

基于自发辐射抑制的红外光机系统优化设计

周 军 李 娟 王庆丰 许敏达 张聪跃

北京遥感设备研究所, 北京 100854

摘要 低背景探测的红外光机系统, 目标信号很弱, 系统自发辐射影响很大。指出了考虑系统自发辐射抑制的红外光机系统优化设计方法。从有效发射率和等效黑体辐射温度两方面比较了折反、同轴全反和离轴全反结构在自发辐射抑制方面的优劣, 发现全反系统优于折反系统, 离轴全反系统最优; 从等效黑体辐射温度的变化, 介绍了光机系统工作波段优化、结构优化设计和构件表面优化处理, 发现甚长波探测在低背景下具有明显优势、光机结构表面高反和发黑合理布局效果更好; 分析了制冷对光机系统抑制自发辐射的作用, 发现制冷对自发辐射抑制作用明显, 但制冷温度越低, 效率越差, 采取局部关键面制冷效果显著。

关键词 光学设计; 自发辐射; 等效发射率; 等效黑体辐射温度; 甚长波; 制冷

中图分类号 TN202 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0322003

Optimized Design of Infrared Opto-Mechanical Systems Based on the Spontaneous Emission Suppression

Zhou Jun Li Juan Wang Qingfeng Xu Minda Zhang Congyue

Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China

Abstract For the low background detecting infrared opto-mechanical systems, the signal is very weak and the spontaneous emission of the system has a large impact. This paper discusses the optimized design of infrared opto-mechanical systems based on the spontaneous emission suppression. The refraction-reflection system, coaxial reflection system and off-axis reflection system are compared on the spontaneous emission suppression in the way of effective emissivity and equivalent blackbody radiation temperature(EBRT). We find that the reflection system is better than refraction-reflection system and the off-axis reflection system is the best. From the change of equivalent blackbody radiation temperature, the paper introduces choosing the wavelength range, the optimized design of opto-mechanical structure and the surface processing. It is concluded that the even longer wavelength detecting has clearly advantage in the low background and it is better that the reflective surfaces and black surfaces has reasonable layout. The impact of refrigeration to the opto-mechanical systems suppressing the spontaneous emission is discussed. We find that refrigeration system can suppress spontaneous emission obviously, while the efficiency is worse when the refrigeration temperature is lower. So the crucial surfaces refrigeration can be adopted.

Key words optical design; spontaneous emission; effective emissivity; equivalent blackbody radiation temperature; even longer wavelength; refrigeration

OCIS codes 290.2745; 290.6815; 220.3620

1 引言

光机系统中, 非目标信号光线被传播到焦平面位置, 在焦平面形成一个附加照度, 这种非目标信号光线就是光机系统的杂散辐射。弱信号探测红外光机系统的目标信号十分微弱, 对外界和自身杂散辐射十分敏感。红外光机系统需要抑制的杂散辐射主要有两类: 视场外光源产生的外杂散辐射通过散射、衍射等方式

收稿日期: 2014-08-26; 收到修改稿日期: 2014-09-25

作者简介: 周 军(1988—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事光机系统设计、光机系统杂散辐射分析与抑制方面的研究。

E-mail: zhoujun0330.good@163.com

到达探测器表面;光机系统本身的自发辐射直接或通过散射等方式到达探测器表面。若光机系统设计不合理,对杂散辐射抑制不足,将使目标信号湮没在杂散辐射噪声之中。国内外对红外光机系统的杂散辐射及抑制的研究大部分集中于两反结构^[1-5],一些学者也开展了离轴三反系统的研究^[6-8]。基于这些研究工作,一些杂散辐射抑制措施被提出:外部杂散辐射的抑制^[9-10],一般采取表面发黑、光阑匹配、遮光罩优化设计、增设挡光环等措施;内部杂散辐射的抑制^[11-13],采取合理分布高反与发黑表面、温阑与冷阑匹配、遮光罩内增设高反特殊面形挡光环(如二次曲面、蜂窝结构)、元件制冷等措施。

