

基于光谱可调谐光谱重构方法研究

张 刘, 张家坤, 吕雪莹, 宋洪震, 王文华*

吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130000

摘 要 针对光谱重构领域中光谱数据量较大与重构精度较低的问题, 提出了一种光谱可调谐的光谱重构方法。在此之前国内外相关研究均是在数百条膜系的基础上进行, 并且计算过程比较复杂, 该方法利用 10 条膜系针对不同的单色光源进行实验并进行光谱重构。光谱重构数学模型可以用线性方程组 $AX=B$ 表示, 在实验过程中会受到多种误差源的干扰, 如膜系加工与设计间的误差、探测器量子效率拟合误差、杂散光干扰误差以及灰度值选取的误差等。这些误差源造成了线性方程组变为病态方程, 造成了目标光谱信息解算的不准确。在解算目标光谱信息的过程中, 首先在 400~900 nm 波长范围内利用凸优化算法解出含有误差的目标光谱信息的初始值, 并进行初次拟合, 得出含有误差的光谱曲线。然后利用已知的光谱曲线信息判断目标光谱的有效波长范围, 对目标光谱范围进行伸缩, 在此范围内进行二次局部解算, 得出局部波长内的光谱信息, 然后对局部光谱信息进行局部拟合, 结合初次拟合结果, 得出新的目标光谱拟合曲线, 进一步提高了光谱重构精度, 以此类推, 得出精度较高的目标光谱曲线。针对重构精度的评价指标不仅采用了国内外广泛使用的 ARE, MSE 与 RQE, 还首次提出了一种新的评价光谱重构精度的指标, 即计算目标有效波长范围内每隔 10 nm 的 MSE 值, 若每 10 nm 的 MSE 值小于 0.1, 则认为光谱重构精度达到了 10 nm, 该方法不仅有效避免了在求解出现严重偏离真实值的情况, 还在凸优化解算过程中提供了约束条件, 有利于提高重构精度。实验结果表明该方法在保证 MSE, ARE 与 RQE 高精度的条件下, 每隔 10 nm 的 MSE 最小值达到了 0.002 3。基于光谱可调谐光谱重构方法不仅达到了对目标光谱达到高精度重构的效果, 而且实现了数据降维。此方法为光谱重构领域的工作方向提供了新的思路, 在工程上具有较大的应用价值。

关键词 光谱重构; 可调谐光谱; 凸优化; 数据降维

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)05-1378-07

引 言

高光谱由于光谱信息丰富、高分辨率等特点被广泛应用于各种航天器中, 在天基攻防^[1-3]、环境质量监督^[4]、深空探测^[5]等领域发挥了巨大的作用。近几十年以来, 光谱重构算法作为高光谱技术的核心经历了从无到有, 从低精度到高精度的巨大提升。目前国内外星载光谱仪光谱分辨率在 10 nm 左右^[6]。近 5 年以来, 国内外研究人员针对求解光谱信息提出了许多算法。

2018 年中国科学院光电研究院王英俊等以量子点材料为背景, 详细阐述了光谱仪的工作过程, 将光谱重构的过程离散化为 $AX=B$ 方程组, 并提出了基于最小二乘法与迭代

相结合的求解方法^[7], 取得了较好的重构效果。同年清华大学提出了利用稀疏优化算法^[8]与非负的字典学习算法相结合在 350~750 nm 波长范围内进行目标光谱信息的求解^[9]。2019 年王宗跃等提出了基于粗糙度的自适应图像组的稀疏正则化图像复原方法, 根据全局的粗糙度计算自适应调整正则化的迭代次数, 根据局部的粗糙度调整学习字典所需的样本数, 将自适应调整出的参数应用于基于图像组的稀疏正则化的图像复原中^[10]。针对目标光谱信息的求解方法还有 IOMP 算法^[11]、正则化多项式法^[12]、小波变换^[13]、局部加权法^[14]等。

