

星载超光谱成像仪杂散光及其测量

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 100049

摘要 超光谱成像仪比一般光谱仪器具有更多的光谱通道和更高的光谱分辨率, 而杂散光是影响超光谱成像仪光谱测量精度的重要因素之一, 当前光谱仪器的杂散光测量方法尚不能满足超光谱成像仪杂散光检测的需要。作者探讨了此类成像光谱仪杂散光的定义、来源和危害, 论述了使用杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 描述光谱仪杂散光的可行性和优越性, 并给出了杂散光受扰系数 $f_i(\lambda)$ 和杂散光干扰系数 $F_i(\lambda)$ 的定义、物理意义和工程应用价值。最后, 介绍了使用窄带滤光片测量星载超光谱成像仪杂散光的测量系统组成、测量步骤和测量结果。结果表明: 杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 能正确表示光谱仪的杂散光特性, 与光源、滤光片、探测器等测量条件无关, 而测量效率比谱杂散光系数法至少提高 1 倍, 满足星载超光谱成像仪杂散光测量的工程需要。

关键词 杂散光; 杂散光测量; 超光谱成像仪; 窄带滤光片

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)10-286-05

引言

随着军事、地质、宇宙探索等各领域对高质量遥感图像的需求, 一度曾被忽视而又直接影响图像质量的杂散光正重新引起人们的重视。罗伯特等人曾对杂散光作了较为深入的分析和总结^[1], 史蒂芬等人对地基天文望远镜系统的杂散光抑制方法进行了研究^[2], 在美国的深空探索望远镜 SNAP 研制过程中也对杂散光作了深入的研究^[3]。在我国, 早在 80 年代刘瑞祥等人就对杂散光进行了研究, 并提出经典的“黑体法”测量望远镜的杂散光^[4]; 近年来, 李婷等人也对杂散光做了定量的分析^[5], 史光辉、钟兴、李欣耀等人对消杂散光措施进行了详细研究^[6-8]。

当前, 国内对光学遥感仪器的杂散光研究主要集中在望远镜系统, 而对光谱仪器的杂散光研究较少^[9], 只有禹秉熙、于洵等在 20 世纪初对单色仪和非单色仪杂散光作了一些分析和测量工作^[10,11], 而对超光谱成像仪杂散光的分析和测量在国内尚少有报道。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^[12,13]。为了降低杂散光引起的光谱仪分光测量误差, Zong 等甚至用单色仪精确测量了光谱仪的杂散光并建立杂散光矩阵, 通过软件实现了杂散光的实时修正^[14]。

本文探讨了此类成像光谱仪杂散光的来源、危害和定义, 比较了当前光谱仪器杂散光测量方法的优缺点, 论述了使用杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 描述光谱仪杂散光的可行性和优越性, 并给出了测量结果。

1 超光谱成像仪杂散光分析

图 1 为某超光谱成像仪的光路简图, 为了同时达到高分辨、大视场和较小的体积和重量, 望远镜采用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系统, 光谱仪的色散元件为复合棱镜^[15]。

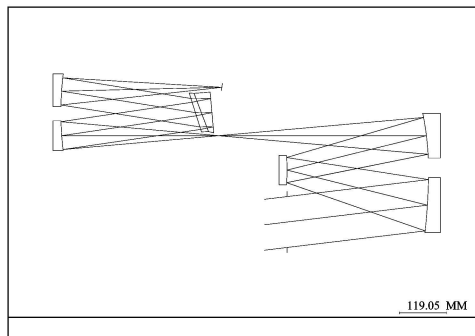


Fig 1 Optical configuration of HRHIS

收稿日期: 2009-11-06, 修订日期: 2010-02-12

基金项目: 国家(863计划)预研基金项目(2008AA121103-5)资助

作者简介: 张军强, 1981年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员 e-mail: zjq1981_81@163.com

光谱仪器杂散光的绝对值大小与入射光源和探测器有关,通常用杂散光系数表示杂散光的相对值,即在光谱仪标称波长上,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。

与普通光栅单色仪不同,本文研究的星载超光谱成像仪采用复合棱镜分光,棱镜表面镀增透膜,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,针对接受器件独立设计的入射狭缝有效避免了光线相混现象,也大大降低了望远镜系统杂散光对光谱仪系统的影响。光谱仪杂散光的来源主要有以下几方面:

(1) 反射镜、棱镜等光学器件表面灰尘及缺陷引起的杂散光;

