

文章编号 1004-924X(2011)03-0552-09

星载成像光谱仪杂散光测量与修正

张军强^{1,2}, 吴清文¹, 颜昌翔¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:分析了星载成像光谱仪杂散光的来源和危害,研究了杂散光对此类光谱仪光谱测量精度的影响。介绍了用点扩散函数描述成像光谱仪杂散光的原理,推导了杂散光影响矩阵和杂散光修正矩阵的求解,给出了杂散光测量和修正的具体方案,并对测量和修正精度进行了分析。实验表明,基于点扩散函数的矩阵法可实现成像光谱仪杂散光的测量和修正。像元中心波长入射时,修正后有效信号降低不足1%,杂散光信号降低至少99%;像元中心波长和非像元中心波长同时入射时,修正后像元中心波长处有效信号降低7%左右,非像元中心波长处有效信号降低25%左右,杂散光信号降低近50%。最后,从原理上解释了杂散光修正效果受入射光波长影响的原因。

关键词:成像光谱仪;杂散光;杂散光测量;点扩散函数

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0552

Measurement and correction of stray light of space-borne high resolution imaging spectrometer

ZHANG Jun-qiang^{1,2}, WU Qing-wen¹, YAN Chang-xiang¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To reduce the influence of stray lights on the spectral measurement accuracy of a High Resolution Imaging Spectrometer(HRIS), sources and hazards of stray lights were analyzed. Based on the Point Spread Function (PSF) theory which is usually used to describe the stray lights of HRISs, the influence matrix and the correction matrix of stray lights were discussed. The measurements and specific correction programs were given, and the accuracies of measurement and correction were analysed. The results show that the method based on PSF can complete the measurement and correction of stray lights for the HRIS. For a pixel center wavelength incident light, the effective signal is only reduced no more than 1%, while the stray light signal is reduced at least by 99% as compared with the raw data. For both pixel center wavelength and non-pixel center wavelength incident lights, the corrected signals are reduced by about 7% at the pixel center wavelength and by nearly 25% at the non-pixel center wavelength, while the stray light signal is reduced by almost 50%. Finally, the theoretical rea-

收稿日期:2009-12-31;修订日期:2010-02-04.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

sons why the incident light wavelength affected the stray light correction were explained.

Key words: High Resolution Imaging Spectrometer (HRIS); stray light; stray light measurement; Point Spread Function (PSF)

1 引言

星载成像光谱仪可在特定光谱域以高光谱分辨率同时获得连续的地物光谱图像,使遥感数据在光谱维进行展开得到高精度的光谱遥感数据,进而定量分析地球表层生物、物理、化学过程与参数,是成像技术和光谱技术的有机结合。高光谱分辨率成像光谱遥感起源于对地质矿物的识别,逐渐扩展到对植被生态、海洋海岸水色、冰雪、土壤以及大气的研究中。光谱遥感的探测目标是微弱的光谱信号,杂散光是影响光谱测量精度的重要原因之一,如白天云层散射、反射等背景辐射产生的杂散光常常会影响光谱测量精度,甚至把微弱的光谱信号淹没。当前,国内对光学遥感仪器中望远镜系统的杂散光分析、仿真、测量和抑制的研究已较为成熟^[1-4],而对光谱仪器杂散光的研究较少,只有禹秉熙、于洵等人曾对单色仪和非单色仪的杂散光做了一些分析和测量工作^[5-6];最近杜述松等人也对干涉成像光谱仪的杂散光进行了一定的分析和仿真研究^[7],而对高分辨率成像光谱仪杂散光分析、测量和修正的研究在国内尚少有报道。在国外,以美国的 CHRIS 和德国的 EnMAP 为代表的新一代高分辨成像光谱仪都将杂散光的分析和测量作为一个重要的课题进行了深入研究^[8-9]。

为了满足星载成像光谱仪杂散光测量和修正的工程需要,本文分析了此类光谱仪器杂散光的来源和危害,介绍了用矩阵法实现成像光谱仪杂散光测量和修正的理论依据,给出了杂散光测量和修正的具体方案,并通过实验验证了矩阵法测量和修正成像光谱仪杂散光的有效性,同时解释了杂散光修正效果与入射光波长有关的原因。

2 星载成像光谱仪杂散光分析

2.1 光学系统

成像光谱仪的杂散光与光学系统结构和分光方式密切相关,图1为本文研究的星载超光谱成

像仪的光路简图。光学系统包括望远系统和光谱仪光学系统两部分:望远镜采用非球面主镜、次镜和第三镜构成离轴非球面三反射镜系统,光谱仪采用的非球面准直镜和成像镜也构成离轴非球面三反射镜系统,光谱仪的色散元件为棱镜。

