

前向临边大气探测成像光谱仪光谱杂散光修正

李占峰*, 王淑荣, 黄煜, 薛庆生

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 基于目前常用的光谱杂散光测试与修正方法, 详细介绍了光谱杂散光矩阵修正法的核心内容——仪器的光谱杂散光矩阵的标定。在实验室搭建了杂散光矩阵测量装置, 标定了前向临边成像光谱仪初样机的杂散光矩阵, 在外场实验中验证了基于仪器杂散光矩阵的杂散光修正方法的精度。

关键词 大气光学; 杂散光修正; 杂散光矩阵; 光谱杂散光; 成像光谱仪; 遥感定量化

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1101001

Spectral Stray Light Correction of Forward Limb Imaging Spectrometer for Atmospheric Exploration

Li Zhanfeng*, Wang Shurong, Huang Yu, Xue Qingsheng

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Based on a brief introduction to the current methods of stray light testing and correction, the spectral stray light matrix calibration, which is the core content of the spectral stray light matrix correction method, is introduced in detail in this paper. Then, to calibrate the stray light matrix of the prototype of the forward limb imaging spectrometer, we set up a stray light matrix measuring device in the laboratory. Finally, the accuracy of the stray light correction method based on the stray light matrix of the instrument is verified in an external field experiment.

Key words atmospheric optics; stray light correction; stray light matrix; spectral stray light; imaging spectrometer; remote sensing quantification

OCIS codes 010.0280; 120.6200; 150.1488

1 引 言

成像光谱仪能实现对观测目标空间信息和光谱信息的同时探测, 近年来被广泛应用于大气遥感、地物光谱分布及识别以及生物医学等领域。而杂散光水平是衡量成像光谱仪探测精度的重要指标, 尤其在定量化研究中, 杂散光已成为限制成像光谱仪探测精度的关键因素之一^[1-3]。

杂散光一般包括空间杂散光和光谱杂散光, 在成像光谱仪设计和加工过程中主要考虑光谱杂散光, 光谱杂散光指到达像面的工作波段以外的光信号。目前主要通过在设计 and 加工阶段设置消杂光光阑、涂覆消杂光黑漆以及提高光学元件表

面的反射率和透射率来降低成像光谱仪的杂散光水平, 但这些措施仅能降低杂散光水平, 不能从根本上消除杂散光。测量光谱仪器光谱杂散光水平的方法通常有截止滤光片法、光谱法、级数透过率法、卷积计算法和谱杂散光系数法等^[4-8], 但这些方法只能评估待测光谱仪器在某一波长或某一段内的光谱杂散光水平, 不能修正测量结果。目前应用广泛且成熟的光谱杂散光测量与校正方法是矩阵修正法^[9]。

本文介绍了杂散光矩阵修正法, 并结合前向临边成像光谱仪初样机的特点, 在实验室搭建了杂散光矩阵测量装置, 利用该装置标定了前向临边成像光谱仪初样机的杂散光矩阵, 并在外场实验中验

收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-06-21; 录用日期: 2018-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(41575023)、国家重点研发计划(2016YFB0500300, 2016YFB0500301, 2016YFB0500302, 2016YFB0500303, 2016YFB0500304)

* E-mail: lizhanfeng115@163.com

证了前向临边成像光谱仪初样机杂散光修正结果的精度。

2 光谱杂散光矩阵修正法简介

光谱杂散光矩阵修正法最早由 Zong 等^[10]提出。利用一系列单色光信号均匀照明仪器,在仪器对单色光的响应过程中区别出有效信号(光谱带宽内的响应)和杂散光信号(光谱带宽外的响应),利用杂散光信号与有效信号的比例建立了杂散光分布矩阵。具体算法中采用光谱线扩散函数 $f_{LSF,i,j}$,来表示入射光为波长 λ_j 的单色光(理论响应位置为 J 像元)时,仪器在 i 像元处的响应。利用光谱线扩散函数可定义杂散光分布矩阵 \mathbf{D} 为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \cdots & d_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $d_{i,j}$ 为杂散光分布矩阵元素,其表达式为

$$\begin{cases} d_{i,j} = \frac{f_{LSF,i,j}}{\sum_{i \in U_{IB}} f_{LSF,i,j}}, & i \notin U_{IB} \\ d_{i,j} = 0, & i \in U_{IB} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: U_{IB} 表示有效光谱带宽内,即有效带宽内像元的信号为有效光谱信号,有效带宽外像元的信号为光谱杂散光信号。

