

星载成像光谱仪杂散光检测技术

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:介绍了星载成像光谱仪杂散光检测技术在国内外的的发展状况,阐述了成像光谱仪杂散光的定义、来源和危害,分析了杂散光检测的必要性。通过截止滤光片法、光谱法、谱杂散光系数法、级数透过率法、氧气吸收光谱及参数拟合法、卷积计算法和矩阵修正法等7种光谱仪器杂散光检测方法优缺点的对比,给出了星载成像光谱仪杂散光检测技术的具体要求和的发展趋势,认为单一的检测技术很难满足工程研制的实际需要,针对各研制阶段的组合检测技术将是星载成像光谱仪杂散光检测的发展方向。

关键词:杂散光;杂散光检测;成像光谱仪

中图分类号:TP73; V243.5 **文献标识码:**A

Stray light measurement technologies for space-borne 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: The current international levels of stray light measurement technologies for a space-borne imaging spectrometer are introduced and the definition of stray light and it's source and harmfulness are discussed. The cut-off filter method, spectrum method, spectral stray light factor method, series transmission method, oxygen absorption spectra and parameter fit method, convolution method and correcting matrix method are described to compare their advantages and disadvantages in the stray light measurement, then the specific requirement of the stray light measurement of space-borne imaging spectrometer are given. Finally, the trends of development of stray light measurement for space-borne imaging spectrometers are summarized, which point out that the independent measuring method for stray light can not meet the needs of practical engineering and the compound measuring technologies will be a developing direction for stray light measurements of space-borne

imaging spectrometers.

Key words: stray light; stray light measurement; imaging spectrometer

1 引言

近年来,高质量的遥感图像在军事、地质、环境、农业等各领域得到了广泛的应用,人们对直接影响遥感仪器成像质量的杂散光也进行了大量的研究。罗伯特等人曾对杂散光做了较为深入的分析 and 总结^[1~3],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^[4],美国在深空探索望远镜 SNAP (Super Nova/Acceleration Probe)^[5,6]研制过程中也对杂散光做了深入的研究。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^[7]。近年来,王平阳、李婷等人也对杂散光做了定量分析和数值模拟^[8,9],史光辉、钟兴、李欣耀等人则对消杂散光措施进行了详细研究^[10~12]。

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^[13],只有禹秉熙、于洵等人在20世纪初对单色仪和非单色仪杂散光做了一些分析和测量工作^[14,15],而对高分辨率成像光谱仪杂散光的分析和检测在国内尚少有报道。在国外,以美国的CHRIS (Compact High-resolution Imaging Spectrometer) 和德国的EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) 为代表的新一代高分辨成像光谱仪都将杂散光的分析和检测作为一个重要的课题进行了深入研究^[16,17]。为了降低杂散光引起的光谱仪分光测量误差,Yuqin Zong 等人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^[18]。

总之,在70年代到90年代之间,人们对杂散光研究的重点由杂散光测量转向杂散光分析,杂散光测量仅作为最终设计评估的手段。但90年代以来,人们对杂散光的研究又回到了杂散光的测量方向,而且是杂散光分析、测量和修正的统一,杂散光测量作为杂散光修正的前提和基础,日益凸现出其重要性。

2 星载成像光谱仪杂散光分析

某星载成像光谱仪的光路如图1所示,工作波段为400~2 500 nm,为了同时达到高分辨、大视场和较低的体积和重量,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 (Three-mirror Anastigmat, TMA),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。

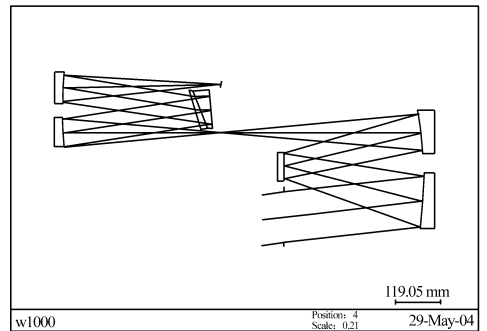


图1 超光谱成像仪的光学结构

Fig. 1 Optical configuration of super-resolution imaging spectrometer

光谱仪器的杂散光大小与入射光源和探测器有关,通常用杂散光系数表示光谱仪器的杂散光水平,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,本文研究的成像光谱仪的光学系统采用复合棱镜分光,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^[19]。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两个方面:

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^[14,15]。美国、德国等也将杂散光的分析和检测纳入新一代高分辨成像光谱仪的研制计划中^[16,17]。

随着星载成像光谱仪的光谱分辨率和光谱测量精度的不断提高,杂散光将逐渐成为制约星载成像光谱仪发展的重要因素之一,必须引起足够的重视。

3 光谱仪器杂散光检测的常用方法

关于光谱仪器杂散光的检测,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法^[20]、光谱法^[21]、级数透过率法^[22]、卷积计算法^[23]等早已应用于单色仪的杂散光测量,矩阵修正法^[18]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^[14]、光学玻璃截止滤光片法^[15]、氧气吸收光谱及参数拟合法^[24]等也被应用于单色仪和非单色仪的杂散光检测。

