

C-T 型平板波导红外光谱仪系统自身背景辐射的分析与抑制

吴 越^{1,2}, 刘家祥¹, 方勇华^{1,2*}, 张蕾蕾^{1,2}, 杨文康^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 红外光谱仪内部背景辐射在长波红外波段(8~12 μm)影响比较显著,会严重降低光学系统的分辨率和信噪比。利用 TracePro 光学分析软件,对基于交叉非对称 Czerny-Turner(C-T)型平板波导红外光谱仪进行了背景辐射分析,包括机械构件表面发射率以及光学元件表面温度对背景辐射的影响。引入了杂光系数作为评价指标,根据仿真分析结果,在高低温箱中,对该红外光谱仪的背景辐射影响采取抑制措施并进行了实验测量,实验结果证明:采取背景辐射抑制措施后,C-T 型平板波导光谱仪系统的杂光系数在常温下(298 K)能达到 5% 以下。

关键词: 红外光谱仪; 平板波导; 背景辐射; 杂光系数

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0803001

Background radiation analysis and suppression of C-T type planar waveguide infrared spectrometer system

Wu Yue^{1,2}, Liu Jiexiang¹, Fang Yonghua^{1,2*}, Zhang Leilei^{1,2}, Yang Wenkang^{1,2}

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: The internal background radiation of the infrared spectrometer has a significant effect which will seriously reduce the resolution and signal-to-noise ratio of the optical system in the long-wave infrared band (8–12 μm). In this paper, the TracePro optical analysis software was used to analyze the background radiation of the cross asymmetric Czerny-Turner (C-T) type planar waveguide infrared spectrometer, including the surface emissivity of the mechanical components and the influence of the surface temperature of the optical elements on the background radiation. The stray light coefficient was introduced as the evaluation indicator, and the actual measurement was carried out before and after the background radiation suppression of the spectrometer system in the high and low temperature box. The experimental results show that the stray light coefficient of the spectrometer system can reach less than 5% under the normal temperature (298 K) after the background radiation suppression measures are taken.

Key words: infrared spectrometer; planar waveguide; background radiation; stray light coefficient

收稿日期: 2019-03-15; 修订日期: 2019-04-21

作者简介: 吴越(1992-), 男, 博士生, 主要从事红外光谱仪器方面的研究。Email: wuyue499@163.com

导师简介: 方勇华(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱遥测及目标识别技术方面的研究。Email: yhfang@aiofm.ac.cn

0 引言

对于红外光学系统来说,背景辐射是指光学系统中除了成像光线外,扩散于探测器表面上的其他非成像光线辐射能。红外光谱仪的入射针孔或狭缝的尺寸都很小,限制了外部辐射的强度,因此仪器的自身背景辐射主要是由光学系统内辐射源,如仪器机械内壁、温控热源或者温度较高的光学元件等产生的辐射能量,经过系统表面的反射、折射或衍射传播进入光路,到达探测器像面上。背景辐射会降低光学系统的分辨率和信噪比,严重时,甚至会导致目标信号完全浸没在其所引起的噪声中。所以,在红外波段,尤其是在(8~12 μm)波段,为保证 C-T 型平板波导红外光谱仪在微型化的同时实现精准的探测,在设计光学系统时要分析光学系统内部光机构件背景辐射的严重影响并通过有效的抑制措施得到可靠的系统^[1-2]。

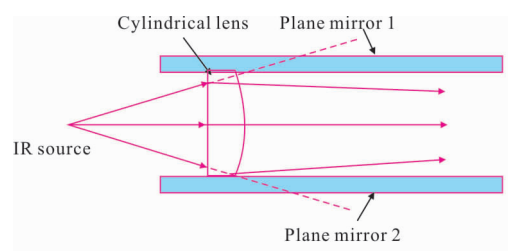
2003 年,英国宇航技术中心^[3]对三维望远镜(VISTA)光学系统的次镜、遮光罩,重要辐射表面发射率等分析,以像面信噪比为评价,指出光学表面有效发射率与信噪比之间的关系,并提出对光学系统部分结构表面抛光或发黑处理的方案。2016 年,澳大利亚天文台^[4]对南极巡天红外望远镜进行了自身热辐射的模型的建立和分析,并且分析了系统的灵敏度,设立了时间计数器以预测系统性能。

