632.8nm 波谱位置的结果，它的合成不确定度为 3.14%。

2.2 线性拟合响应率与实际响应率的差异

目前的光辐射基准建立和传递只进行到 944nm，而且总共只进行了 9 个波谱位置。因此，在进行系统辐射通量定标时，我们实际使用的是通过线性拟合出来的响应率。该拟合结果必然会和真实值有差异，在

此我们仍然用 632.8nm 处的偏差 7‰ 作为该项不确定度。

2.3 给光源供电的电源波动

前面提到要求给系统光源供电使用的大功率恒流源，通过监视电路加以监控，电源引起的光源功率波动小于 1‰。

2.4 单色仪系统光机部分稳定性和重复性

单色仪波谱选择是通过步进电机驱动蜗轮蜗杆使光栅台上的光栅转动，它使光栅方程中所需的正弦运动变为直线运动得以实现的。步进电机和蜗轮蜗杆之间的配合必然存在间隙，它会直接导致出射波谱位置的不准确，影响系统输出的准确性。这两项误差源对系统出射光的影响可以从单色仪出厂的标称值中获得具体指标：单色仪标称杂散光 $<10^{-10}$ ，因此该项可忽略；另外单色仪标称的波谱精密度和正确度最大偏差为 0.07nm，由此而引起的响应率变化约为 3‰（根据探测器线性拟合方程）。表 2 是定标的综合不确定度合成，总不确定度大约为 8.3‰。

表 2 宽光谱辐射定标系统辐射通量不确定度合成 ($\times 10^{-3}$)

Table 2 Synthetic standard uncertainty of broad band radiation flux calibration system ($\times 10^{-3}$)

Error source	Uncertainty of transfer standard	Linear fit of detector	Stability of source	Reproducibility of monochromator	Combined uncertainty
Uncertainty	3.14	7.0	1.0	3.0	8.3

针对以上误差源，提出相应的误差补偿方法是有效的。采用定期复检的方法可以保证系统数据的精确性。另外通过实验室环境条件，如保持实验室洁净，对温度、湿度控制，保证系统硬件参数尽量变化小，都可以达到降低测试不确定度的目的。

3 结 论

基于双单色仪的宽光谱辐射定标系统出射光的特点是光强弱，发散角大。通常陷阱探测器无法高精度定标系统的辐射通量。实验中提出了采用单片探测器并贴近孔径光阑，以接收更多的辐射通量，在后续电路上选用偏置电流极低的运算放大器来保证测量的精度。实验证明单片探测器不仅测量精度高而且光路调整简单方便，完全可以替代陷阱探测器对双单色仪系统进行高精度的辐射通量定标，系统合成不确定度为 8.3‰，达到了测量所要求的精度。采用单片式探测器精确测量类似的弱信号是一种比较理想可行的方法。

参考文献:

- [1] 张俊平, 郑小兵, 吴浩宇. 用三片式陷阱探测器标定单片式标准探测器[A]. 第十四届全国遥感技术学术交流会论文集[C]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 中国海洋学会海洋遥感专业委员会, 2003.
ZHANG Jun-ping, ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu. Transfer standards from trap detector to standard detector[A]. **Collection of thesis of the 14th national remote sensing technology seminar**[C]. Qingdao: First institute society oceanography of SOA, Chinese society of oceanography, 2003.
- [2] 李慎安. 测量不确定度评价与表示[R]. 北京: 国家技术监督局, 1999. 1059.
LI Shen-an. Appraise and express of uncertainty of measurement[R]. Beijing: The state bureau of technical supervision, 1999. 1059.
- [3] BARRY N TAYLOR, CHRIS E KUYATT. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results[R]. National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note, 1994, 1297.
- [4] T M NIEMCZYK, G W GOBELI. Characteristics of a direct grating drive[J]. **Applied Spectroscopy**, 1988, **42**(5): 792-795.
- [5] LOUIS-PHILIPPE BOIVIN. Study of bandwidth effects in monochromator-based spectral responsivity measurements[J]. **Appl. Opt.**, 2002, **41**(10): 1929-1935.