

引用格式: TANG Chao, ZHAO Weiqiang, XU Nan, et al. Matrix Correction and Robustness Analysis of Bandwidth Effects in Spectral Responsivity Measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0804001

唐朝,赵伟强,徐楠,等. 光度探测器光谱响应度测量中带宽效应的矩阵校正与鲁棒性研究[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0804001

# 光度探测器光谱响应度测量中带宽效应的矩阵校正与鲁棒性研究

唐朝,赵伟强,徐楠,刘志伟,刘想靓,闫劲云,苏颖,刘慧,甘海勇

(中国计量科学研究院 光学与激光计量研究所, 北京 100013)

**摘 要:**针对基于单色仪的光谱响应度测量中存在的带宽效应,提出一种基于矩阵模型的校正方法,并考察其在非理想测量条件下的鲁棒性。该方法将测量过程建模为真实光谱与仪器带通函数的卷积,通过构建多波长扫描的线性方程组并采用最小二乘法直接求解探测器的光谱响应度。以  $V(\lambda)$  光谱光视效率函数为光度探测器响应度真值的仿真表明,理想条件下矩阵校正法在响应度陡变波段的校正效果显著优于传统比值法,能够显著减小系统偏差。进一步引入带宽设定偏差、波长标定偏移及随机测量噪声三类典型扰动后发现,当实际带宽与设定带宽因标定存在偏差时,矩阵法在全波段的平均绝对偏差远小于比值法;在波长偏移情况下,矩阵法解算的响应度曲线畸变程度明显更低;在典型噪声环境中,借助最小二乘算法,矩阵法仍能保持稳定的校正效果。此外,针对高斯形、矩形、梯形等不同形貌的仪器带通函数,矩阵法的反演偏差均明显小于比值法,且波动平缓,表现出良好的带通形状通用性。研究表明,本文方法对带宽失配、波长漂移、随机噪声以及带通形状变化均具有良好的抑制能力,可为高精度光度探测器光谱响应度校准提供有效的算法基础。

**关键词:**单色仪;带宽校正;光谱响应度;扰动抑制;模拟仿真

**中图分类号:** TB96

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20265508.0804001

## 0 引言

光度探测器的光谱响应度测量是光度学中的一个重要课题,尤其是在基于探测器的技术路径中。光度探测器的输出电流代表的是光谱的电磁辐射能量与其光谱响应度  $S(\lambda)$  在紫外、可见光与红外波段进行加权求和的结果。在实际的光度探测器应用中,光谱响应度在紫外与红外区通常接近于零,在可见光波段近似于  $V(\lambda)$  函数。 $V(\lambda)$  函数由国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)于 1931 年标准化,该光度学标准模型被称为 CIE 标准光度观测者。对于实际的光度探测器,其光谱响应度  $S(\lambda)$  通常并非理想状态,会实际偏离  $V(\lambda)$  函数<sup>[1]</sup>。

在光谱响应度测量领域中,CIE 技术报告 CIE 202:2011<sup>[2]</sup>推荐了两种主要方法,其中一种采用单色仪。然而基于单色仪测量光谱响应度的方法存在一些问题,包括出射通量低以及带宽效应等问题。在使用标准探测器对光度探测器进行标定时,由于光度探测器在蓝光与红光波段响应度较低,需要将单色仪狭缝宽度进行相应调整以维持尽可能大的输出信号强度,因此必须充分考虑到带宽效应的影响。STEARNS E I, STEARNS R E<sup>[3]</sup>提出了一种基于相邻测量数据加权叠加的经典算法,简称 S-S 法,通过三点差分公式对测量光谱进行校正,算法较为简单,计算速度快,但是此方法要求带通函数形状为三角形,测量步长与带宽匹配,严格的条件限制使其难以推广至更多的使用场景。OHNO Y<sup>[4]</sup>提出了一种对带通函数的先验知识要求

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF0612503)

第一作者:唐朝,15189615205@163.com

通讯作者:赵伟强,zhaowq@nim.ac.cn

收稿日期:2026-04-20;录用日期:2026-06-05

<http://www.photon.ac.cn>

较高的数值校正方法,实现了对任意带通函数都有效的校正,标志着带宽校正方法从经验性差分公式走向基于仪器模型的系统化求解。WOOLLIAMS E R<sup>[5]</sup>提出了一种基于微分算子的校正方法,利用局部多项式拟合和有限差分逼近真实光谱,能处理任意测量步长和一般形状的带通函数,但此方法对测量噪声较为敏感。

本文提出一种基于矩阵的带宽效应校正方法。该方法将单色仪出射光谱建模为入射光谱与仪器带通函数的卷积形式,通过构建多组标称波长扫描下的线性方程组,采用最小二乘法(Least-Squares QR factorization, LSQR)直接求解得到探测器的光谱响应度。相比于经典S-S法<sup>[3]</sup>,该方法不限制带通函数为三角形,也无需测量步长与带宽严格匹配,具备更强的通用性。Ohno方法<sup>[4]</sup>基于光谱局部平滑假设,采用二次多项式对真实光谱进行近似,仅依靠邻域三点实现逐点拟合,在视见函数 $V(\lambda)$ 蓝端上升沿、红端下降沿等响应度快速变化区域,会引入显著的局部近似误差,导致校正精度降低。Woolliams方法<sup>[5]</sup>是对Ohno带宽校正思想的理论深化与推广,二者同属局部逐点加权校正框架,均依赖局部平滑假设,在响应度变化剧烈的波段同样存在偏差。本文所提矩阵校正法采用全波段全局线性建模,直接由标准探测器与被测探测器的读数关联关系反演光谱响应度,无需局部近似,能够更准确地刻画响应度的快速变化特征,在陡峭波段仍保持较高反演精度,有效避免逐点拟合带来的系统性偏差,更适用于光度探测器的高精度响应度定标。

为全面评估该方法在实际测量环境中的适用性,本文重点研究其在三种典型非理想条件下的表现,即带宽设定误差、单色仪波长标定偏移以及随机测量噪声。此外,考虑到实际单色仪的带通函数可能呈现高斯形、矩形、梯形等多种形貌,本文还考察了该方法对不同带通函数形状的通用性。通过仿真模拟,定量分析校正后光谱响应度在不同扰动水平及不同带通形貌下的偏差变化,验证该方法对上述扰动的抑制能力及对不同带通形状的适应性,以期该方法在高精度光度探测器光谱响应度校准中的实际应用提供鲁棒性基础。

## 1 带宽效应与矩阵校正方法

单色仪输出光具有一定的光谱带宽,而非理想的单色光,由此导致的带宽效应是光度探测器光谱响应度测量中不可忽视的系统误差。为有效抑制这一误差,本文采用基于矩阵模型的校正方法。本章将围绕带宽效应的成因及其校正原理展开论述。

