

## 红外探测器内部颗粒物对图像的影响

骆守俊, 彭晴晴, 郭亮

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 在高灵敏度的红外光学系统中, 来自系统内部的热辐射是影响系统探测性能的重要因素之一。污染颗粒物通常是杂散辐射的主要来源, 除了光学元件的表面污染, 探测器内部也会存在污染颗粒物。文中主要研究探测器内部颗粒物对焦平面光场分布产生的影响。根据红外辐射及散射原理建立了相应的理论模型, 对探测器内部不同温度、不同位置的颗粒物在焦平面上形成的光场分布进行了仿真计算和对比分析, 并进行了实验验证。结果表明, 探测器内部如有颗粒杂质, 在一定的使用环境下, 可在探测器焦面上产生黑斑、白斑、黑点白斑等异常现象, 而这些异常光场分布会对场景中的红外目标物产生干扰, 造成误判, 从而影响对目标的准确识别。因此应采用措施以保证探测器内部的洁净度, 防止颗粒物的产生。

**关键词:** 红外探测器; 颗粒物; 光场分布; 黑斑

**中图分类号:** TN216      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0590-05

## Influence of the particulates inside the infrared detector on the image

Luo Shoujun, Peng Qingqing, Guo Liang

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In the high sensitive infrared optical systems, the self-generated thermal radiation is one of the important factors for the detective property. Particulate contaminants are usually the main source of stray radiation. Besides the surface contaminants, there may be particulates within the detector. The influence on the luminous flux distribution on the image plane of the particulates inside the detector was studied in this paper. According to image plane's luminous flux distribution of the particulates inside detector with different temperature from different distance to image plane, relevant theoretical model was built up based on theory of infrared radiation and scattering, which was validated by the corresponding experiments. The results indicate that if there are particulates inside the detector used at the condition of vibration environment, they will form exception image such as black spot and white spot and combination with each other on the image plane. These abnormal distributions of luminous flux disturb the infrared targets in the effective field of view, resulting in false judgments. Thus, the veracity of the identification for infrared targets degraded obviously. Therefore it is of critical importance to keep the inside of the detector clean and prevent the generation of the particulates.

**Key words:** infrared detector; particulates; luminous flux distribution; black spot

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-08-03

基金项目: 总装十二五预研(E201102003050)

作者简介: 骆守俊(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光学系统设计检测及装调方面的研究。Email: luoshoujun@139.com

## 0 引言

随着红外光学系统的不断发展和广泛应用,对红外探测器的图像质量提出了越来越高的要求。在一些高灵敏度红外光学系统中,杂散辐射源的存在,会严重影响系统的杂散辐射量级,使像面上的杂散辐射通量不均匀,导致探测器局部位置出现偏高或偏低辐射(即出现黑斑或者白斑),从而对目标信号的提取和分析造成严重影响<sup>[1-5]</sup>。

由于红外探测器的构成较为复杂,尤其杜瓦内部零部件较多,在其研制或者工作的过程中,探测器内部可能会存在颗粒物杂质。相比其他光学元件上的污染颗粒或者杂散辐射,这些颗粒物杂质距离像面最近。因此需要研究其对焦平面图像的影响<sup>[6-9]</sup>。

文中针对探测器内部不同温度、不同位置的颗粒物对焦平面光场分布的影响进行了相关的分析研究。

## 1 系统仿真模型的建立

### 1.1 红外探测器参数

系统建模选用中波制冷型焦平面探测器进行建模。探测器阵列为 $320 \times 240$ ,像元尺寸为 $20 \mu\text{m}$ ,响应波长为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。

### 1.2 系统辐射度 M 与温度关系

在一定温度 T 条件下,黑体的辐射出射度  $M_{\Delta\lambda}$  为:

$$M_{\Delta\lambda}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 2\pi hc^2 \lambda^{-5} / (e^{hc/\lambda T} - 1) d\lambda$$

式中:波长  $\lambda$  单位为  $\mu\text{m}$ ;光速  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;普朗克常数  $h = 6.626196 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ ;玻耳兹曼常数  $k = 1.380622 \times 10^{-23} \text{ (W} \cdot \text{s)/K}$ 。

根据上述公式,计算可得在  $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$  的波长范围内,系统辐射度与温度关系如表 1 所示。

表 1 系统辐射度与温度关系

Tab.1 System radiation and temperature

T/K	M(T)/W · cm <sup>-2</sup>
300	3.93e-04
210	3.73e-06
200	1.73e-06
150	8.46e-09
90	7.79e-15
80	1.06e-16