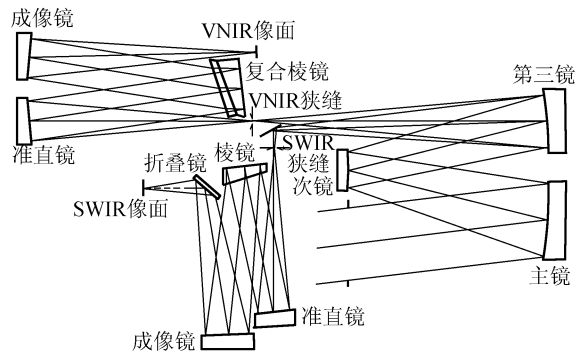


图1 成像光谱仪光学系统

Fig. 1 Optical configuration of HRIS

离轴三反射镜结构望远镜系统对杂散光(特别是一次杂散光)抑制能力较强,且目前对望远镜系统的杂散光分析和遮光罩、挡光环、消杂散光涂料等消杂散光措施的研究也较为深入^[1-3, 10-13],所以,望远镜系统的杂散光一般较低,本文将重点研究光谱仪系统的杂散光,并综合测量与修正反映到光谱仪像面上的整机杂散光。

2.2 杂散光分析及描述

杂散光是由非成像的光到达探测器形成的,杂散光水平是星载光学遥感仪器的重要技术指标之一。成像光谱仪的杂散光水平常用杂散光系数来描述^[14-15],即在光谱仪标称波长上一定带宽内,除该波长以外所有其他波长的辐射能量之和与标称波长的辐射能量之比。

由于采用棱镜分光,本文研究的星载成像光谱仪没有光栅光谱仪中零级和高级光谱干扰及光栅刻划鬼线等杂散光^[16]。此外,针对接收器件独立设计的入射狭缝也在一定程度上避免了光线相混。棱镜色散型成像光谱仪的杂散光主要来源于以下几方面:

(1) 机械系统缝隙引起的漏光,主要来源于镜头、视场分离器等组件的遮光罩与框架之间的缝隙。

(2) 框架内壁、镜座、光阑等机械结构表面的反射引起的漫散光。

(3) 镜头、调焦反射镜等光学元件表面灰尘及缺陷引起的散射光以及棱镜表面的反射光。

(4) 视场外光线没有进行有效的遮拦而到达探测器上形成杂散光。为了不遮挡有效视场,通常情况下光阑的实际口径都比理论口径稍大一些,这必然带来了视场外光线引起的杂散光。

(5) 光谱仪焦面处的光谱串扰,即波长 λ_i 的单色光(充满光谱仪数值孔径)照射光谱仪入射狭缝时,谱面 $\lambda_j (j \neq i)$ 位置处产生的亮背景。

杂散光对光学系统的影响通常表现为像面对比度下降,以及因此引起的传递函数退化和信噪比降低;对于以获得高精度光谱遥感数据为目的的成像光谱仪而言,杂散光可引起光谱响应的失真,进而影响光谱测量精度^[10]。

2.3 杂散光测量与修正的必要性

虽然人们在抑制光谱仪器杂散光的措施上花了很大功夫,而且常常与光学设计同步交替进行,试图保证系统同时具有极高的杂散光抑制水平和良好的成像质量。但实践表明,成像光谱仪的杂散光水平很难达到 0.1% 数量级以下,这主要是因为:

(1) 虽然采用了低反射、高吸收的黑色涂层试图将系统内部的散射杂光减到最小,但是涂料在全谱段的双向反射分布函数(BRDF)值不可能为零,涂料表面不可避免地会有散射光。

(2) 成像光谱仪需经过长时间的装调和试验,光学件表面的灰尘等缺陷引起的杂散光不可避免。

(3) 光阑等消杂散光结构在设计、加工过程中的余量和误差也将带来可观的视场外杂散光。

(4) 成像光谱仪的谱间串扰不可避免,这是成像光谱仪杂散光的主要来源,也是杂散光测量和修正需要关注的重点。

综上所述,任何分析、仿真和抑制措施都不能完全消除成像光谱仪的杂散光,杂散光的测量和修正很有必要。

3 星载成像光谱仪杂散光测量与修正

3.1 杂散光测量

文献[14]指出光谱仪器杂散光测量的常用方法均不能满足星载成像光谱仪杂散光测量的工程需要;文献[15]提出了使用杂散光影响因子描述光谱仪杂散光的思想,并使用窄带滤光片对星载成像光谱仪的杂散光进行了测量,但由于窄带滤光片种类的限制,只能测量少数几个波长间杂散光的相互影响,不能精确反映全波段的杂散光特性。