(2) 框架内壁、反射镜边缘等的反射引起的杂散光。

光谱仪的杂散光会造成一定的背景,降低系统信噪比,直接导致光谱仪分光测量误差增大,大大降低光谱仪测量精度。

2 光谱仪器杂散光测量的常用方法

关于光谱仪器杂散光的测量,人们已经做过许多研究工作:在国外,截止滤光片测其透过率^[17]、光谱法^[18]、级数透过率法^[19]、卷积算法^[20]等早已应用于单色仪的杂散光测量,矩阵修正法^[14]也被用于成像光谱仪的杂散光修正;在国内,谱杂散光系数法^[10]、光学玻璃截止滤光片法^[11]、氧气吸收光谱及参数拟合法^[21]等也被应用于单色仪和非单色仪的杂散光测量。但是,这些方法均不能满足在研超光谱成像仪杂散光测量的工程需要:

(1) 截止滤光片法测量方法简单、效率高,但只能测量截止波长一侧的杂散光,另一侧的杂散光未被检出,且短波长通长波截止的滤光片不宜制作。

(2) 光谱法和谱杂散光系数法测量精度较高,测量结果也较符合实际,但效率较低,不适合工程应用。

(3) 级数透过率法和氧气吸收光谱法工程应用的可操作性不强。

(4) 卷积算法测量结果与光源有关,不能独立表示仪器自身杂散光水平。

(5) 矩阵修正法能准确求解光谱仪器杂散光的影响因子和修正矩阵,但要专用 CCD 等器件,且不能进行光谱仪装调的过程测量。

所以,探索新的杂散光检测方法显得很有必要。

3 超光谱成像仪杂散光描述和测量

当前,国内外对光谱仪器杂散光描述比较准确的是文献[10]提出的谱杂散光系数法,但要直接测量仪器的透过率,测量过程比较复杂。为此,我们用杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 描述光谱仪的杂散光水平,并将其定义为:波长 λ_j 、带宽 $\Delta\lambda$ 的单色光照射光谱仪狭缝时,光谱仪谱面波长 $\lambda_i(i \neq j)$ 处的杂散光辐射能量 E_i 与谱面波长 λ_j 处的有效光辐射能量 E_j 之比。

光谱仪全谱段的杂散光一般在 10^{-3} 数量级,而单个谱段入射光(带宽 $\Delta\lambda < 50$ nm)引起的杂散光就更小了,普通单色仪的光谱辐射经光谱仪后在谱面产生的杂散光很难使探测器产生有效响应。为此,我们选用色温与太阳光相似的大功率氙气灯作为光源,辅助 OD4 级截止深度的窄带滤光片产生具有一定带宽的单色光,用于杂散光的测量。

若用白光照射光谱仪入缝,光谱仪入缝前加窄带滤光片 F_j (中心波长 λ_j),谱面 λ_i 、带宽 $\Delta\lambda$ 处探测器的输出为 $V_{i,j}$,谱面 λ_j 、带宽 $\Delta\lambda$ 处探测器的输出为 $V_{j,j}$,则

$$V_{j,j} = \alpha E(\lambda_j) \tau_j T_j(\lambda_j) R(\lambda_j) \Delta\lambda + V_0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{i,j} &= \alpha E(\lambda_j) \tau_j T_i(\lambda_j) R(\lambda_j) \Delta\lambda + V_0 \\ &= \alpha E(\lambda_j) \tau_j T_j(\lambda_j) R(\lambda_j) \Delta\lambda d_{i,j} + V_0 \\ &= (V_{j,j} - V_0) d_{i,j} + V_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, α 为光电转换系数; $E(\lambda)$ 为光源光谱分布; τ_j 为中心波长 λ_j 窄带滤光片的等效透过率; $T_i(\lambda_j)$ 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; $R(\lambda)$ 为探测器光谱响应; $d_{i,j}$ 为波长 λ_j 、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 $d_{i,j}$

$$d_{i,j} = \frac{V_{i,j} - V_0}{V_{j,j} - V_0} \quad (3)$$

$$d_{i,j} = \frac{\alpha E(\lambda_j) \tau_j T_i(\lambda_j) R(\lambda_j) \Delta\lambda}{\alpha E(\lambda_j) \tau_j T_j(\lambda_j) R(\lambda_j) \Delta\lambda} \quad (4)$$