### 1.1 带宽效应的来源

在应用单色仪进行光谱响应度测量中,带宽效应是影响测量精度的关键因素之一。单色仪输出的光是以设定波长 $\lambda_0$ 为中心、具有一定窄带宽度的光。理想情况下,带通函数应该趋近于狄拉克函数,测量值可以真实反映光谱特性;然而在实际测量中,带通函数具有一定的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM),导致其测量结果为真实光谱在带通函数加权下的积分平均值。

单色仪设定在波长 $\lambda_0$ 处,单色仪的出射光 $M(\lambda_0)$ 并非真实光谱 $S(\lambda)$ 在 $\lambda_0$ 处的取值,而是带通函数 $B(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda)$ 与真实光谱 $S(\lambda)$ 的卷积结果,可以表示为

$$M(\lambda_0) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} S(\lambda) * B(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中,\*表示卷积运算。该积分表明,测量结果为真实光谱在仪器函数带宽内的加权平均。当测量光谱在带宽内发生剧烈变化时,加权平均值将偏离中心波长 $\lambda_0$ 处的真实值,从而引起系统误差。在实际的光度探测器应用中带宽效应的影响尤为复杂,测量光度探测器的光谱响应度时,为了提升信号信噪比,往往需要扩大单色仪狭缝宽度来增加光通量,这就会导致仪器带通函数的展宽,带来显著的带宽效应。其次,在响应度急剧变化的波段,如蓝光上升沿与红光下降沿,即使较小的仪器带宽都可能因响应度随波长的剧烈变化而产生显著的测量偏差。因此,有必要对带宽效应进行精确校正,以获取探测器真实的光谱响应度曲线。

### 1.2 矩阵校正方法的原理

光度探测器的输出由入射光谱与探测器响应度的积分决定,其输出电流为

$$I = \sum_{j=1}^m P_j \cdot S_j \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

式中, $P$ 为入射光辐射强度, $S$ 为探测器响应度。

当单色仪的入射狭缝与出射狭缝相同时,单色仪的带宽函数形状为三角形。使用步进电机旋转单色仪的光栅,使得出射光的辐射峰值以 1nm 步长从 380nm 变化到 780nm,对于第  $i$  次测量,记录其出射光的光谱以及探测器光电读数,其电流表达式为

$$I_i = \sum_{j=1}^m P_{i,j} \cdot S_j \cdot \Delta\lambda \quad (3)$$

对于可见光波段的测量,可以将其写成矩阵形式有

$$\begin{bmatrix} k_1 \cdot p_{1,1} & \cdots & k_1 \cdot p_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_n \cdot p_{n,1} & \cdots & k_n \cdot p_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

$$PS = I \quad (4)$$

式中,  $P$  为光谱矩阵,  $S$  为响应度向量,  $I$  为光电流向量,  $n$  为单色仪以 1nm 步长从 380nm 至 780nm 扫描的总测量次数 ( $n=401$ ),  $m$  为探测器每次测量中光谱响应度的离散波长采样点数,与扫描波长范围及步长一致 ( $m=401$ ),保证波长采样、扫描步数与矩阵维度严格匹配,构造  $401 \times 401$  正方卷积矩阵,满足线性卷积矩阵构造与最小二乘反演的完备性要求。 $p$  为第  $i$  次测量时,出射光波长  $j$  nm 处的光谱辐射强度,系数  $k$  由标准探测器 (Standard Detector, STD) 标定,

$$k_i = \frac{I_{i, \text{STD}}}{\sum_{j=1}^m P_{i,j} \cdot S_{j, \text{STD}} \cdot \Delta\lambda} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (5)$$

对于被测探测器 (Detector Under Test, DUT), 根据式 (4), 其响应度  $S$  可以由下式解出

$$S_{\text{DUT}} = P^{-1} I_{\text{DUT}} \quad (6)$$

在存在测量噪声的情况下,在由式 (4) 建立的矩阵方程中光谱矩阵  $P$  是病态的,直接求解逆矩阵会放大测量噪声,导致解失去物理意义,本文采用 LSQR 法<sup>[6]</sup>求解该矩阵方程。为确保收敛过程稳定且具有物理意义,调控 LSQR 算法性能的关键参数是停止容差  $\tau$ ,它决定了迭代终止条件及重构解的平滑度。设测量电信号的相对噪声水平为  $\sigma$ ,则 LSQR 最优容差  $\tau$  应与  $\sigma$  大致相当。若容差  $\tau$  远大于相对噪声水平  $\sigma$ ,迭代过早停止,求出的响应度欠拟合;若容差  $\tau$  远小于相对噪声水平  $\sigma$ ,迭代过度,拟合的主要是噪声分量,解会出现非物理意义上的振荡。因此应当选择与噪声水平相当的容差,使得迭代在容差范数降至噪声水平时停止,避免噪声主导迭代引起的解的振荡。

## 2 仿真方法与结果

本文采用仿真模拟的方式评估矩阵校正方法在不同扰动条件下的鲁棒性。仿真中,以 CIE A 标准光源作为单色仪的入射光谱,以 CIE 标准光度观测者视见函数  $V(\lambda)$  作为被测探测器的光谱响应度真值,选用陷阱探测器作为标准探测器,其光谱响应度已知。单色仪的入射狭缝与出射狭缝宽度设定相等,此时仪器带通函数为等腰三角形。单色仪出射光的相对光谱分布由入射光源的光谱与对应波长处的三角形带通函数卷积得到。

基于上述设定,分别模拟标准探测器和被测探测器在每次波长扫描下的光电读数。在反演阶段,采用

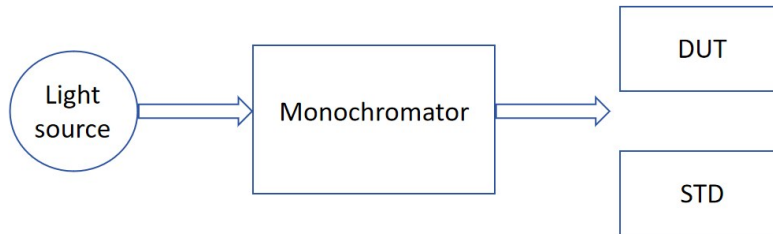


图1 基于单色仪的光度探测器定标系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of a monochromator-based photometric detector calibration system

