

中红外平面光栅光谱仪系统杂散光分析

刘 洋^{1,2}, 方勇华¹, 吴 军¹, 雒 静^{1,2}, 李扬裕^{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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了抑制杂散光对中红外平面光栅光谱仪系统成像质量的影响, 首先探讨了系统杂散光的来源, 设计了遮光罩、挡光环和里奥光阑; 然后针对用挡光板消除光栅衍射杂散光能力有限的问题, 提出利用百叶挡光板和杂散光收集器组合来抑制杂散光的影响, 并结合三维建模软件 Solidworks 和杂散光分析软件 Tracrpro 对系统进行了建模、分析和对比; 最后针对某一型号红外热电堆阵列探测器并运用黑体辐射理论对其进行计算和分析, 最终结果表明: 光谱仪系统地气杂光抑制水平 PST 可以达到 10^{-11} , 内部杂散辐射抑制能力有效发射率为 1.3%, 满足中红外平面光栅光谱仪系统杂散辐射的抑制要求。

关键词: 杂散光; 中红外光谱仪; 百叶挡光板; 杂光收集器; 黑体辐射理论

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1164-08

Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectrometer system

Liu Yang^{1,2}, Fang Yonghua¹, Wu Jun¹, Luo Jing^{1,2}, Li Yangyu^{1,2}

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to suppress the effects of stray light radiation on imaging for mid-infrared plane grating spectrometer system. First, the sources of stray light for spectrometer system were investigated, the baffle, vane and Lyot stop were designed. Then a new method of combining shutter barrier and stray light collector was proposed to solve the shortage of using normal light barrier to suppress the higher order diffraction stray light, and Solidworks and Tracepro softwares were used to model, analyze and compare the system. Finally, the sytem using an infrared thermopile array detector according to blackbody radiation theory was calculated and analyzed. Final analysis results show that the Point Sources Transmittance of the spectrometer can reach the level of 10^{-11} , effective emissivity is 1.3%, two results show that the stray light suppression can meet the requirements.

Key words: stray light; mid-infrared spectrometer; shutter barrier; stray light collector; blackbody radiation theory

收稿日期: 2014-04-07; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(41175037)

作者简介: 刘洋(1986-), 男, 博士生, 主要从事光机系统设计方面的研究。Email: liyang0227@163.com

导师简介: 方勇华(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事遥感光电信息技术方面的研究。Email: yhfang@aiofm.ac.cn

0 引言

杂散光是指光学系统中到达像面的一种有害非目标光束,当影响较大时会淹没目标微弱光信号,甚至导致整个系统失效^[1]。中红外平面光栅光谱仪系统利用目标和背景之间的温差形成的红外辐射而进行被动探测,具有目标识别能力强、应用范围广的特点^[2],但是在系统工作时,视场外和系统自身辐射杂散光会不经散射直接到达像面而影响光学成像质量,因此,为了得到性能可靠的中红外平面光栅光谱仪系统,必须进行杂散光分析和抑制。

目前,国内外针对杂散光的研究已经非常深入。美国国家天文台的史蒂芬等人对地基天文望远镜系统的杂散光进行了研究和抑制^[3];美国 EO-1 资源卫星使用挡光板对杂散路径进行遮拦,得到了很好的效果^[4];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的吴从钧等人利用滤光片实现了对小型光栅光谱仪光谱重叠的消除^[5];中国科学院安徽光学精密机械研究所的周海金等人利用遮光罩和挡光板对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪进行了杂散光分析^[6];浙江大学的刘康等人利用滤光片和挡光板对微型光栅光谱仪系统的杂散光进行了研究^[7]。

针对光栅光谱仪的研究,挡光板的存在虽然在一定程度上抑制了工作波长的高级次衍射杂散光,但是其抑制能力有限,部分杂散光仍然会散射到探测器像面上;同时上述光栅光谱仪的研究只局限于紫外-可见光波段^[5-7],中红外波段自身辐射的影响未曾提及。文中在总结上述抑制杂散光方法的基础上,对挡光板结构进行了改进,同时设计了杂散光收集器,两者组合对工作波长的高级次衍射杂散光进行抑制,最后运用 Tracepro 软件对系统建模、仿真和分析,并计算了系统自身辐射的影响。