目前光机系统的杂散辐射分析,一般是在光机系统设计完成后进行,在光学设计、结构设计阶段并没有考虑杂散辐射的作用,杂散辐射分析完成后再进行光机结构修改,导致光机系统设计的随意性、杂散辐射的不可控性和设计周期的延长。对弱信号探测的红外光机系统,自身热辐射产生的影响比外部杂散辐射更难抑制。国内在光机系统光学设计、结构设计阶段考虑系统自身热辐射效应的工作进行的并不多。因此,考虑光机系统自发辐射的红外光机系统优化设计是十分有必要的。本文基于大量的计算,对折反、同轴全反和离轴全反等三种光机结构形式的自发辐射抑制能力进行了综合比较。采用了有效发射率和等效黑体辐射温度来评价光机系统对自发辐射的抑制能力,尤其是等效黑体辐射温度。提出了低背景探测下的波段优化法则:在考虑目标辐射特性基础上,使工作波段尽量往长波方向远离系统自身热辐射峰值波长以及尽量使工作波段变窄。并在此基础上对甚长波探测的优势做了说明,指明了光机系统结构优化和表面优化处理的方向,具有通用性。

2 红外光机系统自发辐射分析模型

2.1 红外光机系统自发辐射计算理论

红外光机系统自发辐射计算中,所有构件表面可认为是灰体或选择性辐射体,在有限的波段内,构件表面的辐射出射度满足

$$M_{\varepsilon} = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} d\lambda, \quad (1)$$

式中 ε 为构件表面发射率, $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为第一辐射常数, $c_2 = hc/k = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数, k 为玻尔兹曼常数, c 是光速。

任一构件表面的自发辐射在红外光机系统中传输时,经过各个表面的反射、透射、散射、吸收和衍射等作用到达探测器,探测器接收到的能量可表示为

$$\phi = \tau \frac{M_{\varepsilon}}{\pi} \Omega_{d}, \quad (2)$$

式中 τ 为红外光机系统透射率, Ω 为该表面对探测器所张立体角, A_d 为探测器面积。从(2)式可以看出减小探测器接收到的自发辐射有两个方法:1)减小构件的自发辐射;2)减小辐射源表面对探测器所张立体角。这两个因素都与光机系统构件表面属性密切相关,因此这三个因素的控制是抑制红外光机系统自发辐射的主要方向。

2.2 自发辐射抑制的评价

2.2.1 有效发射率

红外光机系统的有效发射率可以描述光机系统对自发辐射的抑制能力^[13]。有效发射率(ε_{eff})是指探测器接收到的系统所有组件表面自发辐射能量之和(Φ_s)与将系统最后一个光学面作为黑体时探测器接收到的辐射能量(Φ_{rb})之比,即

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\Phi_s}{\Phi_{\text{rb}}}. \quad (3)$$

对结构形式和表面属性确定的红外光机系统,有效发射率是光机系统的一个固定属性,随着波长的变长,有效发射率会轻微增大。有效反射率越小,表征光机系统对内部杂散辐射抑制能力越强。

2.2.2 等效黑体辐射温度

将红外光机系统自身热辐射在探测器表面聚集的能量转换为一个叠加在探测器表面的等效黑体,称该黑

体的温度为红外光机系统在探测器表面的等效黑体辐射温度。等效黑体辐射温度使得探测器输出信号中叠加了一个电平。抑制光机系统的自发辐射并使自发辐射在探测器表面分布均匀,相当于降低该电平峰值并使该电平趋近于直流量。因此等效黑体辐射温度的变化能更直观地体现光机系统对自发辐射的抑制能力。

根据光辐射传播理论,对于视场较小的光学系统,等效黑体辐出度与像面照度有如下关系:

$$M = 4EF^2/\tau, \quad (4)$$

式中 M 为等效黑体辐出度, E 为自发辐射在探测器表面形成的照度, τ 为系统透射率。再根据普朗克公式即可求出与等效黑体辐出度对应的等效黑体辐射温度。

折反系统和同轴全反系统有中心遮拦,(4)式中 F 数应取有效数值^[14],有效 F 数为

$$F_{\text{eff}} = F \cdot \left[\frac{1}{1 - (D_{\text{obs}}/D_e)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中 D_{obs} 为遮拦镜直径, D_e 为入射孔径。

3 光学结构选型优化

3.1 光机结构建立

光学系统结构形式有透射式、折反式、同轴全反式、离轴全反式,这几种形式各有优缺点。对红外光学系统,透射式系统口径有限且热辐射很严重,弱目标探测的红外光机系统应谨慎使用透射式结构。折反式、同轴全反式和离轴全反式结构在杂散光抑制、加工装调和成本方面各有优缺点,在特定场合都具有不可替代性,因此对这三种结构的自发辐射抑制能力进行全面分析。