虽然上述几种方法均取得了较好的重构结果, 但重点均集中在提高重构精度上, 并未考虑到数据量较大, 即使用的膜系数量较多的问题。航天器传感器尺寸大小与计算能力有

收稿日期: 2021-04-21, 修订日期: 2021-06-21

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2016YFB0501000), 科工局国防基础科研重点突破项目(JCKY2018 * * * 036), 国防基础科研计划项目(JCKY2019110), 装备预研领域基金项目(61404140505)资助

作者简介: 张 刘, 1978 年生, 吉林大学仪器科学与电气工程学院教授 e-mail: zhangliu@jlu.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: wangwh900@jlu.edu.cn

限，并且在实际工程应用中，会受到多种误差源的影响，这些因素会造成线性方程组变为病态方程，造成解算的光谱信息误差较大并且速度较慢。所以需要一种使用较少的数据量达到高精度光谱重构的方法。

1 原理分析

光谱重构数学模型如图 1 所示。

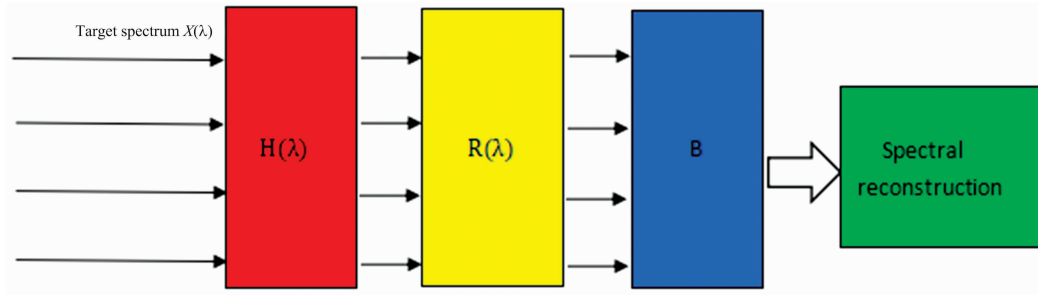


图 1 光谱重构数学模型

Fig. 1 Mathematical model of spectral reconstruction

其中 $X(\lambda)$ 为目标光谱， $H(\lambda)$ 为探测器前端膜系的透过率， $R(\lambda)$ 为探测器量子效率， B 为经不同膜系调制后的透射光强。四者关系如式(1)所示

$$\int_a^b H(\lambda)R(\lambda)X(\lambda)d\lambda = B \tag{1}$$

令 $H(\lambda)R(\lambda)=A(\lambda)$ ，式(1)化简为

$$\int_a^b A(\lambda) X(\lambda)d\lambda = B \tag{2}$$

将式(2)离散化，数学模型可化简为方程组

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中 A 为 $A(\lambda)$ 矩阵， A 的每行代表膜系的数量， A 的列数代表离散波长的数量，并且在给定波长范围的情况下，增加离

散波长的数量，光谱分辨率就越高。 X 为目标光谱在对应波长范围内的均值。 B 为每一种膜系调制后的透射光强即灰度值。在理想情况下，入射光谱的离散波长数量和膜系数量相等，即矩阵 A 是一个方阵，线性方程组(3)有唯一解。但在实际测量过程中，会存在诸多误差，误差源主要有探测器量子效率误差、膜系工艺误差、实验过程中的杂散光干扰等。这些误差使式(3)变为一个病态方程，给解算光谱信息造成极大的困难。

2 实验部分

2.1 膜系设计

膜系的选择至关重要，根据先前的研究结果，矩阵 A 的条件数尽可能的小^[15]，从而保证矩阵拥有更好的鲁棒性。所以在设计膜系的透过率曲线时，曲线形状应该具有较低的相