3.1 截止滤光片法

国内外均有学者曾使用截止滤光片法检测光谱仪器的杂散光。截止滤光片法的基本原理是选择合适光谱透过率的滤光片,将其放在被测光谱仪器入射狭缝前进行测量,并与不加滤光片时的测量结果比较,再由其光谱透过率值计算杂散光。

截止滤光片法的优点是检测设备简单、效率高,适合光谱仪器装调的过程检测。但是,由于只能检测截止滤光片起始波长一侧的杂散光,另一侧的杂散光没有检测出来,所以检测结果较实际值小,且与光源特性有关。此外,短波带通长波截止的滤光片不宜制作,这也成为制约窄带滤光片应用范围的原因之一。

3.2 光谱法

光谱法是利用单色光照射光谱仪器的入射狭缝,测量光谱仪器输出的光谱分布,进而分析光谱仪器杂散光的一种测量方法。

光谱法测得的光谱分布即入射单色光经过光谱仪器后的点扩散函数,能真实反映仪器杂散光

特性,后来还被广泛应用于光谱仪器的光谱标定领域。但是,这种方法需要较强的单色光源,并且探测器的信噪比要求较高。

3.3 谱杂散光系数法

禹秉熙在90年代初提出了用谱杂散光系数来表示单色仪的杂散光,其原理是首先不放被测单色仪,用探测器测量测试用单色仪(用于产生单色光)的光谱辐射通量 $E(\lambda)$,探测器的信号输出为:

$$V_0(\lambda_i) = \alpha E(\lambda_i) E(\lambda_i) \Delta\lambda. \quad (1)$$

然后,把被测单色仪放入测试用单色仪的出射光路上,通过被测单色仪出射的光谱辐射通量为 $E(\lambda)\tau_j(\lambda)$,探测器的信号输出为:

$$V_j(\lambda_i) = \alpha E(\lambda_i) R(\lambda_i) \tau_j(\lambda_i) \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中, α 为光电转换放大系数, $R(\lambda)$ 为探测器的光谱响应, $\Delta\lambda$ 为带宽, $\tau_j(\lambda)$ 为标称波长 λ_j 上被测单色仪的光谱透过率。

由式(1)、式(2)可得出被测单色仪在标称波长上的光谱透过率,即谱杂散光系数:

$$\tau_i(\lambda_i) = \frac{V_j(\lambda_i)}{V_0(\lambda_i)}. \quad (3)$$

谱杂散光系数法的检测结果与光源、探测器等测试条件无关,能较真实地描述仪器的杂散光特性,但是操作较复杂,应用也不够简便。

3.4 级数透过率法

级数透过率法最早是由 C. Mirand 和 P. Conte 等人提出来的,其基本原理是利用某种满足 Beer 定律的溶液,将其配成几种不同的浓度,并且使其浓度成等差级数,即 $C_i = iC_1$ (其中, C 为溶液的浓度, mol/L; $i = 1, 2, 3, \dots, n$),然后用光谱仪测量这 n 种溶液的透过率 T_i ,通过计算(不考虑溶液对杂散光的吸收)可知,各透射率之间存在以下关系:

$$T_{i+1} = \alpha T_i + \beta_i, \quad (4)$$

式中, $\alpha = 10 - \varepsilon C_i l$ (ε 为摩尔吸收系数, l 为光程长度); $\beta = (1 - \alpha)S / (1 + S)$ (S 为杂散光系数)。

由 T_{i+1} 和 T_i 的线性关系,通过直线的斜率和截距即可得到 S 。

由于级数透过率法要使用不同浓度的溶液进行检测,溶液浓度准确性直接影响检测结果。此

外,溶液也有污染光学器件的风险。

3.5 氧气吸收光谱及参数拟合法

氧气吸收光谱及参数拟合法最早是由陈之宜提出来的,并成功用于测量真空紫外单色仪的杂散光。其基本原理是,由于单色仪存在杂散光,当单色仪输出的“单色光”入射到充满氧气的吸收室时,测得的氧气的透过率并不满足 Beer 定律,此时氧气的透过率 T 与吸收系数和杂散光的关系近似表示为(不考虑氧气对杂散光的吸收):

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{\exp(-\mu(273/\Theta)(pl/760)) + S}{1 + S}, \quad (5)$$

式中, μ 为气体的吸收系数, Θ 为气体的绝对温度, p 为气体的压强, l 为气体的几何吸收长度, S 为杂散光。

当改变吸收室中氧气的压强 p 时,同时测出氧气的透过率 T ,即可得到:

$$T_i = \frac{\exp(-\mu(273/\Theta)(p_i l/760)) + S}{1 + S}, \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