1 中红外平面光栅光谱仪系统

中红外平面光栅光谱仪系统如图 1 所示,光学系统由双离轴抛物镜、狭缝、平面光栅、超环面聚焦镜和红外热电堆阵列探测器组成,系统参数如表 1 所示^[2]。

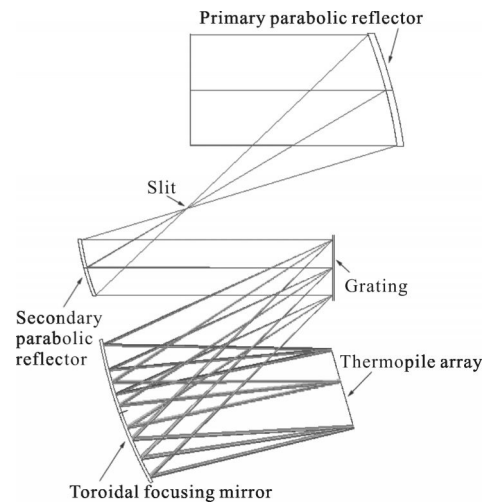


图 1 中红外平面光栅光谱仪光学系统

Fig.1 Optical path of mid-infrared plane grating spectrometer system

表 1 中红外平面光栅光谱仪光学系统参数

Tab.1 Optical parameters of Mid-infrared plane grating spectrometer system

Parameter	Value
Spectral range	8.04–13.96 μm
Spectral resolution $\delta\lambda$	80 nm
Diffraction order k	-1
Aperture diameter D	50.8 mm
Field $Y \times X$	0.34° \times 0.048°
Slit $W \times H$	120 $\mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$

2 杂散光来源及其评价指标

2.1 系统杂散光来源

杂散光的来源大体可以概括为两大类:第一类是外部杂散光,主要是指光学系统视场外的杂散辐射源(星光、太阳、地气散射等)产生的辐射;第二类是内部杂散光,主要是光学系统本身的热辐射直接或通过散射到达探测器表面以及视场内光线经光学元件表面非正常传递到达探测器表面^[3]。

中红外平面光栅光谱仪系统工作于地面环境中,其主要的杂散辐射源有太阳、天空背景和大气。在中红外波段太阳杂散辐射能量已经足够小,可以忽略不计,因此主要考虑天空背景和大气形成的地气杂散光辐射,必须加以抑制。

中红外平面光栅光谱仪系统使用平面闪耀光栅作为分光元件,由光栅方程 $k_i \lambda_i = k_r \lambda_r$ 可知,工作波长

外的短波长高级次光谱与工作波长的低级次光谱发生叠加,例如 $4\ \mu\text{m}$ 光的二级光谱将会重叠在 $8\ \mu\text{m}$ 光的一级光谱上,两者在探测器像元空间上无法区分,此时,二级光谱相对于一级光谱也是杂散光,这种级次的重叠式杂散光必须加以抑制;与此同时,光谱仪系统工作波长的高级次衍射杂散光也可能会入射到像面造成影响,如 $10\ \mu\text{m}$ 的二级衍射光会散射到探测器像元上,因此也必须进行消除。三级次及更高级次的衍射光能量已足够小,可忽略不计。

此外,在任意温度下,红外光学系统本身总是存在着热辐射,其产生的热辐射通过反射、散射或衍射到达探测器像面,会使系统的信噪比降低。因此,自身热辐射的影响也不可忽略。

2.2 杂散光抑制水平评价指标

2.2.1 点源透射率

在目前阶段,光学系统对外部杂散光抑制水平的评价指标普遍采用点源透射率 (PST)^[1],其定义如下:

$$PST = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)} \quad (1)$$

式中: $E_d(\theta)$ 为光学系统视场外离轴角 θ 的点源在像面处产生的辐照度; $E_i(\theta)$ 为该点源在光学系统入瞳处产生的辐照度。

PST体现了光学系统本身对杂散光源的抑制能力,与杂散光源的个数和辐射强度无关,其值越小,表示系统杂光抑制能力越强,系统性能越好。

2.2.2 有效发射率

评价红外系统内部杂散辐射抑制能力的指标是有效发射率(Effective Emissivity)^[8]。有效发射率是指探测器能接收到的系统所有器件表面自发辐射能总和与将最后一个光学元件表面视为黑体时探测器接收到的辐射能之比,即

