

二维划分反馈控制的星模拟器光源光谱匹配精度提升方法

王智勇¹, 张晶晶^{1,2,3*}, 孙浩⁴, 刘石神⁴

- (1. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北 武汉 430074;
2. 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074;
4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 为提高星模拟器光源系统光谱匹配精度, 首先设计并搭建了基于数字微镜的星模拟器光源系统; 其次, 根据按波长标定的区域光谱进行遗传算法的光谱拟合, 结果表明该方案拟合光谱与目标光谱存在一定匹配误差; 最后, 为提高光谱匹配的精度, 提出了按波长和能量二维划分区域的误差反馈及精度提升方法。实验模拟了色温为 2550、4766、6576、8910 K 光源, 结果表明相较于波长方向一维划分的反馈方法, 光谱匹配最大误差分别下降了 55.7%、50.6%、45.2%、42.2%, 极大地提升了星模拟器光源系统的光谱匹配精度。该研究旨在补偿该类色温匹配误差所引入的星敏感器角检测误差, 达到高精度星敏感器的定标精度要求。

关键词: 星模拟器光源; 光谱匹配; 精度提升; 反馈控制; 二维划分

中图分类号: V447.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220451

Star simulator light source spectral matching accuracy improvement method by two-dimensional partition feedback control

Wang Zhiyong¹, Zhang Jingjing^{1,2,3*}, Sun Hao⁴, Liu Shishen⁴

- (1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China;
3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Wuhan 430074, China;
4. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: To improve the spectral matching accuracy of the star simulator light source system, firstly, a star simulator light source system based on digital micromirror is designed and built. Secondly, the spectral fitting of the genetic algorithm is performed according to the regional spectrum calibrated by wavelength. The results show that the scheme exists a certain matching error between the fitted spectrum and the target spectrum. Finally, in order to improve the accuracy of spectral matching, an error feedback and accuracy improvement method is proposed to divide the region into two-dimensional wavelength and energy. The experiment simulates light sources with color temperatures of 2550 K, 4766 K, 6576 K, and 8910 K. The results show that, compared with the feedback method of one-dimensional division in the wavelength direction, the maximum error of spectral matching decreases by 55.7%, 50.6%, 45.2%, and 42.2%, respectively, which significantly improves the spectral

收稿日期:2022-10-10; 修订日期:2022-12-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(CUGL180404);中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX251)

作者简介:王智勇,男,硕士生,主要从事星模拟器方面的研究。

导师(通讯作者)简介:张晶晶,男,副教授,博士,主要从事光谱调控方面的研究。

matching accuracy of the star simulator light source system. The study aims to compensate for the angle measurement error caused by the spectral match error, which improves the star sensor's calibration accuracy.

Key words: star simulator light source; spectral matching; improved accuracy; feedback control; two-dimensional division

0 引言

航天飞行和星空探测是我国军事国防的重点发展方向,空间飞行器的姿态决定其空间运行轨迹。航天事业的进一步发展,使得航天飞行器需要更高的控制精度和可靠性,姿态敏感器的应用也相对越来越广泛^[1]。其中,恒星敏感器又称为星敏感器,相比于其他的方向敏感器,星敏感器不仅测量误差低^[2],而且因其结构稳定性较好,系统可以制作得更加紧凑^[3]。星敏感器以恒星为参照,提供飞行器相对于惯性坐标系的三轴姿态,其定姿精度可达 $1''$,而其他的方向敏感器的精度只有几角分。因此,星敏感器以高精度优势在航天技术中获得了更高的关注度^[4]。

星敏感器以恒星为参照物确定航天飞行器的姿态信息,利用探测器和软件算法实现星点提取和星图识别^[5]。为了确保姿态输出精度,星敏感器在使用前需要对其内部参数进行标定。星敏感器的标定按不同的工作环境可分为在轨标定和地面标定^[6-7]。但是,直接进行外太空测试会使其研发成本大幅提升,因此对星敏感器的标定多采取地面实验室标定。为了解决星敏感器地面标定问题,星模拟器应运而生,其采用调制光源测试方法,可在实验室环境下模拟各种恒星。星模拟器是星敏感器地面测试及标定的设备,可以满足星敏感器的性能参数测试需求^[8-9]。

近年来,随着星敏感器技术的发展,静态星模拟器的研究主要致力于其模拟精度的提高^[10],且更关注对目标恒星的真实光谱特性模拟^[11]。目前,国内外光谱模拟系统根据所使用的光源和光谱调控方案主要可以分为三种方法^[12]:基于多通道滤光片的星模拟方法^[13]、基于多波长 LED 的星模拟方法^[14]和基于光谱色散精确模拟控制的星模拟方法^[12,15]。其中,基于多通道滤光片的星模拟方法采用单一氙灯或者卤钨灯为基底光源,通过带通滤光片作为分光手段,最后利用积分球将光混合输出。基于多波长 LED 的星模拟方法利用 LED 的光谱波段较窄和光强可控的特点,选择不同发光峰值波长和不同数量的 LED 组合拟合

特定色温光谱曲线。这两种光谱模拟方法光谱调控不精确,模拟精度有待提高。基于光谱色散精确模拟控制的星模拟方法通过色散光路将一连续光谱光源(如卤钨灯)光谱色散到空间光调制器件上,使用空间光调制器件翻转闭合光路以实现色散光各波长能量的精确调控,积分球混光输出,从而实现对目标色温光谱的精确模拟,获得优于前述两种方法的目标光谱模拟精度^[12,15]。数字微镜器件(Digital Micromirror Devices, DMD)作为一种空间光调制器,以其高分辨率、高光谱响应速率、易操作、工作功率低和稳定性好等优点,被应用于光谱色散精确模拟控制,其光谱模拟精度仍然有待进一步提升^[12,15]。

为提高基于数字微镜的星模拟器光源模拟精度,文中利用超定方程的最小二乘解和遗传算法进行模拟光谱的权重系数求解,在实验过程中配合反馈控制进行解的修正。此外,对空间方向上的光谱数据进行分析,继而从两个维度划分区域,重新标定划分区域的光谱,实现了光谱匹配的精度提升。

1 星模拟器光源系统及光谱匹配原理

文中设计的光谱可调星模拟器光源结构如图 1(a)所示,主要包括卤钨灯、狭缝、分光镜、数字微镜器件、积分球、机械调节装置。其中,卤钨灯发出光谱连续的光,狭缝与分光镜实现光谱分光,平行入射到数字微镜,色散光束在数字微镜阵列面上按波长展开如图 1(b)所示,形成波长维和能量维。控制 DMD 上各微镜开关翻转状态,若开关打开,则入射到该微镜上的光经微镜反射汇入积分球输出模拟光谱;若开关闭合,入射到该微镜上的光经微镜反射后被黑色吸收材料吸收,不汇入积分球输出。因此通过调控数字微镜各微镜状态即可实现图 1(c)所示的光谱精确控制。