成像光谱仪的杂散光可以用光谱点扩散函数(PSF)来描述^[14-15,17-20],当某一特定波长为 λ_j 的单色光入射成像光谱仪,会成像于光谱仪像面上特定像元 J 上,即像元 J 的响应 DN 值为 $v_{j,j}$;由于杂散光的存在,其他像元 I 对该波长单色光也将有响应,即像元 I 的响应 DN 值为 $v_{i,j} (i=1,2, \dots, j-1, j+1, \dots, n-1, n), v_{j,j}, v_{i,j}$ 可表示如下:

$$v_{j,j} = \alpha E_j T_j(\lambda_j) R_j \Delta \lambda + v_0, \quad (1)$$

$$v_{i,j} = \alpha E_j T_i(\lambda_j) R_j \Delta \lambda + v_0 = \alpha E_j T_j(\lambda_j) R_j \Delta \lambda d_{i,j} + v_0 = (v_{j,j} - v_0) d_{i,j} + v_0, \quad (2)$$

式中 α 为光电转换系数, E_j 为波长 λ_j 入射单色光的光谱辐射通量, $T_i(\lambda_j)$ 为光谱仪谱面 λ_i 处波长 λ_j 的光谱透过率, $T_j(\lambda_j)$ 为光谱仪谱面 λ_j 处波长 λ_j 的光谱透过率, R_j 为像元对波长 λ_j 辐射的光谱响应, $d_{i,j}$ 为波长 λ_j 处带宽 $\Delta \lambda$ 处光谱辐射对波长 λ_i 的杂散光影响因子, v_0 为探测器暗噪声。

由式(2)即可求解杂散光影响因子 $d_{i,j}$:

$$d_{i,j} = \frac{v_{i,j} - v_0}{v_{j,j} - v_0} = \frac{\alpha E_j T_i(\lambda_j) R_j \Delta \lambda}{\alpha E_j T_j(\lambda_j) R_j \Delta \lambda}, \quad (3)$$

即

$$d_{i,j} = T_i(\lambda_j) / T_j(\lambda_j). \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知,杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 理论上仅与光谱仪的光谱透过率 T 有关,与光源、探测器等测试条件无关,所以,表示了光谱仪自身的杂散光特性。在实际测量过程中,光源的稳定性、单色光的杂散光水平、探测器稳定性、探测器信噪比以及探测器像元中心波长标定误差等会在一定程度上影响杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 的测量精度。

3.2 杂散光修正

要对含有杂散光的 CCD 响应 DN 值进行修正,首先应定量、全面描述光谱仪的杂散光特性。本文离散测量了每个像元中心波长入射时其他像元的杂散光影响因子 $d_{i,j}$,将其写成列向量的形式得到了光谱仪工作波段的杂散光影响因子矩阵 \mathbf{D} ,如式(5)所示。 \mathbf{D} 的每一列为式(4)求解的某一像元中心波长辐射对其他像元的杂散光影响,每一行则反映了不同像元中心波长辐射对同一像元的杂散光影响。

杂散光影响因子矩阵 \mathbf{D} 反映了空间某一视场内各像元间的光谱串扰,是系统杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 的组合,能真实反映光谱仪系统的杂散光特性。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & d_{1,3} & \cdots & d_{1,j} & \cdots & d_{1,n-1} & d_{1,n} \\ d_{2,1} & 0 & d_{2,3} & \cdots & d_{2,j} & \cdots & d_{2,n-1} & d_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i,1} & d_{i,2} & d_{i,3} & \cdots & d_{i,j} & \cdots & d_{i,n-1} & d_{i,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n-1,1} & d_{n-1,2} & d_{n-1,3} & \cdots & d_{n-1,j} & \cdots & 0 & d_{n-1,n} \\ d_{n,1} & d_{n,2} & d_{n,3} & \cdots & d_{n,j} & \cdots & d_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

光谱方向第 i 个像元的杂散光 v_i 为:

$$v_i = \sum_{j=1}^n (d_{i,j} \cdot v_{R,j}), \quad (6)$$

式中: $v_{R,j}$ 为第 j 像元响应的有效信号值。

光谱方向第 i 像元的光谱辐射总响应为:

$$v_i^{\text{total}} = \sum_{j=1}^n (d_{i,j} \cdot v_{R,j}) + v_{R,i}, \quad (7)$$