两种方法计算被测探测器的光谱响应度：一是直接比值法，即直接利用两探测器读数比值与标准探测器响应度计算；二是矩阵校正法，构建线性方程组并采用最小二乘法求解。

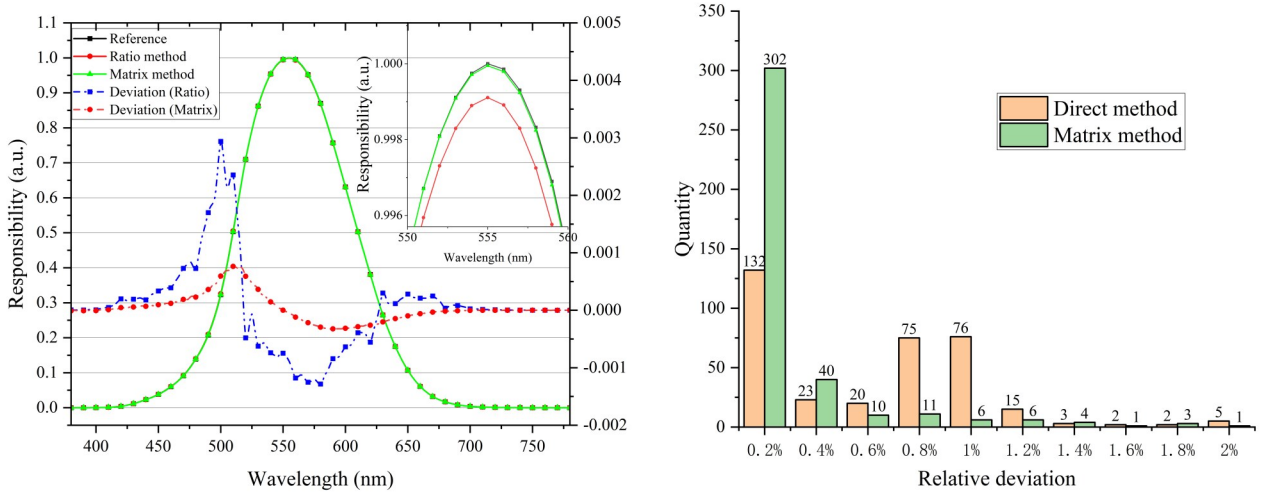


图2 模拟测量响应度与偏差对比。(a)响应度及绝对偏差；(b)相对偏差分布直方图

Fig. 2 Comparison of simulated measured responsivity and deviations. (a) Responsivity and absolute deviation; (b) Histogram of relative deviation distribution

在10nm带宽的仿真模拟中,不添加任何系统扰动的情况下,解得的两组响应度以及其与原响应度的偏差如图2所示。值得说明的是,仿真中选取的被测探测器响应度真值为视见函数 $V(\lambda)$ ,该函数已在峰值555nm处归一化为1,是单位为1的值。因此本文解算得到的响应度均为与 $V(\lambda)$ 一致的单位为1的结果。比值法解得响应度在蓝光上升沿和红光下降沿与原响应度有较大偏差,而矩阵法解得响应度与原响应度的偏差大幅减小,其形状与原响应度更加贴合。在555nm峰值响应处,比值法与原响应度偏差-0.00089,矩阵法与原响应度偏差仅-0.00006。从两种方法得到的响应度与真值的相对偏差分布来看,用矩阵法解得响应度在全波段中有302个波长点的偏差小于0.2%,而直接比值法仅有132个。因此,在理想仿真模拟中,矩阵法可以显著提升反演精度。

以下各节分别针对带宽标定偏差、波长标定偏移、随机测量噪声以及不同形貌的仪器带通函数等不同类型的系统扰动,设计仿真实验以考察矩阵校正法的鲁棒性。

## 2.1 带宽设定偏差

在使用单色仪时,单色仪的实际带宽往往与设定带宽存在偏差,这种偏差可能来源于狭缝宽度的机械误差、仪器校准的不准确。为评估矩阵校正法对带宽设定误差的容忍能力,模拟卷积中人为改变实际带宽值,而校正计算时仍采用理想带宽构建矩阵。

设定理想仪器带宽为10nm,将CIE A光源光谱分别与带宽为9nm、10nm、11nm的三角形仪器函数相乘,得到模拟的出射光光谱,用模拟的出射光辐射值分别与标准探测器和被测探测器响应度相乘,得到两组光电读数。

图3给出了以555nm为中心波长的三角形带通函数在三种带宽下的归一化结果。三角形函数的半高全宽为带宽的一半,中心处权重最高,向两侧线性递减至半高全宽处为零。为了保证每次扫描的出射总功率相同,对每个函数进行了归一化,使所有权重之和为1。图中黑色曲线对应带宽10nm,红色和蓝色曲线分别对应带宽减小至9nm和增大至11nm的情况。可见,带宽越窄,峰值越高,带宽越宽,峰值越低且曲线越平坦,不同宽度的带通函数均保持了理想的三角形线性特征。

使用理想的带宽为10nm的三角形仪器函数与CIE A光源进行卷积,得到理想中的出射光辐射强度,再将其按照总和为1归一化处理,代表了每次测量中,每个波长点的强度分布。根据1.2节描述的流程,基于标准探测器的读数与已知响应度,首先解算出光源强度系数;进而构建出射光辐射强度矩阵 $P$ 。在反演计算阶段,分别采用直接比值法与本文的矩阵校正法求解被测探测器的光谱响应度。