根据数字微镜的开关状态以及光谱叠加理论,建立输出光谱函数数学模型。在模拟目标色温光谱分布曲线时,利用算法得出所有数字微镜的开关状态,据此得出拟合光谱。

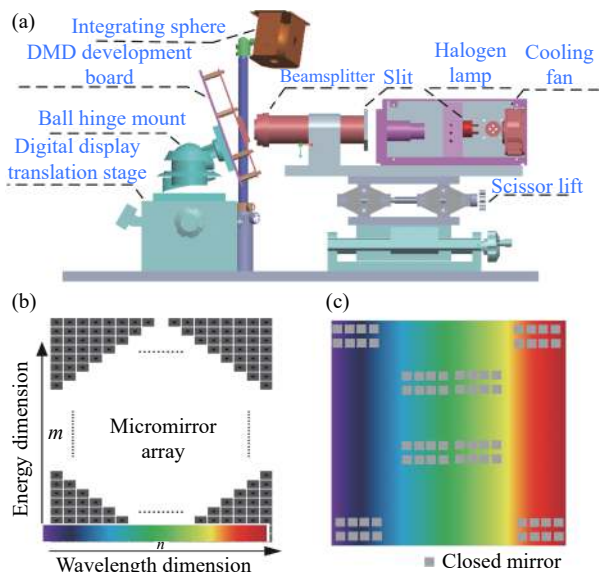


图 1 (a) 星模拟器光源系统结构; (b) 光色散到 DMD 微镜阵列; (c) DMD 微镜控制输出光谱
Fig.1 (a) Structure of the star simulator light source system; (b) Light disperse on the DMD micromirror array; (c) Output spectra controlled by the DMD micromirrors

卤钨灯光源发出的光准直为平行光, 经光栅色散后为波长分布均匀的单色光, 依次排列在微镜阵列面上, 每一列微镜上投射的光的波长可认为一致, 且由于微镜尺寸以 μm 计, 这一列微镜的光谱范围极窄见图 1(b), 图中 $\Delta\lambda_j$ 表示光谱频率宽度, j 为微镜阵列的列值 ($j=1, 2, \dots, n$)。

微镜阵列面上单个微镜上接收的光谱函数表示为 $S_{ij}(\lambda)$, 那么微镜阵列接收的光可以表示为一个矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} S_{11}(\lambda) & S_{12}(\lambda) & \dots & S_{1n}(\lambda) \\ S_{21}(\lambda) & S_{22}(\lambda) & \dots & S_{2n}(\lambda) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1}(\lambda) & S_{m2}(\lambda) & \dots & S_{m(n)}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: m 为阵列的总列数; n 为阵列的总行数; $S_{ij}(\lambda)$ 表示第 i 行第 j 列微镜接受到的光谱。

数字微镜器件可以调节每一个微镜的状态, 决定微镜从哪个方向反射。数字微镜只有“开”和“关”两个工作状态, 所以微镜阵列的开关状态 B 可表示为:

$$B = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $s_{ij}=0$ 或 $1(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$, 表示的是每一个微镜元素的开关状态, $s_{ij}=1$ 表示“开”, $s_{ij}=0$ 表示“关”。

所以, 得到的目标光谱分布函数即是多单色光源与微镜状态共同作用的结果:

$$\begin{bmatrix} T_{11}(\lambda) & T_{12}(\lambda) & \dots & T_{1n}(\lambda) \\ T_{21}(\lambda) & T_{22}(\lambda) & \dots & T_{2n}(\lambda) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{m1}(\lambda) & T_{m2}(\lambda) & \dots & T_{m}(\lambda) \end{bmatrix} = A \cdot B \quad (3)$$

将所有光谱叠加, 得到的目标光谱分布函数如公式 (4) 所示:

$$T = \sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} T_{ij}(\lambda) \quad (4)$$

若严格控制光栅和微镜阵列面的角度, 使微镜阵列上的同一列微镜接收到的光强一致, 那么模型进一步简化为:

$$A = [S_1(\lambda) \quad S_2(\lambda) \quad \dots \quad S_n(\lambda)] \quad (5)$$

此时, 每一列微镜的状态不必完全表示, 只需确定微镜的开合比例, 便可以进行光强控制, 所以微镜阵列状态可用微镜为“开”的数目可表示为:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 微镜状态为“ON”的数量为 N_{ON} , 那么选通函数中的 $k_j=N_{ON}/n$ 。

最终拟合的目标光谱为匀光后的均匀光谱, 根据叠加原理可得:

$$T = A \times K = \sum_{j=1}^{j=n} k_j S_j(\lambda) \quad (7)$$

式中: $S_j(\lambda)$ 为不同列微镜光谱分布; k_j 为每列微镜开关数目的调节系数。

针对光谱调控方案的数学建模和分析, 若要获得目标色温的光谱分布曲线, 只需要确定每列微镜的调节系数 k_j , 当需要调节的系数过多时, 系数值的求解就是光谱模拟算法要解决的重点。

2 光谱匹配方法

文中实验使用的 DLP6500 FYE 的分辨率高达

1 920×1 080, 微镜数目超过 200 万。目标光谱的模拟是通过调控微镜阵列的开关对不同波长的光有选择性地反射来实现的。所以, 在安装好微镜阵列后, 需要测试微镜阵列开关状态的光谱分布, 即标定出所有微镜的光谱分布。若对每一个微镜进行标定, 首先, 工作量是巨大的, 虽然光谱的采集可以通过程序自动化运行, 但光谱数据需要经过处理后才能使用; 其次, 单个微镜反射的光能量较弱, 光谱仪采集需要更大的积分时间, 这同时引入了更多的环境光。所以, 可以将微镜阵列分成不同的区域, 首先假定每一列微镜反射的光强均匀且波段一致, 将微镜阵列按波长划分为合适的列数, 使用遗传算法求出微镜的状态, 与目标光谱比对后, 利用反馈进一步调整, 最后采用二维划分微镜阵列的方式实现光谱匹配精度提升。

