

## 基于数字显微镜的大气透射仪校准光源的光谱模拟方法

孙继亮<sup>1</sup>, 张国玉<sup>1,2,3\*</sup>, 张健<sup>1,2,3</sup>, 徐达<sup>1,2,3</sup>, 梁婧<sup>1</sup>, 运志坤<sup>1</sup>, 杨晓彤<sup>1</sup><sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup> 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;<sup>3</sup> 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对目前大气透射仪校准领域无法溯源到世界气象组织对能见度定义的难题, 以及如何实现满足国际民航组织(ICAO)观测要求的 2700 K 色温光谱模拟问题, 本文提出了一种基于数字显微镜的大气透射仪校准光源的光谱模拟方法。首先分析了光谱模拟单元的偏态性质, 选用 Bigaussian、Asym2Sig 和 ECS 三种函数分别作为正偏态、正态以及负偏态分布光谱模拟单元的拟合函数; 然后采用 Gaussian 函数以及 Bigaussian、ECS、Asym2Sig 三种函数组合进行光谱模拟对比实验, 两者的光谱模拟误差分别为 33.4% 和 25.2%, 这表明三种函数组合代替 Gaussian 函数进行光谱模拟具有可行性; 之后分析了影响光谱模拟误差的主要因素, 提出了一种基于最大模拟误差的光谱修正方法, 并在 410~460 nm 局部波段验证了光谱修正方法的正确性, 最终实现了 380~780 nm 波段范围内 2700 K 色温光谱模拟误差为 6.2%, 较修正前整体光谱调制能力提高了 4.06 倍。

**关键词** 光谱学; 大气透射仪; 大气能见度; 光谱模拟; 黑体色温; 校准方法

中图分类号 TH765.8+3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1111001

## 1 引言

大气能见度精准测量对于预报天气过程、监测气候变化具有重要应用价值, 是生态环境保护与大气污染治理的前提<sup>[1]</sup>。能见度的定义具有一定的主观性, 且受诸多物理量因素的影响, 同时, 能见度的人工观测结果具有不稳定性, 因此世界气象组织(WMO)规定利用气象光学视程(MOR)来表征仪器测得的能见度<sup>[2]</sup>。对于 2700 K 色温白炽灯发出的平行光束, 其光通量经大气削弱降低到初始值的 5% 时所通过的路径长度即为 MOR。

目前, WMO 和国际民航组织(ICAO)将大气透射仪(TVM)和前散仪作为能见度观测的推荐仪器。TVM 具有观测原理与 MOR 定义最为接近、测量一致性好、中低能见度情况下测量准确度高等特点, 已被广泛应用于机场跑道等大气水平能见度测量场合。受自身工作原理以及严苛环境的限制, TVM

的光源多为卤钨灯、氙灯以及单色或白光 LED<sup>[3-5]</sup>, 导致能见度观测结果无法溯源到 MOR 定义。为此, 国内外提出了多种 TVM 校准方法, 以期通过量值传递将 TVM 的观测结果溯源至 MOR 定义。自 1989 年 WMO 组织开展 MOR 观测对比试验以来<sup>[6]</sup>, 人工观测的外场对比方法始终是 TVM 校准的主要方法之一, 但是人工观测主观性太强, 难以作为 TVM 校准与修正的参考基准。2006 年, 荷兰皇家气象研究所提出了一种可将 TVM 的观测结果溯源至中性密度衰减片透过率的校准方法<sup>[7]</sup>。2015 年, 韩国标准与科学研究所提出了一种可溯源到国际单位制的 75 m 基线 TVM 的室内校准方法<sup>[8]</sup>。2020 年, 中国气象局建立了一种室内能见度环境模拟方舱, 该方舱可实现 1 m~10 km 能见度范围的人工模拟<sup>[9]</sup>。2021 年, Liang 等<sup>[10]</sup>研究了绝对色温和光谱模拟误差对 MOR 测量精度的影响规律, 得出了满足 ICAO 测量精度要求的 5 种典型基线下

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-10-09; 录用日期: 2021-11-02

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190302124GX)、国家自然科学基金(62075019)、长春理工大学科技创新基金(XJJLG-2018-02)

通信作者: \*zh\_guoyu@163.com

2700 K 色温白炽灯对应的光谱模拟误差范围。

随着光谱模拟技术的发展,目标色温的种类越来越丰富。2015 年,刘洪兴等<sup>[11]</sup>设计了一种基于 LED 的多色温多星等单星模拟器,利用卤钨灯基底光源与 26 种 LED,实现了 4000 K 与 7000 K 色温光谱模拟误差优于 8%。2016 年,Baguckis 等<sup>[12]</sup>使用卤钨灯配合 6 种 LED 模拟了 400~1100 nm 范围内的太阳光谱,模拟误差小于 25%。2018 年,张晓娟等<sup>[13]</sup>将氙灯和卤钨灯光谱划分为多个光谱模拟单元,模拟了 350~900 nm 光谱范围内 3900,4800,6500 K 色温光谱,模拟误差优于 10%。2020 年,张健等<sup>[14]</sup>利用高斯分布的光谱模拟单元,通过仿真实现了 2700 K 色温光谱模拟误差优于 10%的结果。虽然目前已经初步具备 2700 K 色温模拟的技术基础,但光谱模拟精度偏低,无法满足 ICAO 测量精度下的 TVM 观测溯源需求。

鉴于目前针对 2700 K 色温尚缺乏高精度模拟方法的现状,本文提出了一种基于数字微镜的 TVM 校准光源的光谱模拟方法。利用 TVM 校准光源与最小二乘光谱模拟原理,分析光谱基础模拟单元不同的光谱分布特性,建立相应的光谱模拟单元数学模型。选用 Bigaussian、ECS 和 Asym2Sig 三种函数拟合光谱模拟单元,提出了一种基于最大模拟误差的光谱修正方法,以优化光谱模拟单元间的能量分布权重,实现 2700 K 色温光谱的精确模拟,为符合 MOR 定义以及满足 ICAO 测量精度的 TVM 校准与溯源链条建立提供研究基础与技术支撑。

## 2 TVM 校准原理与基于数字微镜的 TVM 校准光源的组成

### 2.1 TVM 校准原理

TVM 通过测得的大气透过率  $T$  即可实现对 MOR 的测量,测量原理<sup>[15]</sup>为

$$L_{\text{MOR}} = -2.996 \frac{L}{\ln T}, \quad (1)$$

式中: $L_{\text{MOR}}$  为气象光学视程; $L$  为基线长度; $T$  为可见光范围内的大气透过率。

可见光波段的大气透过率  $T$ <sup>[8]</sup> 受大气光谱透过率  $\tau(\lambda)$  以及探测光源光谱分布  $S(\lambda)$  的影响,其测量公式为

$$T = \frac{\int_{380}^{780} \tau(\lambda) S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中: $V(\lambda)$  为人眼视觉函数。

由式(1)和式(2)可知,经透过率标定后的中性密度衰减片可以模拟相应 MOR 条件下的大气透过率,用于 TVM 外场校准。TVM 的校准原理为

$$L_{\text{MOR}} = -2.996 \frac{L}{\ln \frac{\int_{380}^{780} N(\lambda) J(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} J(\lambda) V(\lambda) d\lambda}}, \quad (3)$$