由上述定义可知,光谱仪器的光谱杂散光 \mathbf{Y}_S 与有效信号 \mathbf{Y}_{IB} 之间的关系可表达为

$$\mathbf{Y}_S = \mathbf{D}\mathbf{Y}_{IB}, \quad (3)$$

光谱仪器探测时输出总信号 \mathbf{Y} 为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{IB} + \mathbf{Y}_S = (\mathbf{E} + \mathbf{D})\mathbf{Y}_{IB}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{E} 为单位矩阵,根据矩阵运算可得有效信号 \mathbf{Y}_{IB} 为

$$\mathbf{Y}_{IB} = (\mathbf{E} + \mathbf{D})^{-1}\mathbf{Y}. \quad (5)$$

根据(1)~(5)式可知,当杂散光分布矩阵 \mathbf{D} 已知时,即可由光谱仪器的探测信号直接计算出修正光谱杂散光后的有效信号。由于杂散光分布矩阵是光谱仪器的固有特性,仪器光谱辐射性能未发生变化时,杂散光分布矩阵也固定不变。综上所述,光谱杂散光矩阵修正法的核心是标定出仪器的杂散光分布矩阵。

3 前向临边成像光谱仪

前向临边成像光谱仪是一台小型化棱镜色散型成像光谱仪,探测目标为地球临边高度为 10~

60 km 的大气光谱辐射数据,以此获取高空间时间覆盖和高垂直分辨率的图像和数据信息,获取整层大气密度、臭氧分布和气溶胶等微量成分的垂直结构及三维分布信息。前向临边成像光谱仪工作波段为 290~1000 nm,光谱分辨率为 1~23 nm,地球临边高度方向的空间分辨率优于 3 km,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 前向临边成像光谱仪性能参数表

Table 1 Parameters of forward limb imaging spectrometer

Parameter	Value
Probe limb height	10~60 km
Spectral range	290~1000 nm
Spectral resolution	1.2 nm@290 nm~23 nm@1000 nm
Field of view	$2.4^\circ \times 0.02^\circ$
F number	6.92
Entrance pupil diameter	10 mm
Dynamic range	$>10^6$
Stray light coefficient	3%@600 nm
Spatial resolution	3 km
Weight	11.8 kg
Size	393 mm×328 mm×174 mm

前向临边成像光谱仪初样机光谱定标时发现光谱串扰,最大光谱串扰在 740 nm 处,仪器对 740 nm 单色光的响应图像如图 1 所示,对空间维数求和得到光谱响应曲线,如图 2 未经杂光修正曲线分布所示,图中 ADU 为 CCD 输出电子数的数字量化信号的单位。

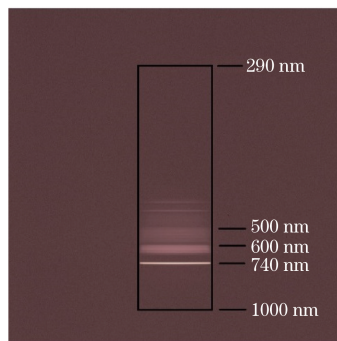


图 1 740 nm 单色光的响应图像

Fig. 1 Image of 740 nm monochromatic light

经实验验证,上述光谱杂散光主要来源于狭缝处的滤光片的多次反射,为了降低大气光谱响应信号的动态范围以及保护狭缝免受污染,在狭缝处设置了一个随波长变化的滤光片,仪器的整体光路图如图 3 所示,滤光片透过率曲线如图 4 所示,由于滤

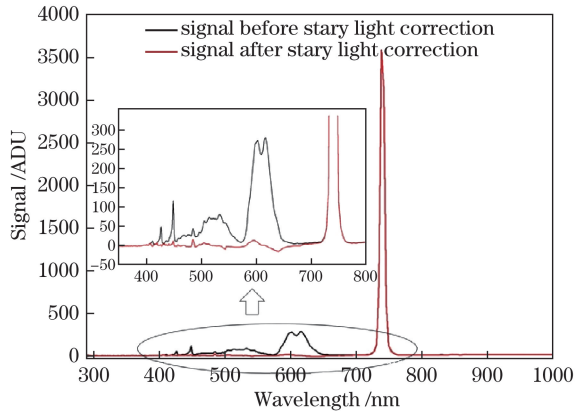


图 2 740 nm 单色光的杂散光修正前后的响应曲线

Fig. 2 Response curve of 740 nm monochromatic light before and after stray light correction