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\Phi_s}{\Phi_{\text{bb}}} \quad (2)$$

式中: Φ_s 为探测器接收到的系统所有器件表面自发辐射能总和; Φ_{bb} 为最后一个光学元件表面视为黑体时探测器接收到的辐射能。

性能良好的红外系统要求有效发射率在 2%~3%之间,抛光良好、镜面无污染的红外系统要求有效发射率控制在 2%以内^[8]。

3 消杂散光装置设计

3.1 遮光罩设计

遮光罩的作用是在不遮拦视场内光线的前提下,尽可能地抑制杂散光辐射。根据 2.1 分析知,系统外部杂散辐射源主要是地气杂散光,其入射临界角为 15° ^[9],根据遮光罩设计基本原则及设计方法进行设计^[10]。

遮光罩有盒状和筒状两种结构。文中光学系统的视场为 $0.34^\circ \times 0.048^\circ$,为一矩形视场,Y方向视场较大,遮光罩外观应当设计成盒状。由光学系统参数可知,Y方向上的半视场为 0.17° ,以此角度作为外遮光罩视场内光线的边界,从入瞳下边沿作一条与光轴成 15° 的直线交光轴上边界与一点,则该点就是外遮光罩入口所在的位置,如图 2 所示。

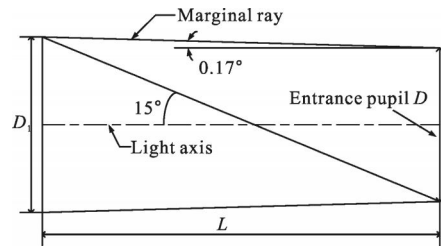


图 2 Y 方向的遮光罩尺寸设计

Fig.2 Baffle design of Y axis

设遮光罩的长度为 L ,外端口直径为 D_1 ,由图中的几何关系有:

$$L \tan 15^\circ = L \tan 0.17^\circ + D \quad (3)$$

$$D_1 = D + 2 L \tan 0.17^\circ \quad (4)$$

联立(3)、(4)得: $D_1=51.4\ \text{mm}$, $L=191.7\ \text{mm}$ 。

同理在 X 方向遮光罩的口径和长度分别为 $D_1=50.87\ \text{mm}$, $L=189.9\ \text{mm}$ 。

遮光罩应当保证足够的长度以至于杂散光辐射不能直接照射在主镜面上,所以设计遮光罩外观为长方体盒状,长度 $L=192\ \text{mm}$,内部 Y 方向口径为 $51.4\ \text{mm}$,X 方向口径为 $50.9\ \text{mm}$ 的锥状结构。

3.2 挡光环设计

由于要求系统对杂光抑制水平较高,需要在遮光罩内部设置挡光环结构,并涂上高吸收的黑色涂层,从而消弱后面系统的杂散辐射能量。

由于系统 Y 方向视场较大,如果挡光环采用圆

形通光孔径,则会使 X 方向进入系统的杂光辐射能量增加,因此,需要将挡光环设计成方形结构。挡光环梯度分布, X 和 Y 方向根据各自方向上的视场角决定挡光环的宽度,这样将会减小 X 方向上直接到达主镜的杂光能量,从而可以最大限度地抑制直接到达系统的视场外杂光^[10]。

X 方向视场小,由此确定挡光环的梯度,即由 X 方向视场决定挡光环的位置和数目。

根据挡光环设计原理^[10],如图3所示, AB 为遮光罩外端口, CD 为遮光罩的内端口, EF 为入瞳直径。作 AC 与 BF 交于 G_1 点,此点为第一挡光环位置,再过 G_1 点作直线 EG_1 与遮光罩表面 CN 相交于 H_1 点,连接 AH_1 与 BF 交于 G_2 点,为第二挡光环位置,以此类推即可求出所需挡光环的数目以及它们的轴向位置。