式中: $N(\lambda)$  为中性密度衰减片的光谱透过率; $J(\lambda)$  为校准光源的光谱分布。

由式(3)可知,校准光源光谱分布与 2700 K 色温白炽灯光谱分布的差异决定了 TVM 的校准结果能否溯源到 MOR 定义且满足 ICAO 测量精度要求。

### 2.2 TVM 校准光源的组成与工作原理

TVM 校准光源系统如图 1 所示。该系统主要由色散系统、数字微镜、聚焦透镜、积分球等组成。数字微镜是由若干个微小反射镜组成的光学开关,每个微反射镜都可以独立、快速地转换其开关状态,实现入射光线的强度调制<sup>[16]</sup>。

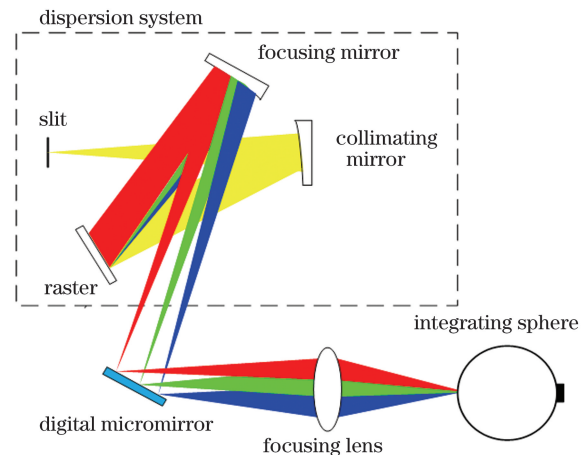


图 1 TVM 校准光源系统

Fig. 1 TVM calibration light source system

光源发出的光束经狭缝入射后由色散系统分光在数字微镜上形成光谱衍射谱线。利用数字微镜可以独立、快速转换各微反射镜开关状态的特性,通过控制数字微镜阵列面微反射镜的开关状态,形成一系列光谱模拟单元,即系统的单通道光谱输出函数,然后运用最小二乘光谱模拟原理求解光谱模拟单元间的比例系数,进而调节光谱模拟单元对应的微反射镜的开关状态,实现不同波段光线的强度调制。调制后的反射光束经聚焦透镜进入积分球进行混光,就可以获得 2700 K 色温下的光谱曲线。光谱模拟单元比例系数的计算方法如下:

建立目标光谱模拟方程,即

$$AK = b, \quad (4)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} z_1(\lambda_1) & z_2(\lambda_1) & \cdots & z_m(\lambda_1) \\ z_1(\lambda_2) & z_2(\lambda_2) & \cdots & z_m(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1(\lambda_{n-1}) & z_2(\lambda_{n-1}) & \cdots & z_m(\lambda_{n-1}) \\ z_1(\lambda_n) & z_2(\lambda_n) & \cdots & z_m(\lambda_n) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $z_j(\lambda_i)$  为第  $j$  个光谱模拟单元中波长为  $\lambda_i$  的相对光谱的能量,  $\lambda$  为目标光谱波长,  $j \in (1, m)$ ,  $i \in (1, n)$ ;  $K = [k_1 \ k_2 \ \cdots \ k_{m-1} \ k_m]^T$ ,  $k_j$  为第  $j$  个光谱模拟单元的比例系数,  $m$  为光谱模拟单元的数量;  $b = [y(\lambda_1) \ y(\lambda_2) \ \cdots \ y(\lambda_{n-1}) \ y(\lambda_n)]^T$ ,  $y(\lambda_i)$  为目标光谱波长为  $\lambda_i$  的相对光谱的能量。

根据式(4)可以建立正规方程组  $A^T AK = A^T b$ , 由此可得最小二乘解为  $K = (A^T A)^{-1} A^T b$ 。

### 3 光谱模拟单元数学模型的建立

#### 3.1 光谱模拟单元的划分

短弧氙灯相比于卤钨灯等其他热光源具有更高的能量集中度<sup>[17]</sup>, 会使更多的能量会聚至狭缝处。经系统调制后的色温为 2700 K 的光束具有更高的能量, 可以扩大衰减片透过率的标定范围。利用短弧氙灯光源、TVM 校准光源系统以及光谱仪搭建的 TVM 校准光源光谱模拟实验装置如图 2 所示, 其中的光谱仪用来探测 TVM 校准光源系统中从积分球出射光束的光谱。

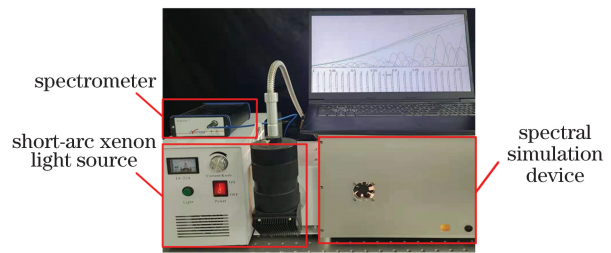


图 2 TVM 校准光源光谱模拟实验装置

Fig. 2 Experimental device for spectral simulation of TVM calibration light source

由于白炽灯为等热辐射源, 2700 K 色温白炽灯的光谱分布与 2700 K 黑体的辐射分布接近<sup>[18]</sup>, 因此 2700 K 色温黑体的光谱分布  $S(\lambda)$  可由普朗克辐射定律求得, 即

$$S(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[ e \left( \frac{c_2}{\lambda \cdot T_b} \right) - 1 \right]}, \quad (6)$$

式中:  $c_1 = 3.74183 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ;  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ;  $T_b$  为黑体的绝对色温;  $e$  为自然常数。

TVM 校准光源实验中数字微镜的分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ , 像元大小为  $7.56 \mu\text{m}$ , 色散结构的光谱分辨率为  $1 \text{ nm}$ 。考虑到光谱的模拟精度, 在  $380 \sim 780 \text{ nm}$  波段内以  $10 \text{ nm}$  为峰值波长间隔选择 40 个光谱模拟单元, 同时根据短弧氙灯与 2700 K 色温黑体光谱形状的差异, 在  $380 \sim 780 \text{ nm}$  光谱区间外补充了 9 个光谱模拟单元。短弧氙灯、2700 K 色温黑体以及 49 个光谱模拟单元的实测光谱分布如图 3 所示。

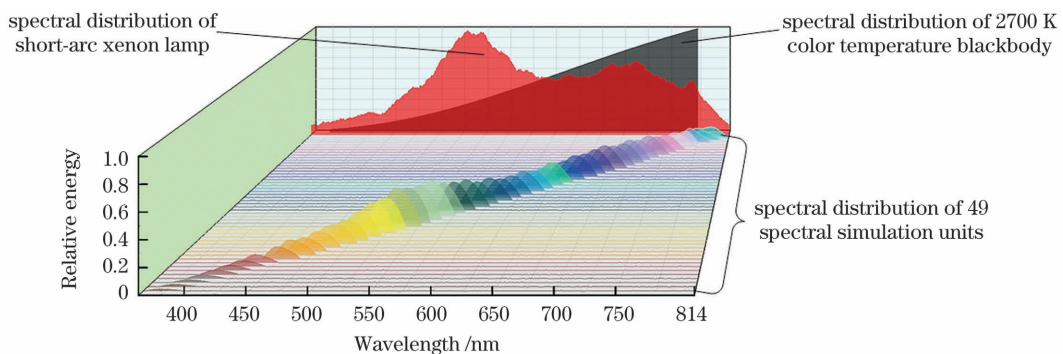


图 3 短弧氙灯、2700 K 色温黑体以及 49 个光谱模拟单元的实测光谱分布

Fig. 3 Measured spectral distribution of short-arc xenon lamp, 2700 K color temperature blackbody, and 49 spectral simulation units