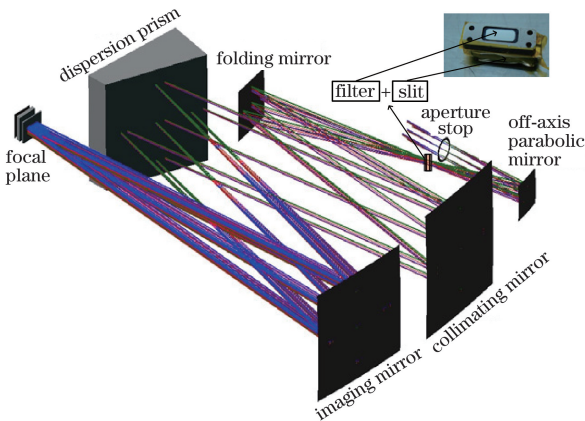


图 3 前向临边成像光谱仪光路图

Fig. 3 Optical layout of forward limb imaging spectrometer

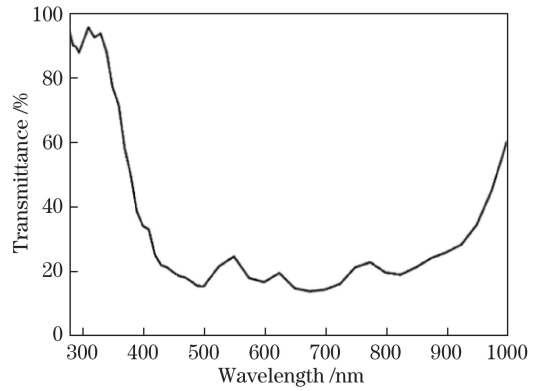


图 4 滤光片透过率曲线

Fig. 4 Transmittance curve of filter

光片在 500~800 nm 波段的透过率较低,多次反射能量较强,滤光片平板的多次反射在像面不同光谱维位置形成多个狭缝像,引入较强的光谱杂散光。为了降低光谱杂散光对仪器测量结果的影响,利用实验室搭建的杂散光矩阵测量装置对前向临边成像光谱仪初样机的光谱杂散光矩阵进行了标定。

4 杂散光矩阵标定

图 5 所示为光谱杂散光矩阵测量装置。该装置主要由高精度单色仪系统和积分球系统组成,单色仪提供高亮度的单色光谱,积分球保证单色光均匀照明待测成像光谱仪。

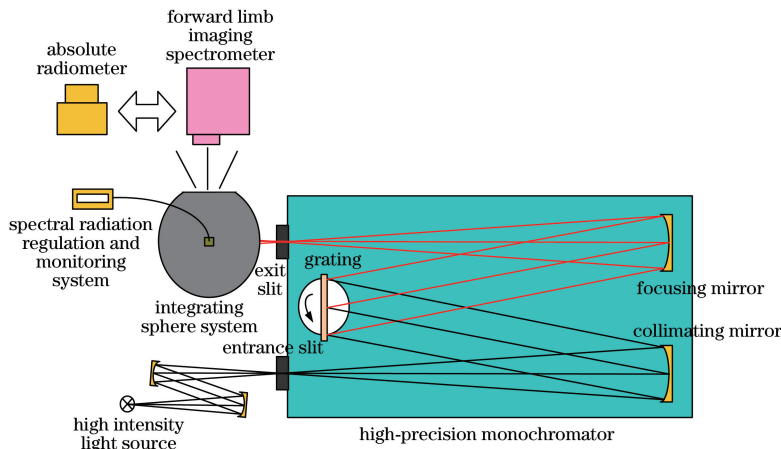


图 5 光谱杂散光矩阵测量装置

Fig. 5 Calibrated device on spectral stray light matrix

利用上述装置输出一系列等光谱间隔(需小于待测仪器的光谱分辨率)的单色均匀光,依次进入并充满前向临边成像光谱仪的视场,记录仪器探测器像元 (x, y) 处的响应信号 $S(x, y, \lambda_i)$,其中 i 表示杂散光测试装置输出一系列单色光的序号,值为 1,