### 1.3 系统建模

中波探测器内部分为两个部分,探测器窗口连接的部分为外腔,温度在  $200 \sim 300 \text{ K}$  之间,滤光片连接部分为内腔,探测器焦平面置于内腔内,其温度在  $80 \sim 200 \text{ K}$  之间,内外腔有一直径为  $1.5 \text{ mm}$  的气孔。图 1 为其结构示意图。

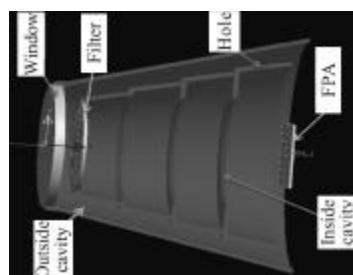


图 1 探测器内部结构示意图

Fig.1 Schematic of detector structure

假设探测器内的颗粒物尺寸为  $W0.1 \text{ mm} \times L0.2 \text{ mm} \times H0.1 \text{ mm}$ ,因为内外腔有直径为  $1.5 \text{ mm}$  的气孔,在振动中颗粒物可以在内外腔移动,故设颗粒物的温度高温可以在  $210 \text{ K}$ ,低温可达  $80 \text{ K}$ 。设颗粒物温度的典型值: $80 \text{ K}$ 、 $90 \text{ K}$ 、 $150 \text{ K}$ 、 $200 \text{ K}$ 、 $210 \text{ K}$ ,将其同时置于探测器焦平面一定距离( $0.3 \text{ mm}$ 、 $0.8 \text{ mm}$ 、 $1.8 \text{ mm}$ )处,并将  $300 \text{ K}$  黑体置于探测器窗口前  $100 \text{ mm}$  处,考察其光场分布。不同温度的颗粒物其在同一平面内的分布如图 2 所示。假设颗粒物不能透射外来的光线,其外来光线在其表面发生  $100\%$  朗伯散射。

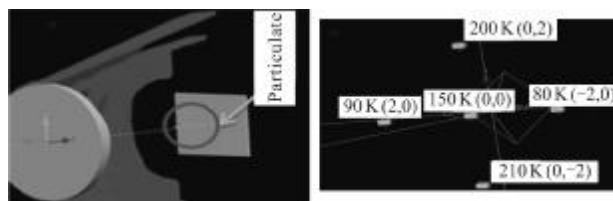


图 2 颗粒物位置示意图

Fig.2 Schematic of particulates position

## 2 探测器焦平面上的光场分布分析

### 2.1 颗粒物距焦平面 $0.3 \text{ mm}$ 时对光场分布影响

假设温度分别为  $80 \text{ K}$ 、 $90 \text{ K}$ 、 $150 \text{ K}$ 、 $200 \text{ K}$ 、 $210 \text{ K}$  的 5 个颗粒物,距离焦平面距离为  $0.3 \text{ mm}$ ,通过追迹大量光线( $2 \times 10^8$  条),得到不同温度的颗粒物叠加  $300 \text{ K}$  黑体时探测器焦平面上的光场能量分布,如图 3 所示。

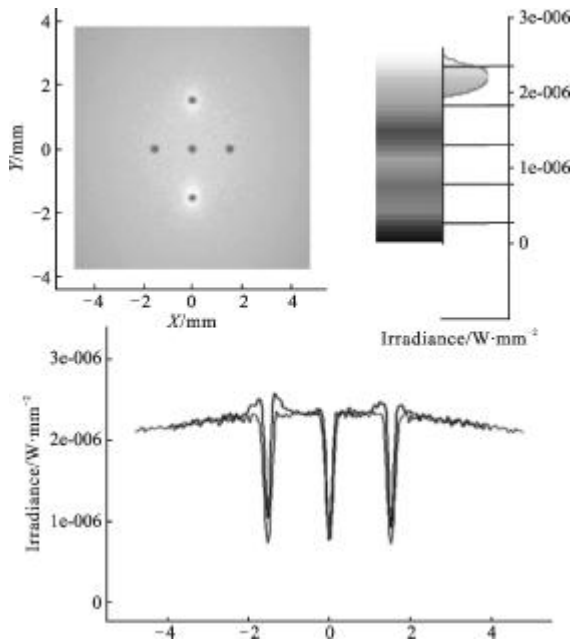


图 3 不同温度颗粒物叠加 300 K 在探测器焦平面的光场分布  
Fig.3 Luminous flux distribution on the image plane of 300 K black body with particulates at different temperatures