#### 3.2 光谱拟合函数的选取

由图 3 可知, 实际测量的短弧氙灯光谱中不同波长对应的能量差异较大, 同时所选光谱模拟单元多数峰值波长间隔较宽(为  $10 \text{ nm}$ ), 因此, 测试得到的 49 个光谱模拟单元的光谱分布特性存在正偏态分布、正

态分布和负偏态分布三种类型。为此, 以  $1 \text{ nm}$  为间隔在每个光谱模拟单元上取若干个实测的散点数据, 分别以呈正偏态分布、正态分布和负偏态分布的典型峰值波长分别为  $466, 488, 770 \text{ nm}$  的光谱模拟单元为例, 确定适用于不同光谱分布特性的拟合函数。

目前, Gaussian 函数常用作模拟单元的拟合函数<sup>[19]</sup>。Gaussian 函数的表达式为

$$P_j(\lambda) = \tau \cdot \exp\left[\frac{-(\lambda - \lambda_j)^2}{2\omega^2}\right], \quad (7)$$

式中:  $P_j(\lambda)$  是光谱模拟单元的拟合函数;  $\lambda_j$  为峰值

波长;  $\tau$  为决定拟合模型峰值的比例系数;  $\omega$  为半峰宽度系数。

采用 Gaussian 函数对具有三种分布特性的光谱模拟单元的实测散点数据进行拟合, 拟合结果如图 4 所示。

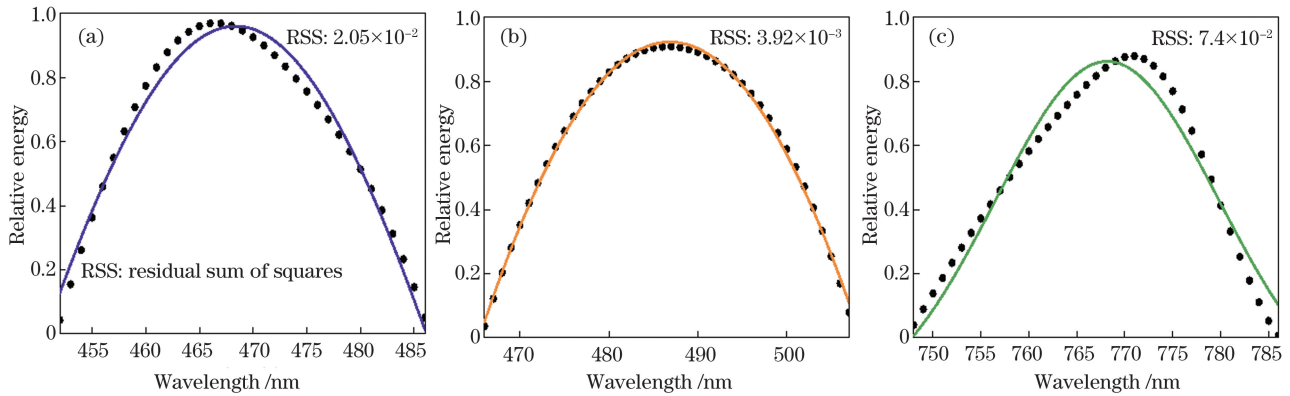


图 4 Gaussian 函数拟合三种偏态光谱模拟单元。(a) 正偏态分布; (b) 正态分布; (c) 负偏态分布

Fig. 4 Gaussian function fitting three kinds of skew spectrum simulation units. (a) Positive skew distribution; (b) normal distribution; (c) negative skew distribution

由图 4 可知, Gaussian 函数对正偏态和负偏态分布光谱模拟单元的拟合效果较差, 三种特性单元的拟合精度不一致。这说明 Gaussian 函数不适用于同时对三种分布特性的模拟单元进行拟合。

Bigaussian 函数通过调整拟合宽度系数  $\omega_1$  和  $\omega_2$  可以对具有不同偏态性质的函数进行表征。Bigaussian 函数表达式为

$$\begin{cases} P_j(\lambda) = \tau \exp\left[-0.5\left(\frac{\lambda - \lambda_j}{\omega_1}\right)^2\right], & \lambda < \lambda_j \\ P_j(\lambda) = \tau \exp\left[-0.5\left(\frac{\lambda - \lambda_j}{\omega_2}\right)^2\right], & \lambda \geq \lambda_j \end{cases} \quad (8)$$

利用 Bigaussian 函数对具有三种光谱分布特性的模拟单元的实测散点数据进行拟合, 拟合结果如图 5 所示。

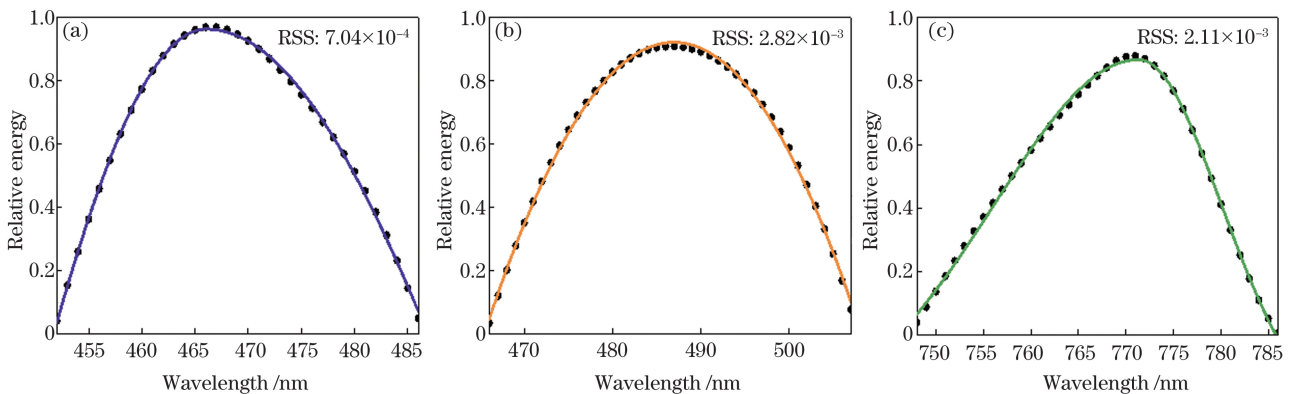


图 5 Bigaussian 函数拟合三种偏态光谱模拟单元。(a) 正偏态分布; (b) 正态分布; (c) 负偏态分布

Fig. 5 Bigaussian function fitting three kinds of skew spectrum simulation units. (a) Positive skew distribution; (b) normal distribution; (c) negative skew distribution