将式(7)表示为矩阵的形式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_R, \quad (8)$$

式中 \mathbf{V} 为光谱仪某一视场内所有像元的实际响应 DN 值组成的列向量, \mathbf{V}_R 为同一视场内所有像元对有效信号的响应 DN 值(即待求解的修正值)组成的列向量。

对式(8)进行如下处理:

$$\mathbf{V} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_R = [\mathbf{D} + \mathbf{I}] \cdot \mathbf{V}_R = \mathbf{A} \cdot \mathbf{V}_R, \quad (9)$$

则:

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{V} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{V}. \quad (10)$$

式(10)中, $\mathbf{A} = \mathbf{D} + \mathbf{I}$, \mathbf{C} 为光谱仪杂散光修正矩阵,当光谱仪光机结构不变的情况下, \mathbf{C} 为常量。只需建立光谱仪的杂散光影响因子矩阵 \mathbf{D} ,即可

求解杂散光修正矩阵 \mathbf{C} ,进而在数据处理时修正测量结果中的杂散光成份,降低杂散光对光谱测量结果的影响。

文献[15]提出的窄带滤光片法使用硅探测器作为弱信号的检出器件,灵敏度较高;矩阵修正法采用 CCD 作为弱信号的检出器件,工程实践中发现杂散光和有效信号的光谱辐亮度相差悬殊,即使有效信号处像元饱和,谱线位置较远处的杂散光也不能使像元有效响应。为此,可以用分段积分法^[21]在一定程度上提高 CCD 的信噪比,扩大光谱测量范围。

由式(6)~式(10)可知,当光谱仪像元中心波长单色光入射时,若不考虑数值计算带来的精度影响,杂散光修正不存在理论误差。实际修正误差主要来自杂散光影响因子测量误差和入射波长准确度误差。

4 实验

4.1 杂散光测量

基于以上理论,对某星载成像光谱仪的杂散光进行了测量和修正实验,测量系统原理如图 2 所示。

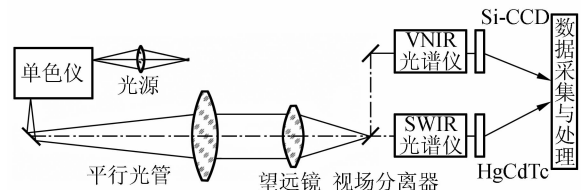


图2 成像光谱仪杂散光测量系统图示

Fig.2 Stray light measurement system of HRIS

为了保证入射光谱辐射通量相对稳定,并实现多个波长扫描入射以求解杂散光影响因子矩阵,入射单色光采用卤钨灯和单色仪组合实现。系统光源选用 7ILT75 型卤钨灯光源组件并配套 71PT75 稳流电源;单色仪为 7ISW303 型扫描单色仪,以上组件均由北京赛凡光电仪器有限公司提供。

测量步骤如下:

- (1) 按图 2 所示完成测试系统硬件布局。
- (2) 将探测器输出帧频设定为允许的最大值,采集 CCD 暗噪声;光源通电稳定后,调整稳流

电源输出电流大小,使中心波长处 CCD 像元响应为饱和值的 80%左右,采集 CCD 响应数据。

(3) 降低探测器输出帧频为最大值的 0.5 倍频和 0.25 倍频,采集 CCD 暗噪声;调整稳流电源输出电流大小,采集 CCD 响应数据。

(4) 在有效光谱范围内逐波长扫描单色仪,重复步骤(2)、步骤(3)。

(5) 改变成像光谱仪与平行光管的相对位置,重复步骤(2)~步骤(4),完成成像光谱仪全部视场的杂散光测量。

(6) 将像元中心波长(由光谱定标获取)单色光入射时 CCD 的响应数据对输出帧频归一化处理,并完成数据拼接。

(7) 根据式(3)求解每个像元杂散光影响因子 $d_{i,j}$,并按照式(5)的格式整理杂散光影响因子矩阵 D 。

平行光管视场相对较小,不能一次覆盖成像光谱仪全视场,步骤(5)采用局部测量的方法,最终实现全视场的覆盖。由于杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 和杂散光影响因子矩阵 D 都是反映光谱仪空间某一视场内各像元间的光谱串扰,分视场局部测量法虽然忽略了空间方向的影响,测量结果还是可以接受的。