式中, n 为测量次数。

采用参数拟合的方法求 S 和 μ ,利用 LMF 算法求解:

$$R = \sum_{i=1}^n [T_i - \frac{\exp(-\mu(273/\Theta)(p_i l/760)) + S}{1 + S}]^2, \quad (7)$$

S 和 μ 为最小值时的 S 即为杂散光。

氧气吸收光谱及参数拟合法检测设备和检测过程较复杂,只有在有特殊需要时(如紫外波段杂散光测量等)才使用。

3.6 卷积算法

卷积算法的基本原理是通过卷积计算求解单色仪的杂散光。若把离开标称波长 L 单位以外的光辐射定义为杂散光,则杂散光为:

$$S(\lambda, L) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda'-L} P(\lambda) F(\lambda, \lambda') d\lambda + \int_{\lambda'+L}^{\infty} P(\lambda) F(\lambda, \lambda') d\lambda, \quad (8)$$

式中, K 为常数, $P(\lambda) = E(\lambda)D(\lambda)M(\lambda)(E(\lambda)$ 为光源的光谱分布, $D(\lambda)$ 为探测器的灵敏度, $M(\lambda)$ 为单色仪的效率), $F(\lambda, \lambda')$ 为单色仪的仪器

函数, λ' 为单色仪标称的波长, λ_1 、 λ_2 为光源发出光的波段范围。

通过测量单色仪的仪器函数 $F(\lambda, \lambda')$ 和光源强度分布 $P(\lambda)$,即可通过式(8)计算单色仪的杂散光。

卷积算法对于检测确定光源的单色仪杂散光有一定的应用价值,但是由于其检测结果与光源、探测器等有关,不能独立表示仪器自身杂散光水平。

3.7 矩阵修正法

矩阵修正法是由 Yuqin Zong 等人最新提出来的,其基本原理是通过测量光谱仪器的杂散光后建立杂散光影响因子矩阵 D ,光谱仪器谱面的光谱辐射可以表示为:

$$Y = D \cdot Y_{IB} + Y_{IB}, \quad (9)$$

式中, Y 为光谱仪器谱面所有像元的光谱辐射实测值组成的列向量; Y_{IB} 为光谱仪器谱面所有像元光谱辐射的有效值组成的列向量。

由式(9)可求解光谱仪器的杂散光修正矩阵:

$$Y_{IB} = A^{-1} \cdot Y = C \cdot Y, \quad (10)$$

式中, C 为光谱仪器杂散光修正矩阵,它反应了光谱仪的杂散光水平。若已知光谱仪器的杂散光修正矩阵 C ,即可利用式(10)对测量结果进行修正。

矩阵修正法的优点是能在检测杂散光的同时对测量结果进行修正,提高光谱仪器的光谱分辨率;但这种方法需要较强的单色光源,并且 CCD 的信噪比要足够高,一般用于成像光谱仪研制后期杂散光的修正,不便于装调过程中杂散光的检测。

通过对 7 种光谱仪器杂散光检测常用方法的归纳,可以发现,这些方法均不能满足星载成像光谱仪杂散光检测在工程研制过程中的需要。

4 星载成像光谱仪杂散光检测要求

现有杂散光检测技术研究和某星载成像光谱仪研制的工程实践表明,星载成像光谱仪杂散光检测方法应满足以下条件:

1) 杂散光检测方法应满足仪器装调过程中

杂散光检测的需要。在仪器装调过程中及时发现杂散光,可为采取措施降低杂散光提供可能;

2) 杂散光检测方法应满足仪器研制后期杂散光修正的需要。杂散光分析和消除工作应在系统设计和装调过程中进行,在仪器装调完毕后,再想降低杂散光水平、提高仪器光谱分辨率,就必须对杂散光进行修正。

3) 任何杂散光检测方法都应满足检测设备简单、检测过程简便、检测效率较高的要求,这直接影响检测方法的工程应用范围。

4) 描述杂散光的物理量应能独立反映仪器的杂散光水平,不能因检测光源、探测器等检测条件影响检测结果,这是星载成像光谱仪杂散光检测的本质要求。

5 结束语

综上所述,虽然人们对光谱仪器的杂散光检测技术进行了大量的研究,但这些检测方法绝大部分仅适用于单色仪的杂散光检测,尚不能完全满足星载成像光谱仪研制过程中对杂散光检测的要求。随着更多光谱通道、更高光谱分辨率的星载成像光谱仪发展,杂散光检测技术必须引起足够的重视。为了满足工程研制不同阶段对杂散光检测的不同需求,单一的检测技术将很难满足工程研制的实际需要,针对各个研制阶段的组合检测技术必将成为此类成像光谱仪杂散光检测的发展趋势。

参考文献:

- [1] ROBERT P B. Problems and techniques in stray radiation suppression[J]. *SPIE*,1977,107:1-2.
- [2] ROBERT P B. Current technology of stray light[J]. *SPIE*,1986,675:2-12.
- [3] ROBERT P B. Stray light technology overview of the 1980 decade(and a peek into the future)[J]. *SPIE*,1990,1331:2-3.
- [4] STEPHEN M P. A stray light analysis of the apache point observatory 3.5-meter telescope system[J]. *SPIE*,2003,4842:128-138.
- [5] LAMPTONF M, AKERLOFB C, ALDERINGA G, et al. . SNAP telescope[J]. *SPIE*,2002,4849:215-226.
- [6] SHOLL M J, GROCHOCKI F S, FLEMING J C, et al. . Stray light design and analysis of the SNAP telescope[J]. *SPIE*,2007,6675:66750C/1-66750C/12.
- [7] 刘瑞祥. 杂光系数及其测量[J]. *光学精密工程*,1977,(5):11-16.
LIU R X. Stray light factors and its measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*,1977,(5):11-16. (in Chinese)
- [8] 王平阳, 夏新林, 谈和平, 等. CCD相机的杂散光模拟计算与分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*,1999,31(5):55-59.
WANG P Y, XIA X L, TAN H P, et al. . Simulation and analysis of stray light in CCD camera[J]. *J. Harbin Institute Technol.*,1999,31(5):55-59. (in Chinese)
- [9] 李婷, 杨剑锋, 阮萍, 等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. *光子学报*,2007,36,137-142.
LI T, YANG J F, RUAN P, et al. . Stray light analysis of the lunar-based optical telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,36:137-142. (in Chinese)
- [10] 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 emergences in Cassegrain systems[J]. *Opt. Precision Eng.*,1997,5(5):10-16. (in Chinese)
- [11] 钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. *红外与激光工程*,2008,37(2):316-318.
ZHONG X, ZHANG L, JIN G. Stray light removing of reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Eng.*,1997,37(2):316-318. (in Chinese)
- [12] 李欣耀, 原育凯, 裴云天, 等. 风云二号扫描辐射计可见杂光分析与抑制[J]. *科学技术与工程*,2006,6(12):1605-1608.
LI X Y, YUAN Y K, PEI Y T, et al. . Analyzing and suppressing visible stray light of scanning radiometer for FY-2 meteorological satellite[J]. *Sci. Technol. and Eng.*,2006,6(12):1605-1608. (in Chinese)
- [13] 郝云彩, 肖淑琴, 王丽霞. 星载光学遥感器消杂光技术现状与发展[J]. *中国空间科学技术*,1995,3:40-50.

- HAO Y C, XIAO SH Q, WANG L X. Status and development of stray light elimination technology for space borne optical sensors[J]. *Chinese Space Sci. and Technol.*, 1995, 3:40-50. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 于洵, 候西旗. 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 X, HOU X Q. Analysis and measurement of stray light in non-monochromatic spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 1991, 12(5):53-56. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] STUFFLER T, KAUFMANN C, HOFER S, *et al.*. The EnMAP hyperspectral imager – an advanced optical payload for future applications in earth observation programmes[J]. *Acta Astronaut.*, 2007, 61:115-120.
- [18] ZONG Y Q, STEVEN W B, JOHNSON B C, *et al.*. Correction of stray light in spectrographs: implications for remote sensing[J]. *SPIE*, 2005, 5882:588201-588208.
- [19] 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 hyper-spectral imager[J]. *Chinese J. Opt. and Appl. Opt.*, 2009, 2(4):304-308. (in Chinese)
- [20] MIELENZ K D, WEIDNER V R, BURKE R W. Heterochromatic stray light in UV absorption spectrometry[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(18):3354-3356.
- [21] TARRANT A W S. Optical techniques for studying stray light in spectrophotometers[J]. *J. Mod. Optic*, 1978, 25(12):1167-1174.
- [22] MIRANDA C, CONTE P. Stray light in absorption spectrophotometry III a survey of method for evaluating stray light level and stray light corrections[J]. *Appl. Spectrosc.*, 1971, (25):557-563.
- [23] KAYE W. *Stray Radiation in Spectrophotometers*[M]. California American Laboratory, 1983.
- [24] 陈之宜. 单色仪杂散光的一种测量方法[J]. 湖北工学院学报, 2000, 15(3):66-68.
CHEN ZH Y. Measuring the stray light in monochromator[J]. *J. Hubei Polytechnic University*, 2000, 15(3):66-68. (in Chinese)

作者简介:张军强(1981—),男,江苏泰州人,博士研究生,助理研究员,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,湖北洪湖人,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:yanx@ciomp.ac.cn

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 和空间光学遥感器热控技术等方面的研究。E-mail:wuqw@ciomp.ac.cn