由图 5 可知, Bigaussian 函数对三种偏态光谱模拟单元拟合的残差平方和 (RSS) 分别为  $7.04 \times 10^{-4}$ 、 $2.82 \times 10^{-3}$  和  $2.11 \times 10^{-3}$ 。Bigaussian 函数对正偏态分布的光谱模拟单元的拟合效果最好。三种分布特性光谱模拟单元的拟合精度不在相同量级, 导致不同波段内的光谱模拟精度不同, 从而限制了光谱的整体模拟精度。

同理, Asym2Sig 函数和 ECS 函数均可以通过调节实现对不同偏态性质函数的表征。采用 Asym2Sig 函数和 ECS 函数对三种偏态光谱模拟单元的实测散点数据进行拟合, 拟合效果如图 6 所示。

Asym2Sig 函数和 ECS 函数拟合三种偏态光谱模拟单元的残差平方和如表 1 所示。

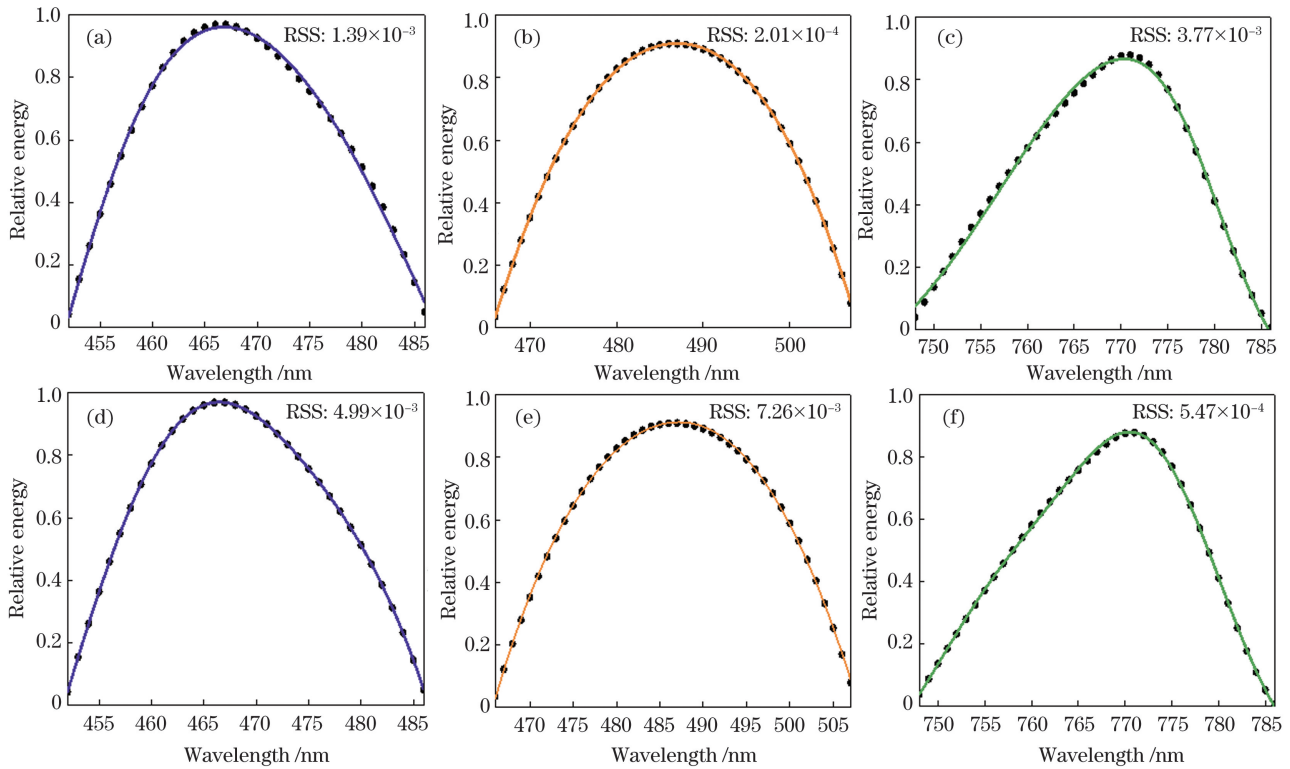


图 6 Asym2Sig 函数和 ECS 函数拟合三种偏态光谱模拟单元。(a) Asym2Sig 函数拟合正偏态单元; (b) Asym2Sig 函数拟合正态单元; (c) Asym2Sig 函数拟合负偏态单元; (d) ECS 函数拟合正偏态单元; (e) ECS 函数拟合正态单元; (f) ECS 函数拟合负偏态单元

Fig. 6 Asym2Sig and ECS functions fitting three kinds of skew spectrum simulation units. (a) Asym2Sig function fitting positive skew unit; (b) Asym2Sig function fitting normal unit; (c) Asym2Sig function fitting negative skew unit; (d) ECS function fitting positive skew unit; (e) ECS function fitting normal unit; (f) ECS function fitting negative skew unit

表 1 Asym2Sig 函数和 ECS 函数拟合三种偏态光谱模拟单元的残差平方和

Table 1 Residual sum of squares of Asym2Sig and ECS functions fitting three kinds of skew spectrum simulation units

Function	Residual sum of squares		
	Positive skew unit	Normal unit	Negative skew unit
Asym2Sig	$1.39 \times 10^{-3}$	$2.01 \times 10^{-4}$	$3.77 \times 10^{-3}$
ECS	$4.99 \times 10^{-3}$	$7.26 \times 10^{-3}$	$5.47 \times 10^{-4}$

由表 1 可知, Asym2Sig 函数和 ECS 函数对正态和负偏态分布光谱模拟单元的拟合精度量级与 Bigaussian 函数对正偏态分布光谱模拟单元的拟合精度量级一致, 所以选取 Bigaussian 函数、Asym2Sig 函数和 ECS 函数分别作为正偏态、正态和负偏态分布光谱模拟单元的拟合函数。

利用所选三种函数组合对 49 个实测模拟单元进行拟合, 拟合结果如图 7 所示。

由图 7 可见, 拟合的残差平方和均小于  $1.5 \times 10^{-3}$ , 多数模拟单元的拟合精度都在  $10^{-4}$  量级, 最大拟合误差出现在峰值波长为 600 nm 的模拟单元处, 残差平方和为  $1.4 \times 10^{-3}$ 。

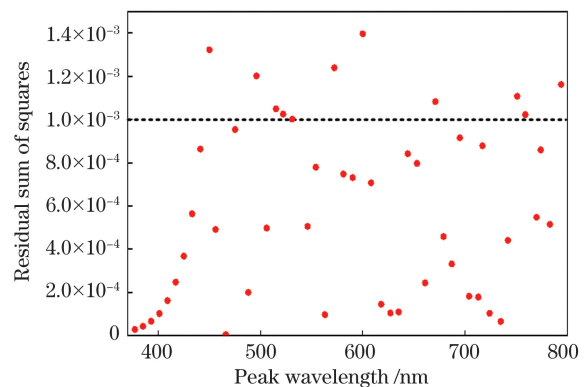


图 7 模拟单元的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of simulation units