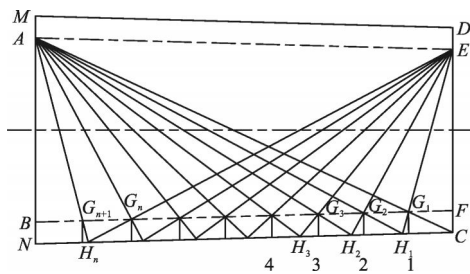


图3 挡光环设计

Fig.3 Design of light barrier ring

所设计挡光环高度为8 mm,遮光罩外端口处壁厚1 mm,外观为立方体盒状,内部为锥状。利用Solidworks三维建模软件,结合光谱仪系统自身结构,并考虑到仪器外壳的厚度4 mm,将遮光罩一分为二,分为内外遮光罩,由于系统处在离轴状态,需要在内遮光罩的侧面开个孔,最终设计的内外遮光罩如图4所示。

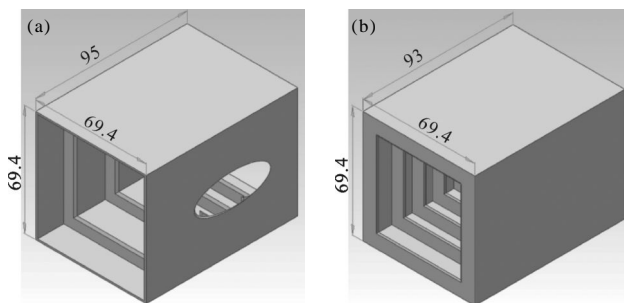


图4 内外遮光罩示意图

Fig.4 Inner baffle and outer baffle

3.3 带通滤光片

根据系统的光谱工作范围 $8.04\sim 13.96\ \mu\text{m}$ 以及光栅方程 $k_i\lambda_i=k_r\lambda_r$ 可知, $4.02\sim 6.54\ \mu\text{m}$ 的二级光谱($k=2$)以及 $2.67\sim 4.67\ \mu\text{m}$ 的三级光谱($k=3$)会与 $8.04\sim 13.96\ \mu\text{m}$ 波段的一级光谱($k=1$)发生重叠,因此需要将小于 $7\ \mu\text{m}$ 的波段光谱截止,在光学系统中附加 $7\sim 15\ \mu\text{m}$ 的带通滤光片^[5]。

经Tracepro光学设计软件多次仿真得知,如果将带通滤光片放置在入瞳处会使离轴平行光到达离轴抛物镜发生偏离,因此,将红外带通滤光片放置在平行光路中,即放置在平面光栅前。

3.4 其他消杂散光装置设计

(1)衍射光栅存在多级次衍射现象,主极大之外的光线都是杂散光,在保证光路正常传输的同时,用表面涂有红外吸收层的挡光板将光路隔离开^[6-7]。

(2)根据该光学系统的成像特点,在红外热电堆阵列探测器前放置里奥光阑^[8]。里奥光阑一般有圆柱状、圆锥状两种形式,文中选择具有两级挡光环的圆锥状的一阶里奥光阑,采用矩形通光孔径,如图5所示。

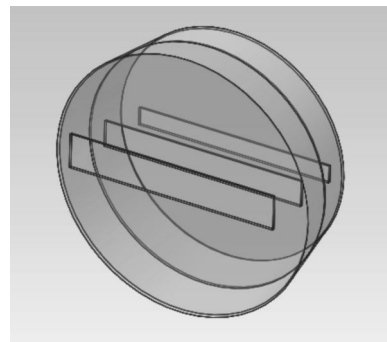


图5 里奥光阑

Fig.5 Lyot stop

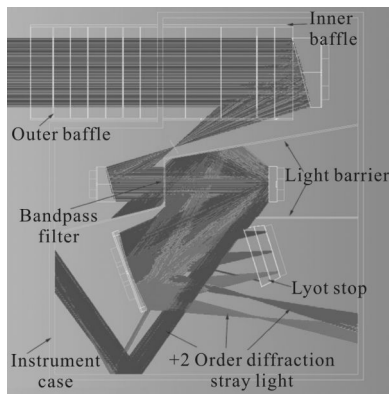
4 系统消杂散光仿真与分析

4.1 系统建模

根据光学系统结构和设计的消杂散光装置,利用三维建模软件Solidworks建立初始光机结构,为突出关键问题,对镜片支架结构进行了一定的简化,将光机结构另存为SAT文件导入Tracepro软件中,根据Abg散射模型,对系统元件进行表面特性设置。