如图1~3所示,选取 $F=2, f=150 \text{ mm}$ 的折反式、同轴全反式和离轴全反式光机系统,在长波红外到甚长波红外波段成像质量良好[随着波段扩大调制传递函数(MTF)会下降大约0.05,甚长波时不考虑折反系统]。

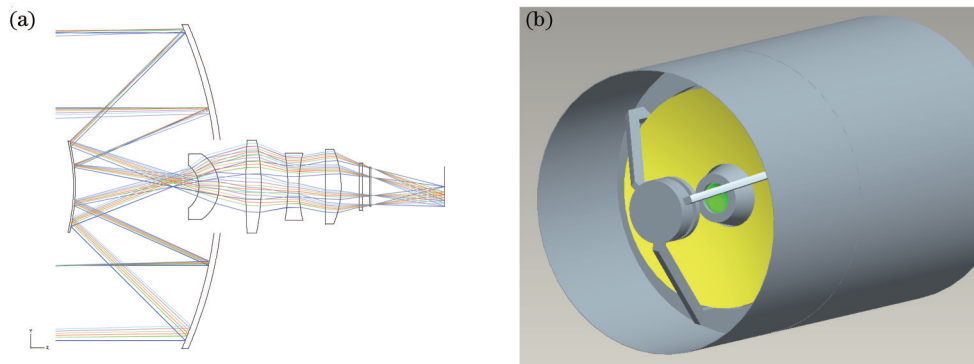


图1 折反式系统。(a)光学结构;(b)光机结构

Fig.1 Refraction-reflection system. (a) Optical structure; (b) opto-mechanical structure

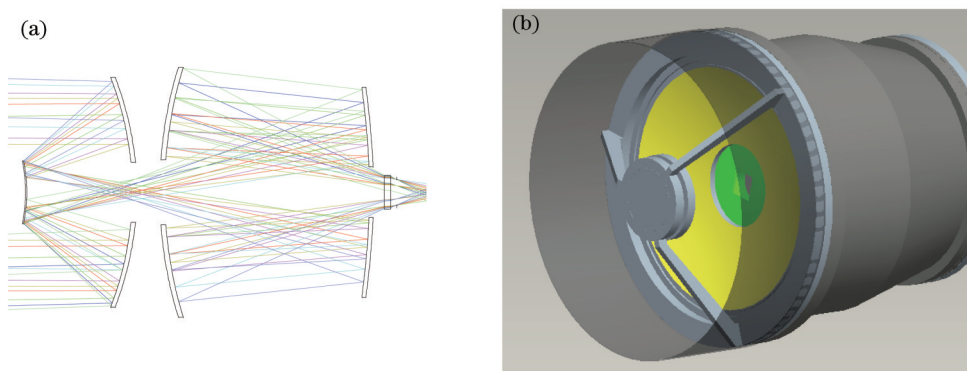


图2 同轴全反式系统。(a)光学结构;(b)光机结构

Fig.2 Coaxial reflection system. (a) Optical structure; (b) opto-mechanical structure

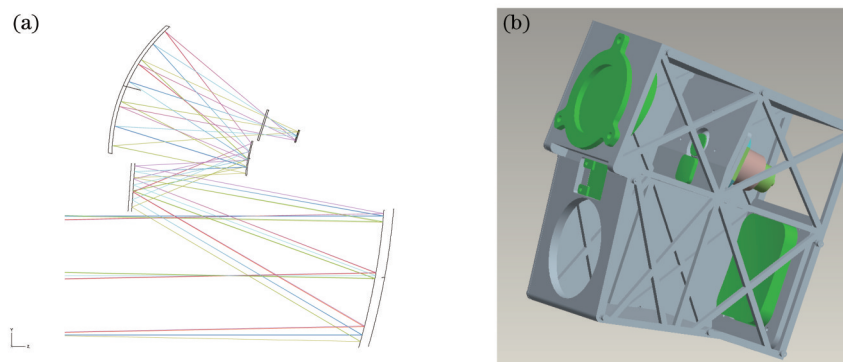


图3 离轴全反式系统。(a)光学结构;(b)光机结构

Fig.3 Off-axis reflection system. (a) Optical structure; (b) opto-mechanical structure