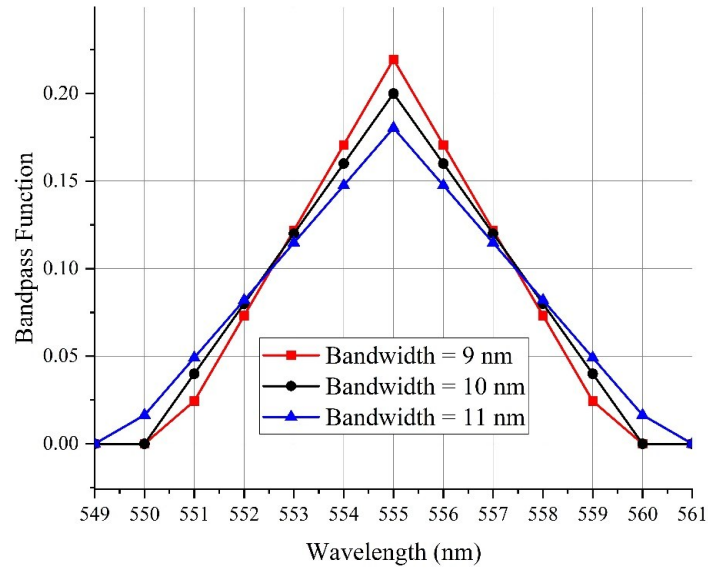


图3 带宽分别为9nm、10nm、11nm的归一化带宽函数图像

Fig. 3 Normalized bandwidth functions for bandwidths of 9 nm, 10 nm, and 11 nm

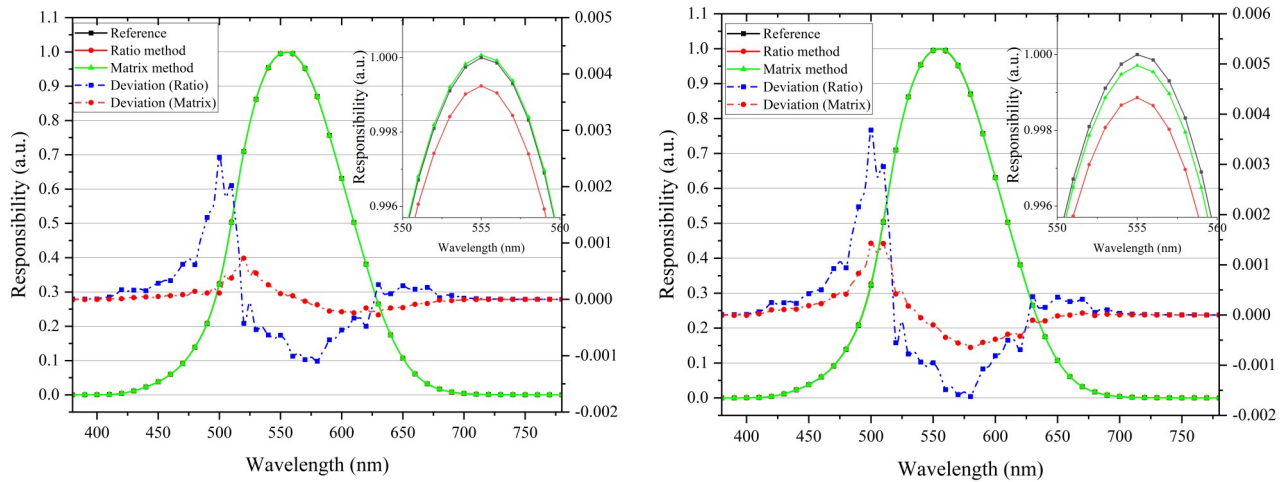


图4 不同实际带宽下响应度校正结果对比。(a)带宽9nm时响应度及绝对偏差;(b)带宽11nm时响应度及绝对偏差

Fig. 4 Comparison of responsivity correction results under different actual bandwidths. (a) Responsivity and absolute deviation at 9 nm bandwidth; (b) Responsivity and absolute deviation at 11 nm bandwidth

如图4所示,在实际带宽9nm与11nm情况下,矩阵校正法都得到了与直接比值法相比更优的响应度结果,其与真实响应度的偏差相较于比值法更小。在全波段比值法与矩阵法解出响应度与原响应度平均偏差分别为0.0004、0.0001;在555nm处,两种方法解出响应度偏差分别为-0.00076、0.00007。可见在真实带宽与理想带宽误差1nm的情况下,矩阵法仍能取得显著的修正效果。

如图5所示,实际带宽为8nm和12nm时,矩阵校正法可对响应度结果进行有效修正,与真实响应度的偏差小于直接比值法。全波段内比值法与矩阵法的平均偏差分别为0.0003、0.0001;555nm处两者偏差分别为-0.0005、0.0003。带宽偏差达到2nm时,矩阵法仍可发挥校正作用,但随着带宽偏差增大,其校正优势相比1nm偏差时有所下降,整体校正效果有所减弱。

上述结果表明,实际带宽与理想带宽相差 $\pm 2$ nm时,矩阵校正法仍具备带宽误差抑制作用,可实现有效校正;但偏差控制在 $\pm 1$ nm以内时,校正效果更稳定、精度更高。因此实际使用中,建议将单色仪带宽设定误差控制在 $\pm 1$ nm以内,以充分发挥矩阵法的校正性能。

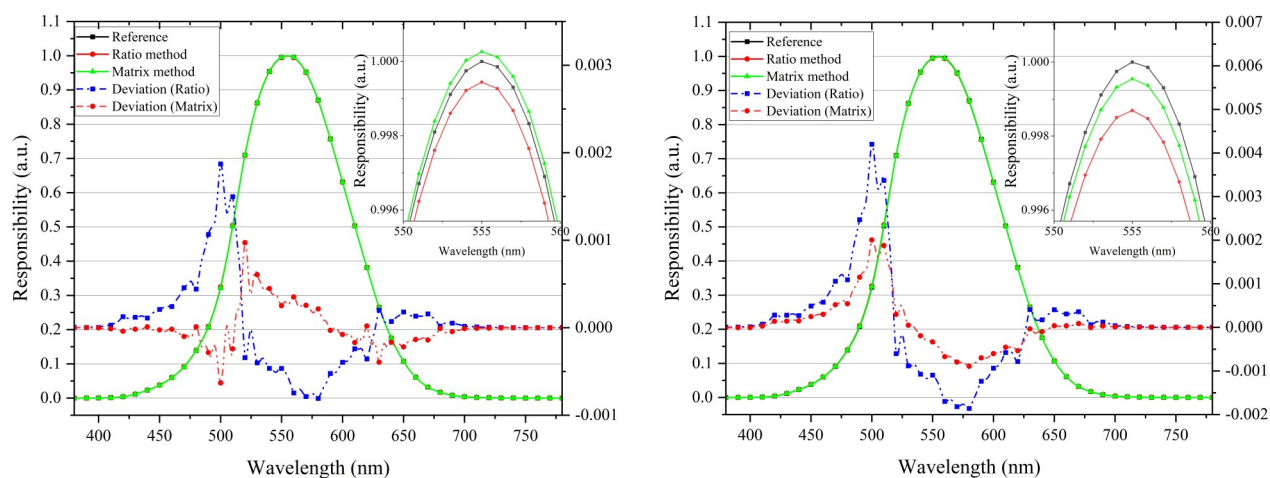


图5 不同实际带宽下响应度校正结果对比。(a)带宽 8 nm 时响应度及绝对偏差;(b)带宽 12 nm 时响应度及绝对偏差  
Fig. 5 Comparison of responsivity correction results under different actual bandwidths. (a) Responsivity and absolute deviation at 8 nm bandwidth; (b) Responsivity and absolute deviation at 12 nm bandwidth

## 2.2 波长标定偏差

单色仪的波长标定可能会存在偏差,在实际测量中,导致实际出射光峰值波长与设定值之间发生偏移。为了评估矩阵校正方法对于波长偏移的容忍能力,设计仿真实验。

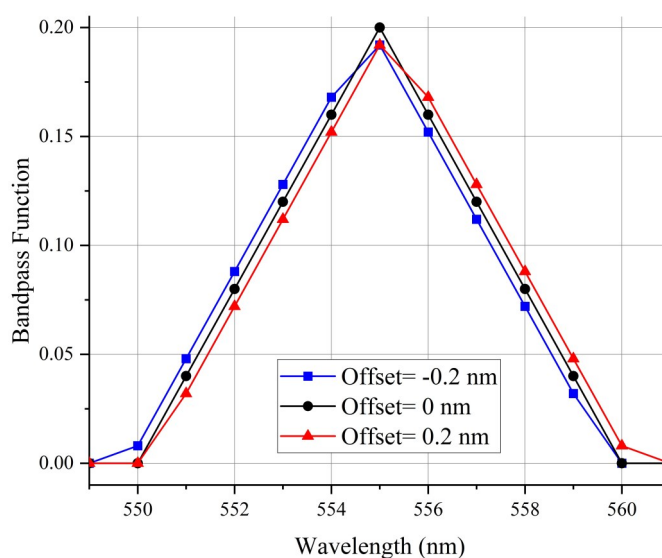


图6 在 555nm 波长下 10 nm 带宽函数及左右 0.2 nm 偏移  
Fig. 6 10 nm bandwidth function at 555 nm with left and right shifts of 0.2 nm