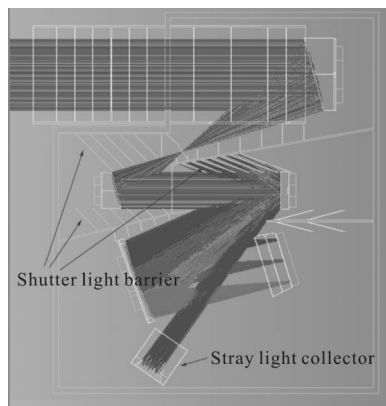
其中, 红外带通滤光片材质为 ZnSe, 表面镀增透膜^[1], 透射率为 97%, BRDF 参数为: $A=0.00076$, $B=0.015$, $g=2$; 双离轴反射镜和超环面反射镜表面设置为 IR Gold 属性; 挡光板、镜片支架、里奥光阑、仪器壳体内表面、杂光收集器外表面采用 Aeroglaze Z306 涂层^[6], 吸收率为 93%, BRDF 参数为: $A=0.0066$, $B=0.1$, $g=2$; 遮光罩、挡光环、杂光收集器内表面采用黑色吸收涂层^[2], 吸收率为 96%, BRDF 参数为: $A=0.0007$, $B=0.1$, $g=0$; 平面闪耀光栅表面设置为 grating, 衍射级次考虑 0 级、 ± 1 级、 ± 2 级, 其中 -1 级为主极大; 像面设置为理想吸收表面, 即吸收率为 100%。

利用 Grid Source 模拟平行光, 得到如图 6(a) 所示的光机系统, 从图中可以看出, 经平面光栅衍射后的高级次衍射光经挡光板散射后仍然会在系统中传播, 最后会对系统成像造成影响。对挡光板进



(a) 未添加百叶挡光板和杂散光收集器

(a) Spectrometer without shutter barrier and stray light collector



(b) 添加百叶挡光板和杂散光收集器

(b) Spectrometer with shutter barrier and stray light collector

图 6 Tracepro 光机系统仿真

Fig.6 Spectrometer system simulation in Tracepro

行改进, 增加了百叶片, 如图 6(b) 中所示, 同时设计了杂散光收集器, 如图 7 所示, 正锥形设计有利于吸收入射的红外杂散光束, 放置在光栅高级次衍射路径上。然后, 在 Tracepro 中将百叶挡光板表面设置为 Aeroglaze Z306 涂层, 杂散光收集器内表面设置为黑色吸收涂层, 进行平行光追迹, 得到图 6(b) 所示的光路。

对比图 6(a) 和 (b), 可以看出, 由于百叶挡光板和杂散光收集器的存在, 平面光栅高级次衍射杂散光得到了很好的抑制。

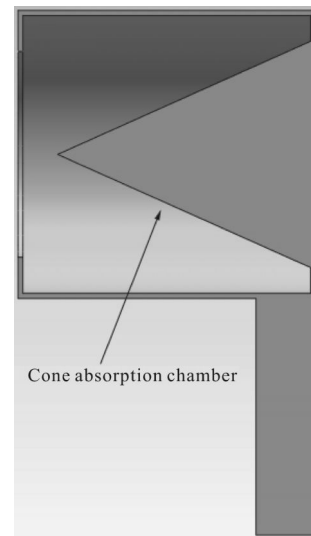


图 7 杂光收集器

Fig.7 Stray light collector

4.2 确定系统散射路径

杂散光分析中有两类重要的散射面, 即关键表面和照明面^[4]。如果一个元件表面既是关键表面又是照明面, 则杂散光线经过该表面直接到达探测器像面形成一次散射路径。如果从一个关键表面能够看到某个照明面, 那么杂散光线经过照明面散射到关键表面上, 再由此关键表面散射到探测器像面而形成二次散射路径, 对系统造成很大的危害, 因此, 应当尽可能阻挡或消除一次、二次散射路径。