2.1 基于遗传算法的光谱匹配算法

一般使用高斯函数等模型模拟光谱匹配, 以拟合光谱和目标光谱误差最小为目标, 建立适应度函数, 不考虑解的取值和范围。实验时, 需调整目标光谱的系数, 使得在要求的波长范围内, 某组镜子全开时, 采集的所有单个区域内波长的光谱强度最小值略微大于对应频率目标光谱的强度, 以便使权重系数处于 (0,1) 之间。调控某一波长范围的光谱强度, 是通过调控对应微镜的开合实现的, 所以每组镜子开合数量的取值应该是 0~1 920。通过算法求得所有元区间的权重系数, 该权重系数乘以 1 920, 取整即可得到微镜的开合的数量。这种做法虽然可以得到较好的拟合曲线, 但取整使得拟合光谱与目标光谱有略微差距, 所以应该在算法编码中考虑微镜开合数量必须为整数, 这样计算的适应度也是比较准确的。

波长 λ_i 处的光谱匹配误差 e 可表示为:

$$e(\lambda_i) = |S_{fit}(\lambda_i) - S_{target}(\lambda_i)| / S_{target}(\lambda_i) \quad (8)$$

式中: $S_{fit}(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处的拟合光强; $S_{target}(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处的目标光强。以每一波长处的误差平方和计算适应度函数, 若 $e(\lambda_{max})$ 在某波长 λ_{max} 处达到最大, 则 $e(\lambda_{max})$ 为最大光谱匹配误差。

遗传算法控制微镜状态模拟光谱步骤如图 2 所示, 主要包括 3 个步骤:

- (1) 设置对应每列微镜个数的初始权重系数;
- (2) 变异重组权重系数, 计算适应度函数;
- (3) 反复迭代获取符合误差条件的权重系数。

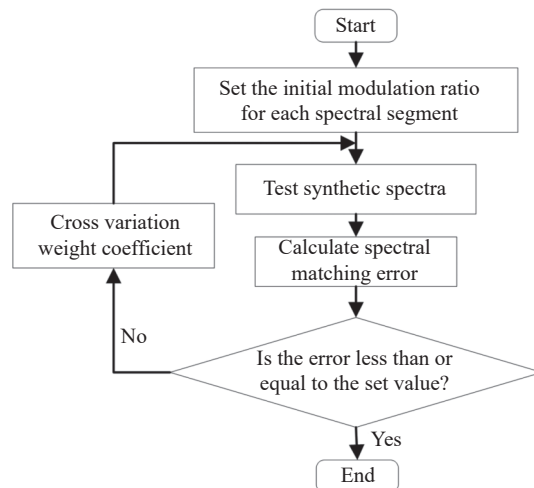


图 2 遗传算法控制微镜状态模拟光谱步骤

Fig.2 Genetic algorithm to control the micromirror state simulation spectrum steps

2.2 基于遗传算法的光谱匹配反馈算法

由于区域光谱强度较弱, 且卤钨灯光源受到各种影响会轻微不稳定, 所以每次实验所测光谱与目标黑体辐射光谱仍有较大差距, 经过迭代后遗传算法得出的拟合光谱还有进一步的改进空间。而且, 实际模拟光谱总是稍弱于目标光谱, 可能是实验模拟时间与区域光谱标定时间间隔过长, 光源光谱分布不稳定。

为了抵消因光源、环境变化带来的影响, 提高光谱模拟系统的准确性, 当光谱可调光源模拟目标光谱后, 与目标光谱进行比对, 继续使用遗传算法优化, 实现光谱拟合的反馈调节。如图 3 所示, 首先使用最小

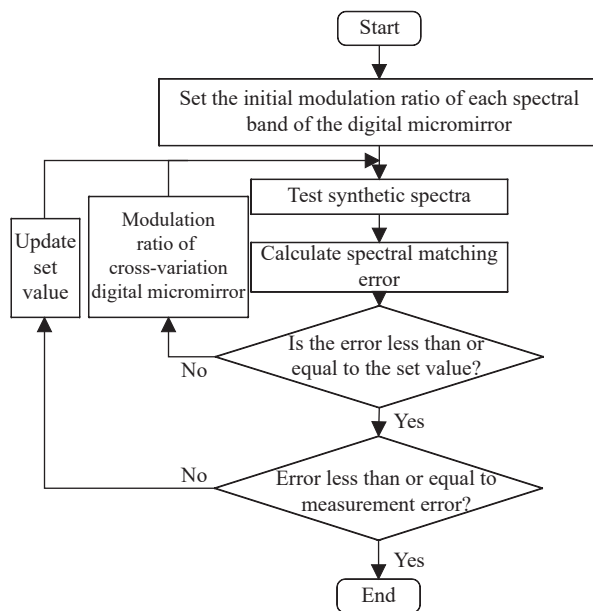


图 3 遗传算法反馈控制

Fig.3 Genetic algorithm feedback control

二乘法和遗传算法求解权重系数, 不过由于环境因素或光源自身的不稳定性, 其拟合光谱与目标光谱有较大差距; 其次反馈调整根据差距大小设置, 误差越大的波段, 下一次的补偿也越大; 最后通过不断调整各组微镜阵列的开关状态组合直至达到稳态, 这时的输出光谱更接近于目标光谱。

2.3 二维划分区域的光谱标定及光谱匹配实现

如图 1(b) 所示, 将波长方向上的微镜划分为 10 组, 将能量方向的微镜划分为 10 组, 得到如图 4 所示的元区域光谱功率分布, 10 种颜色的曲线分别对应 10 种波长划分, 同一颜色的曲线代表能量划分。由图 4 可看出实际每一组微镜在空间方向上的光强并非等量均匀的, 同一列微镜的光强最大相差两倍。

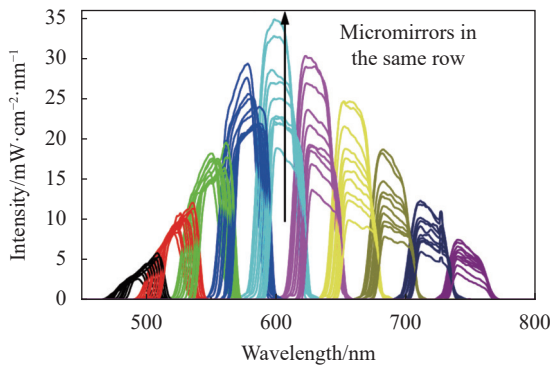


图 4 按波长和空间方向划分得到的元区域光谱功率分布曲线
Fig.4 Spectral power distribution curve of sub region divided by wavelength and spatial direction

此外, 由图 4 可以看出, 同属于一个波长范围内

的光谱分布, 除了能量分布不均匀, 中心波长也存在偏移。这种现象在搭建光学平台时需要将色散光路波长方向与微镜的一侧对齐, 但具体操作起来难以调节, 无法完全消除偏差。