3.2 三种结构自发辐射抑制比较

在仿真软件 LightTools 中对 3.1 节三种光机结构进行了自发辐射仿真计算。分析计算时,反射镜镜面反射率取 0.985,透镜表面透射率取 0.985,光学元件表面散射如(6)式所示,式中 σ 、 λ 分别为镜面粗糙度和入射波长。机械构件均为硬铝,机械构件表面(原色或涂覆黑漆)散射为朗伯散射或小角度高斯散射^[15],车加工原色铝表面发射率约为 0.2,铣加工原色铝表面发射率约为 0.06,线切割原色铝表面发射率约为 0.8。对于发黑表面,表面发射率为 0.94。

$$S_{TIS} = \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

分别以有效发射率和等效黑体辐射温度两个指标对三种结构形式系统进行比较。

表 1 为光机系统温度为 293 K 时三种结构形式系统在 8~10 μm 波段的自发辐射能量统计及有效发射率。从表 1 可以看出,离轴全反系统有效发射率最小,同轴全反系统次之,折反系统最大,说明全反结构自身热辐射抑制能力比折反系统强,而离轴全反结构抑制能力最强。

表 1 293 K 时 8~10 μm 波段的自发辐射能量(W)和有效发射率

Table 1 Spontaneous emission energy (W) and effective emissivity at 293 K of 8~10 μm band

	Refraction-reflection system	Coaxial-reflection system	Off-axis system
Last optical surface as blackbody	1.67×10^{-4}	4.38×10^{-4}	1.76×10^{-4}
All surfaces	3.44×10^{-5}	4.19×10^{-5}	1.30×10^{-5}
Effective emissivity	0.191	0.096	0.074

表 2 为光机系统温度为 293 K 时,8~10 μm 波段内三种结构形式系统的等效黑体辐射温度(EBRT)。从表 2 可知,离轴全反系统等效辐射温度最小,同轴全反系统次之,折反系统最大,说明全反结构自身热辐射抑制能力比折反系统强,而离轴全反结构抑制能力最强,所得结论与采用有效发射率评价相同。

折反和同轴全反结构对自身热辐射的抑制能力不如离轴全反结构,一个原因就是折反和同轴全反结构存在遮拦,使得有效 F 数大于理论 F 数;折反结构不如全反结构,还因为折反结构光学面多于全反结构,使得透射率小于全反结构。

表 2 293 K 时 8~10 μm 波段三种结构形式系统的等效黑体辐射温度

Table 2 Equivalent blackbody radiation temperature of the three optical structures at 293 K of 8~10 μm band

System structure	Refraction-reflection system	Coaxial reflection system	Off-axis reflection system
EBRT /K	233	210.6	196.4

4 工作波段优化

光学系统的工作波段主要是依据目标的辐射特性确定,在考虑目标辐射特性基础上,引入波段优选细分可以有效提高系统对内部杂散辐射抑制能力。根据维恩位移定律,当红外光机系统处于一定温度,可以确定其自身热辐射峰值波长。根据普朗克定律,红外光机系统工作波段越宽,探测器接收到的系统自身热

辐射能量就越多,等效黑体辐射温度就越高。表3计算了温度为293 K的黑体在各个波段的辐射出射度。当光机系统温度为293 K时,计算了折反、同轴全反和离轴三反结构在不同波段下的等效黑体辐射温度,如表4所示。

表3 293 K时各波段的黑体辐射出度

Table 3 Blackbody radiant exitance in each band at 293 K

Wave band / μm	6~8	7.7~8.6	8~10	9~11	11~13	14~16
Radiant exitance /(W/m^2)	39.17	22.52	53.50	54.90	50.79	38.72

表4 三种结构形式系统温度为293 K时在不同波段下的等效黑体辐射温度

Table 4 Equivalent blackbody radiation temperature of the three optical structures in different band at 293 K

Wave band / μm	6~8	7.7~8.6	8~10	9~11	11~13	14~16
Refraction-reflection sytem /K	243.6	237.8	233.0	228.0	218.7	-
Coaxial reflection system /K	224.0	220.1	210.6	204.5	193.2	178.7
Off-axis reflection system /K	211.1	206.1	196.4	189.7	177.5	162.3

由表3、表4可知:1)波长越长,等效黑体辐射温度越低;2)往中波方向远离峰值波长(9.9 μm)时,虽然探测器接收到的热辐射通量会减弱,但该波段对能量更敏感,因此等效黑体辐射温度更高;3)超长波波段内无需制冷,全反结构系统等效黑体辐射温度已经低于180 K,可见弱目标时,超长波与甚长波探测具有明显优势,甚长波探测是低温探测的一大发展方向。