国内对背景辐射的研究起步相比于国外较晚。2006 年,中国科学研究院上海技术物理研究所的陈永和等^[5]利用 LightTools 分析软件对一套折反式红外光学系统进行建模,分析了内部机械构件主要表面在不同表面折射率的情况下,探测像面上接收到的辐射能量。2010 年,中国科学院西安光学精密仪器研究所的牛金星等^[6],用 TracePro 软件对 Ritch-Chretien(R-C)型红外探测系统的几个关键内表面研究了一定温度范围内的自身背景变化。同年,中国科学院上海技术物理研究所的王建宇等^[7],针对热红外高光谱成像系统背景辐射严重这一问题,结合几种通用的背景辐射抑制措施,提高了仪器性能。2013 年,北京空间机电研究所的李岩等^[8],对某红外预警相机的背景辐射进行了实例分析,提出了采用内杂散光和外杂散光综合抑制的方法来降低相机系统的背景辐射。

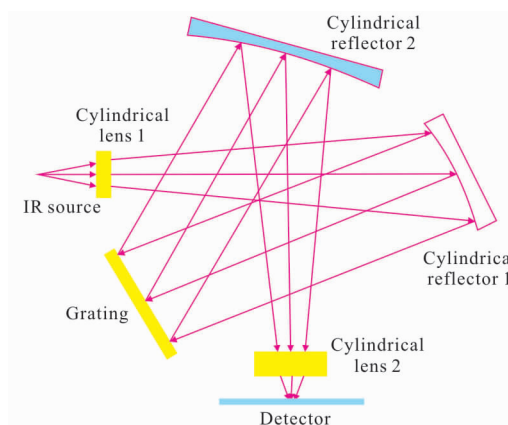
文中针对红外光谱仪在长波红外波段,由于仪器内部背景辐射影响所导致的仪器光学系统性能下降的问题,通过理论分析和实验验证,对交叉非对称 Czerny-Turner 红外光谱仪光学系统自身背景辐射问题进行了研究,并采取了相应的抑制措施,为 C-T 型红外光谱仪的设计和应用提供了有价值的参考。

1 光学系统简介

C-T 型平板波导红外光谱仪采用平板波导结合交叉非对称 Czerny-Turner 结构,体积小、成本低、方便在实验室外作业。其原理如图 1(a)所示,它是以前间隔为 6 mm 的两块上下表面镀金的反射镜形成中空平板波导,结合交叉非对称 Czerny-Turner 结构,可在垂直方向上使光学元件尺寸大大减小;在色散平面上如图 1(b)所示,光线从通过柱面棱镜 1,经柱面反射镜 1 准直后入射到光栅上,然后经后柱面反射镜 2 反射,经柱面棱镜 2 会聚后入射到探测器像面上^[9]。



(a) 垂直平面
(a) Vertical plane



(b) 色散平面
(b) Dispersion plane

图 1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of system structure

1.1 设计参数

C-T 型平板波导红外光谱仪光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光谱仪具体参数

Tab.1 Parameters of spectrometer

Wavelength range/ μm	Spectral sampling interval/ μm	Numerical aperture	Detector array size	Detector pixel size/ mm^2
8-12	0.062 5	0.22	64×1	0.5×1.5

1.2 设计结果

点列图是由一点发出的许多光线经光学系统后，因像差使其与像面的交点不再集中于同一点，形成了一个散布在一定范围的弥散图形。当形成的弥散斑直径符合 Airy 斑直径的要求时，可认为该光学系统为理想光学系统。如图 2 所示，分别是波长 8、10、12 μm 的点列图，黑色圆圈表示为 Airy 斑，