本测量系统光源波动为 0.2%,单色仪杂散光水平为 0.01%,单色仪输出波长准确度为 0.3 nm, VNIR 探测器像元中心波长标定误差 0.5 nm,校正后 VNIR 探测器像元间光谱响应差异性为 0.3%, VNIR 探测器及信号采集系统不确定度为 1%(中心波长两侧各 4 个像元范围内),杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 的测量误差约为 1.5%,波长准确度为 0.6 nm。

4.2 测量结果修正

在杂散光影响因子矩阵 D 已知的前提下,根据式(9),式(10)即可求解光谱仪杂散光修正矩阵 C ,矩阵 C 与空间视场一一对应。

当一束光入射成像光谱仪时, CCD 空间方向某一列像元的实际响应 DN 值组成的列向量为 V ,通过式(10)即可求解该列像元在消除杂散光影响后的有效信号 DN 值 V_R 。

对于不同空间方向 CCD 像元,可根据各自唯一的杂散光修正矩阵 C 完成测量结果的杂散光

修正。

由于 CCD 探测能力有限,像元中心波长入射时,中心波长两侧各 4 个像元范围内修正误差约为 1.5%,其余像元修正结果可信度较低。

4.3 杂散光测量与修正结果

实验表明,可见近红外(VNIR)光谱仪与短波红外(SWIR)光谱仪杂散光测量和修正结果类似,各光谱仪在全视场、全谱段范围内杂散光测量与修正效果也基本相同。以下仅给出了 VNIR 光谱仪 CCD 第 500 列像元对应视场和特定像元处的杂散光测量与修正结果,以此判断杂散光测量和修正的效果。

(1) 像元中心波长入射时杂散光测量与修正以 VNIR 光谱仪 CCD 第 500 列像元对应视场的杂散光测量与修正为例,当第 29,31 光谱通道对应中心波长单独入射时, CCD 输出 DN 值如图 3 所示;当第 29,31 光谱通道对应中心波长同时入射时, CCD 输出 DN 值如图 4 所示;修正后的结果如图 5 所示。

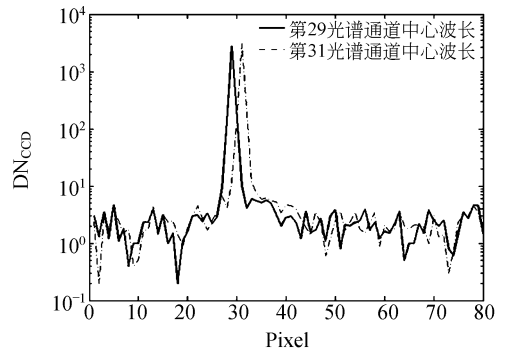


图3 第29,第31通道中心波长单独入射时的光谱响应
Fig. 3 Spectral reaction at wavelengths 29 and 31

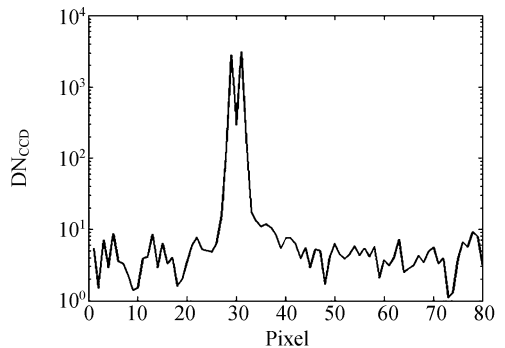


图4 第29,第31通道中心波长同时入射时的光谱响应
Fig. 4 Spectral reaction at both wavelengths 29 and 31