确定系统工作波段时,在考虑目标辐射特性基础上,如果能使工作波段尽量往长波方向远离系统自身热辐射峰值波长以及尽量使工作波段变窄,将对抑制光机系统自身热辐射产生极大的作用。

5 结构优化设计及表面处理

自发辐射光线传输中,能被探测器直接看到的构件表面为关键面,总有部分到达关键面的杂散辐射光线能够直接传到探测器。如图4所示,到达关键面的自发辐射光线从关键面上某面元 A_1 传播到下一个面元 A_2 时,入射到面元 A_2 的自发辐射能量为

$$d\varphi_2 = L_1 \cos \theta_1 dA_1 d\Omega_1 = \frac{L_1}{E_1} \cdot E_1 dA_1 \cdot \frac{\cos \theta_1 dA_2 \cos \theta_2}{r^2} = S_{\text{BRDF}} \cdot d\varphi_1 \cdot \Omega_{\text{GCF}}, \quad (7)$$

式中 φ_1 、 φ_2 为入射到面元 A_1 、 A_2 辐射通量, L_1 为面元 A_1 的辐亮度, r 为两个面元中心距, Ω_1 为面元 A_2 对面元 A_1 所张立体角, θ_1 、 θ_2 为两个面元法线与中心线夹角,BRDF为反应面元 A_1 散射特性的双向反射分布函数, Ω_{GCF} 为面元 A_1 对面元 A_2 所张投影立体角。

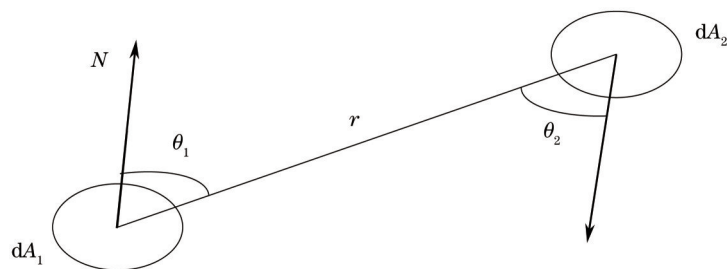


图4 自发辐射光线传输示意图

Fig.4 Transmission illustration of spontaneous emission rays

从(7)式可知,红外光机系统应对自发辐射严重的关键面尽量遮拦,减小关键面对探测器的实际投影立体角,阻挡自发辐射光线传输到探测器的途径,同时应改善自发辐射光线传输中各个表面吸收、散射等属性,使得自发辐射能量传输逐次减小。

为阻挡自发辐射光线的传输,红外光机系统首先应确保冷阑与温阑匹配,冷光阑效率为100%。对于杂散辐射抑制,具有中间像面的光学结构形式效果更好。对折反和全反等结构形式,当中间像面位于主镜之后,杂散辐射抑制效果更好^[16]。对具有中间像面的光学结构形式,可在中间像面位置处加视场光阑,由于视

场光阑能被像面直接看到,加视场光阑要慎重或应对视场光阑关键面进行表面高反处理。

光机系统构件表面处理对杂散辐射抑制影响甚大。以折反系统为例,表5列出了系统温度为293 K、分别采用车加工和线切割方式时,在8~10 μm波段探测器接收到的各个结构件的辐射能量。从表5可以看出:1)机械表面采用线切割加工方式时,自发辐射比车加工方式严重得多;2)遮光罩和透镜筒自发辐射影响最大。线切割加工时,机械表面容易被氧化,使得发射率大大增加。遮光罩能直接被主镜看到,透镜筒有一部分也能直接被主镜和探测器看到,对其自发辐射影响很大。因此,可以对遮光罩、透镜筒等机械部件表面采取车加工或进行高反处理,而对其他机械表面采取线切割加工或表面发黑。

对全反系统,反射镜表面的自发辐射则起到支配性作用。以同轴全反系统为例,表6列出了系统温度为293 K、反射镜反射率分别为98.5%和99%、机械构件表面为原色时,在8~10 μm波段探测器接收到的各个结构件的辐射能量。从表6可见:1)反射镜表面的自发辐射影响很大,提高反射镜反射率0.5%等效辐射温度显著下降;2)视场光阑关键面采取高反处理后,其自发辐射所占比例仍然达到了18.2%和22.9%,还可进一步对其进行优化处理。