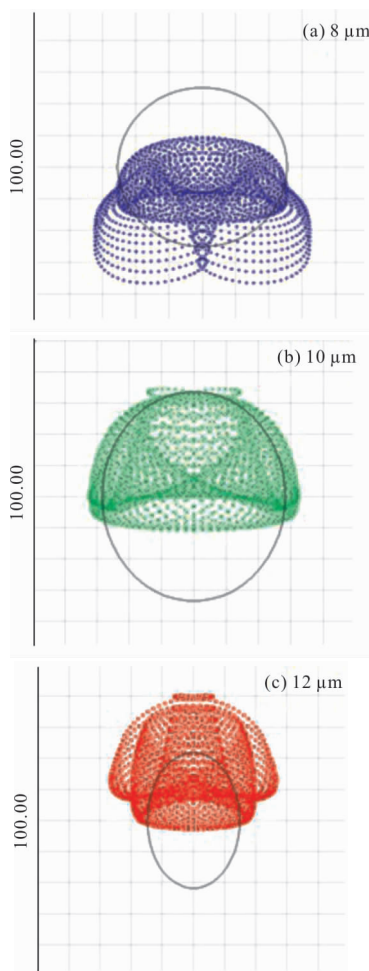


图 2 Zemax 中光学系统点列图

Fig.2 Spot diagram of optical system in Zemax

从图中可以看出各个波长光斑的尺寸与 Airy 斑很接近。图 3 为 RMS Spot Y 与波长的关系图，从图中可以看出：8~12 μm 这个波段 RMS Spot Y 均小于衍射极限值，说明该系统中像差较小，满足设计要求。

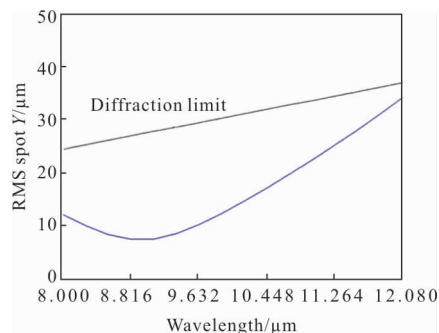


图 3 RMS Spot Y 与波长的关系

Fig.3 RMS Spot Y vs wavelength

2 系统背景辐射分析

根据普朗克公式^[10-11]推导出波长 λ_1 到 λ_2 的灰体辐射功率计算公式为：

$$\phi_e = \varepsilon S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda \quad (1)$$

由公式(1)可知，在一定波段范围内 C-T 型平板波导红外光谱仪探测器像面上的辐射能量与以下几个因素有关：元件表面的发射率 ε 、元件表面的面积 S 以及元件表面的温度 T 。考虑以上因素，针对 C-T 型平板波导红外光谱仪的机械构件和光学元件进行仿真分析，光学元件不同于机械构件，其实际表面发射率相对较小，分析时主要考虑温度的影响，而机械构件由于表面发射率不同，其造成探测器像面上的辐射能量也不一样，同时也还要考虑温度的影响。

2.1 光机模型的建立

利用 TracePro 软件对 C-T 型平板波导红外光谱仪光学系统进行简化建模，如图 4 所示，为了对自身背景辐射进行仿真分析，首先要设定光机系统中各个元件的表面特性，主要背景辐射元件包括机械构件、柱面透镜 1、柱面反射镜 1、柱面反射镜 2、柱面透镜 2 及探测器。

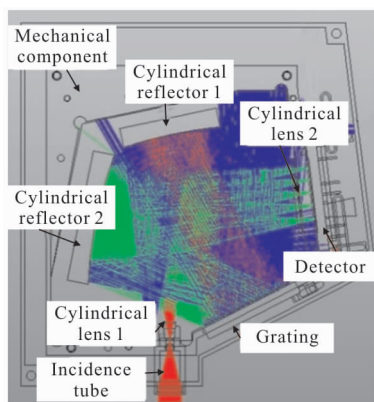


图 4 TracePro 中光机系统光线追迹图

Fig.4 Ray tracing of the whole system in TracePro

2.2 机械构件和光学元件的背景辐射

元件的表面特性决定了杂散光在光机系统中的传输特性,是影响自身背景辐射的重要因素,需要根据实际应用进行设定。在随机光线模拟中,一般要分析 106 条以上的光线才能得出与真实情况较为吻合的结果^[12]。首先分析不同发射率的机械构件表面的背景辐射,在 TracePro 软件中有大量的双向散射分布函数(BRDF)散射模型,在此选用适用于常见均匀随机粗糙表面 ABg 函数模型^[13-14],表达式如下所示。

$$BSDF = \frac{A}{B + |\vec{\beta} - \vec{\beta}_0|^g} \quad (2)$$

式中: $\vec{\beta}$ 和 $\vec{\beta}_0$ 分别是入射方向和反射方向的方向正弦; A 、 B 、 g 是确定 BRDF 函数的 3 个参数。根据实际机械加工工艺和一些公开发表的资料^[15-16],建立反射表面、透镜表面及机械构件表面的 ABg 模型,如表 2 所