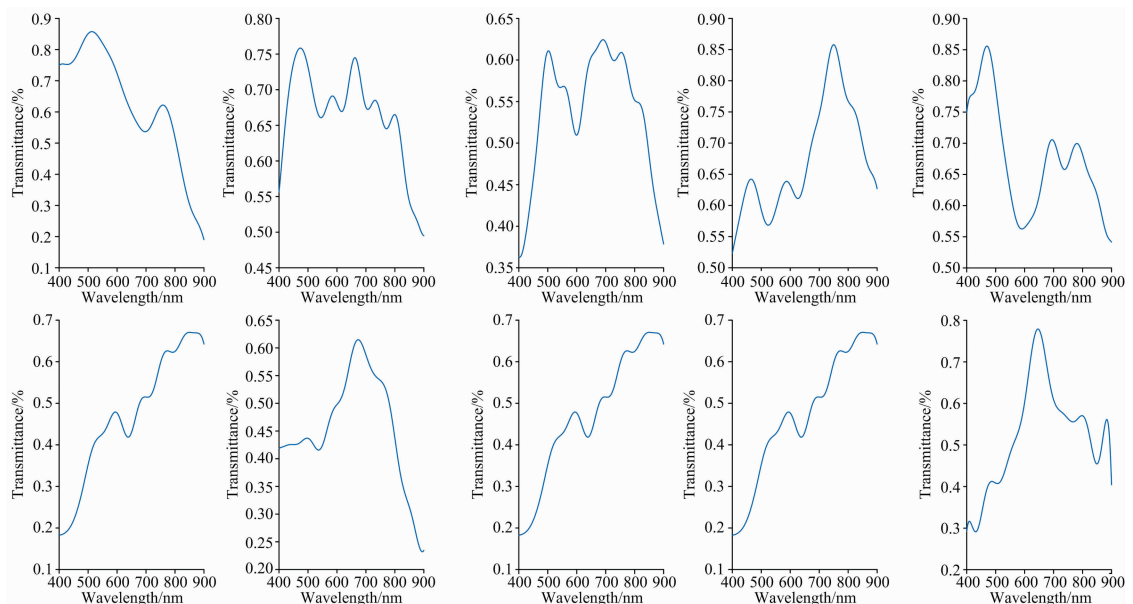


图 2 拟合后的膜系透过率曲线

Fig. 2 Transmittance curve of the film system after fitting

似性。之前国内外的研究均是在上百条的基础上进行仿真，虽然能够取得了较好的仿真结果，但不利于光谱仪的小型化。本文是在 10 条膜系的基础上进行分析，在很大程度上实现了矩阵 A 的稀疏化与数据降维。将基于上述原理设计的膜系进行加工并复测，对多次复测后的膜系透过率曲线进行拟合，得出相应的函数表达式 $A(\lambda)$ 。膜系透过率曲线如图 2 所示。

2.2 探测器选型

可见光探测器采用 CMOS 探测器，型号为 GSENSE5130^[16]，实际工程应用中，为了实现高光谱成像，将面阵 CMOS 探测器开窗划分为多个膜系推扫成像区，每个膜系覆盖多个像元。为了实现高几何高光谱成像，CMOS 探测器与目标区域呈现垂直方向的相对运动，每个开窗区域以相同的行频推扫过同一个目标。以 10 个膜系为例，随着 CMOS 成像探测器与目标的相对运动，10 个膜系陆续输出同一个目标的 10 条图像，这 10 条膜系的光谱透过特性各不相同，所有条带的不同光谱图像数据为光谱重构提供依据。探测器成像模组如图 3 所示，拟合探测器量子效率曲线，如图 4 所示。得出与波长相应的量子效率函数 $R(\lambda)$ 。