从图 3 可以看出:当颗粒物温度较低时,在焦平面上看到是黑斑;当颗粒物温度升高或发射表面积增大,导致辐射场能量的密度和辐射面积都增大,在焦面上就会显示出黑点白斑的图像。当颗粒物温度再升高时,其对焦面光场分布影响大于 300 K 黑体对焦面影响时,可预见焦面上呈现的是一大白斑。

### 2.2 颗粒物距焦平面不同距离时叠加 300 K 黑体辐射对光场分布的影响

图 4 为距焦平面表面距离分别为 0.8 mm、1.8 mm

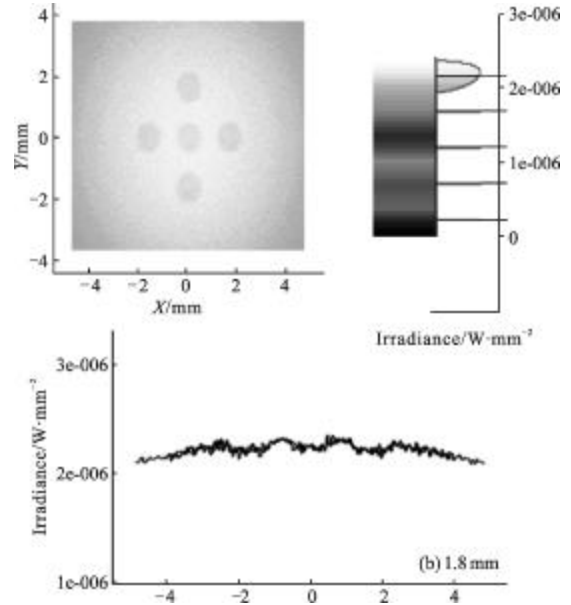
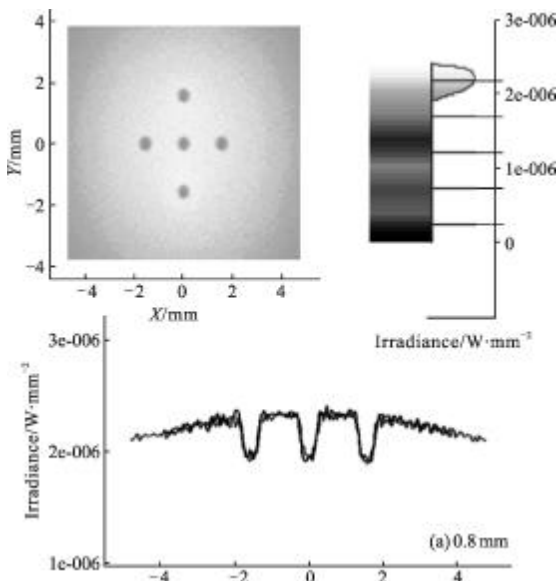


图 4 不同温度颗粒物距焦面 0.8 mm 和 1.8 mm 时叠加 300 K 黑体在探测器焦平面的光场分布

Fig.4 Luminous flux distribution on the image plane of particulates at different temperatures with 0.8 mm and 1.8 mm distance from image plane

时 80 K、90 K、150 K、200 K、210 K 颗粒物叠加 300 K 黑体在探测器焦平面的光场分布图。

### 2.3 颗粒物产生的黑斑尺寸数值模拟

由图 4 可知,当颗粒物离开焦平面时,其对焦平面光场辐射减小,颗粒物遮挡效应影响的区域逐渐扩大,最终焦平面形成越来越大的黑斑且对比度逐渐减弱,最终黑斑也消失。其原理如图 5 所示。随着颗粒物离焦平面越远,遮挡区域逐渐变大颗粒物辐射(忽略和散射影响)。

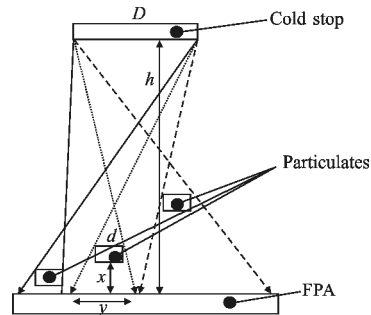


图 5 颗粒物对焦平面的遮挡效应示意图

Fig.5 Figure of blocking effect of the particulates on FPA

根据以上几何关系,估算颗粒物在焦平面上形成黑斑的直径  $y$ :

$$y=d+(a \cdot D+d) \cdot x/[d \cdot (h-x)]$$

式中:  $d$  为颗粒物有效尺寸;  $D$  为冷阑尺寸;  $a$  为遮光系数, 与颗粒物尺寸、冷阑处辐照度强度及探测器响应相关;  $h$  为冷阑至焦平面距离;  $x$  为颗粒物离焦平面高度;