表 2 光谱仪系统物理参数

Tab.2 Physical parameters of spectrometer

Name	Absorptivity	Reflectance/Transmittance	BRDF		
			A	B	g
Cylindrical reflector 1	3%	97%	0.000 1	0.015	2
Cylindrical reflector 2	3%	97%	0.000 1	0.015	2
Cylindrical lens 1	5%	95%	0.000 01	0.001 5	2
Cylindrical lens 2	5%	95%	0.000 01	0.001 5	2
Mechanical component	-	-	0.006 6	0.1	2

示。平面光栅表面设置为光栅,衍射级次考虑 0 级、 ± 1 级、 ± 2 级,像面设置为理想吸收表面,吸收率为 1。

选择光线工作波长 8~12 μm , 将光谱仪系统机械构件表面设置成面光源,且均为朗伯体表面,然后分别对不同发射率的机械构件(0.1~0.9)进行计算分析,得到不同发射率下探测器像面接收到的辐射能量,如图 5 所示。

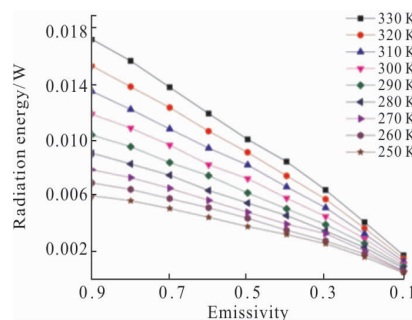


图 5 不同元件在像面上的辐射能量

Fig.5 Radiation flux on image surface of different components

从图 5 中可知,当工作温度一定,C-T 型平板波导红外光谱仪机械构件表面发射率从 0.9 降低到 0.1 时,探测器像面上的辐射能量逐渐变小;当机械构件表面发射率一定时,探测器像面上的辐射能量随着温度的增加而增加。

其次研究不同光学元件的背景辐射影响,在 TracePro 软件中,出射波长为系统的工作波长(8~12 μm),设置光学系统机械构件表面发射率为 0.8,将光学元件表面设为朗伯体表面,探测器像面吸收率为 100%,其余表面参数仍按照表 2 设定,然后在不同表面温度下对不同光学元件进行软件计算分析,得到探测器像面接收到的辐射能量如图 6 所示。

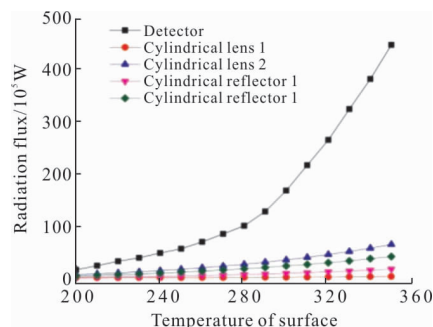


图 6 不同元件在像面上的辐射能量

Fig.6 Radiation flux on image surface of different components

从图 6 中可以看出:柱面透镜 1、柱面透镜 2、柱

面反射镜 1、柱面反射镜 2、探测器随着表面温度的增加,像面上的辐射能量越大;相同温度下,不同位置的光学元件对系统像面上的背景辐射影响不同。柱面透镜 1、柱面透镜 2、柱面反射镜 1、柱面反射镜 2 的产生背景辐射能量基本接近,其中探测器对像面造成背景辐射能量最明显。

3 背景辐射抑制实验

基于上述实验结果,为了减少背景辐射,将其控制在允许的范围内,采取以下几种背景辐射抑制措施相结合的方式^[17]:

(1) 为减小机械构件背景辐射的影响,对机械构件采取表面抛光打磨,降低表面发射率,对于那些没有辐射能量到达像面的表面,可以采取表面发黑的手段,增大吸收率,吸收更多的到达这个表面的辐射能,从而减少其他通过这个表面到达像面的辐射;

(2) 由于探测器工作时自身电路会产生热能,导致探测器表面温度升高。为此,采取添加冷屏和探测器二级制冷的结合抑制方法,如图 7 所示,冷屏可以阻挡大部分的背景辐射能量进入像面,同时对探测器制冷又可以减少探测器的自身背景辐射能量的产生。