即

$$d_{i,j} = T_i(\lambda_j) / T_j(\lambda_j) \quad (5)$$

式(3)中, $V_{i,j} - V_0$ 为波长 λ_j 处的光谱辐射在谱面 λ_i 处形成的杂散光 DN 值, $V_{j,j} - V_0$ 为有效光的 DN 值。所以,杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 是光谱仪谱面杂散光对有效光的归一化结果。

式(5)中, $T_i(\lambda_j)$ 为光谱仪谱面 λ_i 处波长 λ_j 的光谱透过率, $T_j(\lambda_j)$ 为谱面 λ_j 处波长 λ_j 的光谱透过率,两者均为光谱仪本身的特性,与光源、探测器等测试条件无关。所以,杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 表示了光谱仪自身的杂散光特性。

综上所述,可知:

(1) 杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 是光谱仪谱面杂散光与有效光之比,直接反映了杂散光对光谱仪成像对比度的影响。

(2) 杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 的本质是光谱仪透过率的比值,与光源、窄带滤光片、探测器等测试条件无关,所以能真实反应仪器的杂散光特性。

(3) 杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 的表现形式为单色光入射时光谱仪谱面不同位置处的光谱辐射能量之比,省略了光谱仪透过率测量的复杂过程,杂散光测量效率至少提高 1 倍,便于工程应用。

若将杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 表示为如式(6)所示矩阵形式,则矩阵 D 的每行为光谱仪谱面不同波长 λ_j 处辐射对某一波长 λ_i 的影响,称为谱面 λ_i 处的杂散光受扰系数 $f_i(\lambda_j)$;每列为某一波长 λ_i 处辐射对不同波长 λ_j 的影响,称为谱面 λ_i 处的杂散光干扰系数 $F_i(\lambda)$ 。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & d_{1,3} & \dots & d_{1,14} & d_{1,15} \\ d_{2,1} & 0 & d_{2,3} & \dots & d_{2,14} & d_{2,15} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{15,1} & d_{15,2} & d_{15,3} & \dots & d_{15,14} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

杂散光受扰系数 $f_i(\lambda)$ 一定程度上反应了光谱仪谱面 $\lambda_i \pm \Delta\lambda$ 处的光谱纯度, 而杂散光干扰系数 $F_i(\lambda)$ 则反应了光谱仪对不同波长光谱辐射源的杂散光敏感程度。

所以, 对于研制过程中的星载超光谱成像仪, 降低仪器杂散光的根本就是通过采取适当措施降低杂散光受扰系数和杂散光干扰系数; 而对于在轨工作的设备, 我们可以根据实际需要避开杂散光干扰系数较大的辐射源, 同时尽量选用杂散光受扰系数较小波段的光谱数据, 以节约系统资源、提高数据有效率和光谱仪的光谱分辨率。

4 实验

在某星载超光谱成像仪的 VNIR 光谱仪的装调过程中, 建立了如图 2 所示的杂散光测量系统。光源选用氙气灯, 经光学系统成像后充满光谱仪口径; 15 种窄带滤光片 F_i (半宽 $B \approx 10 \text{ nm}$, 峰值透射率 $T_i \geq 50\%$, 截止范围 200~1100 nm, 截止深度 $\geq OD4$) 中心波长 λ 基本均布于 400~1000 nm 之间; 探测器选用日本滨松硅探测器。

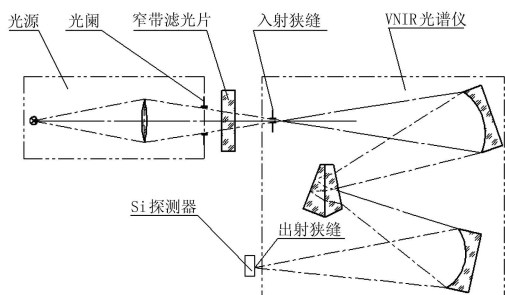


Fig 2 Stray light measurement system of VNIR spectrometer

测量步骤如下:

- (1) 测量探测器的暗噪声 V_0 。
- (2) 调节氙气灯亮度, 使探测器输出合适的 DN 值。
- (3) 光谱仪入缝前加窄带滤光片 $F_j (j = 1, 2, \dots, 15)$, 谱面 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, 15)$ 、带宽 $\Delta\lambda$ 处的探测器响应为:

当 $i = j$ 时, 探测器响应值为有效光 $V_{i,j}$ (包含暗噪声 V_0);