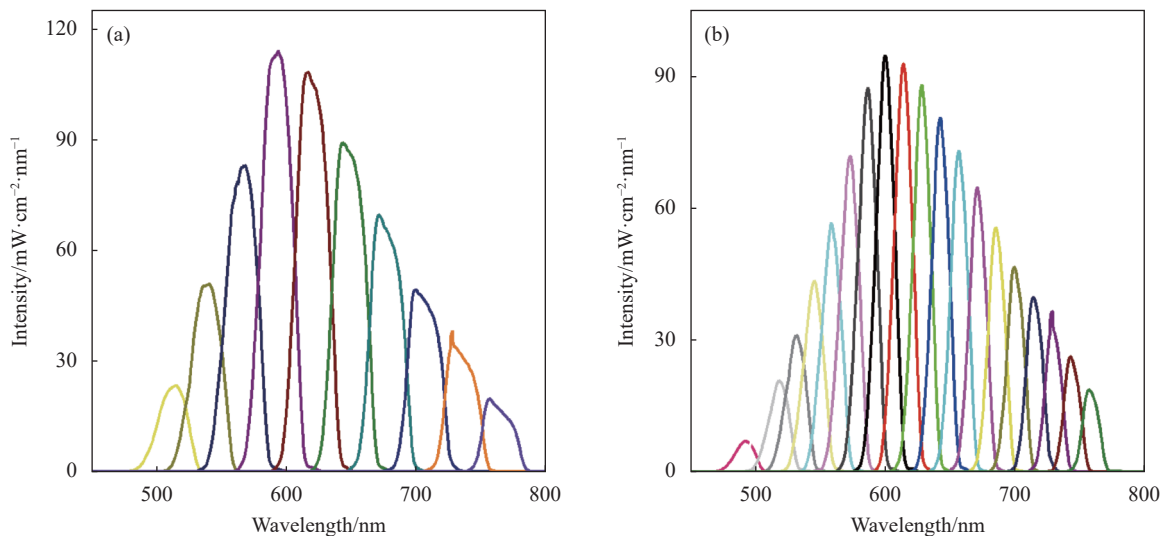
为了进一步提高光谱匹配精度, 考虑上述峰值波长偏移和能量分布不均匀的情况, 将空间方向也分成一定的区域。重新设计光谱匹配算法的变量个数, 每次微镜的开关以 $m \times n$ 个区域中的一个作为整体变化。

3 实验结果与分析

为降低环境光噪声, 该实验系统安装在由多层遮光布遮盖的暗室环境中。所用光源为德国 OSRAM 的 50 W 卤钨灯, 分光镜为芬兰 Specim 公司 ImSpector V8 型号分光镜, 积分球为美国 Thorlabs 公司的 IS200 型积分球, 光谱仪为美国海洋光学公司的 HR4000 型光纤光谱仪。为稳定卤钨灯光源光谱, 硬件设计方面系统采用恒流源驱动卤钨灯, 并用大功率风扇制冷以稳定卤钨灯工作温度。为抑制背景光环境噪声干扰, 光谱数据采集前首先采集并扣除环境背景噪声及光谱仪自身暗噪声, 光谱数据取十次平均值, 以提高光谱测量的信噪比。

3.1 基于遗传算法的光谱匹配算法结果

光谱可调星模拟器光源系统首先模拟的光源色温为 3400 K, 将微镜波长维分别以 54 列、27 列、15 列和 10 列分为一组的光谱采集曲线如图 5 所示, 由此可以得出, 波长维划分越精细, 光谱元区间的波长范围越窄, 这有利于提升光谱匹配效果。



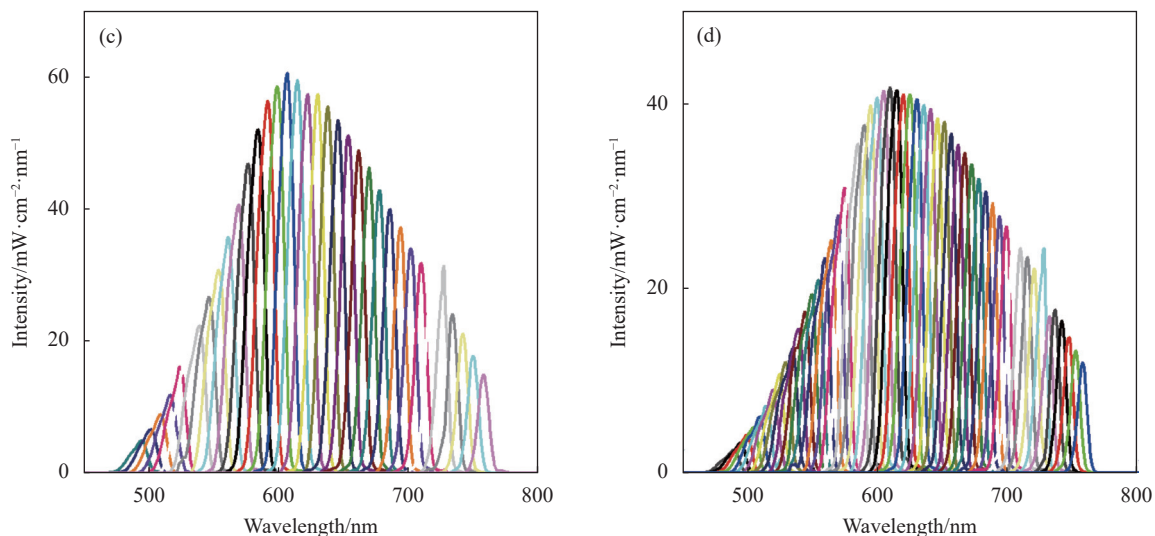


图 5 初始光谱元区间标定。(a) 微镜波长维以 54 列为一组; (b) 微镜以 27 列为一组; (c) 微镜以 15 列为一组; (d) 微镜以 10 列为一组
 Fig.5 Initial spectral element interval calibration. (a) Wavelength dimension of the micromirrors are grouped in 54 columns; (b) Grouped in 27 columns; (c) Grouped in 15 columns; (d) Grouped in 10 columns