这里设  $d=0.1 \text{ mm}$ ,  $a=0.08$ ,  $D=10 \text{ mm}$ ,  $h=20 \text{ mm}$ , 则黑斑直径  $d$  与颗粒物距离焦平面高度关系曲线如图 6 所示。从图中可以看出黑斑直径随距离成近似放大关系 (其最大值应小于焦平面的光敏面尺寸)。

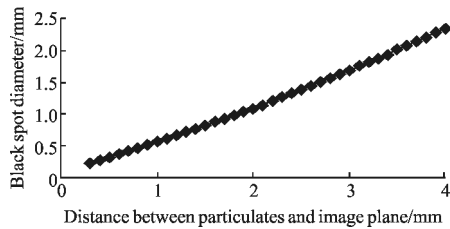


图 6 黑斑直径  $d$  与颗粒物距离焦平面高度  $x$  关系

Fig.6 Black spot diameter  $d$  and distance between particulates and image plane  $x$

考虑颗粒物的自身辐射和散射效应的综合影响, 将温度为 90 K、尺寸大小为  $W0.1 \text{ mm} \times L0.2 \text{ mm} \times H0.1 \text{ mm}$  的颗粒物置于探测器表面不同距离处, 如图 7 所示。其模拟光场分布如图 8 所示。

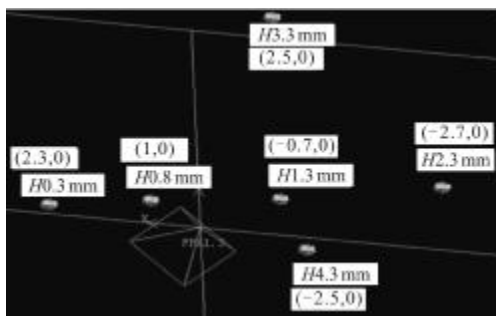


图 7 颗粒物的空间位置示意图

Fig.7 Schematic of particulates space position

从模拟的结果也可以直观地看出黑斑的直径随距离成近似线性关系(任选 Y 方向)。根据上述公式, 估算出黑斑在距离为 0.3 mm、0.8 mm、1.3 mm、2.3 mm 时的直径分别为 0.24 mm、0.47 mm、0.72 mm、1.26 mm。与模拟结果有比较好的一致性。

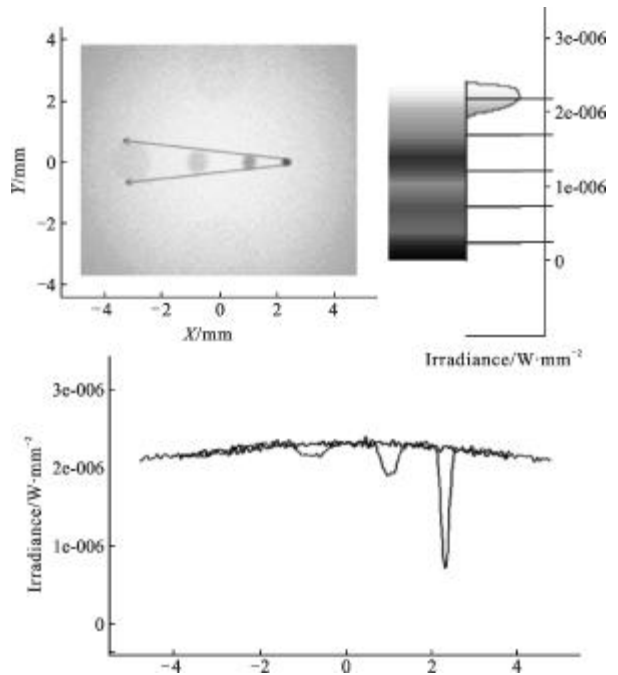


图 8 温度 90 K 的颗粒物距离探测器距离为 2.3 mm、1.3 mm、0.8 mm、0.3 mm 时对探测器焦平面光场分布的影响

Fig.8 Effect of luminous flux distribution on the image plane of particulates at temperature of 90 K with 2.3 mm、1.3 mm、0.8 mm、0.3 mm distance from image plane