## 4 基于最小二乘的 2700 K 色温黑体光谱的模拟对比实验

为验证选用 Bigaussian、ECS、Asym2Sig 三种函数组合代替 Gaussian 函数进行光谱模拟实验的可行性,基于最小二乘光谱模拟原理,分别利用 Gaussian 函数和三种函数组合作为模拟单元拟合函数计算出模拟单元的比例系数;然后利用上述 TVM 校准光源光谱模拟实验装置,基于两种函数

得到的模拟单元比例系数,分别模拟了 2700 K 色温黑体的光谱,模拟结果对比如图 8 所示。

由图 8 可知:两种光谱模拟曲线均是在 380~455 nm 波长范围的误差较大;Gaussian 函数的光谱模拟误差波动较大,最大光谱模拟误差出现在 388 nm 处,为 33.4%;选用 Bigaussian、ECS、Asym2Sig 三种函数组合的最大光谱模拟误差出现在 431 nm 处,为 25.2%。这一结果表明,选用三种分布特性函数组合进行光谱模拟的精度更高。

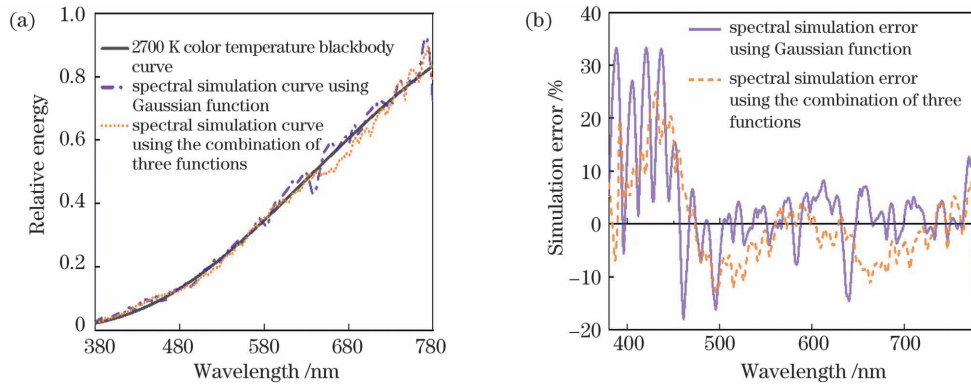


图 8 2700 K 色温黑体光谱模拟结果对比。(a)利用 Gaussian 函数和三种函数组合得到的 2700 K 色温黑体光谱模拟曲线对比;(b)模拟误差对比

Fig. 8 Spectral simulation comparison of 2700 K color temperature blackbody. (a) Comparison of spectral simulation curves of 2700 K color temperature blackbody obtained using Gaussian function and three functions combination; (b) simulation error comparison

## 5 光谱模拟误差修正

### 5.1 光谱模拟误差的影响因素

TVM 测量精度与基线长度成正比。在 10, 20, 30, 50, 75 m 这五种典型基线长度中,对于满足 ICAO 观测精度要求的 75 m 基线, TVM 所需 2700 K 色温光谱的模拟误差为 0.008%, 现有光谱模拟技术难以实现。同时, 50 m 基线下 2700 K 色

温光谱的模拟误差优于  $\pm 7.4\%$ <sup>[10]</sup>, 远优于选用 Bigaussian、ECS、Asym2Sig 三种函数组合的最大光谱模拟误差。

为此,在覆盖最大光谱模拟误差所在的波长区间内,选取峰值波长为 425, 433, 441 nm 的三个连续光谱模拟单元,分析光谱模拟误差偏大的原因。利用 Lighttools 软件仿真对应数字微镜阵列面中的光谱分布,仿真结果如图 9 所示。

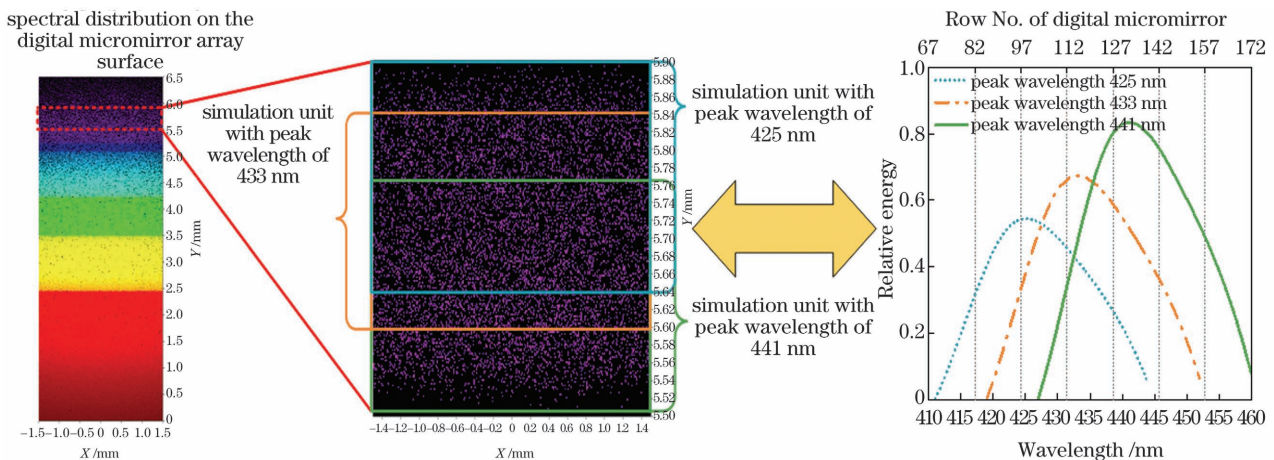


图 9 数字微镜中光谱单元的分布情况

Fig. 9 Distribution of spectral units in digital micromirror

由图 9 可知三个光谱模拟单元在数字微镜阵列面上存在相互叠加区域,各光谱模拟单元相互影响,导致叠加区域同时受多个比例系数调控,不符合最小二乘光谱模拟原理中各光谱模拟单元比例系数相互独立的原则,导致利用最小二乘光谱模拟原理调制的光谱模拟精度偏低。

### 5.2 基于最大模拟误差的光谱修正方法

为充分利用各光谱模拟单元的能量,将各光谱模拟单元峰值波长作为特征波长,将最大光谱模拟

误差作为调节依据,将 2700 K 色温光谱的模拟误差优于  $\pm 7.4\%$  作为模拟目标,利用峰值波长比例系数协同控制各光谱模拟单元的能量权重,实现 380~780 nm 波段范围内 2700 K 色温光谱的精确模拟。基于最大模拟误差的光谱修正方法的具体流程如图 10 所示。