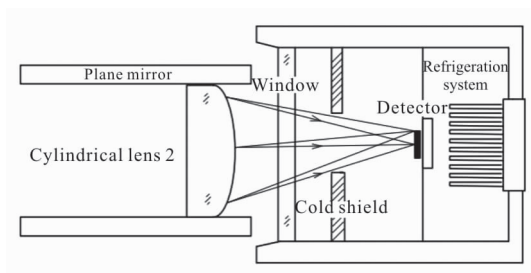


图 7 探测器背景辐射抑制示意图

Fig.7 Schematic diagram of detector background suppression

光谱仪器背景辐射的绝对值大小与入射光源和探测器有关,为了测量采取抑制措施前后光谱仪系统的背景辐射,引入杂光系数 γ 来描述光谱仪的背景辐射的抑制水平^[18-19],即在光谱仪标称波长上一定带宽内,除该波长带宽以外所有其他波长的辐射能量之和与像面的总辐射能量之比,设像面的总辐射能量为 I ,标称波长带宽外的辐射能量为 I_0 ,则杂光系数公式可表示为:

$$\gamma = \frac{I_0}{I} \times 100\% \quad (3)$$

文中选用 IR 光源 (美国鹰眼公司的宽波段光源 IR-Si253,光谱范围 1~20 μm)代替黑体,并在光源和光谱仪之间放入一片滤光片(选择中心波长为 10.555 μm ,带宽为 10 nm 的滤光片)如图 8 所示,实验装置放在高低温箱中,设置不同的温度,对未采取背景辐射抑制的光谱仪进行实验测量记录数据;对光谱仪进行背景辐射抑制,对探测器制冷至 298 K,然后放在高低温箱中进行相同实验并记录。

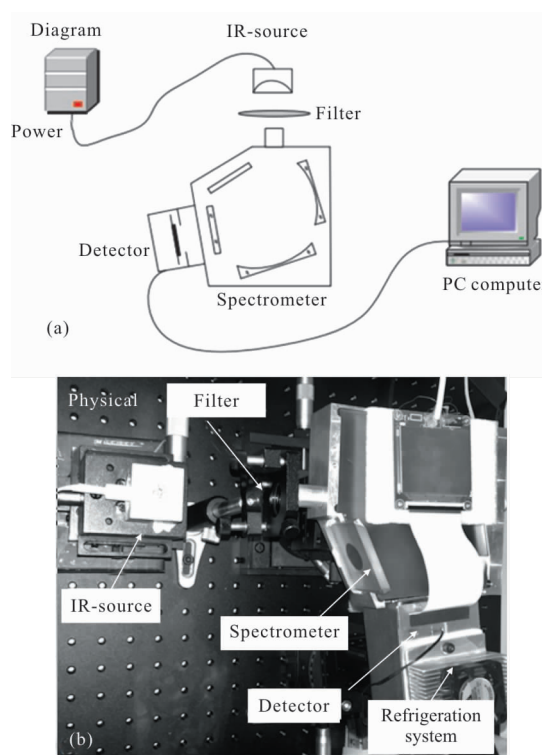


图 8 背景辐射抑制装置

Fig.8 Background radiation suppression device

在不同环境温度下,通过对中心波长(10.555 μm)的光束在探测器上的辐射能量测量,计算得到红外光谱仪系统采取背景辐射抑制措施前后,在 10.555 μm 处的响应谱线,如图 9、10 所示。

图 9 为在实验室环境温度下(298 K),探测器上灰度值(DN)响应,C-T 型平板波导红外光谱仪做背景辐射抑制措施后,其背景辐射明显减小。图 10 为在不同环境温度下,计算光谱仪背景辐射抑制前后的杂光系数,从图中可以看出,在同一环境温

度下,光谱仪系统采取背景辐射抑制后,杂光系数明显减小,且随着环境温度的递减,杂光系数也随之变小。最后通过对探测器进行二级制冷,可使 C-T 型平板波导红外光谱仪在常温环境下(298 K),其杂光系数能达到 5% 以下。

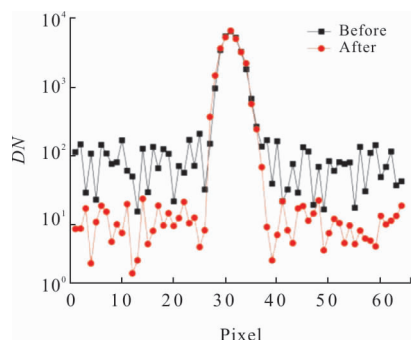


图 9 抑制前后 10.555 μm 波长处的响应(298 K)

Fig.9 Response of 10.555 μm wavelengths before and after suppression (298 K)