图 6 为模拟 3400 K 色温的光谱匹配结果, 其中虚线为目标色温的光谱分布, 红实线为实验测得的拟

合光谱。计算模拟目标光谱色温 3400 K 时的最大匹配误差分别为 9.81%、8.36%、7.58%、6.45%。可以发

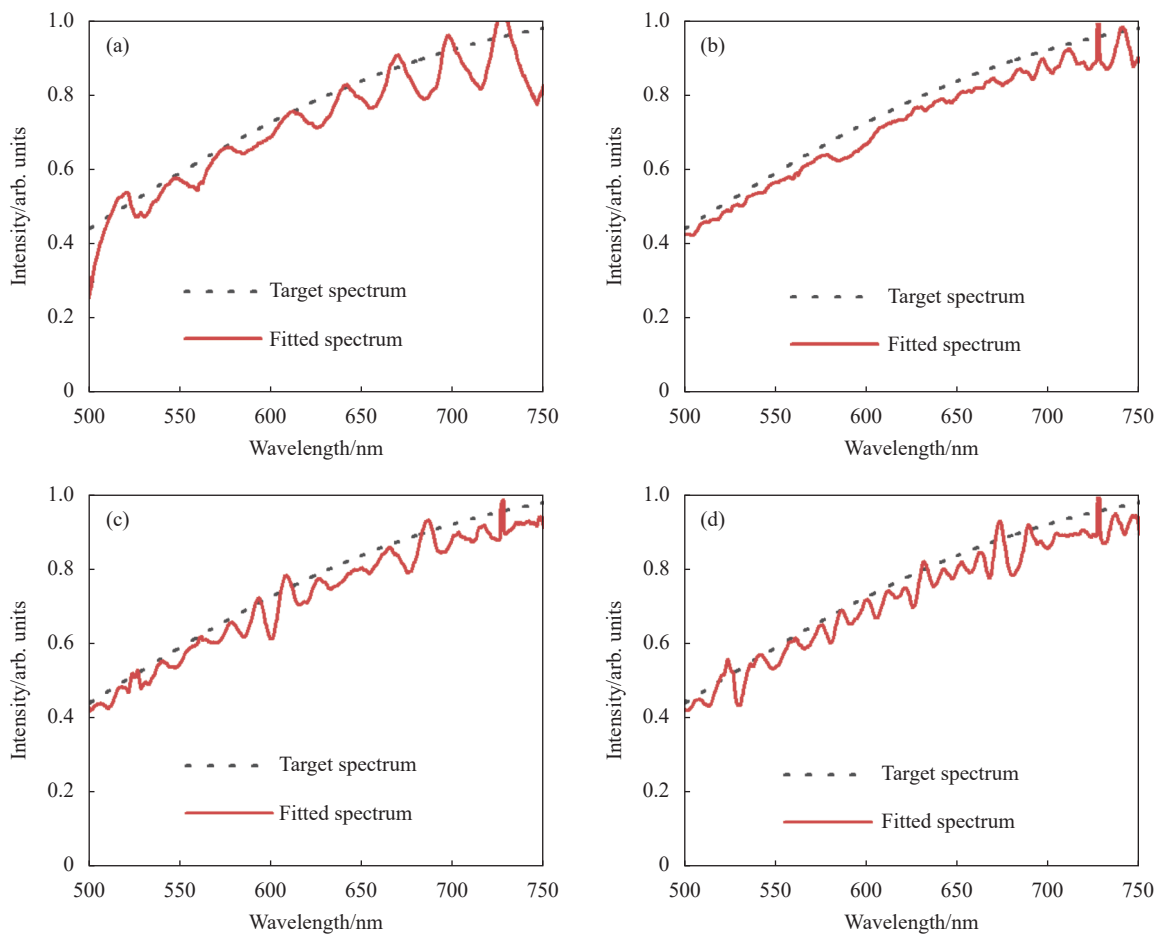


图 6 模拟色温 3400 K 结果。(a) 微镜以 54 列为一组; (b) 微镜以 27 列为一组; (c) 微镜以 15 列为一组; (d) 微镜以 10 列为一组
 Fig.6 Simulation results of color temperature 3400 K. (a) Micromirrors are grouped in 54 columns; (b) Micromirrors are grouped in 27 columns; (c) Micromirrors are grouped in 15 columns; (d) Micromirrors are grouped in 10 columns

现,当微镜按波长维以 10 列为一组划分为 108 组后,光谱匹配结果并没有明显改善,且划分的组数越多,光谱数据采集及处理需要的时间越长,光谱仪噪声增加,所以该系统将波长维分为 108 组。

模拟色温分别为 2 550、4766、6 576、8 910 K

光谱曲线分布,并以测得的拟合光谱曲线与目标光谱曲线作比较,效果如图 7 所示,最大匹配误差分别为 6.45%、8.74%、10.97% 和 11.37%,显然最大匹配误差越来越大,这是因为卤钨灯的色温大约为 3000 K,模拟相近色温的曲线更为精确。