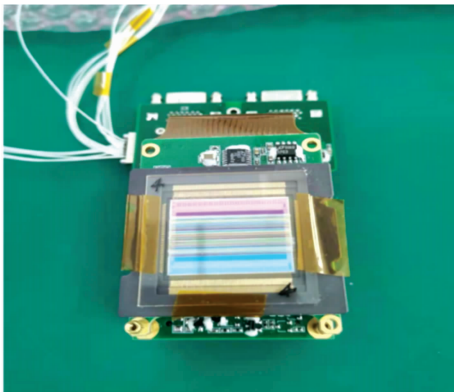


图 3 成像模组

Fig. 3 Imaging module

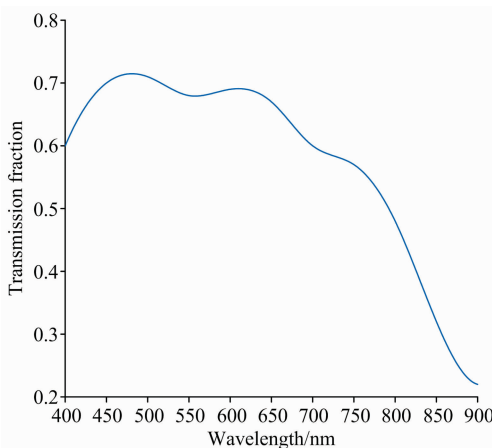


图 4 探测器量子效率曲线

Fig. 4 The quantum efficiency curve of the detector

2.3 单色光源标定

为了更准确验证算法的可靠性以及更好的进行光谱重构

精度评价，需要对实验所用单色光源进行标定。光纤光谱仪具有测量精度高，测量速度快的优点被广泛应用于光谱测量中。

标定光谱如图 5 所示。

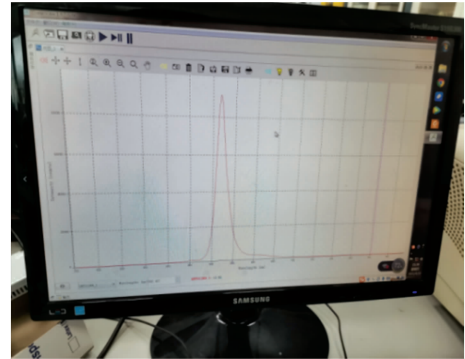


图 5 单色光源标定

Fig. 5 Monochromatic light source calibration

2.4 获取灰度值

利用蓝光与绿光进行实验，灰度图如图 6 与图 7 所示。

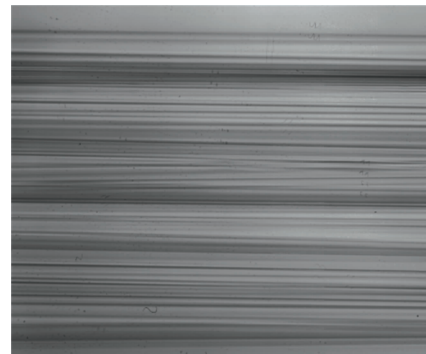


图 6 蓝色光源灰度图像

Fig. 6 Grayscale image of blue light source

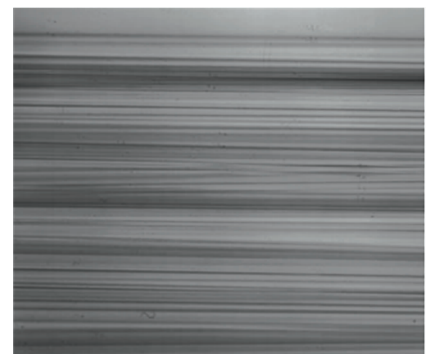


图 7 绿色光源灰度图像

Fig. 7 Grayscale image of green light source

理想灰度图中每一条膜系各部分的灰度值都应相同，但由于各种误差的存在，使得每个膜系各部分灰度值会有差异，这也是方程组(3)奇异性较大的主要原因之一。为了尽可能地获取准确的灰度值，取每一个条带的平均值作为该膜系的灰度值。

3 结果与讨论

将 $A(\lambda)$ 在 400~900 nm 波长范围内整体进行积分, 求出 10 个整体均值 $mean_i$

$$mean_i = \frac{B_i}{\int_{400}^{900} A(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

将 $A(\lambda)$ 在 400~900 nm 范围内根据波长均分 10 份, 可得 10×10 矩阵 A 。在解算光谱信息的方法上有多种选择, 考虑到计算方法需要同时满足普遍性与较高的精度, 本实验采用凸优化的方式来求解, 并建立数量较少且有效的约束, 达到工程化的目的。凸优化表达式及约束范围如式(5)

$$\begin{cases} \min \text{imize } \| A \cdot X - B \|_2 \\ \text{s. t. } | A_i \cdot X - B_i | \leq K \quad i = 1, 2, \dots, 10 \\ \left| \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_{10})}{n} \times m - \text{mon} \right| < T \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, mon 为 10 个 $mean_i$ 的均值。 n 为总积分波长范围, m 为每段波长对应波长范围, m 与 n 有如式(6)关系