4.2.1 反向光线追迹确定关键表面

从像面出发反向追迹杂散辐射传输的关键面, 将探测器表面设置为面光源, 光线发射特性为 lambertian, 光线条数 10 000 根, 阈值为 1×10^{-10} , 光线出射方向随机分布, 同时将平面衍射光栅表面定义为 Mirror, 得到的关键表面见表 2。

表 2 系统关键表面

Tab.2 Major surfaces of spectrometer system

Object No.	Surface
1	15, 24, 25, 26
9	13-66
10	0-3
11	3
13	16
16	7
17	1-20
18	0-22
19	0, 1, 4
20	4-26

4.2.2 前向追迹确定照明面

从杂散光源方向 0.2°~40°之间的 10 个离轴角度入射光线分别确定系统的照明面,不同离轴角的光线追迹得到不同的照明面。表 3 给出了具有代表性的 0.2°入射光线的照明面。

表 3 0.2°光源入射确定的照明面

Tab.3 Direct lighting surface of system in the light source angle of 0.2°

Object No.	Surface
1	15, 27, 28
2	0-52, 59-102
3	0-80
4	0-16
5	0-7
6	0-12
7	0, 7
9	68-123
10	0-3
11	3
13	16
17	21
20	4-27

通过比较表 2、表 3 可以看出,所有的光学元件表面均是一次散射面,除此之外,由于狭缝、遮光罩、挡光板等消杂散光装置的存在,系统二次及二次以上的散射路径几乎不存在。

4.3 系统点源透射比 PST 计算

根据以往对中红外光学仪器的使用及黑体辐射理论,天空背景和大气形成的地气杂光辐射源可以

用有效温度为 300 K 的黑体辐射近似地代表^[12],其大小可由普朗克公式^[13]计算得到:

$$L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_e) - 1} d\lambda \quad (5)$$

式中: c_1 为辐射常数, $c_1=3.741\ 832 \times 10^4$ ($W \cdot \mu m/cm^2$), $c_2=1.438\ 786 \times 10^4$ ($\mu m \cdot K$); $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为光谱仪系统工作波段。

地气杂散辐射源在光学系统入瞳处的辐照度可表示为:

$$E_e = L_e \Omega_e \cos \theta \quad (6)$$

式中: θ 为光线进入光学系统的离轴角,根据 PST 定义, $\theta=0^\circ$; Ω_e 为地气杂散光辐射源对像面所张的立体角, $\Omega_e = A_0 \cos \theta_0 / f^2$, θ_0 为系统离轴角。

根据式(5)、(6),可得 $E_e=9.2\ W/m^2$ 。

已知系统入瞳的直径 D , 则系统入瞳处接收到的杂散光辐射功率为:

$$P_e = E_e A_0 = E_e \frac{\pi}{4} D^2 \quad (7)$$

将 $E_e=9.2\ W/m^2$ 代入式(5),可得 $P_e=1.864\ 7W$ 。

入瞳处杂散光辐射功率经过系统后由探测器单个探测单元接收到的辐射功率为 P_{stray} :

$$P_{stray} = P_e PST(\theta) \quad (8)$$

所述系统采用 Micro-Hybrid 公司生产的 TPL640 型号红外热电堆阵列探测器,其性能参数如表 4 所示。

表 4 TPL640 性能参数

Tab.4 Performance parameters of TPL640

Parameter	Value
Pixel	64
Spectral range	2-16 μm
Specific Detectivity	$1.08 \times 10^9\ cm\ Hz^{1/2}/W$
Active area per pixel	0.45 mm \times 1.5 mm

探测器单元的噪声等效功率 P 为:

$$P = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{D^2} \quad (9)$$

式中: A_d 为探测器单元面积; Δf 为噪声带宽,取 $\Delta f=20\ kHz$,可得 $P=1.075\ 8 \times 10^{-8}\ W$ 。

