

多谱段相机红外光学系统杂散辐射分析

刘鑫,黄一帆,李林,靳晓瑞

(北京理工大学光电学院,北京 100081)

摘要: 杂散辐射是影响多谱段红外相机成像性能的主要因素。为了确保系统在各种工作状况下正常运行,需要分析并抑制相机光学系统中的杂散辐射。在详细分析了其红外光学系统中杂散辐射主要来源的基础上,针对系统特殊的光机结构,在杂光分析软件中建立光机系统模型;围绕遮光罩选取了 8 个太阳方位、16 个离轴角进行光线追迹,得到太阳杂光在像面上产生的辐照度,据此来评价系统杂散辐射水平;同时分析了指向镜滚动轴和俯仰轴在两个方位内的转动以及地球大气杂散辐射对像面辐照度的影响。最后,对于影响严重的杂散辐射,进行了有效的抑制措施。结果表明,可以忽略地球大气的杂散辐射,当太阳杂光入射角大于 58° 时,系统能满足对像面辐照度的技术要求,多谱段相机红外光学系统可在此范围内正常工作。

关键词: 杂散辐射; 多谱段相机; 红外光学系统; 辐照度

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3201-06

Stray radiation analysis of infrared optical system in multispectral camera

Liu Xin, Huang Yifan, Li Lin, Jin Xiaorui

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The performance of the multispectral infrared camera is seriously influenced by the stray radiation. In order to ensure that the camera can work properly in all situations, the stray radiation in different working conditions needs to be analyzed. The main sources of the stray radiation in the infrared optical system of a camera were analyzed. The model of the multispectral infrared camera was established in the stray light analysis software. The irradiance of the imaging plane was used to evaluate the stray radiation level. Taking the influence of the solar azimuth and the off-axis angle into consideration, around the hood, 8 solar azimuths and 16 different off-axis angles were selected to carry out the ray tracing. Thus the irradiance of the imaging plane for every certain condition was obtained. And the effect to the irradiance of the imaging plane caused by the rotation of the pointing mirror which was composed of roller shaft and pitching axis was analyzed. Meanwhile the influence of the earth atmosphere stray radiation was also discussed. The results show that the earth atmosphere stray radiation is tolerable. And the system can basically satisfy the requirement to the imaging plane irradiance when the off-axis angle is greater than 58° . The infrared optical system of the multispectral camera can work well within this range.

Key words: stray radiation; multispectral camera; infrared optical system; irradiance

收稿日期: 2013-04-18; 修订日期: 2013-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB733100)

作者简介: 刘鑫(1989-), 女, 硕士, 主要从事复杂光学系统设计和杂散光分析问题的研究。Email: liuxin07642@126.com

0 引言

多谱段红外相机是应用于卫星系统之上,用于远距离点目标探测的空间光学遥感仪器,高灵敏度是成功获取信息的关键。杂散辐射,也称为杂散光,是影响红外相机成像质量的重要因素。严重的杂散辐射可能会导致系统无法正常工作^[1-2]。因此,为了抑制系统的杂散辐射,提高系统的信噪比,需要在光学系统基本定型后详细分析系统中的杂散辐射来源,评价系统的杂散辐射水平。同时,对于严重影响成像的杂光路径提出有效的抑制措施,从而将杂散辐射的影响控制在可接受的范围内,确保多谱段相机在各种工况下正常工作。

1 杂散辐射来源分析

杂散辐射,又称为杂散光,是指到达光学系统探测器像面的非成像光线的辐射能,以及通过非正常光路到达探测器的成像光线辐射能^[3-5]。对于可见光通道一般称为杂散光,红外通道则称为杂散辐射。

多谱段相机光学系统的杂散辐射源如表 1 所示。其中,太阳和地球大气的杂散辐射对系统影响较大,所以下面详细分析了它们在各种工作状态下对系统成像的影响。

表 1 多谱段红外相机系统杂散辐射源

Tab.1 Stray radiation sources of multispectral infrared camera system

| Stray radiation sources | Radiation characteristics |
|-------------------------|---|
| Solar | Out-field stray radiation source. The irradiance at entrance pupil: 2.7–2.95 μm band is 8.05 W/m ² and 4.2–4.45 μm band is 1.73 W/m ² . |
| Terrestrial | One of the camera measurement targets. In-field earth atmosphere radiation is the valid signal, while the out-field earth atmosphere radiation which reaches the imaging plane is considered as stray radiation. |
| Other radiations | The scattering and radiation of the structure within the system. |