$$n = 10 \times m \quad (6)$$

由于初次凸优化波长为 400~900 nm, 故 $n=500$, $m=50$ 。

为了更好地评价光谱重构结果, 需将求出的 10 个 X 值进行归一化, 归一化公式如式(7)

$$x_j = \frac{X_j}{X_{\max}} \quad j = 1, 2, \dots, 10 \quad (7)$$

对归一化后的值进行拟合, 每个值代表的是每段波长范围内归一化光强的均值, 将该均值作为对应波长内的中心波长的灰度值, 画出含有误差的光谱曲线。但此时光谱重构并未达到最好拟合效果, 但已知目标光谱的初步信息, 将均值为零或接近于零所对应的区间进行舍弃, 对光强较大的波长区间进行进一步的局部求解, 获得更加准确的光谱信息, 在局部求解过程中, 要始终保证 A 为方阵。解算出局部信息后, 结合初次计算的数值, 得出精度较高的目标光谱曲线。

以蓝光与绿光为例, 进行实验并进行光谱重构, 蓝光重构如图 8—图 10 所示。

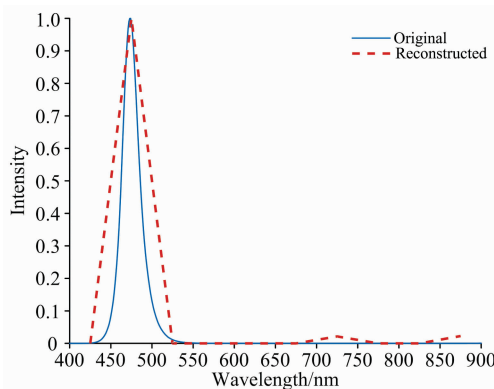


图 8 初次求解的蓝光光谱曲线

Fig. 8 Blue spectrum curve of the first solution

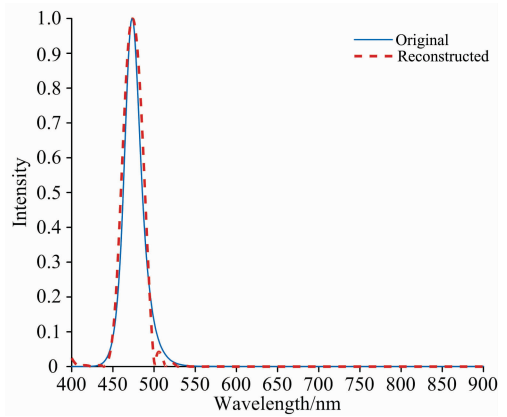


图 9 经过光谱调谐后的蓝光光谱重构曲线

Fig. 9 Blue spectrum reconstruction curve after spectral tuning

由图 8 可知, 蓝光的主要波长范围在 400~550 nm, 所以在此波长范围内对 $A(\lambda)$ 进行均等分割, 间隔为 15 nm。

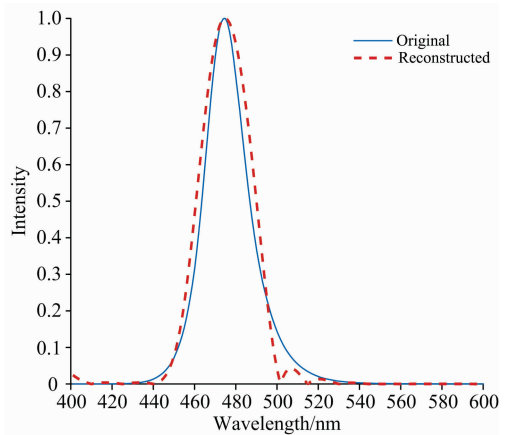


图 10 400~600 nm 蓝光光谱重构曲线

Fig. 10 400~600 nm blue light spectrum curve

绿光重构结果如图 11—图 13 所示。

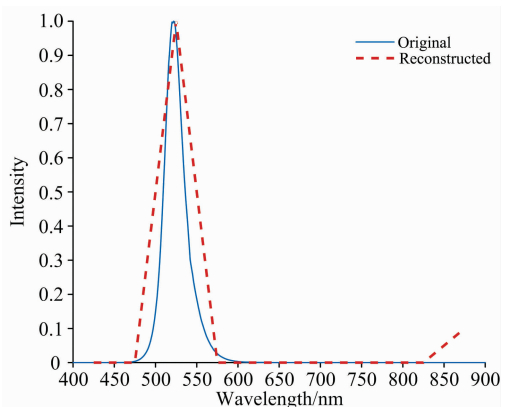


图 11 初次求解的绿光光谱曲线

Fig. 11 Green spectrum curve of the first solution

由图 11 可知, 绿光的主要波长范围在 450~600 nm, 所