设定理想仪器带宽为 10nm,将带宽函数向左或者向右偏移 0.1nm、0.2nm,模拟单色仪波长定标中的存在的偏差。将偏移后的仪器函数与 CIE A 光源辐射值卷积得到出射单色仪的辐射值,进而得到标准探测器与被测探测器的模拟光电读数。在反演阶段,采用比值法与矩阵法计算被测探测器的响应度。

如图 7 所示,当带宽函数分别向左、向右偏移 0.1 nm 后,两种方法反演得到的响应度均受到不同程度的影响。向左或向右偏移 0.1 nm 时,两种方法的响应度曲线均出现轻微畸变,但在 380~780nm 全波段内,矩阵法的绝对偏差普遍小于比值法,矩阵法的响应度形状更接近参考曲线,表现出更强的鲁棒性。

如图 8 所示,当带宽函数分别向左、向右偏移 0.2 nm 后,两种方法反演得到的响应度偏差方向在全波段几乎一致,偏差幅度也相近。仿真结果表明,在该带宽偏移条件下,矩阵法并未表现出优于比值法的鲁棒性。

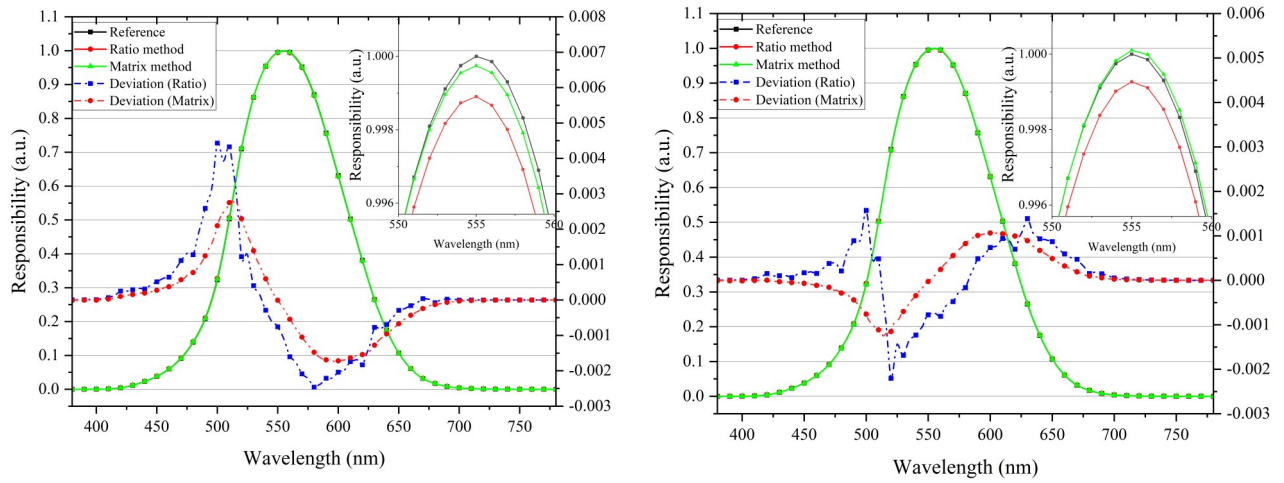


图7 波长偏移0.1 nm时响应度校正结果对比。(a)左偏0.1 nm响应度及绝对偏差;(b)右偏0.1 nm响应度及绝对偏差  
Fig. 7 Comparison of responsivity correction results at 0.1 nm wavelength shift. (a) Responsivity and absolute deviation at 0.1 nm left shift; (b) Responsivity and absolute deviation at 0.1 nm right shift

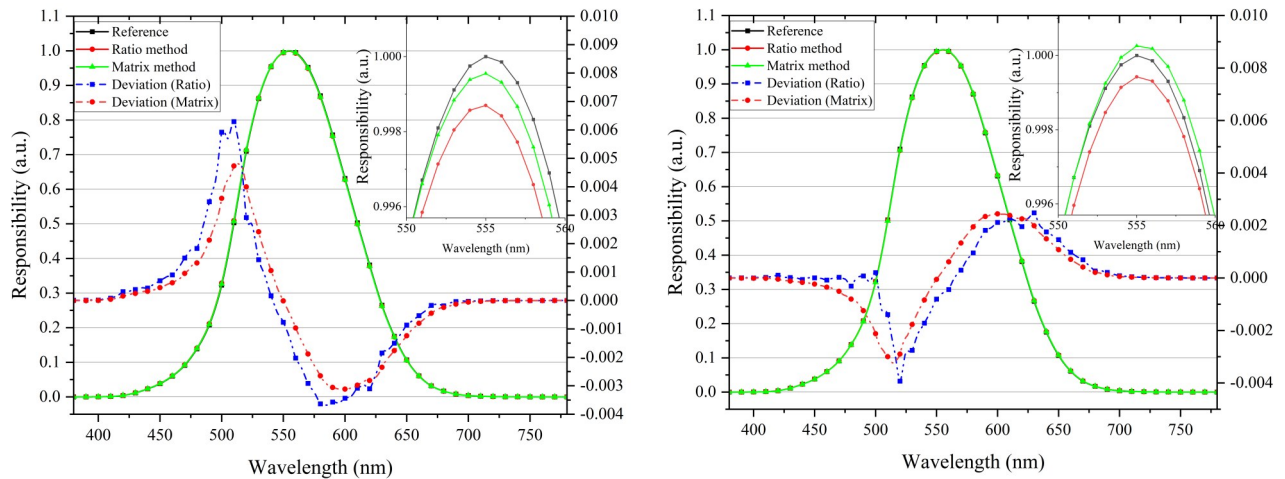


图8 波长偏移0.2 nm时响应度校正结果对比。(a)左偏0.2 nm响应度及绝对偏差;(b)右偏0.2 nm响应度及绝对偏差  
Fig. 8 Comparison of responsivity correction results at 0.2 nm wavelength shift. (a) Responsivity and absolute deviation at 0.2 nm left shift; (b) Responsivity and absolute deviation at 0.2 nm right shift