当 $i \neq j$ 时, 探测器响应值为杂散光 $V_{i,j}$ (包含暗噪声 V_0)。

(4) 由式(3)求解杂散光影响因子 $d_{i,j}$, 并将 $d_{i,j}$ 整理成式(6)所示的矩阵形式。

(5) 绘制杂散光受扰系数 $f_i(\lambda)$ 和杂散光干扰系数 $F_i(\lambda)$ 随波长变化的曲线。

(6) 由于 $f_i(\lambda)$ 和 $F_i(\lambda)$ 随波长变化是光滑过渡的, 对于未知波长处的数据可用 Matlab 软件插值求解。

以波长 $\lambda_4 = 532 \text{ nm}$ (4号窄带滤光片) 为例, 谱面 λ_4 处的杂散光受扰系数 $f_4(\lambda)$ 如图 3 所示, 杂散光干扰系数 $F_4(\lambda)$

如图 4 所示。需要指出的是, 图 3 和图 4 均忽略了曲线在波长 $\lambda_4 = 532 \text{ nm}$ 处的不连续点。

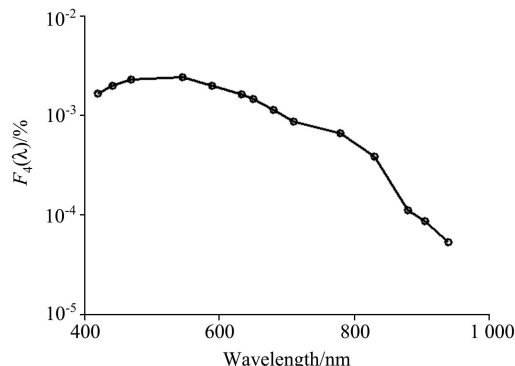


Fig 3 Relationship between $f_4(\lambda)$ and wavelength

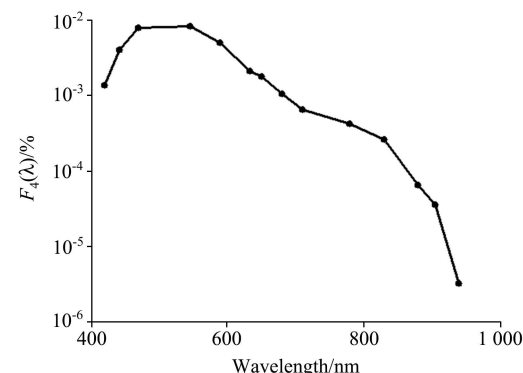


Fig 4 Relationship between $F_4(\lambda)$ and wavelength

由图 3、图 4 可知, 该 VNIR 光谱仪在中心波长 532 nm 的杂散光较大, 同样在其他波段的杂散光测量结果也较大。分析后发现, 原因是测量用光源引起的, 在增加光阑后(位置如图 2 所示), 所有波段的杂散光均有所下降, 其中波长 532 nm 处的杂散光受扰系数 $f_4(\lambda)$ 如图 5 所示。

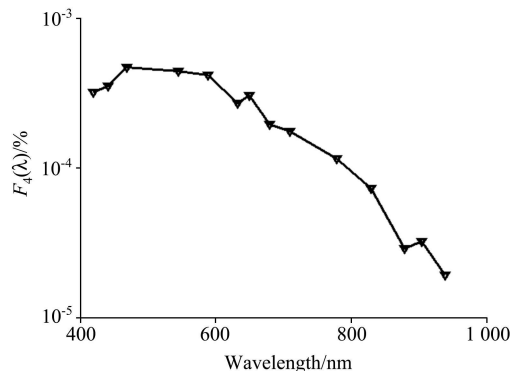


Fig 5 Relationship between $f_4(\lambda)$ and wavelength

5 结论

本文介绍了超光谱成像仪杂散光的定义、来源和危害; 比较了当前光谱仪器杂散光测量方法的优缺点; 提出了使用杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 描述光谱仪杂散光的方法。最后介绍了

使用窄带滤光片测量星载超光谱成像仪杂散光的系统组成、测量步骤和测量结果。结论如下:

- (1) 现有的杂散光测量技术不能满足超光谱成像仪杂散光测量的工程需要。
- (2) 杂散光影响因子 $d_{i,j}$ 能正确表示光谱仪的杂散光特性, 测量结果与光源、滤光片、探测器等测量条件无关, 数据处理简单。
- (3) 窄带滤光片克服了单色仪光谱辐射强度不足的缺