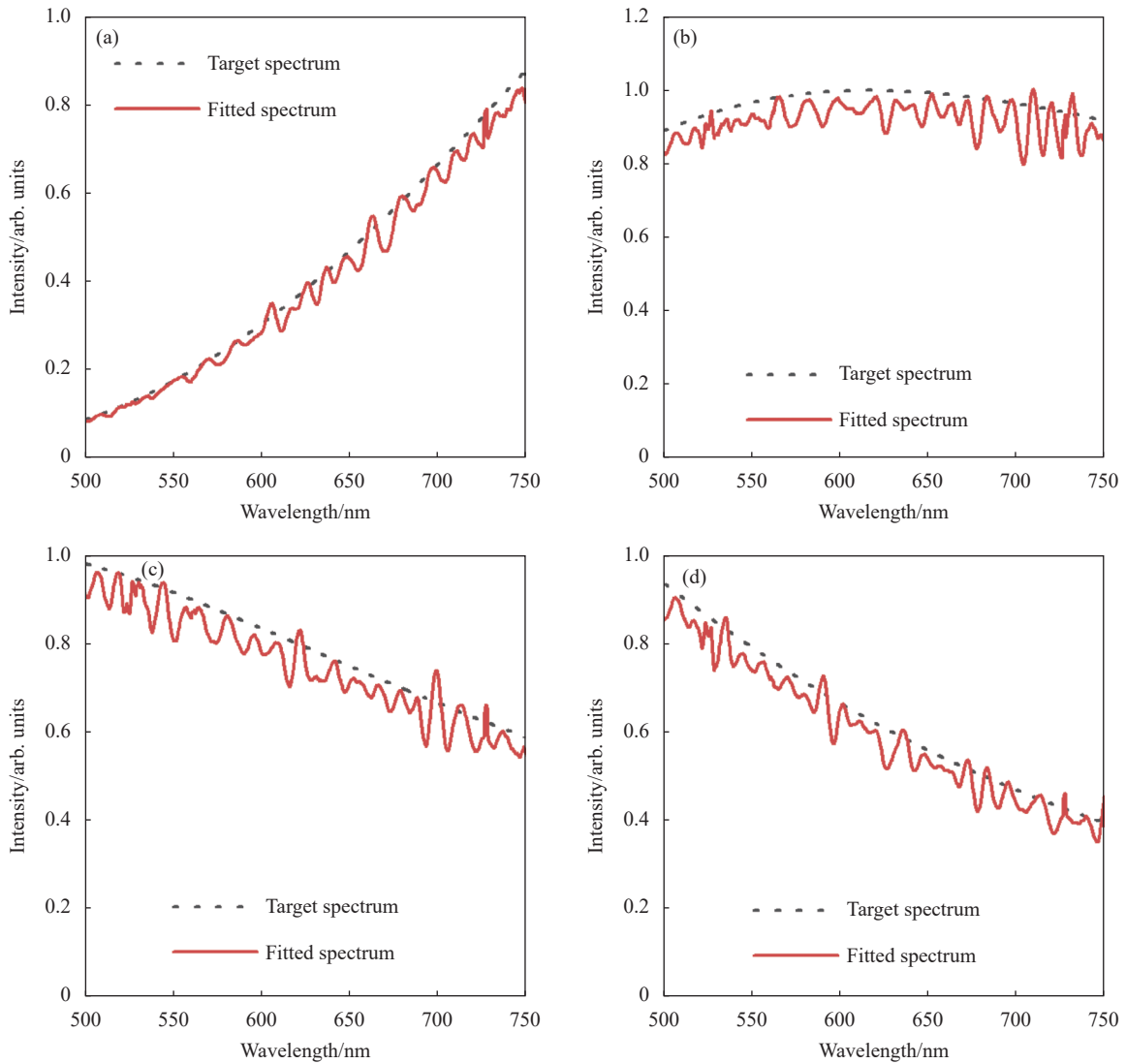


图 7 微镜以 10 列为一组模拟各色温结果。(a) 色温 2550 K; (b) 色温 4766 K; (c) 色温 6516 K; (d) 色温 8910 K

Fig.7 Micromirrors simulate the results of various color temperatures in a group of 10 columns. (a) Color temperature 2550 K; (b) Color temperature 4766 K; (c) Color temperature 6516 K; (d) Color temperature 8910 K

3.2 基于遗传算法反馈控制的光谱匹配算法结果

图 8 所示为光谱分辨率为 5 nm、模拟各色温时的实际测量光谱结果。计算最大匹配误差分别为 4.54%、6.99%、8.41% 和 8.87%。与未采用反馈控制的光谱匹配算法相比,匹配误差较小,若光谱匹配

未能达到设定效果,加入反馈后则继续调整目标光谱,以原目标光谱与上一步模拟光谱和目标光谱的差作为调整后的目标光谱。从结果上来看,遗传算法结合反馈控制是有效的,光谱模拟精度进一步提高。