当带宽函数偏移0.1 nm时,矩阵法的校正效果优于比值法,响应度曲线更接近参考值,但偏移量增大到0.2 nm后,两种方法表现几乎一致,矩阵法不再具有明显优势。因此,建议将单色仪的波长标定偏差控制在 $\pm 0.1$  nm以内,以保证矩阵法优势的有效发挥。

### 2.3 测量噪声

在实际测量中,探测器的光电读数不可避免地受到多种噪声的干扰,例如探测器的暗电流、杂散光的干扰、读出电路的电子噪声以及光源的波动等等。这些噪声会影响信号的信噪比,从而影响响应度计算的准确性。为了评估噪声矩阵校正法对于噪声的容忍能力,可以设计如下仿真模拟:

设定理想带宽为10 nm,采用CIE A光源与三角形仪器函数卷积生成模拟的出射光光谱,进而得到两组探测器光电读数。在此基础上,分别对标准探测器读数与被测探测器读数添加两类高斯噪声:一类为绝对噪声,其标准差为固定值,不随信号强度变化;一类为相对噪声,其标准差为相对值,以信号强度的固定比例来设定。

在采用最小二乘法进行求解时,容差参数的设置应与噪声水平相匹配<sup>[7]</sup>;若容差过小,易引起求解向量的剧烈振荡,若容差过大,则会损失过多光谱细节。由于光度探测器响应度呈CIE  $V(\lambda)$ 函数形状,不同波段

响应度与对应光电读数相差数个数量级,为保证全波段噪声模拟合理、数值稳定,本研究采用统一噪声添加规则:针对标准探测器(STD)与被测探测器(DUT)两组模拟光电读数,分别取各自无噪声信号最大值,将统一绝对噪声水平与最大值相乘得到对应绝对噪声标准差,同时采用统一相对噪声水平对两组信号同步添加噪声。

结合本实验室实际光度探测器测量工况,在555 nm波长处10次测量相对实验标准偏差为0.0013%,光度探测器测量噪声可稳定控制在0.00001量级,该噪声为已扣除暗电流基底后的随机测量噪声。因此仿真中统一设定:绝对噪声水平取信号最大值的0.000001,相对噪声水平设为0.00001;其中绝对噪声较相对噪声低一个数量级,目的是避免在蓝端、红端等弱信号波段因绝对噪声占比过高导致信噪比急剧下降,确保全波段反演稳定合理。同时将最小二乘求解容差设为0.00002,与系统总体噪声水平相当,兼顾反演稳定性与光谱细节保真度。

为进一步探究不同噪声水平对矩阵校正法性能影响的适用边界,在更宽泛的噪声条件下开展对比仿真,采用如下参数设置:绝对噪声水平为信号最大值的0.00001,相对噪声水平为0.0001,并将最小二乘求解容差设为0.0002,与该总体噪声水平相当,以保证反演结果稳定可靠。

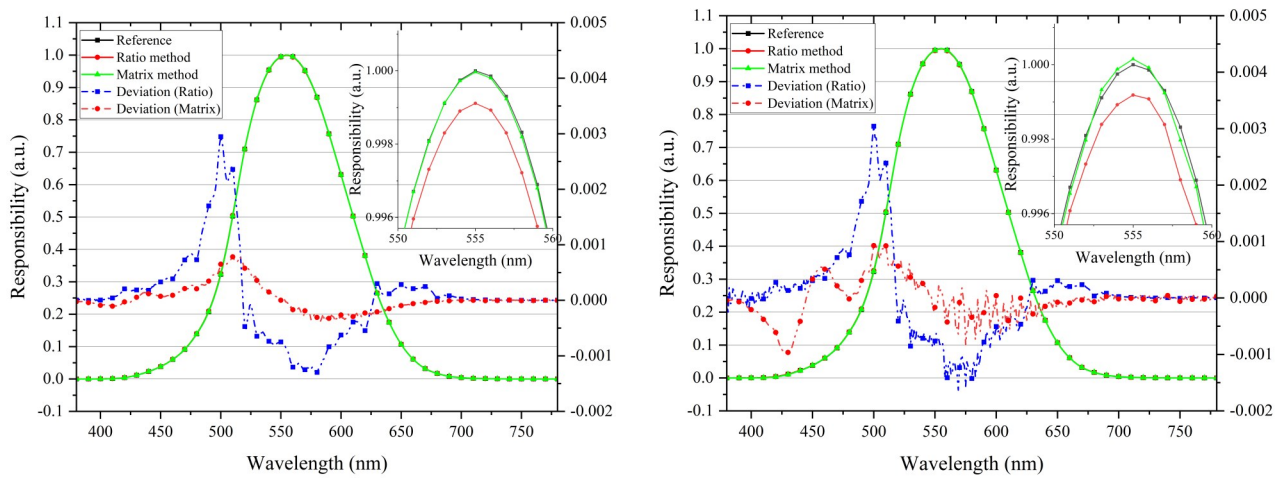


图9 不同容差下含噪声响应度校正结果对比。(a)容差0.00002;(b)容差0.0002

Fig. 9 Comparison of responsivity correction results with noise under different tolerances. (a) Tolerance 0.00002; (b) Tolerance 0.0002

图9(a)中结果表明,矩阵法反演得到的响应度曲线整体与参考响应度高度贴合,校正效果显著优于传统比值法,其偏差曲线仅存在轻微波动,未对整体还原效果造成明显影响。在555 nm处,比值法与参考值的偏差为-0.0009,而矩阵法仅为0.00004,偏差幅度降低了一个数量级。这表明,在与实验室实测工况一致的噪声水平下,矩阵法对噪声干扰具有良好的抑制能力,可提供稳定且高精度的响应度反演结果。

图9(b)中结果表明,当噪声水平提升一个数量级至0.0001时,矩阵法反演的响应度曲线仍能较好地贴合参考响应度,整体校正效果依然优于比值法,偏差曲线虽出现更明显的波动,但并未对整体还原效果造成决定性影响。在555 nm处,比值法与参考值的偏差为-0.0008,矩阵法偏差为0.0001,偏差幅度仍比比值法低约一个数量级。与图9(a)相比,矩阵法在更高噪声水平下的校正精度略有下降,但仍保持了明显优于比值法的性能,验证了其在更宽泛噪声条件下的鲁棒性。

值得注意的是,图9(b)中,矩阵法在400-450 nm蓝端的偏差幅度高于比值法,这一现象可归因于两方面因素:一是在蓝端光度探测器响应度低,光电信号强度较弱,在统一绝对噪声水平设置下信噪比显著降低,噪声对矩阵法求解过程的影响被放大;二是此波段靠近响应度曲线的快速上升沿,信号变化率高,本身更易受带宽效应的影响,矩阵法在处理此类强变化区域时,受噪声与带宽效应的耦合影响更为明显,因此偏差表现相对更大。