### 3 实验验证

为对分析结果进行实验验证, 将尺寸为  $W0.1 \text{ mm} \times L0.2 \text{ mm} \times H0.1 \text{ mm}$  的固体颗粒放入探测器腔体内。并在探测器前置一 300 K 黑体, 在一定的振动试验条件下, 探测器光场出现了异常分布。其能量分布的截面图如图 9 所示。

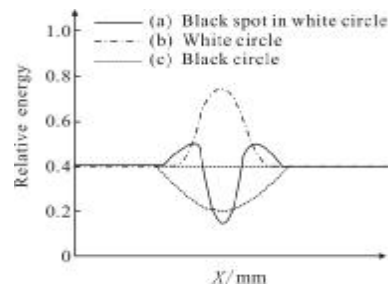


图 9 实验光场能量分布截面图

Fig.9 Luminous flux distribution cross section in experiment

实验证明, 在 300 K 黑体前, 探测器内部颗粒物在一定冲击振动条件下会在探测器焦平面上产生黑点白圈、白斑、黑斑等光场分布异常现象。当颗粒物

自身辐射和遮挡效应同时起作用时产生黑点白斑；当自身辐射占主要影响时产生白斑现象；当遮挡效应占主要影响时产生黑斑现象。这与理论模拟的仿真结果是相一致的。

#### 4 总 结

以上研究结果表明,探测器内部如有颗粒物,在一定使用条件下会在像面上产生光场异常分布,从而导致探测器焦面上呈现出黑点白圈、白斑、黑斑白圈的现象。实验验证和理论推导表明,理论模拟的数据和实测的结果有较好的一致性。

探测器内部颗粒物产生的异常光场分布,严重时错误地将其与目标信号的光场分布相混淆,从而严重影响目标信号的提取和分析。因此应严格控制探测器内部的洁净度,防止存在颗粒物以及可能在冲击振动或其他环境中产生颗粒物的潜在因素。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Yan, Fang Jiexiong, Xu Guosen. Influence of background radiation on a medium-wave HgCdTe photoconductive detector with overlap structure [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(6): 958-961. (in Chinese)  
张燕, 方家熊, 徐国森. 背景辐射对 HgCdTe 中波叠层光导器件噪声的影响[J]. 半导体学报, 2007, 28(6): 958-961.
- [2] Zhao Nan, Xue Yu, Wang Jing. Analysis of stray radiation from infrared optical system with Monte-Carlo method [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 665-670. (in Chinese)  
赵楠, 薛育, 王晶. 利用蒙特卡洛法分析红外光学系统的杂散辐射[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 665-670.
- [3] Xiao Jing, Zhang Bin, Yao Xiuwen, et al. Influence of contaminated mirror on the stray radiation performance of infrared optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 402-407. (in Chinese)  
肖静, 张彬, 姚秀文, 等. 镜面污染对红外光学系统杂散辐射性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 402-407.
- [4] 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.
- [5] Yuan Liyin, Lin Ying, He Zhiping, et al. Design and realization of an long-wave infrared hyperspectral imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (02): 3-11. (in Chinese)  
袁立银, 林颖, 何志平, 等. 长波红外高光谱成像系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(02):3-11.
- [6] Li Xinyao, Pei Yuntian, Wang Chengliang. Suppressing method of infrared stray radiation in space optical system [J]. Infrared, 2011, 32(1): 31-34. (in Chinese)  
李欣耀, 裴云天, 王成良. 空间光学系统中红外杂散辐射的抑制方法[J]. 红外, 2011, 32(1): 31-34.
- [7] Liu Yang, An Xiaoqiang, Deng Jian. Removal of stray radiation from warm shields in cooled infrared optical systems[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(1): 186-190. (in Chinese)  
刘洋, 安晓强, 邓键. 制冷型红外光学系统温栏杂散辐射分析及消除方法[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 186-190.
- [8] Sun Chuang, Xia Xinlin. Suppression of infrared stray radiation in space optical system [J]. Infrared Technology, 2007, 29(6): 337-340. (in Chinese)  
孙创, 夏新林. 空间光学系统的红外杂散辐射抑制特性[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 337-340.
- [9] Yao Xiuwen, Xiao Jing, Zeng Shuguang, et al. Analysis and suppression of self-generated thermal emission in infrared optical systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 91-94. (in Chinese)  
姚秀文, 肖静, 曾曙光, 等. 红外光学系统自身杂散辐射分析及抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 91-94.