表5 293 K时折反系统在8~10 μm波段探测器接收到的各构件辐射通量

Table 5 Radiant flux of structural parts of the refraction-reflection system received by the detector in 8~10 μm band at 293 K

Components	Lathed mechanical surfaces(primary colors)		Wire cutting mechanical surfaces(primary colors)	
	Radiant flux /W	Percentage /%	Radiant flux /W	Percentage /%
Primary mirror	1.89×10^{-6}	5.4	1.48×10^{-6}	2.0
Secondary mirror	2.44×10^{-6}	7.0	1.91×10^{-6}	2.6
Lens	3.57×10^{-6}	10.3	3.53×10^{-6}	4.8
Lens hood	8.60×10^{-6}	24.6	3.39×10^{-5}	46.4
Truss	4.60×10^{-6}	13.2	1.03×10^{-5}	14.1
PM tube	1.47×10^{-6}	4.3	3.44×10^{-7}	0.5
Lens tube	8.07×10^{-6}	23.2	1.60×10^{-5}	21.9
Others	4.21×10^{-6}	12.0	5.64×10^{-6}	7.7
Sum	3.44×10^{-5}	100	7.31×10^{-5}	100
EBRT /K	233		261.7	

表6 293 K时同轴全反系统在8~10 μm波段探测器接收到的各构件辐射通量

Table 6 Radiant flux of structural parts of the coaxial reflection system received by the detector in 8~10 μm band at 293 K

Components	Mirror reflectivity: 98.5%		Mirror reflectivity: 99%	
	Radiant flux /W	Percentage /%	Radiant flux /W	Percentage /%
Primary mirror	4.96×10^{-6}	11.8	3.36×10^{-6}	9.7
Secondary mirror	5.34×10^{-6}	12.7	3.61×10^{-6}	10.5
Third mirror	5.61×10^{-6}	13.4	3.76×10^{-6}	10.9
Forth mirror	6.57×10^{-6}	15.7	4.38×10^{-6}	12.7
Lens hood	3.71×10^{-7}	0.9	3.81×10^{-7}	1.1
Tube	6.92×10^{-6}	16.5	6.91×10^{-6}	20.0
Truss	2.22×10^{-6}	5.3	2.27×10^{-6}	6.6
Field stop	7.62×10^{-6}	18.2	7.92×10^{-6}	22.9
Others	2.28×10^{-6}	5.5	1.91×10^{-6}	5.6
Sum	4.19×10^{-5}	100	3.45×10^{-5}	100
EBRT /K	210.6		205.4	

6 制 冷

根据(2)式,对红外光机系统制冷是降低光机系统的自发辐射、抑制杂散噪声最直接的方法。但制冷会使光机系统结构更加复杂,增大光机系统成本而且制冷温度越低,技术难度越大。因此需要合理考虑光机

系统制冷与否和制冷哪些元件。为了分析不同制冷温度对红外光机系统自发辐射的影响,计算了不同制冷温度下红外光机系统整机制冷时探测器接收到的 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段的自发辐射能量,进而得出不同制冷温度下 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段的等效黑体辐射温度,如图5所示。从图5可以看出,随着制冷温度降低,自发辐射越来越小。根据普朗克定律,温度越低时黑体辐射出射度减小速度越慢,由此可知制冷温度越低,自发辐射减小的速度越慢。采取制冷措施时,应依据上文的分析计算,找出自发辐射比重较大的关键面,对其进行制冷。如对表5所示车加工折反系统,仅对遮光罩和透镜筒制冷到 $200\ \text{K}$,系统等效黑体辐射温度从 $233\ \text{K}$ 下降到 $214.5\ \text{K}$,自发辐射抑制效果十分明显。