在实际应用中,测量系统的噪声水平会直接影响矩阵校正法的求解稳定性与精度,因此需结合系统噪

声特性合理设置最小二乘法的容差参数,在求解稳定性与光谱细节保真度之间取得平衡。结合本实验室光度探测器测量噪声可稳定控制在0.00001量级的工况,在仿真与实际测试中可参考该噪声水平设定参数;同时,通过鲁棒性仿真探究表明,当噪声水平提升至0.0001量级时,矩阵法仍能保持优于比值法的校正效果,相对噪声水平0.0001可作为本矩阵校正方法仍具备有效校正优势的噪声适用边界。在仿真与实际测试中可参考该噪声水平设定参数,并通过优化测量流程、采用信号平均等噪声抑制手段,进一步降低噪声对反演结果的影响。建议在正式实验前先对测量系统进行噪声水平评估,并通过数值仿真测试不同容差下的反演效果,确定与实际工况匹配的最优参数,从而充分发挥矩阵校正方法在高精度光谱响应度定标中的优势,保障反演结果的可靠性与准确性。

## 2.4 带通形貌适应性分析

本文所提出的矩阵校正法理论推导基于单色仪带宽卷积的线性积分关系,将仪器带通函数离散化并构造卷积矩阵,再通过最小二乘求解实现带宽效应的逆校正。整个模型框架仅要求仪器带通函数满足能量归一化与线性叠加基本物理约束:归一化保证带通权重积分守恒、符合能量分布规律;线性叠加使带宽卷积过程可通过线性矩阵方程离散求解。建模并未对带通轮廓的几何形貌施加额外限定,因此在原理上无需将带通函数固定为三角形,可适配任意形貌的仪器带通分布。

前期仿真选取三角形带通函数作为基准工况,得益于其线性衰减、无明显旁瓣与拖尾的特性,能够最大程度保留原始光谱细节,适合作为理想模型开展算法基础性能分析。实际单色仪受狭缝结构、光学系统像差等因素影响,仪器带通常呈现高斯形、矩形、梯形等多种形态。为进一步检验算法的普适性能,本节在保持半高全宽一致的前提下,补充引入上述典型带通函数开展对比仿真。

将不同形貌带通函数分别与CIE A光源光谱卷积构建出射光分布,仿真得到标准探测器与被测探测器的光电响应信号,同步采用矩阵校正法与比值法进行光谱响应度反演。通过对比不同带通函数下的全波段偏差、曲线畸变特征与反演稳定性,系统评估带通形状对两种算法计算精度的影响规律。

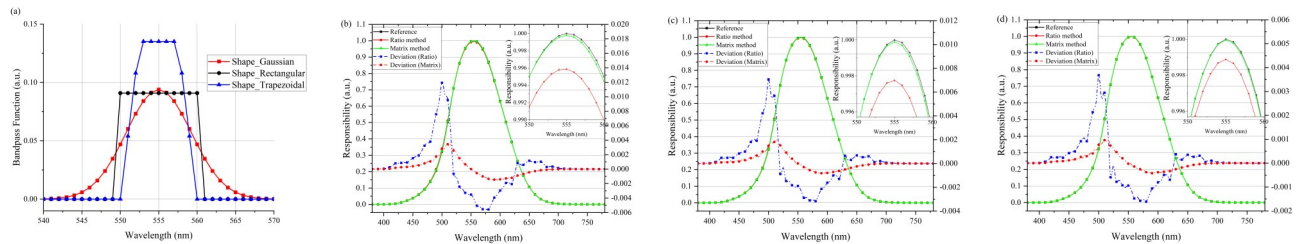


图10 三种典型带通函数及其校正结果对比。(a) 三种带通函数的归一化分布;(b) 高斯形带通函数下的校正结果;(c) 矩形带通函数下的校正结果;(d) 梯形带通函数下的校正结果

Fig. 10 Comparison of three typical bandpass functions and their correction results. (a) Normalized distributions of three bandpass functions; (b) Correction results under Gaussian-shaped bandpass function; (c) Correction results under rectangular bandpass function; (d) Correction results under trapezoidal bandpass function

在图10(a)中,通过对三种典型带通函数形貌特征的比较可知,高斯型带通呈钟形分布,能量随波长向两侧逐渐衰减,其对光谱信号的“平滑效应”最为显著;矩形带通边缘陡峭、顶部平坦,能量集中于带通中心区间,但边缘处的突变易诱发频谱混叠;梯形带通则兼具二者特征,顶部能量分布平坦且边缘过渡相对缓和,其平滑效应与混叠效应均处于较低水平。

如图10(b)–(d)所示,不同带通形貌的差异直接体现于直接比值法的反演偏差之中。在高斯带通条件下,偏差最大,这是由于该函数能量分布范围宽、拖尾效应明显,对目标光谱产生的畸变作用更强,使得比值法难以有效分辨带通内的能量分布差异;矩形带通条件下的偏差次之,其边缘陡峭特性所引入的频谱混叠效应,会在响应度曲线的峰值与谷值处造成明显的偏差放大;梯形带通条件下的偏差最小,该形貌既保障了中心能量的集中度,又规避了高斯带通的过度平滑与矩形带通的边缘突变,因而对原始光谱的畸变程度最低。

相比之下,矩阵校正法的反演偏差在不同带通形状下均保持在较低水平,偏差曲线幅值明显小于比值

法,且整体波动较为平缓。矩阵校正法通过构建完整的带通卷积矩阵,对不同形貌带通的能量分布规律进行了有效建模,从而显著减轻了由带通形状所引入的平滑效应与混叠效应。其校正性能受带通边缘陡峭程度或峰值形貌变化的影响相对较小。

上述结果说明,本文所提出的矩阵校正方法对不同类型仪器带通均具有良好的通用性,其校正效果不依赖于带通函数是否限定为特定三角形分布,可在多种典型单色仪带通条件下实现稳定、高精度的带宽效应校正。

### 3 结论

本文针对基于单色仪的光度探测器光谱响应度测量系统中的带宽效应,提出了一种基于矩阵的校正方法,并通过模拟仿真系统评估了其在理想条件及多种非理想条件下的鲁棒性。在10nm带宽的仿真前提下,理想无扰动条件下矩阵法解得的响应度曲线与真实响应度高度吻合,校正效果显著优于比值法。针对非理想实际测量条件,本文给出方法适用边界与工程实操建议:带宽设定偏差宜控制在 $\pm 1$  nm以内,波长标定偏移宜控制在 $\pm 0.1$  nm以内;随机噪声水平宜控制在0.0001量级以内,在此范围内矩阵法仍保持显著校正优势。针对随机测量噪声,应依据实测噪声水平匹配LSQR求解容差,容差过小易引发求解振荡,容差过大会损失光谱细节,实际测量中应先评估系统噪声再确定最优容差参数。