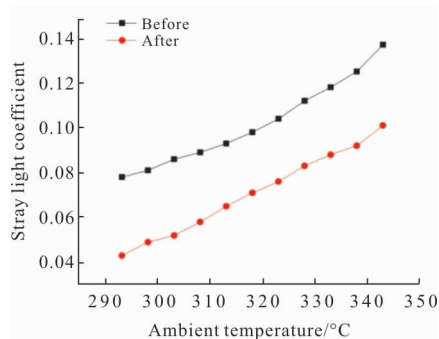


图 10 不同温度下的杂光系数

Fig.10 Coefficient of stray light at different temperatures

4 结论

利用 TracePro, 通过光线追踪仿真了交叉非对称 C-T 型平板波导红外光谱仪不同元件不同条件下的背景辐射影响。引入杂光系数作为评价指标,在高低温箱中对红外光谱仪背景辐射抑制前后进行了定量测量,实验结果证明:采取背景辐射抑制措施后的光谱仪系统在常温下(298 K)的杂光系数能达到 5% 以下,满足一般红外系统的使用要求。文中的研究作为 C-T 型长波红外光谱仪的设计和应用提供了理论依据,对提高红外光谱仪的探测信噪比、减少仪器背景噪声具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Huang Qiang, Niu Xinhua, Shen Xuemin. Stray radiation

analysis caused by interior heat radiation in infrared optical systems [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(6): 348-352. (in Chinese)

黄强, 钮新华, 沈学民. 红外光学系统内部热辐射引起的杂散辐射分析[J]. 红外技术, 2006, 28(6): 348-352.

[2] Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, Zhu Qihua. Stray light analysis for optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 300-304. (in Chinese)

岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 300-304.

[3] Brett A P, Martyn W. Analysis of scattered light for VISTA [C]//SPIE, 2007: 4842.

[4] Zhang J R, Lawrence Jon, Content R, et al. Antarctic surveying telescope (AST3 -3) NIR camera for the Kunlun Infrared Sky Survey (KISS): thermal optimization and system performance [C]//SPIE, 2007, 9911: 9911H.

[5] Chen Yonghe, Fu Yutian, Shen Xuemin. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical system [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(8): 73-79. (in Chinese)

陈永和, 傅雨田, 沈学民. 红外光学系统内部构件热辐射分析[J]. 光学技术, 2006, 32(8): 73-79.

[6] Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, et al. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271. (in Chinese)

牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267-2271.

[7] Wang Jianyu, Xu Weiming. Background radiation suppression of a thermal infrared hyperspectral imaging system [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(6): 419-430. (in Chinese)

王建宇, 徐卫明. 热红外高光谱成像系统的背景抑制和性能优化[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 419-430.

[8] Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0928002. (in Chinese)

李岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.

[9] Li Yangyu, Fang Yonghua, Li Dacheng, et al. Optical design of miniature infrared gratings spectrometer based

- on planar waveguide [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 841–845. (in Chinese)
- 李扬裕, 方勇华. 基于平板波导的小型红外光栅光谱仪的光学设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 841–845.
- [10] Che Nianzeng, Yan Dayuan. Radiometry and Photometry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. (in Chinese)
- 车念曾, 闫达远. 辐射度学与光度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [11] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 57–74. (in Chinese)
- 张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 57–74.
- [12] Zhou Jun. Research on stray light of the infrared detection system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- 周军. 红外目标探测系统的杂散辐射研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] Wang Wenfang, Yang Xiaoxu, Jiang Kai, et al. Stray light analysis of catadioptric infrared optical system with large field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 138–142. (in Chinese)
- 王文芳, 杨晓许, 姜凯, 等. 大视场红外折反光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 138–142.
- [14] Deng Chao. Analysis on stray light elimination for apace solar telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 715–720. (in Chinese)
- 邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 715–720.
- [15] Liu Yang, Fang Yonghua, Wu Jun, et al. Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectrometer system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1164–1171. (in Chinese)
- 刘洋, 方勇华, 吴军, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1164–1171.
- [16] Zhou Haijin. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2331–2337. (in Chinese)
- 周海金. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331–2337.
- [17] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316–318. (in Chinese)
- 钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统在散光的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316–318.
- [18] Tian Tieyin, Wang Hong, Feng Shengjie. Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 583–589. (in Chinese)
- 田铁印, 王红, 冯晟杰. 三线阵测绘相机光学系统的杂光分析与计算[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 583–589.
- [19] Zhang Junqiang, Wu Qingwen, Yan Changxiang. Measurement and correction of stray light of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 552–560. (in Chinese)
- 张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量与修正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 552–560.