由图 10 可知,光谱修正流程主要分为初始化设置、最大波长查找、误差极值调节以及模拟误差判断 4 个部分。

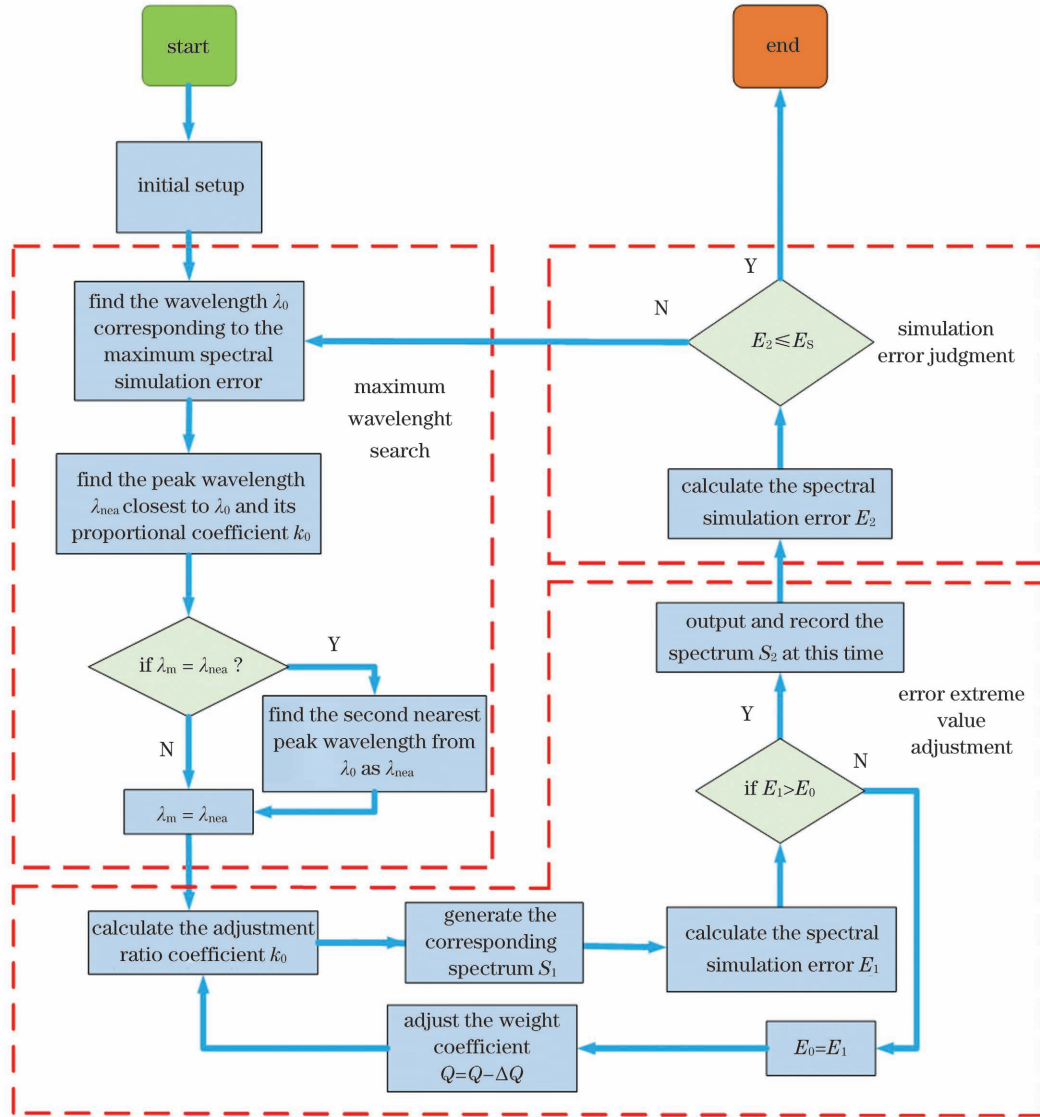


图 10 光谱修正流程图

Fig. 10 Spectrum modification flow chart

1) 初始化设置

设置初始误差极值  $E_0$ 、初始最大光谱模拟误差对应的波长  $\lambda_m$ 、初始权重系数  $Q$ 、权重调节分辨率  $\Delta Q$ 、目标光谱  $S_0$ 、模拟目标  $E_s$ 。

2) 最大波长查找

a) 查找最大光谱模拟误差对应的波长  $\lambda_0$ ;

b) 寻找光谱模拟单元中与  $\lambda_0$  最近的峰值波长  $\lambda_{nea}$  及其比例系数  $k_0$ ;

c) 若两次查找的最大峰值波长相同,则查找第二接近的峰值波长。

3) 误差极值调节

a) 根据  $k_0 = k_0 Q$  调节比例系数  $k_0$ ,生成对应的

光谱  $S_1$ ;

$$b) \text{ 根据 } E_1 = \max \left| \frac{S_1(\lambda) - S_0(\lambda)}{S_0(\lambda)} \right| \text{ 计算光谱模拟误差 } E_1;$$

拟误差  $E_1$ ;

c) 若调制后的光谱模拟误差  $E_1$  不大于之前的误差  $E_0$ , 则根据  $Q = Q - \Delta Q$  调节权重系数, 重新调节比例系数  $k_0$ ;

d) 若调制后的光谱模拟误差  $E_1$  大于之前的误差  $E_0$ , 则  $E_0$  为此时光谱模拟误差极值, 输出此时的光谱为  $S_2$ , 并记录该光谱。

4) 模拟误差判断

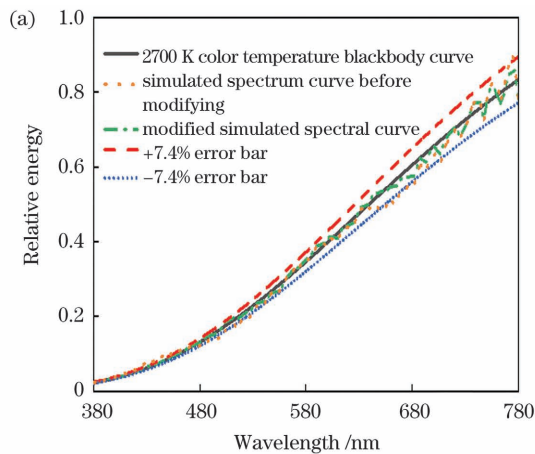
$$a) \text{ 根据 } E_2 = \max \left| \frac{S_2(\lambda) - S_0(\lambda)}{S_0(\lambda)} \right| \text{ 计算 } S_2 \text{ 的光谱模拟误差};$$

光谱模拟误差;

b) 判断  $E_2$  是否满足优化目标, 若不满足则重新进入最大波长查找模块, 直至出现匹配结果。

### 5.3 局部光谱修正方法的实验验证

以图 9 中分析光谱模拟误差影响因素的峰值波长 (425, 433, 441 nm) 模拟单元所在的局部波段为例进行实验, 修正光谱模拟误差, 验证基于最大模拟误差的光谱修正方法的正确性。根据图 8 所示的三种函数组合的光谱模拟实验结果, 设置初始误差极值  $E_0$  为 25.2%, 初始最大光谱模拟误差对应的波长  $\lambda_m$  为 431 nm, 初始权重系数  $Q$  为 1, 权重调节分辨率  $\Delta Q$  为 0.001, 目标光谱  $S_0$  可根据式 (6) 求出,