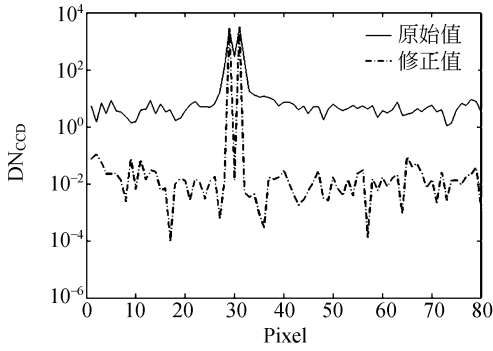


图 5 中心波长入射时的杂散光修正结果

Fig. 5 Results of stray light correction for center-wavelength incident light

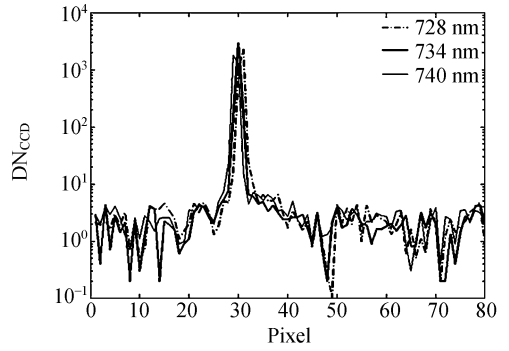


图 6 740,734,728 nm 波长单独入射时的光谱响应

Fig. 6 Spectral reaction for 740,734,728 nm

表 1 列出了第 26 至第 34 光谱通道像元的数据,比较可知,第 29,第 31 光谱通道像元中心波长的单色光同时入射时,修正后有效信号降低不足 1%,而杂散光信号则降低至少 99%,特别是第 28,30,32 像元的杂散光基本被完全修正为零。

表 1 像元中心波长入射时杂散光修正效果

Tab. 1 Stray light correction for center-wavelength incident light

像元	实测 DN 值	修正 DN 值	修正值与实测值之比/%
26	6	0.018	0.300
27	16	0.006	0.038
28	140	0.013	0.009
29	2814	2802.012	99.574
30	296	0.013	0.004
31	3079	3069.542	99.693
32	185	0.005	0.003
33	18	0.003	0.017
34	13	0.004	0.031

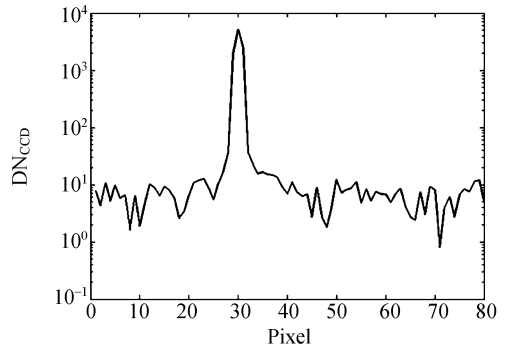


图 7 740,734,728 nm 波长同时入射时的光谱响应

Fig. 7 Spectral reaction for all 740,734,728 nm

(2) 像元中心波长和非中心波长同时入射时杂散光的测量与修正

同样以 VNIR 光谱仪 CCD 第 500 列像元对应视场的杂散光测量与修正为例,通过光谱定标可知,第 29,30,31 像元中心波长分别为 744,734,724 nm。当 740,734,728 nm 3 个中心波长单独入射时,CCD 输出 DN 值如图 6 所示;3 个中心波长同时入射时,CCD 输出 DN 值如图 7 所示;修正后的结果如图 8 所示。

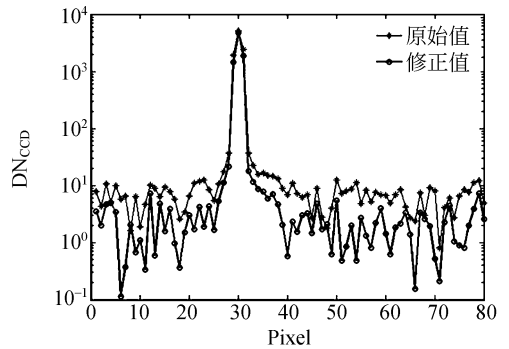


图 8 中心波长和非中心波长同时入射时的杂散光修正结果

Fig. 8 Stray light corrections for both center-wavelength incident light and others

表 2 列出了第 26~34 光谱通道像元的数据,比较可知,740,734,728 nm 3 个波长单色光同时入射时,修正后像元中心波长有效信号降低 7%左右,非像元中心波长有效信号降低 25%左右,而杂散光信号则降低近 50%。

表 2 中心波长与非中心波长同时入射时杂散光修正效果

Tab. 2 Stray light correction for both center-wavelength incident light and others

像元	实测 DN 值	修正 DN 值	修正值与实测值之比(%)
26	8	4.062	50.775
27	14	8.691	62.079
28	28	16.566	59.164
29	1485	1 113.073	74.954
30	3 995	3 720.768	93.136
31	1 890	1 465.382	77.533
32	28	13.604	48.586
33	17	8.915	52.441
34	12	6.713	55.942

对比实验数据可以发现,基于点扩散函数的矩阵法可实现成像光谱仪杂散光的测量和修正,但修正效果取决于入射光的波长,即当入射光波长为 CCD 像元对应中心波长时修正效果最佳,而当像元中心波长和非中心波长同时入射时修正效果次之。