2 杂散辐射的评价方法

用来衡量空间光学系统杂散光水平的评价方法

有很多,彼此之间的差异很大,适用的范围也不同。其中,杂散光系数和点源透过率(PST)以及辐照度分析图是衡量光学系统杂散光水平常用的评价方法。杂散光系数是杂散光实验测量结果最常用的表示方式,点源透过率和辐照度分析图是杂散光分析软件常用的输出结果形式。由于工程实践中通常使用光线追迹软件来仿真分析空间遥感器的杂散辐射,所以下面详细介绍点源透过率和辐照度分析图这两种评价方法。

2.1 点源透过率

点源透过率(PST)定义为:离轴角为 θ 的点光源经过光学系统在探测器上形成的辐照度 $E_d(\theta)$ 与光源在光学系统入瞳处的等效辐照度 $E_i(\theta)$ 之比,数学表达式为:

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

点源透过率是一个可测的能够表征光学系统消杂散光水平的指标,它与点光源的辐射强度无关,与探测器和系统入瞳的尺寸也是无关的,而且结果是个无量纲的数值。通过测得离轴点源在系统入瞳和探测器上的辐照度,便可计算得到点源透过率的值^[6]。

2.2 辐照度分析图

辐照度分析图是对选定的某一个具体表面来定义的,显示了入射到单位接收表面的辐射功率。如果选择最终的成像面进行分析,则可以得到成像面上的辐射功率,通过分析辐照度的均匀性可以得出系统杂散光水平的数量级。需要注意的是,在杂散光分析软件中,如果模拟的杂散光数量不够,将引起成像面上的照度不均匀。因此,为了得到更准确的模拟结果,需要追迹足够多数量的光线^[7]。多谱段相机红外光学系统的杂散辐射分析根据像面接收到的最大辐照度来评价系统的杂散辐射水平。

3 系统建模

文中分析的工作情况针对的是某型号多谱段红外相机星下点测量模式。卫星轨道高度 750.543 km,工作谱段 2.7~2.95 μm、4.2~4.45 μm。此时不考虑卫星平台的偏转,遮阳罩端面法线正对地心,卫星与地球、太阳光的位置关系如图 1 所示。相机轨道按照平均高度 750 km 计算,那么图中太阳光直射入遮阳罩时的极限角度 α 为 63.5°。此角度作为太阳光入射相

机入瞳光线的最小入射角。技术要求中,为了使系统在不同的工作状态下正常工作,像面的杂散辐射照度需要小于一定的阈值,即不超过 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 。

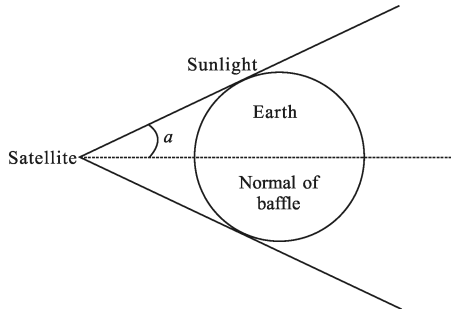


图 1 卫星、地球与太阳光夹角关系
Fig.1 Position of satellite, earth and sunlight

3.1 建立光机系统模型

利用杂光分析软件(TracePro)建立某型号多谱段相机光机系统模型如下图所示。图 2 为光机系统整机外形结构;图 3 为指向镜结构。指向镜位于相机遮阳罩内端口处,由滚动轴和俯仰轴传动,可在两个平面内转动。外部辐射经遮阳罩入射至指向镜表面,再经指向镜反射,以不同角度进入相机内部光学系统。这一结构决定了相机系统的非对称性。图 4 为相机光学系统结构。