模拟目标  $E_s$  选用 50 m 基线下 2700 K 色温光谱的模拟误差 7.4%。实验修正前后的局部光谱模拟对比如图 11 所示。

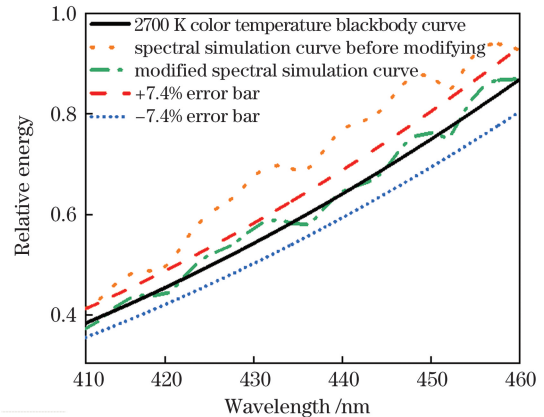


图 11 实验修正前后的局部光谱模拟对比

Fig. 11 Comparison of local spectral simulation before and after experiment modifying

由图 11 可知, 经过实验修正后, 在 410 ~ 460 nm 波段范围内, 光谱模拟误差为 5.8%, 满足模拟目标。

### 5.4 全波段光谱修正实验

利用基于最大模拟误差的光谱修正方法, 在 380 ~ 780 nm 波段范围内进行 2700 K 色温光谱的实验修正, 修正后的最大模拟误差为 6.2%, 较修正前整体光谱的调制能力提高了 4.06 倍。实验修正前后 2700 K 色温光谱的模拟结果如图 12 所示。

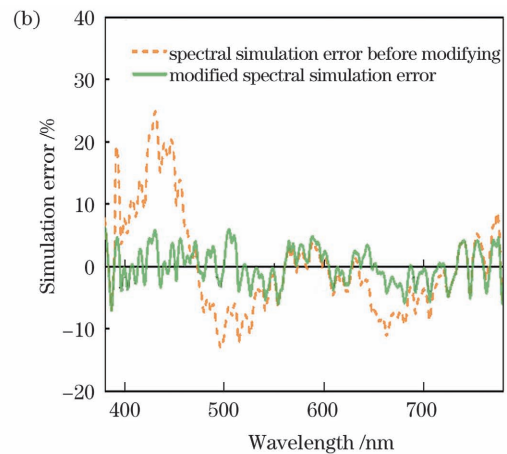


图 12 实验修正前后的 2700 K 色温光谱模拟对比。(a) 修正前后的光谱模拟曲线对比; (b) 修正前后的光谱模拟误差对比

Fig. 12 Comparison of 2700 K color temperature spectrum simulation before and after experiment modifying.

(a) Comparison of spectral simulation curves before and after modifying; (b) comparison of spectral simulation errors before and after modifying

## 6 结 论

本文提出一种基于数字显微镜的 TVM 校准光源的光谱模拟方法。首先, 在校准光源的基础上, 划分

了 49 个光谱模拟单元, 基于实测光谱模拟单元的偏态性质, 利用 Gaussian、Bigaussian、Asym2Sig 以及 ECS 函数分别拟合了三种偏态分布的光谱模拟单元, 根据拟合精度选用 Bigaussian、Asym2Sig 和



ECS 三种函数分别作为正偏态、正态以及负偏态分布光谱模拟单元的拟合函数。然后,进行了基于最小二乘的 2700 K 色温光谱模拟对比实验,结果表明,选用 Gaussian 函数的光谱模拟误差为 33.4%,选用三种函数组合的光谱模拟误差为 25.2%。分析得出光谱模拟单元在数字微镜阵列面上存在叠加区域,各模拟单元无法独立控制是影响光谱模拟误差的主要因素。因此,提出了一种基于最大模拟误差的光谱修正方法,设计了光谱修正流程。以 410~460 nm 波段为例进行实验,验证了光谱修正方法的正确性,最终实现了 380~780 nm 波段范围内 2700 K 色温光谱模拟误差为 6.2%,较实验修正前整体光谱调制能力提高了 4.06 倍,满足 ICAO 观测精度要求的 50 m 基线下 2700 K 色温光谱模拟误差要求。

### 参 考 文 献

- [1] 魏昊明, 赵威, 戴星灿. 雾和气溶胶前向散射对消光的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1354-1361.  
Wei H M, Zhao W, Dai X C. Influence of fog and aerosol particles' forward-scattering on light extinction[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1354-1361.
- [2] World Meteorological Organization. World Meteorological Organization 2014 guide to meteorological instruments and methods of observation[R]. Geneva: WMO, 2014, 8: 291.
- [3] 李学彬, 宫纯文, 徐青山, 等. 气溶胶细粒子与能见度的相关性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1177-1180.  
Li X B, Gong C W, Xu Q S, et al. Relationship between aerosol fine particle and visibility[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1177-1180.
- [4] 徐慧婷. LT31 大气透射仪基本功能及应用[J]. 中国新通信, 2014, 16(3): 67.  
Xu H T. Basic functions and applications of LT31 atmospheric transmissometer [J]. China New Telecommunications, 2014, 16(3): 67.
- [5] 唐慧强, 鞠琳, 鲍婷婷. 基于 WSN 的透射式能见度检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2011(11): 57-59.  
Tang H Q, Ju L, Bao T T. Design of transmission visibility measurement system based on WSN [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(11): 57-59.
- [6] Griggs D J, Cummins K L, Maier M W, et al. The first WMO inter-comparison of visibility measurement: final report [R]. Geneva: WMO, 1989.
- [7] Bloemink H I. KNMI visibility standard for calibration of scatterometers [EB/OL]. [2021-05-09]. [https://cdn.knmi.nl/system/data\\_center\\_publications/files/000/068/577/original/paper\\_bloemink\\_4thiceaws\\_final.pdf?1495621277](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/068/577/original/paper_bloemink_4thiceaws_final.pdf?1495621277).
- [8] Park S, Lee D H, Kim Y G. SI-traceable calibration of a transmissometer for meteorological optical range (MOR) observation [J]. Korean Journal of Optics and Photonics, 2015, 26(2): 73-82.
- [9] Chong W, Bian Z Q, Chu J H, et al. A method for calibrating forward scatter meters indoors [J]. Metrologia, 2020, 57(6): 065030.
- [10] Liang J, Zhang G Y, Zhang J, et al. Influence of transmissometers' light source spectral distribution in measuring visibility [J]. Optics Communications, 2021, 499: 127294.
- [11] 刘洪兴, 任建伟, 刘则润, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0212003.  
Liu H X, Ren J W, Liu Z X, et al. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0212003.
- [12] Baguckis A, Novičkovas A, Mekys A, et al. Compact hybrid solar simulator with the spectral match beyond class A [J]. Journal of Photonics for Energy, 2016, 6: 035501.
- [13] 张晓娟, 杨俊杰, 张健, 等. 星模拟器多色温模拟技术研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(6): 735-743.  
Zhang X J, Yang J J, Zhang J, et al. Research on multi-color temperature simulation for star simulator [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 735-743.
- [14] 张健, 孙继亮, 张国玉, 等. 校准能见度仪用 2700 K 黑体色温光谱模拟方法研究 [J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 37(4): 8-10, 15.  
Zhang J, Sun J L, Zhang G Y, et al. Research on 2700 K blackbody color temperature spectral simulation method for calibrating visibility meter [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2020, 37(4): 8-10, 15.
- [15] 韩永, 谢晨波, 饶瑞中, 等. 基于光散射技术的两种能见度探测方法的比较分析 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 173-176.  
Han Y, Xie C B, Rao R Z, et al. Comparison and analysis of two visibility detecting methods based on optical scatter technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 173-176.
- [16] 谢熙伟, 胡静, 沈亦兵. 基于数字微镜器件随机编码调制的相位成像 [J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2311001.