以此波长范围内对 $A(\lambda)$ 进行均等分割, 间隔为 15 nm。

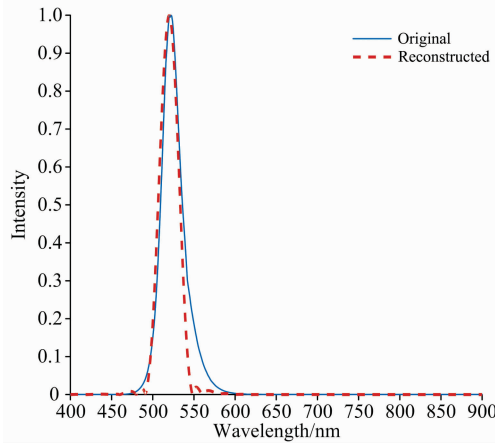


图 12 经过光谱调谐后的绿光光谱重构曲线
Fig. 12 Green light spectrum reconstruction curve after spectral tuning

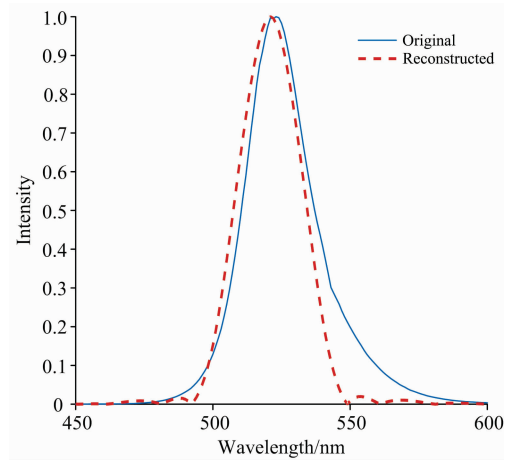


图 13 450~600 nm 绿光光谱重构曲线
Fig. 13 450~600 nm green light spectrum reconstruction curve

目前国内外对于光谱重构精度评价主要有三种, 分别为 ARE, MSE 与 RQE。

$$ARE = \frac{\|\varphi(\lambda_k) - \phi(\lambda_k)\|_2^2}{\|\varphi(\lambda_k)\|_2^2} \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n_\lambda} (\varphi(\lambda_k) - \phi(\lambda_k))^2 \quad (9)$$

$$RQE = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n_\lambda} (\varphi(\lambda_k) - \phi(\lambda_k))^2}}{\sum \phi(\lambda)} \quad (10)$$

其中 $\phi(\lambda_k)$ 为标准光谱值, $\varphi(\lambda_k)$ 为重建光谱值。

表 1 重构精度评价

Table 1 Evaluation of reconstruction accuracy

	MSE	ARE	RQE
蓝光	0.019 7	0.055 6	0.031 6
绿光	0.021 5	0.052 3	0.037 7

由于选取膜系数数量仅为 10 条, 远小于 200 条, 求解出的数值可能会出现跳跃的情况, 所以单独计算有效波长范围内总的 MSE 与 ARE 并不能准确地反映出光谱重构的精度, 还需计算每 10 nm 的 MSE 的均值, 作为光谱重构分辨率的评价标准。