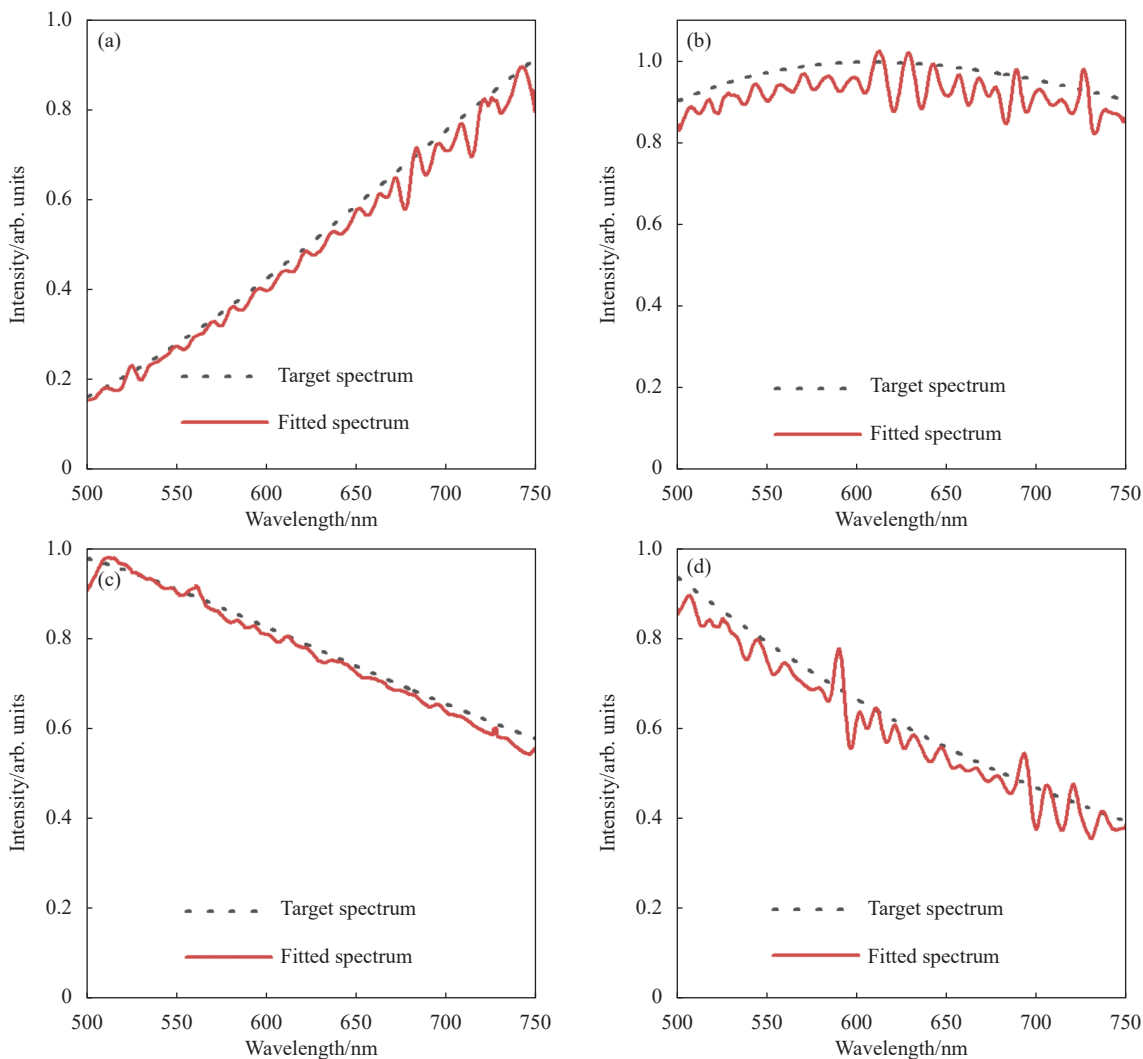


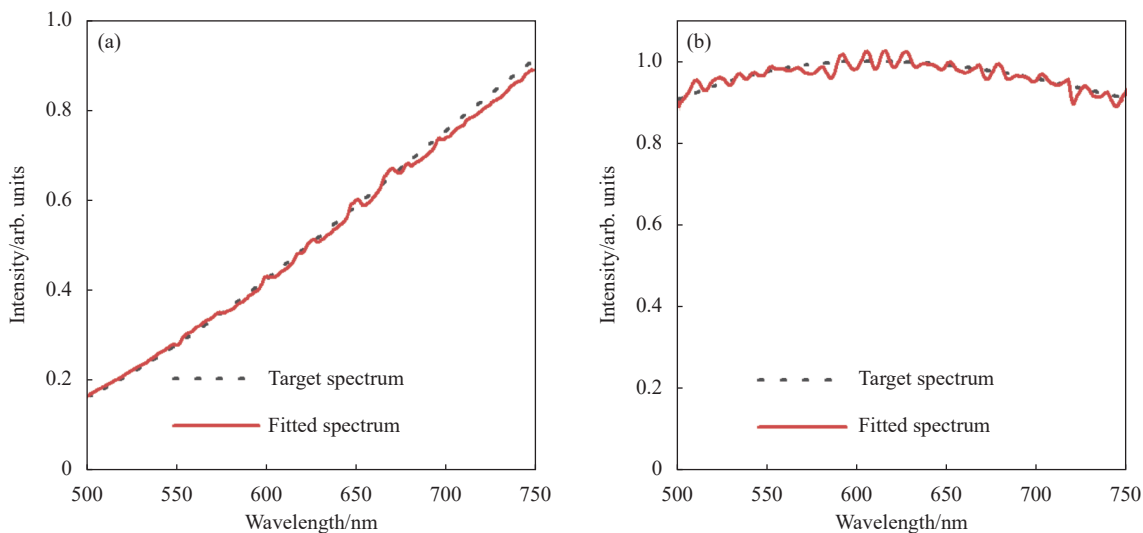
图 8 遗传算法反馈模拟各色温结果。(a) 色温 2250 K; (b) 色温 4766 K; (c) 色温 6576 K; (d) 色温 8910 K

Fig.8 Genetic algorithm feedback simulation results of different color temperatures. (a) Color temperature 2250 K; (b) Color temperature 4766 K; (c) Color temperature 6576 K; (d) Color temperature 8910 K

3.3 二维划分区域的光谱匹配结果

将微镜阵列划分为不同的区域,并用算法模拟微

镜状态以及实验测量光谱分布。图 9 所示为按 $n=30$, $m=30$ 二维划分后的光谱匹配结果。



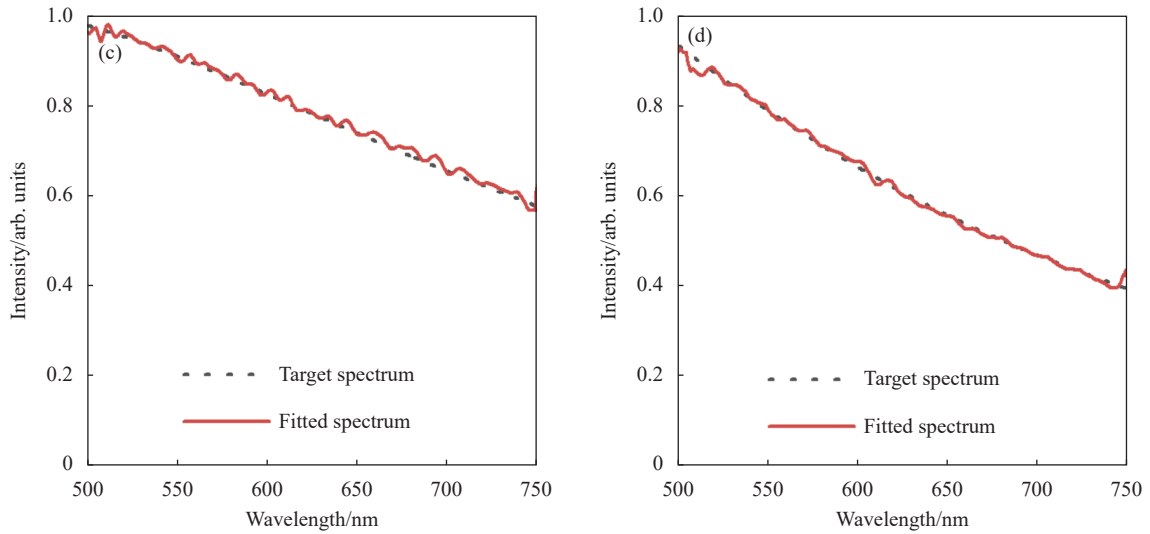


图 9 按波长和能量二维划分区域模拟各色温结果。(a) 色温 2250 K; (b) 色温 4766 K; (c) 色温 6576 K; (d) 色温 8910 K

Fig.9 Simulate result for all color temperatures by division in wavelength and energy two-dimension. (a) Color temperature 2250 K; (b) Color temperature 4766 K; (c) Color temperature 6576 K; (d) Color temperature 8910 K

通过算法的改进,模拟色温为 2250 K 的光谱时,最大匹配误差为 2.01%;模拟色温为 4766 K 的光谱时,最大匹配误差为 3.45%;模拟色温为 6516 K 的光谱时,最大匹配误差为 4.61%;模拟色温为 8910 K 的光谱时,最大匹配误差为 5.13%。

3.4 光谱匹配的精度提升分析

本节的光谱匹配实验根据仿真基础上进行的,根据实验结果改进实验方法。首先,假定色散光源在空间方向分布是均匀的,选择合适的波长分辨率,利用

最小二乘法和遗传算法进行光谱匹配,模拟色温分别为 2550、4766、6576、8910 K 光源光谱曲线,结果显示与目标光谱有较大差异;其次,引入负反馈控制,能较大程度抵抗光源、环境等不稳定因素的干扰;最后,实验分析了色散光在微镜阵列面上的分布,提出了按空间和波长两个方向进行区域划分的方法,采用遗传算法和反馈控制,实验结果证明该方法能有效提高光谱匹配的稳定性。图 10(a) 是这三种方法模拟色温 8910 K 的光源光谱的效果对比图。