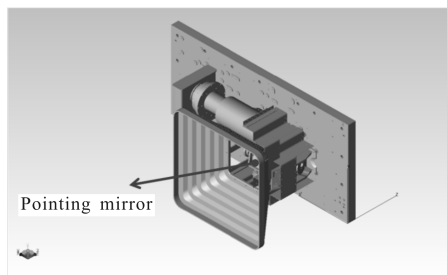


图 2 光机系统模型
Fig.2 Opto-mechanical system model

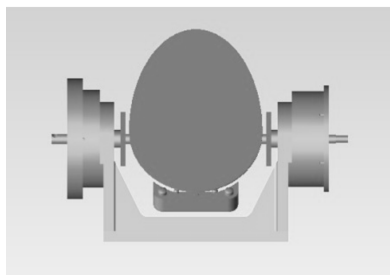


图 3 指向镜
Fig.3 Pointing mirror

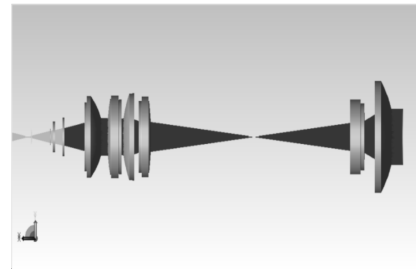


图 4 光学系统结构示意图
Fig.4 Optical system model

3.2 建立物理参数模型

相机材料及光学器件材料的表面吸收率和发射率在相机的两个工作谱段内相差很小。选取两个谱段的平均吸收率和发射率,在杂散光分析软件(TracePro)中建立多谱段相机系统物理参数模型如表 2 所示。

表 2 多谱段相机系统物理参数模型

Tab.2 Physical parameters of camera system

| Components | Absorptivity | Reflectance / Transmittance |
|--------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Pointing mirror | 3% | 97% |
| Color separation filter | 5% | 90% |
| Lens surface | 2% | 98% |
| Optical filter | 1.5% | 97% |
| Baffle and inside of lens cone | 95% | 5% |
| 2-D pointing device | 85% | 15% |
| Other structures | 85% | 15% |

4 杂散辐射分析

4.1 追迹光线数的选择依据

为了保证运算结果的有效性,光线追迹时要有足够的光线数量。在同一系统工作状态下,分别设追迹光线数为 800 万、1000 万、1500 万、2000 万、3000 万,进行光线追迹。根据像平面上接收到的辐照度值的稳定性,确定杂散辐射分析时所需的追迹光线数。表 3 为追迹光线数与像面辐射能量关系。

由表 3 可以看到,当光线数为 1500 万以上时,像面上接收到的辐照度已经趋于稳定,考虑到光线数的增加会大大增加光线追迹所需的时间,综合考虑选取光线数 1500 万为系统分析时的追迹光线数。

表 3 追迹光线数与像面辐射能量关系

Tab.3 Relationship between the number of rays and the irradiance on the imaging plane

| Number of rays | Irradiance on imaging plane |
|----------------|---------------------------------|
| 8 million | 6.342 88 e-012 W/m ² |
| 10 million | 5.084 71 e-012 W/m ² |
| 15 million | 3.833 78 e-012 W/m ² |
| 20 million | 3.204 84 e-012 W/m ² |
| 30 million | 3.643 53 e-012 W/m ² |

4.2 太阳引起的杂散辐射分析

由于相机与太阳的距离较远，可以将太阳作为点光源，而且从太阳辐射出的光线到达传感器前，可以看作是平行光，因此可以将太阳等效为传感器入口前某一位置处的以 0.5° 发散角出射的表面光源，而且光源的直径要足够大，保证光源光束在每一个角度都可以充满传感器的入口，使得入瞳可以被均匀照射。因此，光源模型的参数设置如下：

光源类型为 0.5° 发散角出射的表面光源；光源尺寸为 500×500mm；光源位置为遮阳罩入口前 300mm；光线数量 1500 万条；光线精度为 10⁻¹⁰。