此外,针对高斯、矩形、梯形等不同形貌的仪器带通函数,矩阵法的反演偏差均明显小于比值法且波动平缓,表明该方法对带通形状变化具有良好的通用性,不受三角形带通函数限制。综上,本文提出的矩阵校正方法不仅能显著减小带宽效应引起的系统误差,而且对带宽标定偏差、波长偏移、测量噪声及带通形状变化均具有良好的鲁棒性,文中给出的适用边界与参数选择建议可为高精度光度探测器光谱响应度测量提供直接、实用的参考。

#### 参考文献

- [1] ISO/CIE. ISO/CIE 19476:2014 Characterization and performance of illuminance meters and luminance meters[S]. Vienna/Geneva: CIE, 2014.
- [2] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. CIE 202:2011 Spectral responsivity measurement of detectors, radiometers and photometers[S]. Vienna: CIE, 2011.
- [3] STEARNS E I, STEARNS R E. An example of a method for correcting radiance data for bandpass error[J]. Color Research and Application, 1988, 13(4): 257-259.
- [4] OHNO Y. A flexible bandpass correction method for spectrometers[C]. Proceedings of the AIC Colour 05 - 10th Congress of the International Colour Association, Granada, Spain, 2005: 697-700.
- [5] WOOLLIAMS E R, BARIBEAU R, BIALEK A, et al. Spectrometer bandwidth correction for generalized bandpass functions[J]. Metrologia, 2011, 48(3): 164.
- [6] PAIGE C C, SAUNDERS M A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1982, 8(1): 43-71.
- [7] BENBOW S J. Solving generalized least-squares problems with LSQR[J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1999, 21(2): 416-433.

## Matrix Correction and Robustness Analysis of Bandwidth Effects in Spectral Responsivity Measurement

TANG Chao, ZHAO Weiqiang, XU Nan, LIU Zhiwei, LIU Xiangliang, YAN Jinyun, SU Ying, LIU Hui, GAN Haiyong

(Division of Optics, National Institute of Metrology China, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Measuring the spectral responsivity of photometric detectors via a monochromator-based system is inevitably affected by the bandwidth effect, which induces prominent systematic errors in spectral regions with steep responsivity variations, such as the blue rising edge and red falling edge. The conventional ratio method calculates responsivity by dividing the photocurrent of the device under test by that of the standard

detector and multiplying the result by the standard detector's responsivity. This method neglects the convolution effect of the instrument bandpass function, thereby introducing large calculation deviations in sharply varying spectral regions. The classical Stearns-Stearns method relies on a triangular bandpass profile and strict matching between scanning step and bandwidth, leading to harsh application constraints. To address the above limitations, this paper proposes a matrix-based bandwidth effect correction method, and systematically evaluates its robustness under practical non-ideal measurement conditions. The proposed method characterizes the measurement process as a convolution between the true spectral responsivity and the instrument bandpass function. A linear equation set is established based on multi-wavelength scanning data, and the detector's spectral responsivity is directly solved by adopting the LSQR least-squares algorithm. In the simulation, CIE standard illuminant A is selected as the incident spectrum, the intrinsic responsivity of the device under test adopts the CIE standard photopic spectral luminous efficiency function  $V(\lambda)$ , and the standard detector employs a trap detector with known and flat responsivity across the visible band. The monochromator bandwidth is set to 10 nm with a triangular bandpass function. Under ideal disturbance-free conditions, the responsivity curve retrieved by the matrix method is in great agreement with the true  $V(\lambda)$ , and its correction performance is obviously superior to that of the ratio method. Three typical interference factors in practical measurement are investigated through numerical simulation. In terms of bandwidth setting deviation, when the actual bandwidth deviates from the nominal value by 1 nm, the matrix method presents a much smaller average absolute deviation over the full spectral range and maintains stable correction capability compared with the ratio method. When the deviation increases to 2 nm, the matrix method still achieves satisfactory correction, though its superiority is weakened. It is suggested to limit the bandwidth setting deviation within  $\pm 1$  nm. For wavelength calibration offset, a central wavelength shift of 0.1 nm for the bandpass function brings milder curve distortion and smaller absolute deviation using the matrix method than the ratio method. When the offset reaches 0.2 nm, the two methods perform similarly, and the matrix method no longer shows obvious advantages. Thus, the wavelength calibration deviation is recommended to be controlled within  $\pm 0.1$  nm. Regarding random measurement noise, the absolute noise amplitude is set to 0.000001 times the maximum signal and the relative noise level to 0.00001 in the simulation. Correspondingly, the LSQR convergence tolerance is set to 0.00002, matching the overall noise magnitude. Under such typical noisy conditions, the matrix method can still acquire stable and reliable inversion results, with better correction performance than the conventional ratio method, except for a slightly larger deviation in the low signal-to-noise blue spectral region. In practice, the actual bandpass function of a monochromator commonly presents Gaussian, rectangular and trapezoidal profiles. With the full width at half maximum kept constant, this paper compares the correction results of the three typical bandpass shapes. The results indicate that the Gaussian bandpass has the strongest spectral smoothing effect, the rectangular bandpass easily causes spectral aliasing, and the trapezoidal bandpass produces the slightest spectral distortion. The traditional ratio method shows distinct deviation differences under various bandpass shapes, with the maximum deviation appearing in the Gaussian case. In contrast, by constructing a complete bandpass convolution matrix and precisely modeling the energy distribution of different bandpass profiles, the matrix method maintains a low inversion deviation level for all shapes. Its deviation amplitude is far lower than that of the ratio method with gentle fluctuation, which verifies that the proposed method possesses excellent universality to bandpass shapes and is not limited to triangular profiles. In conclusion, the proposed matrix correction method outperforms the ratio method significantly under ideal 10 nm bandwidth simulation conditions. For engineering practice, it is feasible to restrict the bandwidth deviation within  $\pm 1$  nm and wavelength calibration offset within  $\pm 0.1$  nm, where the matrix method retains prominent correction superiority. The LSQR convergence tolerance should be matched to the actual system noise level: an overly small tolerance causes solution oscillation, while an overlarge tolerance results in the loss of spectral detail. In practical application, the system noise level should be evaluated first, and the optimal tolerance can be determined by simulation. Moreover, the matrix method exhibits good adaptability to diverse bandpass shapes. The application scope and parameter selection suggestions provided in this paper can offer practical guidance for high-precision spectral responsivity calibration of photometric detectors.

**Key words:** Monochromator; Bandwidth correction; Spectral responsivity; Disturbance suppression; Numerical simulation

**OCIS Codes:** 120.3940; 120.4800; 300.6190; 300.6550

**CSTR:** 32255.14.gzxb20265508.0804001