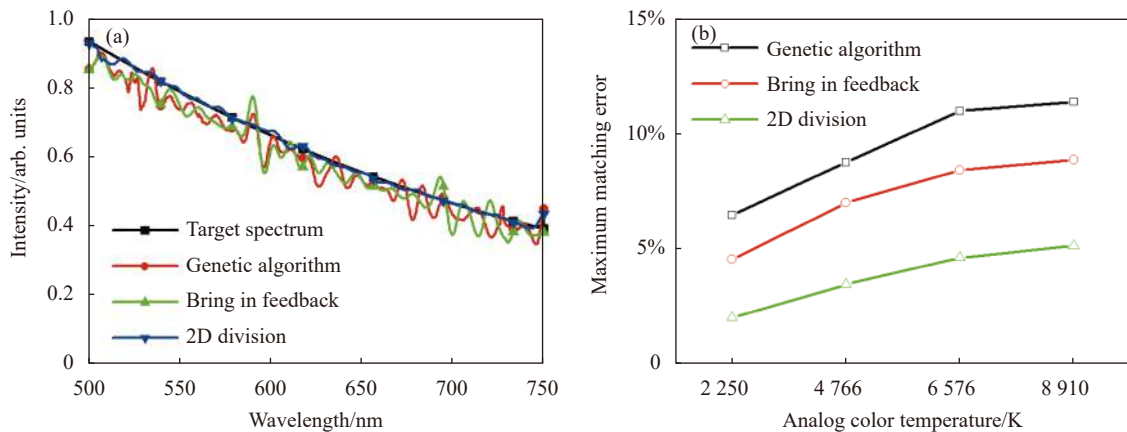


图 10 三种方法模拟色温结果。(a) 色温 8910 K; (b) 模拟各色温

Fig.10 Simulate results for color temperatures by three ways. (a) Color temperature 8910 K; (b) Various color temperatures

基于遗传算法的光谱匹配算法,模拟色温分别为 2550、4766、6576、8910 K 的光源光谱,最大误差

分别为 6.45%、8.74%、10.97% 和 11.37%,引入反馈控制后,最大误差分别为 4.54%、6.99%、8.41% 和 8.87%,

光谱匹配最大误差分别下降了 29.6%、20.0%、23.3% 和 22.0%。采取二维划分区域方案,最大误差分别为 2.01%、3.45%、4.61% 和 5.13%,相较于只按波长方向一维划分的方法,光谱匹配最大误差分别下降了 55.7%、50.6%、45.2%、42.2%。如图 10(b) 所示,从这 3 个方法的数据结果和匹配效果来说,采取二维划分区域方案,算法上使用基于遗传算法的反馈控制能有效提升光谱匹配的精度。

4 结 论

文中针对星模拟器光源的光谱匹配方案,首先假定每一列微镜上的光谱能量是均匀分布的,利用超定方程的最小二乘解作为遗传算法的初始代,利用标定好的元波段光谱进行算法拟合,考虑到实验测量光谱与目标光谱仍有较大差距,引入反馈控制。为了进一步提高光谱匹配精度,对空间方向上的微镜阵列进行划分分析,发现同一波长范围内能量分布极度不均匀,所以从两个维度划分区域,重新标定元区域的光谱,利用带反馈的遗传算法进行模拟。相较于只按波长方向一维划分的方法,光谱匹配最大误差分别下降了 55.7%、50.6%、45.2%、42.2%,光谱匹配精度得到有效提升。当模拟不同色温的光谱曲线时,与卤钨灯色温相差越大,匹配精度越差,但最大匹配误差小于 5.2%。基于以上的分析和实验,在 500~750 nm 波长范围内,光谱调制系统可实现 2 000~9 000 K 色温范围的连续模拟。

高精度星敏感器的测角精度一般为角秒量级,当星模拟器光源与恒星等相同、但色温不匹配会对星敏感器的测量精度产生较大影响。课题组前期仿真分析计算得出^[1],当恒星色温分别为 2 550、3 490、4 766、6 516、8 910、31 054 K 时,星模拟器光源的色温与恒星目标色温不匹配所引入的测角误差最高可达 0.367",与高精度星敏感器的测量误差相较占比较大。因此开展星模拟器光源的光谱匹配精度提升研究,旨在对该类色温匹配误差进行补偿,达到高精度星敏感器的定标精度要求。

影响该方法最终光谱拟合精度的因素主要包括卤钨灯光源光谱的稳定性、背景光环境噪声干扰及光

谱仪本底噪声对光谱仪采集数据的准确性、DMD 波长维和能量维分块划分的粗细程度。3 小节已阐述系统设计针对前两种影响因素的应对方案。DMD 波长维和能量维划分越细,其理论光谱拟合精度越高,然而进一步划分需要求光谱仪具有更高的弱光探测能力,此外将导致待求解变量数量增加,文中所用遗传算法难以快速求解最优解。因此后续为更细地二维划分以提高光谱匹配精度,将研究多变量最优求解算法。

参考文献:

- [1] Zhou Xueji, Lu Zhengliang, Zhang Xiang, et al. Fault diagnosis research on spacecraft attitude sensors based on GRU-AE [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(1): 38-43. (in Chinese)
- [2] Wang Xiaowei, Wang Gangyi, Wei Xinguo, et al. Star spot extraction based on optimal background estimation for star sensor in stray light (network launched) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210780. (in Chinese)
- [3] Shi Yijun, Xu Ziqi. Optical system design of star sensor and stray light suppression technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210015. (in Chinese)
- [4] Zhang Shufen, Jiang Shan, Dong Lei, et al. High accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1368-1377. (in Chinese)
- [5] Ren Pingchuan, Zhou Qi, Jin He, et al. Evaluation method of star sensor dynamic accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210571. (in Chinese)
- [6] Wang Rui, Zhang Zhiliang, Zheng Baidong, et al. Maximum correntropy kalman filter based self calibration of airborne SINS adopting aided by star sensor(network launched) [J]. *Computer Measurement & Control*, 2022(8): 197-203. (in Chinese)
- [7] Gao Jingjing, Bi Yong, Li Jinpeng, et al. Research on calibration system of star sensor thermal drift based on error decoupling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1004004. (in Chinese)
- [8] Xu Honggang, Han Bing, Li Manli, et al. Design and verification of high-precision multi-star simulator with a wide field of view [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1343-1351. (in Chinese)
- [9] Fu Jingyi, Qing Tianxiang, Huang Yunhan, et al. A field-of-view splicing method for the optical system of a star simulator [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1468-1475. (in Chinese)
- [10] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Jiang Huilin, et al. Design of very

- high accuracy star simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1730-1735. (in Chinese)
- [11] Wang Zhiyong, Liu Shishen, Sun Hao, et al. The influence of color temperature mismatch in star simulator on positioning accuracy and magnitude measurement by star sensor[C]//Proc of Cteem, 2021, 2132(1): 012034.
- [12] Wang Wenpeng. Study on technique of star spectral simulator based on digital micromirror device[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] Liu Hongliang, Sun Jingxu, Liu Zexu, et al. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1447-1454. (in Chinese)
- [14] Liu Hongxing, Ren Jianwei, Liu Zexun, et al. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003. (in Chinese)
- [15] Zhao Duo, Zhang Guoyu, Xu Da, et al. A dffraction correction method based on digital mirror device star simulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 54-61. (in Chinese)