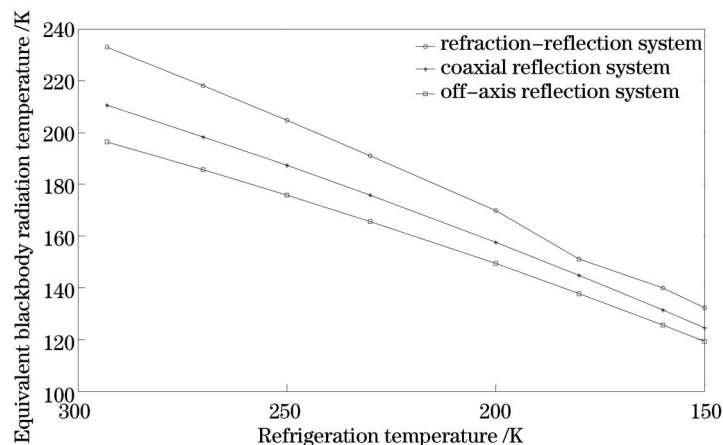


图5 不同制冷温度下光机系统在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段的等效黑体辐射温度

Fig.5 Equivalent blackbody radiation temperature of opto-mechanical system in $8\sim 10\ \mu\text{m}$ band at different refrigeration temperatures

7 结 论

低背景探测的红外光机系统,目标信号弱,系统自身热辐射影响大。因此对考虑红外光机系统自发辐射的红外光机系统优化设计进行了讨论。

1) 在光学系统的结构选型方面,考虑对自身热辐射的抑制能力,全反系统优于折反系统,离轴全反系统优于同轴全反系统。

2) 工作波段合理优化,在考虑目标辐射特性基础上,如果能使工作波段尽量往长波方向远离系统自身热辐射峰值波长以及尽量使工作波段变窄,将对抑制光机系统自身热辐射产生极大的作用。在甚长波波段,无需制冷光机系统等效黑体辐射温度已降到 $180\ \text{K}$,说明低背景时甚长波探测具有突出优势,甚长波探测是一个发展大方向。

3) 结构优化设计和表面属性合理分配对抑制光机系统自身热辐射具有明显的作用:采用带中间像面的结构,中间像面位于主镜之后,系统关键面高反处理,反射镜保持洁净(镜面污染会增加散射)并提高反射率。

4) 合理考虑光机系统制冷与否和制冷哪些元件。制冷能显著降低自身热辐射噪声,但是制冷温度越低,技术难度越大,而自发辐射减小的速度却越慢,找出自发辐射影响最大的局部元件并对其进行制冷更符合实际需要。

参 考 文 献

- 1 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 768-771.
牛金星, 周仁魁, 刘朝辉, 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 768-771.
- 2 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.
李 岩, 刘剑锋. 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.
- 3 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316-318.

- 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.
- 4 Marija S Scholl. Design parameters for a two-mirror telescope for stray-light sensitive infrared applications [J]. Infrared Physics & Technology, 1996, 37(2): 251-257.
- 5 Paul A Lightsey, Zongying Wei. James Webb space telescope observatory stray light performance [C]. SPIE, 2006, 6265: 62650S.
- 6 Yan Changxiang, Xu Jie, Peng Yan. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 289-293.
- 颜昌翔,许 杰,彭 岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(2): 289-293.
- 7 Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping, *et al.*. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(s1): 136-141.
- 李 婷,杨建峰,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(s1): 136-141.
- 8 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
- 朱 杨,张 新,伍雁雄,等. 离轴反射式空间天文望远镜系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- 9 Mei Chao, Zhou Sizhong, Yan Peipei, *et al.*. Design of an outer baffle based on scattering model [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122005.
- 梅 超,周泗忠,闫佩佩,等. 基于散射模型设计外遮光罩[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122005.
- 10 Zou Gangyi, Fan Xuewu. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 605-609.
- 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.
- 11 Riad Haidar, Sylvain Maine, Nicolas Guerineau, *et al.*. Scatter-based interpretation of infrared stray light from warm windows in optical instruments [J]. Optical Engineering, 2006, 45(11): 116402.
- 12 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.
- 尚 玲,刘朝辉,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.
- 13 Zheng Xiaobing. Numerical Analysis of Scattering from Random Surfaces [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1998.
- 郑小兵. 随机表面光散射的数值分析[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1998.
- 14 Ann St Clair Dinger. Thermal emissivity analysis of a GEMINI 8-meter telescopes design [C]. SPIE, 1992, 1753: 183-188.
- 15 R D Hudson. Principle of Infrared System (First edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1975. 116.
- 哈德逊. 红外系统原理(第1版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975. 116.
- 16 Paul K Manhart, K Scott Ellis, James E Michalski, *et al.*. Compact, three-mirror anastigmat, with reflective lens [C]. SPIE, 3482: 282-292.

栏目编辑: 韩 峰