点, 能实现超光谱成像仪杂散光影响因子的测量, 测量设备和测量过程简单, 能满足星载超光谱成像仪杂散光测量的工程需要。

- (4) 杂散光受扰系数 $f_i(\lambda)$ 和杂散光干扰系数 $F_i(\lambda)$ 反应了光谱仪的光谱纯度和对不同波长光谱辐射源的杂散光敏感程度, 对于星载超光谱成像仪研制特别是在轨工作具有较大的应用价值, 可以有效节约系统资源、提高光谱数据有效率和光谱仪的光谱分辨率。

参 考 文 献

- [1] Robert P B. SPIE, 1990, 1331: 2.
- [2] Stephen M P. SPIE, 2003, 4842: 128.
- [3] Sholl M J, Grochocki F S, Fleming J C, et al. SPIE, 2007, 6675: 66750C.
- [4] LIU Rui xiang (刘瑞祥). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 1977, (5): 11.
- [5] LI Ting, YANG Jiarr feng, RU AN Ping, et al (李 婷, 杨剑锋, 阮 萍, 等). Acta Photonica Sinica (光子学报), 2007, 36: 137.
- [6] SHI Guang-hui (史光辉). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2008, 5(5): 10.
- [7] ZHONG Xing, ZHANG Lei, JIN Guang (钟 兴, 张 雷, 金 光). Infrared and Laser Engineering (红外与激光工程), 1997, 37(2): 316.
- [8] LI Xirr yao, YU AN Yir kai, PEI Yurr tian, et al (李欣耀, 原育凯, 裴云天, 等). Science Technology and Engineering (科学技术与工程), 2006, 6(12): 1605.
- [9] HAO Yurr cai, XIAO Shur qin, WANG Lr xia (郝云彩, 肖淑琴, 王丽霞). Chinese Space Science and Technology (中国空间科学技术), 1995, 3: 40.
- [10] YU Bing-xi (禹秉熙). Acta Metrologica Sinica (计量学报), 1991, 12(3): 177.
- [11] YU Xun, HOU Xr qi (于 洵, 侯西旗). Application Optics (应用光学), 1991, 12(5): 53.
- [12] Cutter M A, Lobb D R, Williams T L, et al. SPIE, 1999, 3753: 180.
- [13] Stuf Fler T, Kaufmannb C, Hoferea S, et al. Acta Astronautica, 2007, 61: 115.
- [14] Zong Y Q, Steven W B, Johnson B C, et al. SPIE, 2005, 5882: 588201.
- [15] ZHANG Jur qiang, DONG De yi, YAN Chang xiang (张军强, 董得义, 颜昌翔). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2009, 17(10): 2457.
- [16] WANG Yr qun, YAN Chang xiang, MIAO Churr an (汪逸群, 颜昌翔, 苗春安). Chinese Journal of Optics and Applied Optics (中国光学与应用光学), 2009, 2(4): 304.
- [17] Mielenz K D. Appl. Opt., 1982, 21: 3354.
- [18] Tarrant A W S. Opt. Acta, 1978, (25): 1667.
- [19] Miranda C. Appl Spectrosc, 1971, (25): 557.
- [20] Wilber Kaye. Stray Radiation in Spectrophotometers. American Laboratory, 1983.
- [21] CHEN Zhryi (陈之宜). Journal of Hubei Polytechnic University (湖北工学院学报), 2000, 15(3): 66.

Stray Light of Space Borne Hyperspectral Imager and Its Measurement

ZHANG Jur 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 100049, China

Abstract Hyperspectral imager has more spectral channels and higher spectral resolution compared to normal spectral instrument. Stray light is one of the important reasons affecting the spectral accuracy of the hyperspectral imager, but the current stray light measurements can't meet the need. Definition, sources and harmfulness of stray light are described in the present paper. The feasibility and superiority of the stray light factor $d_{i,j}$, used to describe the stray light characteristics of the spectral instruments, is investigated thoroughly, where the definition, physical significance and value of engineering application of stray light interference factor $f_i(\lambda)$ and stray light disturbance factor $F_i(\lambda)$ are given. Finally, the system components, measurement procedure and measurement results of the stray light measurement system, using narrow-band filter, are introduced. Results

show that the stray light factor $d_{i,j}$ meets the need of the stray light measurement because it can indicate the stray light characteristics of the spectral instruments without relationship to the light source, filter, detector and other measurement conditions, and the measurement efficiency is increased at least one fold than the spectral stray light factors method.

Keywords Stray light; Stray light measurement; Hyperspectral imager; Narrow band filter

(Received Nov. 6, 2009; accepted Feb. 12, 2010)