- Xie X W, Hu J, Shen Y B. Phase imaging based on random coding modulation of digital micro-mirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (23): 2311001.
- [17] 苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208001.
- Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41 (2): 0208001.
- [18] 田会娟, 胡阳, 陈陶, 等. 基于红/绿/蓝/青/黄/暖白 6 色 LED 的白光光谱优化方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0823001.
- Tian H J, Hu Y, Chen T, et al. Spectral optimization of a mixed white light-emitting diode (LED) cluster comprising a red/green/blue/cyan/yellow/warm white LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0823001.
- [19] 谭跃跃, 李岳衡, 黄平, 等. 水下无线光通信系统信道冲激响应拟合函数对比分析 [J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1106001.
- Tan Y Y, Li Y H, Huang P, et al. Comparative analyses of fitting functions for channel impulse response in underwater wireless optical communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1106001.

## Spectral Simulation Method for Calibrating Light Source of a Transmission Visibility Meter Based on Digital Micromirror

Sun Jiliang<sup>1</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Jian<sup>1,2,3</sup>, Xu Da<sup>1,2,3</sup>, Liang Jing<sup>1</sup>, Yun Zhikun<sup>1</sup>, Yang Xiaotong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>2</sup> Opto-Electronic Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, Jilin, China

### Abstract

**Objective** The transmission visibility meter (TVM), being the main visibility measurement instrument, is calibrated based on the spectral characteristics of the detection light source, which does not satisfy the 2700 K color temperature light source standard defined by the Meteorological Optical Range (MOR) for visibility, making the instrument unidentifiable with the definition of visibility after calibration. Although the technical basis for 2700 K color temperature simulation is initially available, spectral simulation accuracy is low and it still cannot satisfy the requirements for TVM observation and traceability under the measurement accuracy of the International Civil Aviation Organization (ICAO). To address the current lack of a high-precision simulation method for 2700 K color temperature, this study proposes a spectral simulation method for calibrating the light source of TVM based on a digital micromirror for accurate simulation of the 2700 K color temperature spectrum. It also provides research basis and technical support for TVM calibration and traceability chain establishment that meets the definition of MOR and the standard of ICAO.

**Methods** Forty-nine spectral simulation units are divided using the TVM-calibration light source experimental device. The Gaussian, Bigaussian, Asym2Sig, and ECS functions were used to fit three skew distribution spectral simulation units, based on the measured skewness properties of the spectral simulation unit. Three functions of Bigaussian, Asym2Sig, and ECS are selected as the fitting functions of the positive, normal, and negative skew distribution spectrum simulation units, based on the fitting accuracy. The feasibility of using Bigaussian, ECS, and Asym2Sig functions to replace the Gaussian function for the spectrum simulation experiment is proven using the 2700 K color temperature spectrum simulation comparison experiment based on least squares. Three continuous spectral simulation units are selected at the wavelength where the maximum spectral simulation error is covered, and Lighttools software is used to simulate and analyze the reason for the large spectral simulation error. A spectrum correction method based on the maximum simulation error is proposed, and a local waveband experiment is

performed to correct the spectrum simulation error and verify its correctness, based on the analysis of the influencing factors of the spectrum simulation error. The simulation error of the 2700 K color temperature spectrum after the experiment correction in the range of 380–780 nm is measured by conducting a full-band spectrum correction experiment.

**Results and Discussion** The Bigaussian, Asym2Sig, and ECS functions fit the spectral simulation units for positive, normal, and negative skew distributions, respectively. The residual sum of squares is all less than  $1.5 \times 10^{-3}$ , the fitting accuracy of most simulation units is in the order of  $10^{-4}$ , the maximum fitting error appears at the simulation units with a peak wavelength of 600 nm, and the residual sum of squares is  $1.4 \times 10^{-3}$  (Fig. 7). Comparing the experimental results of 2700 K color temperature based on least-squares spectrum simulation show that the spectrum simulation error using spectral Gaussian function fluctuates significantly, with a maximum spectral simulation error of 33.4% at 388 nm, the maximum simulation error using Bigaussian, ECS, and Asym2Sig functions is 25.2% at 431 nm, and the spectrum simulation accuracy using a combination of the three distribution characteristic functions is higher than that using Gaussian function (Fig. 8). The results of using the Lighttools software to simulate and analyze the spectral distribution on the digital micromirror array surface show that the spectral simulation unit has overlapping areas on the digital micromirror array surface, with each spectral simulation unit influencing one another, causing the overlapping area to be controlled by multiple proportional coefficients simultaneously. However, this does not comply with the principle that the scale coefficients of each spectrum simulation unit in the least-squares spectrum simulation principle are independent of each other. Therefore, spectrum simulation modulated by the principle of least-squares spectrum simulation has a low precision (Fig. 9). The results of the experimental correction of spectral simulation error on the local band show that the spectral simulation error is 5.8% in the range of 410–460 nm after the experimental correction. This implies that the spectral simulation satisfies the 2700 K color temperature spectral simulation error requirement under the 50 m baseline required by ICAO in the local band and that the maximum simulation error is used to verify the correctness of the spectral correction method (Fig. 11). The results of correction studies on the full-band spectrum show that the maximum simulation error after correction is 6.2%, which is 4.06 times larger than the overall spectral modulation ability before correction (Fig. 12).

**Conclusions** This study proposes a spectral simulation method for calibrating the light source of TVM based on a digital micromirror. The skew nature of the spectral simulation unit is analyzed, and Bigaussian, Asym2Sig, and ECS functions are selected to fit the positive, normal, and negative skew distribution spectral simulation units, respectively. The spectral simulation comparison experiment between using the Gaussian function and combining the Bigaussian, ECS, and Asym2Sig functions is performed; the spectral simulation errors of the two functions are 33.4% and 25.2%, respectively. This shows that the Gaussian function can be replaced with a combination of three functions for spectrum simulation. The analysis reveals that the main factors influencing the spectral simulation errors are the presence of superimposed regions of spectral simulation units on the surface of the digital micromirror array and the lack of independent control of each simulation unit. The correctness of the spectral correction method based on the maximum simulation error is demonstrated using the local band of 410–460 nm. The final simulation error of the 2700 K color temperature spectrum in the band of 380–780 nm is 6.2%, which is 4.06 times higher than the overall spectral modulation capability before the correction; simulation accuracy of 2700K color temperature spectrum corrected by experiment satisfies the ICAO observation accuracy requirements for the simulation error of 2700 K color temperature spectra at 50 m baseline and provides a research basis and technical support for establishing TVM calibration and traceability chain that satisfies the definition of MOR and the standard of ICAO.

**Key words** spectroscopy; transmission visibility meter; atmospheric visibility; spectral simulation; blackbody color temperature; calibration method