表 2 蓝光每隔 10 nm MSE 值

Table 2 MSE value of blue light every 10 nm

	450~460 nm	460~470 nm	470~480 nm	480~490 nm	490~500 nm
第一次求解	0.864 3	0.309 8	0.007 2	0.077 5	0.156 6
第二次求解	0.011 8	0.032 6	0.011 2	0.043 1	0.009 3

表 3 绿光每隔 10 nm MSE 值

Table 3 Green light MSE value every 10 nm

	500~510 nm	510~520 nm	520~530 nm	530~540 nm	540~550 nm
第一次求解	0.270 1	0.055 5	0.006 6	0.121 1	0.212 7
第二次求解	0.014 2	0.010 8	0.002 3	0.017 1	0.042 0

4 结 论

针对膜系设计原理、膜系复测结果、探测器选型做了详细的阐述。并且利用了基于可调谐的光谱重构方法进行数据处理。重构结果表明: (1) 进一步验证了光谱重构技术原理可行性和正确性。(2) 利用 10 条膜系可以进行高精度的光谱

重构, 实现了数据降维。(3) 重构结果中 ARE 值小于 0.022、MSE 值小于 0.06、RQE 值小于 0.04。(4) 实验分析了每 10 nm 的 MSE 值, 均小于 0.1。保证了重构过程中不会出现跳跃值的情况。基于可调谐的光谱重构技术为相关研究人员的深入研究提供了新的思路与方向, 并有效地解决了工程中的实际问题。

References

- [1] LIU Jia, ZHANG Heng, HE Man, et al(刘 佳, 张 恒, 何 漫, 等). Aerospace Electronic Warfare(航天电子对抗), 2019, 35(4): 60.
- [2] HU Yun-peng, LI Ke-bo, CHEN Lei(胡云鹏, 黎克波, 陈 磊). SCIENTIA SINICA Technologica(中国科学: 技术科学), 2021, 51(4): 424.
- [3] NIU Zhao-dong, WANG Lin, DUAN Yu, et al(牛照东, 汪 琳, 段 宇, 等). Chinese Optics(中国光学), 2017, 10(3): 310.
- [4] FAN Bin, CHEN Xu, LI Bi-cen, et al(范 斌, 陈 旭, 李碧岑, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2017, 46(1): 0102002.
- [5] FAN Bin, LIU Yan-li, ZHAO Hai-bo, et al(范 斌, 刘彦丽, 赵海博, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2020, 49(5): 20201005.
- [6] ZHANG Chun-min, MU Ting-kui, YAN Ting-yu, et al(张淳民, 穆廷魁, 颜廷昱, 等). Spacecraft Recovery and Remote Sensing(航天返回与遥感), 2018, 39(3): 104.
- [7] WANG Ying-jun, ZHOU Jin-song, WEI Li-dong, et al(王英俊, 周锦松, 魏立冬, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(3): 869.
- [8] Zhang S, Dong Y, Fu H, et al. Sensors, 2018, 18: 644.
- [9] TAN Cui-mei, XU Ting-fa, MA Xu, et al(谭翠媚, 许廷发, 马 旭, 等). Chinese Optics(中国光学), 2018, 11(6): 949.
- [10] WANG Zong-yue, XIA Qi-ming, CAI Guo-rong, et al(王宗跃, 夏启明, 蔡国榕, 等). Optical and Precision Engineering(光学精密工程), 2019, 27(12): 2713.
- [11] LIU Huan-lin, WANG Chu-jun, CHEN Yong(刘焕淋, 王储君, 陈 勇). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2018, 45(3): 0306004.
- [12] WANG Ke, WANG Hui-qin, LONG Yan-qun, et al(王 可, 王慧琴, 龙艳群). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2018, 55(5): 053004.
- [13] XUE Qing-sheng, TIAN Zhong-tian, HAO Xi-jie, et al(薛庆生, 田中天, 郝锡杰, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2020, 40(17): 1730001.
- [14] HUANG Wei, WU Fei-yang, SUN Le(黄 伟, 伍飞扬, 孙 乐). Journal of Applied Sciences(应用科学学报), 2020, 38(6): 890.
- [15] ZHANG Ming-qi, CAO Guo, CHEN Qiang, et al(张茗琪, 曹 国, 陈 强, 等). Computer Science(计算机科学), 2019, 46(1): 86.
- [16] FAN Xing-hao, LIU Chun-yu, JIN Guang, et al(樊星皓, 刘春雨, 金 光, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2021, 29(3): 463.