考虑到相机系统的非对称性，在遮阳罩入口平面上选择八个位置作为太阳光入射方位。如图 5 所示。

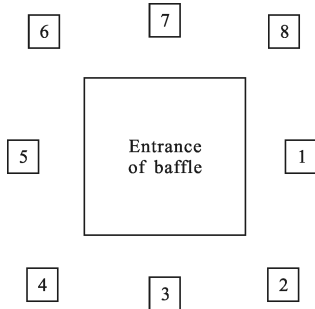


图 5 光源与遮阳罩相对位置

Fig.5 Relative positions of light source and lens hood

4.2.1 像面最大辐照度与太阳光入射角的关系

由于 2.7~2.95 μm 谱段比 4.2~4.45 μm 谱段光在像面上产生的辐照度大，当 2.7~2.95 μm 谱段光在像面产生的杂散辐射满足杂光抑制要求时，4.2~4.45 μm 谱段光也必能满足。所以为了得到像面杂散辐照度与太阳光入射角的关系，仅需分析 2.7~2.95 μm 谱段光杂散辐射对像面辐照度产生的影响。

在技术要求中，太阳与光轴的夹角大于等于 63.5°，

太阳在 63.5° 时在相机入瞳处的辐照度为 8.05 W/m²，太阳在像面上的杂光辐照度不能超过 5×10⁻⁵ W/m²。为方便观察不同离轴角下的像面辐照度趋势，分析其是否满足上述技术要求，光线追迹得到太阳光源在八个位置处，指向镜在零位时，像面最大辐照度随离轴角变化曲线如图 6 所示。其中，辐照度的单位为 W/m²，

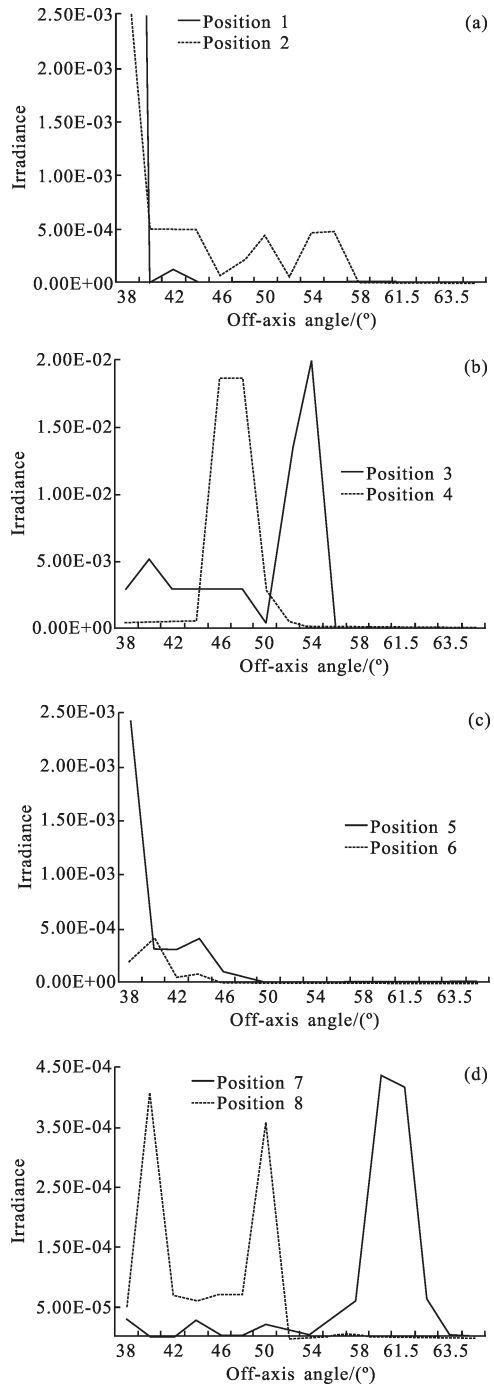


图 6 像面最大辐照度随入射角变化曲线

Fig.6 Relationship between off-axis angle and irradiance of imaging plane

离轴角的单位为($^{\circ}$)。

太阳光直射入遮阳罩的最小角度 α 为 63.5° 。由图 6 可知,在离轴角大于 58° 之后,像面上的最大辐照度值非常小,可以满足抑制 63.5° 以外的太阳杂散辐射的技术要求,即不大于 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 。但是,在 7 位置时辐照度出现了反常情况,下面分析辐照度异常的原因。