$2, 3, \dots, n$ (覆盖待测仪器的光谱范围)。 x 和 y 分别为成像光谱仪的像元行序号和列序号,分别代表不同的视场位置和光谱位置。与滤光片多次反射产生杂散光的入射角度相比,前向临边成像光谱仪的空间视场角较小,并且经实验验证,不同视场的光谱

杂散光矩阵一致。因此,为了降低信号起伏的影响,对所有空间像元 x 进行合并处理,仪器响应信号写为 $S(y, \lambda_i)$ 。

同时利用绝对辐射计标定出杂散光测试装置输出的该系列单色光的光谱能量分布 $L(\lambda_i)$,结合仪器响应信号可得前向临边成像光谱仪的光谱响应函数

$$R(y, \lambda_i) = \frac{S(y, \lambda_i)}{L(\lambda_i)} \quad (6)$$

对于每一个入射单色光 λ_i ,对 $R(y, \lambda_i)$ 与 y 的关系进行拟合,得到响应最大像元列序号 λ_i 和响应带宽 $\Delta\lambda_i$ 。以对应仪器光谱带宽内响应之和为基准,对带宽外的光谱响应函数进行归一化,即得到杂散光分布矩阵元素

$$d_{y,i} = \begin{cases} \frac{R(y, \lambda_i)}{S_{\text{sum}_i}}, & y \notin [y_i - \Delta y_i, y_i + \Delta y_i], \\ 0, & y \in [y_i - \Delta y_i, y_i + \Delta y_i] \end{cases} \quad (7)$$

式中:在有效光谱带宽对应像元区间 $[y_i - \Delta y_i, y_i + \Delta y_i]$ 之外的像元处信号为光谱杂散光信号; S_{sum_i} 为有效带宽内像元信号之和,即有效光谱信号之和

$$S_{\text{sum}_i} = \sum_{y=y_i-\Delta y_i}^{y=y_i+\Delta y_i} R(y, \lambda_i) \quad (8)$$

由(8)式得到的前向临边成像光谱仪的光谱杂散光矩阵如图 6 所示。500~800 nm 的单色光在仪器 300~700 nm 处产生了一定的光谱串扰,形成光谱杂散光。利用定标得到的仪器光谱杂散光矩阵对上述 740 nm 单色光响应图像中的光谱杂散光进行修正,修正结果如图 2 中杂散光修正后的曲线分布所示。

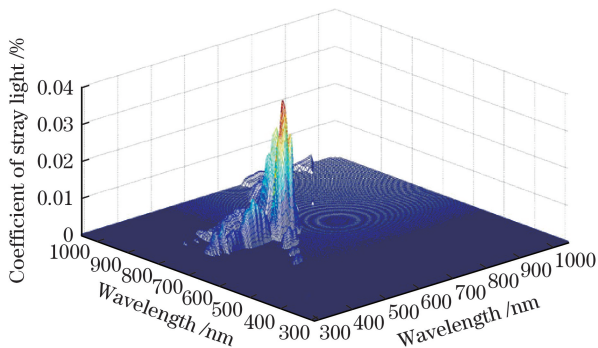


图 6 前向临边成像光谱仪的光谱杂散光矩阵分布图
Fig. 6 Distribution of spectral stray light matrix of forward limb imaging spectrometer

杂散光修正后,740 nm 单色光在原光谱杂散光

影响波长处的信号并未完全为 0,即存在一定的残余光谱杂散光,影响残余光谱杂散光的主要因素是仪器探测器的噪声水平,由于某一波长处的杂散光是其他所有波长在该波长的总和,一个很小的噪声累加起来会导致较大的杂光修正误差,因此需在计算杂散光分布矩阵元素时设定阈值,大于阈值的元素认为是真实的杂光信号,小于阈值的元素认为是噪声,将该元素值设为 0。将前向临边成像光谱仪的阈值设为 0.001,因为仪器探测器的噪声水平约为 2 ADU,测定杂光矩阵时,不同单色光仪器响应最大信号范围为 3000~15000 ADU,所以噪声与信号比值小于 0.0006,留部分余量,设为 0.001。