为保证杂散光不影响正常探测,则要求系统满足如下关系^[8]:

$$P_{stray} \leq 0.1P \quad (10)$$

联立方程得:

$$PST(\theta) \leq 5.7685 \times 10^{-10} \quad (11)$$

根据 PST 的定义, 用有效视场外无限远处的点光源入射系统, 在 Tracepro 中采用 Grid Source 平行光进行模拟。为使仿真结果更精确, 合理设置追迹条数和阈值, 分别对 $0.2^\circ \sim 40^\circ$ 之间的 10 个离轴角度进行光线追迹。在 $0.2^\circ \sim 5^\circ$ 内, 采用 54 000 条追迹光线, 阈值为 1×10^{-11} ; 在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 内, 采用 72 000 条追迹光线, 阈值为 1×10^{-12} , 得到相应的像面辐射功率, 计算出系统的 PST 值, 并用 Matlab 绘制 PST 曲线, 如图 8 所示。

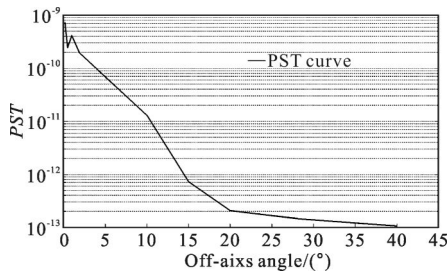


图 8 中红外平面光栅光谱仪系统 PST 曲线

Fig.8 PST curve of Mid-IR Plane Grating Spectrometer system

从图 8 可以看出, PST 曲线整体呈下降趋势, 离轴角在 $0.2^\circ \sim 20^\circ$ 下降很快, 并且数量级保持在 10^{-11} ; 在临界角 15° 时, PST 达到 10^{-12} ; 离轴角在 20° 以上时 PST 约为 10^{-13} , 比较式(11), 可以看出消杂散光装置的设计完全满足系统要求。

4.4 有效发射率计算

根据基尔霍夫定律, 在热平衡的条件下, 物体表面的热辐射发射率与其对热辐射的吸收率相等, 因此物体表面吸收率大, 同样其发射率也大, 产生的热辐射也多。

为了保持对外部杂散辐射的良好抑制, 继续采用前面分析的消杂散光装置, 因此挡光板、镜片支架、里奥光阑、仪器壳体内表面、杂光收集器外表面的热发射率为 0.93; 遮光罩、挡光环、杂光收集器内表面的热发射率为 0.96; 双离轴反射镜和超环面反射镜表面热发射率为 0.01; 探测器表面仍设置为理想吸收表面, 系统温度为 300 K, 在 Tracepro 软件中对其进行设置、仿真, 探测器接收到的总能量如图 9(a) 所示。

将系统最后一个光学表面——超环面反射镜表面设置成黑体辐射, 温度为 300 K, 探测器接收到的

能量如图 9(b) 所示。

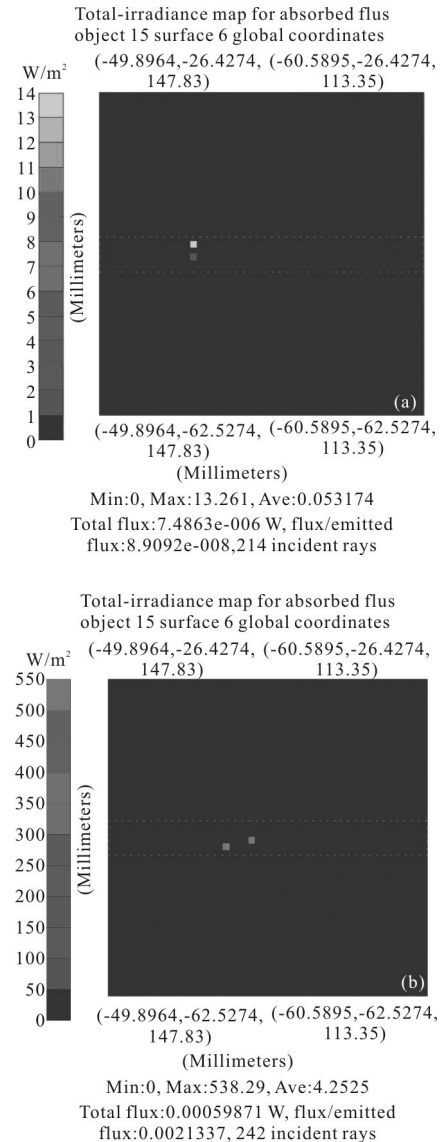


图 9 (a) 探测器接收所有器件的自发辐射能, (b) 超环面反射镜为黑体时探测器接收到的能量

Fig.9 (a) All equipments spontaneous radiation by detector and (b) Toroidal focusing mirror as black body spontaneous radiation by detector