其中太阳杂光源在 7 位置时的 4 个主要光路能量比例如表 4 所示。

表 4 光路能量比例

Tab.4 Energy ratio of 4 main light paths

| Path | Radiant power/W | Energy ratio |
|------|-----------------|--------------|
| No.1 | 7.67E-11 | 39.028 6% |
| No.2 | 4.60E-11 | 23.417 1% |
| No.3 | 2.30E-11 | 11.711 % |
| No.4 | 1.53E-11 | 7.807 3% |

在 TracePro 中查看以上光路的传播路径可知,像面辐照度在太阳光源位于 7 位置时的异常增幅是由于外杂光入射到遮阳罩支架,从而进入光学系统,在镜片表面间多次反射导致。所以,可以考虑采取以下措施降低像面的杂散辐射:

(1) 将遮阳罩支架表面进行发黑或粗糙化处理,从而降低其对杂散光的反射和散射。

(2) 将透镜的非有效区域发黑或粗糙化处理,可吸收或散射掉入射到非有效区域的杂散光,也能起到减少杂光影响的效果。

(3) 改变非光学表面的面形,尽量减小面向像面方向的非光学表面在像面方向上的投影面积,从而控制这类表面向像面的散射。

采用上述方法对相机进行处理后,仿真得到 7 位置处的最大杂散辐照度值已由 $4.3 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ 下降至 $1.6 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 。可见,改进后的相机系统的杂散辐射明显降低,并可使其控制在 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 以下。

4.2.2 像面最大辐照度与指向镜转角的关系

指向镜由滚动轴和俯仰轴传动,可在两个平面内转动,如图 3 所示。指向镜镜面法线在 YZ 平面内,零位时镜面法线与 +Y 轴成 45° 夹角。相机工作时指向镜面法线与光轴夹角为 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 可变,两轴转角满足:(1) 滚动轴在零位(45°),俯仰范围为 $\pm 30^{\circ}$ 。(2) 滚动轴在极限位置(30° 和 60°),俯仰范围为 $\pm 35.3^{\circ}$ 。

选取太阳光直射入遮阳罩时的极限角度 63.5° 和其附近的 64.5° 进行分析,调整指向镜滚动轴与俯仰轴,分别每隔 10° 进行光线追迹,得到了像面辐照度数据。下面列出了像面最大杂散辐照度超出 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 时的指向镜角度和太阳方位,如表 5 所示。

表 5 像面最大辐照度超出 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 的指向镜角度和太阳方位

Tab.5 Solar azimuths and pointing mirror angles when irradiance is larger than $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$

| Off-axis angle | Solar azimuth | Roller shaft | Pitching axis | Biggest stray irradiance/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
|----------------|---------------|--------------|-----------------|--|
| 63.5° | 4 | 50° | 30° | 5.67E-05 |
| | 6 | 60° | 35.3° | 6.34E-05 |
| | 8 | 60° | -35.3° | 6.41E-05 |
| 64.5° | 4 | 30° | 35.3° | 6.34E-05 |
| | 6 | 60° | 35.3° | 4.02E-04 |
| | 6 | 60° | 25° | 4.70E-04 |
| | 6 | 60° | 15° | 5.73E-05 |

由图 6 可以看到,当指向镜处于零位时,太阳光从 63.5° 和 64.5° 入射到达像面的最大辐照度均小于 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$,能满足像面的杂散辐射要求。但表 5 表明,随着指向镜滚动轴和俯仰轴的转动,各别位置处像面辐照度大于 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 。这些位置多集中在指向镜极限位置处,且相对于 $5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 不超过 1 个数量级。考虑到指向镜工作时间大多处于非极限位置,所以可以忽略指向镜转动对像面杂散辐照度产生的影响,认为当离轴角大于 58° 时,系统均能满足像面杂散辐照度要求。

4.3 地球大气背景杂散光分析

多谱段测量相机测量目标之一为地球大气背景,视场内的地球大气辐射是有效信号,视场外的地球大气辐射如果达到像面被视为杂散辐射。下面对系统地球大气背景的杂散光进行分析。