Research on Tunable Spectrum Reconstruction

ZHANG Liu, ZHANG Jia-kun, LÜ Xue-ying, SONG Hong-zhen, WANG Wen-hua*

College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130000, China

Abstract Aiming at the problem of a large amount of spectral data and low reconstruction accuracy in the field of spectral reconstruction, a spectral tunable spectral reconstruction method is proposed. Prior to this, domestic and foreign-related research were carried out based on hundreds of film systems, and the calculation process was relatively complicated. This method uses 10 film systems to conduct experiments against different monochromatic light sources and perform the spectral reconstruction. Linear equations can express the mathematical model of spectral reconstruction. During the experiment, it will be interfered with by various error sources, such as the error between film processing and design, the fitting error of the detector quantum efficiency, the stray light interference error, the error of grey value selection, etc. These error sources cause the linear equations to become ill-conditioned equations, resulting in an inaccurate solution of the target spectrum information. In calculating the target spectral information, firstly, the convex optimization algorithm is used to solve the initial value of the target spectral information with errors in the wavelength range of 400~900 nm, and the initial fitting is performed to obtain the spectral curve with errors. Then use the known spectral curve information to determine the effective wavelength range of the target spectrum, expand and contract the target spectral range, perform a secondary local calculation in this range, and obtain the spectral information within the local wavelength. Then the local spectral information is locally fitted, combined with the initial fitting results, and a new target spectral fitting curve is obtained, which further improves the accuracy of the spectral reconstruction and obtains a higher-precision target spectral curve. The evaluation index for reconstruction accuracy not only

adopts the widely used ARE, MSE and RQE at home and abroad but also proposes a new index for evaluating the accuracy of spectral reconstruction for the first time, which is to calculate the MSE value every 10 nm within the effective wavelength range of the target. If the MSE value per 10 nm is less than 0.1, the spectrum reconstruction accuracy is considered to have reached 10 nm. This method effectively avoids the serious deviation from the true value in the solution and provides constraint conditions during the convex optimization solution process, which is beneficial to improving the reconstruction accuracy. Experimental results show that this method can achieve a minimum MSE of 0.0023 every 10 nm under the condition of ensuring high accuracy of MSE, ARE and RQE. The tunable spectrum reconstruction method based on spectrum achieves the effect of high-precision reconstruction of the target spectrum and achieves data dimensionality reduction. This method provides a new idea for the work direction in spectral reconstruction and has great application value in engineering.

Keywords Spectral reconstruction; Tuning spectrum; Convex optimization; Data dimensionality reduction

(Received Apr. 21, 2021; accepted Jun. 21, 2021)

* Corresponding author

(上接 1360 页)

会务组联系方式

毛慰明(会议稿件)

云南师范大学物理与电子信息学院

电话: 0871-65941168; 13529401604

e-mail: maoweiming3@126.com

欧全宏(会议咨询)

云南师范大学物理与电子信息学院

电话: 0871-65941168; 15908891183

e-mail: ouquanhong@163.com

王香凤(厂商联络)

北京师范大学分析测试中心

电话: 010-58807981; 13520034335

Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

刘文广(厂商联络)

云南师范大学物理与电子信息学院

电话: 0871-65941168; 15987101479

e-mail: liuwgkm@qq.com

支持媒体

会议官网: 光谱网: <http://www.sinospectroscopy.org.cn>(会议各类信息以光谱网发布为准)

主办单位:

中国光学学会

中国化学会

中国光学学会光谱专业委员会

承办单位:

云南师范大学物理与电子信息学院

第 22 届全国分子光谱学学术会议暨 2022 年光谱年会组委会

2021 年 12 月 28 日