5 杂散光修正算法验证

为了验证前向临边成像光谱仪杂散光修正效果,开展了外场大气散射光谱观测实验,如图 7 所示。实验以德国 Instrument Systems GmbH 公司的高精度 CAS 140CT 光谱仪为基准,其光谱范围为 200~800 nm,光谱分辨率为 2.7 nm,杂光系数优于 10^{-4} 。绝对辐射精度为 3%,相对辐射精度为 0.5%。为了消除绝对辐射定标的影响,两台仪器采用相同的标准光源(NIST 标准卤钨灯 F661)进行光谱响应度标定,然后同时观测天空同一区域。以 CAS 140CT 光谱仪计算得到的目标区域大气散射光谱辐射亮度为参考光谱,与前向临边成像光谱仪经过上述杂散光修正与不经杂散光修正得到的目标光谱辐射亮度进行比对,结果如图 8 所示。



图 7 前向临边成像光谱仪外场实验装置图

Fig. 7 Field test device of forward limb imaging spectrometer

图 8 为利用实验室标定得到的杂散光矩阵进行杂散光修正前后的对比,前向临边成像光谱仪的测量结果与 CAS 140CT 光谱仪测量结果的一致性误差由最大 20%降低到了 3%以内,有效减小了杂散光对前向临边成像光谱仪测量结果的影响,提高了测量精度。

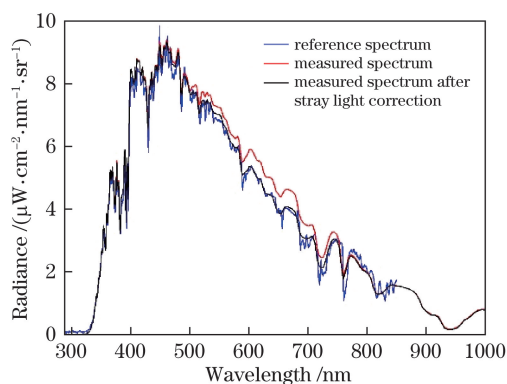


图 8 杂光修正前后测得大气光谱辐亮度分布

Fig. 8 Measured atmospheric radiance before and after stray light correction

6 结 论

介绍了遥感光谱仪光谱杂散光矩阵修正法原理,根据前向临边成像光谱仪的特点,在实验室搭建了光谱杂散光矩阵测量装置。并利用该装置标定出前向临边成像光谱仪光谱杂散光矩阵,分析可知杂散光矩阵的主要误差来源是探测器噪声。为验证杂散光矩阵及杂散光的修正效果,开展了外场实验,并与基准光谱仪测量结果对比表明,前向临边成像光谱仪经过上述杂散光修正后,杂散光的影响由 20% 降低到 3% 以内。证实了杂光修正矩阵算法的可行性,验证了实验室标定仪器杂散光矩阵的精度,为后续空间遥感光谱仪光谱杂散光修正提供了参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] Zhang M M, Meng B H, Qian H H, *et al.* Research on correction method of stray light in directional polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1112003.
张苗苗, 孟炳寰, 钱鸿鹄, 等. 多角度偏振成像仪杂散光校正方法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1112003.
- [2] Mu Y J, Li R, Wan Y, *et al.* Stray light analysis and suppression for spaceborne lidar system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510005.
穆永吉, 李蕊, 万渊, 等. 星载激光雷达系统杂散光分析与抑制[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510005.
- [3] Chen H L, Chen L, Hu X Q, *et al.* Effect of external stray light on low-light imager loaded in Fengyun-3 day/night orbit meteorological satellite[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050101.
陈海龙, 陈林, 胡秀清, 等. 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中微光成像仪的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050101.
- [4] Mielenz K D, Weidner V R, Burke R W. Heterochromatic stray light in UV absorption spectrometry: a new test method[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(18): 3354-3356.
- [5] Tarrant A W S. Optical techniques for studying stray light in spectrophotometers[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 2010, 25(12): 1167-1174.
- [6] Miranda C, Conte P. Stray light in absorption spectrophotometry. III. A survey of methods for evaluating stray light levels and stray light corrections[J]. *Applied Spectroscopy*, 1971, 25(5): 557-563.
- [7] Laherrere J M, Poutier L, Bret-Dibatv T, *et al.* POLDER on-ground stray light analysis, calibration, and correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3221: 132-140.
- [8] Yu B X. The stray light in monochromator and its measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1991, 12(3): 177-180.
禹秉熙. 单色仪的杂散光及其测量[J]. *计量学报*, 1991, 12(3): 177-180.
- [9] Zong Y Q, Brown S W, Johnson B C, *et al.* Correction of stray light in spectrographs: implications for remote sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5882: 588201.
- [10] Zong Y Q, Brown S W, Johnson B C, *et al.* Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(6): 1111-1119.