软件中光源模型的参数设置如下:光源类型为黑体、朗伯体;光源温度为 300 K ;光源波长为 $2.7 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 、 $4.2 \sim 4.45 \mu\text{m}$;光源尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$;光源位置为遮阳罩入口前 100 mm ;光线数量为 5000 万条;光线精度为 10^{-10} 。

光线追迹得到探测器像平面上辐照度图如图 7 所示。

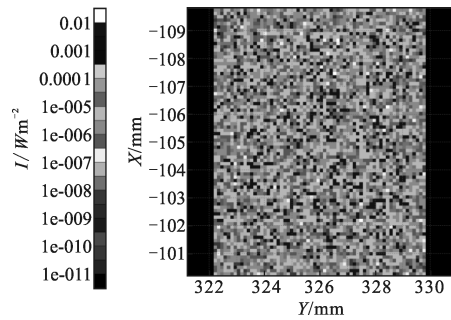


图 7 探测器像平面上辐照度图

Fig.7 Irradiance map on detector

其中,正常光路和非正常光路所占能量比例如表 6 如所示。

表 6 正常光路和非正常光路能量比例

Tab.6 Energy proportion of normal light path and abnormal light path

| Path | Radiant power/W | Energy ratio/% |
|-----------------------------|-----------------|----------------|
| No.1 (Normal light path) | 7.98E-09 | 99.468 5 |
| No.2 | 1.28E-11 | 0.159 15 |
| No.3 | 7.55E-12 | 0.094 141 |
| No.4 | 6.82E-12 | 0.085 057 |

由表 6 可知,通过正常光路到达像面的辐射能量占地球大气辐射总能量的 99.468 5%。这表明,视场外的地球大气杂散辐射对像面辐照度几乎无影响。

5 结 论

文中详细分析了多谱段相机红外光学系统的杂散辐射来源,并针对太阳杂光和地球大气辐射进行了深入的研究。以像面辐照度为指标评价系统的杂散辐射抑制水平。在杂光分析软件(TracePro)中建立了红外相机的光机系统模型,设定相应的杂光源进

行光线追迹,得到了太阳、地球大气辐射以及指向镜的转动对像面辐照度的影响;另外,对于杂散辐射的异常增幅提出了有效的改善措施。结果表明,除相机工作的极限位置外,在入射角大于 58° 之后,像面上的太阳杂散辐照度非常小,而地球大气的杂散辐射也可以忽略。即多谱段红外相机可以通过避免工作在极限位置和采取文中提出的杂散辐射抑制措施,来满足抑制 63.5° 以外杂散辐射的技术要求。从而使其光学系统能适应各种工作状况,在一定范围内正常工作。

参考文献:

- [1] Ghaffarian B. Solar intrusion thermal analysis[C]//SPIE, 1996, 2812: 251-259.
- [2] Shi Rongbao, Zhou Jiankang, Ji Yiqun, et al. Stray light analysis and baffle design of remote sensing camera for microsatellite[C]//SPIE, 7506, 2009: 75060T-1-7.
- [3] Reininger F. Stray light performance optimization through system design[C]//SPIE, 2260, 1994: 17-28.
- [4] Stauder J L. Stray light design and analysis of the Wide-Field Infrared Explorer(WIRE)[C]//SPIE, 3122, 1997: 35-44.
- [5] Schwartz R, Bloomberg S, Mom M, et al. Stray radiation in airborne FLIR system[C]//SPIE, 4820, 2003: 676-687.
- [6] Du Baolin. Research and protection of stray radiation in space remote sensor [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010: 36-37. (in Chinese)
杜保林. 空间传感器的杂散辐射研究与防护[D]. 北京: 北京理工大学, 2010: 36-37.
- [7] Du Shusong, Wang Yongmei, Du Guojun, et al. Stray light analysis of fabry-perot interference imaging spectrometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 246-251. (in Chinese)
杜述松, 王咏梅, 杜国军, 等. 干涉成像光谱仪的杂散光分析[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 246-251. (in Chinese)