根据式(2), 得到系统有效发射率为:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\Phi_s}{\Phi_{\text{rb}}} = 1.3\% \quad (12)$$

根据 2.2.2 节描述, 系统有效发射率满足系统使用要求。

5 结论

对中红外平面光栅光谱仪系统进行了杂散光分析, 设计了消杂散光装置, 利用百叶挡光板和杂散光

收集器的组合对杂散光进行抑制。在三维建模软件 Solidworks 中实现光机装配,在杂散光分析软件 Tracrpro 中建模、仿真,分析了系统一次、二次散射路径。针对某一型号红外热电堆阵列探测器并结合黑体辐射理论对其进行计算和分析,最终结果表明:百叶挡光板和杂散光收集器的组合使用,光谱仪系统地气杂光抑制水平 PST 可以达到 10^{-11} ,内部杂散辐射抑制能力有效发射率为 1.3%,满足中红外平面光栅光谱仪系统使用要求。

虽然消杂散光装置的设计保证了系统的正常使用,但是由于机械装置的添加增加了光谱仪的重量,增大了仪器整体尺寸,同时也产生了机械振动等问题,这些文中未进行讨论,对于中红外平面光栅光谱仪系统更深层次的研究将在后续工作中进行。

参考文献:

- [1] Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jianguang. Stray light analysis for hyper-spectral imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1532-1537. (in Chinese)
王美钦, 王忠厚, 白加光. 高光谱成像仪的杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1532-1537.
- [2] Liu Yang, Fang Yonghua, Li Dacheng, et al. Optical design and optimization of a Mid-IR plane grating spectrometer System [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 413-418. (in Chinese)
刘洋, 方勇华, 李大成, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统光学设计与优化[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 413-418.
- [3] Shang Ling, Liu Zhaohui, She Wenji. Optimizing design of baffle in the ground-based IR optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1158-1162. (in Chinese)
尚玲, 刘朝晖, 折文集. 陆基红外探测系统遮光罩优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1158-1162.
- [4] Deng Chao. Analysis on stray light elimination for space 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.
- [5] Wu Congjun, Yan Changxian. Optical design of a small-size, long-spectrum range and low-resolution spectrograph [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 134-139. (in Chinese)
吴从钧, 颜昌翔. 小型宽光谱低分辨率光谱仪光学设计 [J]. *光电工程*, 2011, 38(10): 134-139.
- [6] Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi, et al. 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, 刘文清, 司福祺, 等. 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.
- [7] Liu Kang. Research on the key technology of the miniature spectrometer and its application system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
刘康. 微型光谱仪关键技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [8] 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.
- [9] Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping, et al. Baffle design and simulation of R-C system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 332-336. (in Chinese)
李婷, 杨建峰, 阮萍, 等. R-C 系统的遮光罩设计与仿真 [J]. *光子学报*, 2008, 37(2): 332-336.
- [10] Yan Peipei, Fan Xuewu, Zou Gangyi, et al. Stray light removing design and simulation of the three-mirror optical system used in field bias[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1997-2002. (in Chinese)
闫佩佩, 樊学武, 邹刚毅, 等. 偏视场用三反系统消杂光设计及仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1997-2002.
- [11] Shang Ling. Optical system design and stray light analysis of a space-based visible camera [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2012. (in Chinese)
尚玲. 天基可见光探测相机光学系统设计及杂散光分析 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2012.
- [12] Niu Jinxing. Stray light analysis and suppressing of Infrared Detecting System [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2010. (in Chinese)
牛金星. 红外探测系统杂散辐射的分析与抑制技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2010.
- [13] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. *Infrared Physics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (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.