要解释以上现象,首先应了解成像光谱仪获取光谱数据的工作原理。成像光谱仪将地面景物成像并光谱展开于光谱仪的 CCD 感光面上,CCD 在一定光谱带宽内以时间积分的方式工作,即对谱宽和时间进行二重积分。由于成像光谱仪 CCD 相邻像元间波长间隔较小(一般为 10 nm 左右),通常用 CCD 某一个像元的 DN 输出值代表该像元中心波长处的光谱辐射大小,而不关心像元带宽内各波段光谱的具体分布,这直接决定了以 CCD 响应(DN 值)为原始数据的修正矩阵,能准确修正像元中心波长入射光产生的杂散光,而对非像元中心波长处辐射引起的杂散光只能近似修正。显然,这并不影响矩阵法在成像光谱仪杂

散光测量与修正方面的应用。

5 结 论

本文分析了星载成像光谱仪的杂散光来源和危害,介绍了基于点扩散函数的矩阵法测量和修正杂散光的原理和方法。理论分析和工程实践表明,基于点扩散函数的矩阵法原理正确,可操作性强,能实现成像光谱仪杂散光的测量和修正。该方法有效降低了光谱仪焦面处的光谱串扰,提高了光谱分辨率,但在以下 3 方面仍有必要继续深入研究:(1) 弱信号探测。虽然分段积分法能扩大 CCD 的光谱测量范围,但实践表明,中心波长两侧各 4 个像元范围以外,分段积分法的测量效果并不显著,CCD 对杂散光信号的响应与其自身的噪声数量级相当,这将导致测量和修正波长范围减小、精度将低,因此有必要进一步研究弱信号探测方式。(2) 谱线偏移。矩阵修正法的前提是精确测量像元中心波长单色光入射时的杂散光影响矩阵,这种方法对像元中心波长单色光入射时的修正效果最佳,第 4.3 节的实验数据充分证明了这一点。然而,星载成像光谱仪在发射过程中以及在轨运行期间,由于光学、结构和电子学部件的性能改变,像面上谱线位置会发生改变^[22],实验室建立的修正矩阵将不能满足像元中心波长变化后杂散光的修正需求。如何在谱线位置会发生改变时,正确、有效地修正成像光谱仪的杂散光是需要深入研究的问题。(3) 矩阵法能对成像光谱仪的杂散光进行测量与修正,但在修正矩阵的推导过程中,只考虑了光谱方向相邻波长间的光谱串扰,没有全面考虑空间方向的杂散光影响(虽然相对值较小),这是值得关注的问题。

参考文献:

- [1] 史光辉. 消除卡塞格林系统杂光的措施[J]. 光学精密工程, 1997,5(5):10-16.
SHI G H. Methods preventing stray light emerged in Cassegrain systems[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,5(5):10-16. (in Chinese)
- [2] 高郭鹏,熊望城,甘玉泉,等. R-C 系统外遮光罩挡光环的程序化设计及锥状内遮光罩的改进[J]. 应

用光学,2009,30(4):575-579.

GAO G P, XIONG W E, GAN Y Q. Program design of outer baffle vanes and improvement of conical inner baffle in R-C system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009,30(4):575-579. (in Chinese)

- [3] 邹刚毅,樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. 光子学报,2009,38(3):605-609.

ZOU G Y, FAN X W. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope[J].

- Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3):605-609. (in Chinese)
- [4] 张国玉, 李凤春, 高玉军. 光学系统杂光黑斑测量的理论研究[J]. 光学技术, 1997, 2:35-38.
ZHANG G Y, LI F CH, GAO Y J. Theoretical study of stray light black-spot measurement for optical system[J]. *Optical Technology*, 1997, 2:35-38. (in Chinese)
- [5] 禹秉熙. 单色仪的杂光及其测量[J]. 计量学报, 1991, 16(3):177-180.
YU B X. The stray light in monochromator and its measurement[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1991, 12(3):177-180. (in Chinese)
- [6] 于洵, 侯西旗. 非单色光谱仪杂散光分析和测量[J]. 应用光学, 1991, 12(5):53-56.
YU Y, HOU X Q. Analysis and measurement of stray light in non-monochromatic spectrometer[J]. *Application Optics*, 1991, 12(5):53-56. (in Chinese)
- [7] 杜述松, 王咏梅, 杜军国, 等. 干涉成像光谱仪的杂散光分析[J]. 应用光学, 2009, 30(2):246-251.
DU SH S, WANG Y M, DU G J, *et al.*. Stray light analysis of Fabry-Perot interference imaging spectrometer[J]. *Application Optics*, 2009, 30(2):246-251. (in Chinese)
- [8] CUTTER M A, LOBB D R, WILLIAMS T L, *et al.*. Integration & testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [J]. *SPIE*, 1999, 3753:180-191.
- [9] STUFFLER T, KAUFMANN C, HOFEREA S, *et al.*. The EnMAP hyperspectral imager-An advanced optical payload for future applications in Earth observation programmes[J]. *Acta Astronautica*, 2007, 61:115-120.
- [10] 钟兴, 贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3):621-625.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):621-625. (in Chinese)
- [11] 张红鑫, 卢振武, 夏利东, 等. 白光日冕仪光系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10):2371-2376.
ZHANG H X, LU ZH W, XIA L D, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10):2371-2376. (in Chinese)
- [12] 杜保林, 李林, 黄一帆, 等. 空间遥感器消杂散光涂料的分析与研究[J]. 光子学报, 2009, 37:220-222.
DU B L, LI L, HUANG Y F, *et al.*. Analysis and study on coating suppressing stray-light of space remote sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 37:220-222. (in Chinese)
- [13] 姜伟, 张云琨, 张忠玉, 等. 用电化学方法消除4J32镜头组件的杂散光[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8):1367-1370.
JIANG W, ZHANG Y K, ZHANG ZH Y, *et al.*. Suppressing stray light for 4J32 alloy by electrochemistry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 16(8):1367-1370. (in Chinese)
- [14] 张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光检测技术[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4):337-342.
ZHANG J Q, WU Q W, YAN CH X. Stray light measurement technology for the space-borne imaging spectrometer[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4):337-342.
- [15] 张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载超光谱成像仪杂散光及其测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10):2861-2865.
ZHANG J Q, WU Q W, YAN CH X. Stray Light of Space-borne Hyperspectral Imager and Its Measurement[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10):2861-2865.
- [16] 汪逸群, 颜昌翔, 苗春安. 星载高分辨率超光谱成像仪分光方式的选择[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(4):304-308.
WANG Y Q, YAN CH X, MIAO CH A. Choice of spectral-splitting modes in space-borne hyperspectral imager [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(4):304-308. (in Chinese)
- [17] ZONG Y, BROWN S W, JOHNSON B C, *et al.*. Correction of stray light in spectrographs; implications for remote sensing[J]. *SPIE*, 2005, 5882:1-8.
- [18] ZONG Y, BROWN S W, JOHNSON B C, *et al.*. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(6):1111-1119.
- [19] ZONG Y, BROWN S W, JOHNSON B C, *et al.*. Correction of stray light in spectroradiometers and imaging instruments[J]. *CIE*, 2007, 178(D2):33-

36.

- [20] ZONG Y, BROWN S W, MEISTER G, *et al.*. Characterization and correction of stray light in optical instruments[J]. *SPIE*, 2007, 6744:67441L-1-67441L-11.
- [21] 赵艳皎, 唐敏学, 吴建宏. 一种提高光谱仪中线阵 CCD 信噪比的方法[J]. *光电子技术与信息*, 2004, 17(4):43-46.
- ZHAO Y J, TANG M X, WU J H. A method for

enhancing SNR of linear CCD in spectroscopy[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, 17(4):43-46. (in Chinese)

- [22] 李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(4):309-315.
- LI X H, YAN CH X. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(4):309-315. (in Chinese)

作者简介:



张军强(1981—),男,江苏泰州人,助理研究员,博士研究生,主要从事空间光学遥感仪器研制方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com



颜昌翔(1973—),男,湖北省洪湖市人,博士后,研究员,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

导师简介:



吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士生导师,研究员,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 研究和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn

● 下期预告

离焦星点图的 RC 式望远镜装调技术

孙敬伟^{1,2}, 陈涛¹, 王建立¹, 张金凯^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了实现对大口径望远镜的装调, 针对离焦星点图的图像处理和分析, 对 RC 式望远镜的装调技术进行了研究。首先, 根据横向几何像差分析离焦像点图像和系统装调误差之间的相应关系。接着分析了横向误差中离心和倾斜导致的偏心彗差和内外轮廓圆的圆心位置偏离距离的关系, 以及彗差消除后残余的像散导致外轮廓椭圆的偏心率随长轴增大而逐渐减小的特点。然后分析了主次镜之间纵向误差导致的球差和最小圆半径大小的关系。最后应用 Zemax 建模仿真验证了上述分析, 并总结了如何应用离焦星点图指导装调过程以及图像处理的方法。实验结果表明: 无论是横向误差还是纵向误差, 应用该方法得到的实验结果和理论分析值拟合度均良好, 通过倾斜调整彗差和通过偏心率调整像散的误差均可控制在 5% 以内。