

## 红外成像光学系统近场辐射噪声建模与仿真分析

杜 渐, 费锦东

(北京仿真中心 航天系统仿真重点实验室, 北京 100854)

**摘 要:** 在红外探测系统中, 当目标信号比较弱时, 少量的杂散光引起的噪声就会大大降低系统的输出信噪比, 从而降低系统的探测能力。对于高灵敏红外成像探测系统和低冷辐射环境模拟系统, 系统自身热辐射将成为杂光的最大来源。文中分析说明了系统自身热辐射杂光的确定性和近场性, 提出了一种新的基于光线光学的计算模型, 讨论了计算模型中的一些关键问题和解决方法, 并编程实现了对近场物体杂散辐射的精确数值模拟与仿真。得到了杂光在探测器上的辐照度分布图, 并分析了温度、物距和辐射系数等参数对系统杂光水平的影响。对如何合理高效地降低系统自身热辐射噪声具有指导意义。

**关键词:** 自身热辐射; 红外成像系统; 数值模拟

**中图分类号:** TN21    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0001-05

## Modeling and simulation analysis of near-field radiation noise of infrared imaging system

Du Jian, Fei Jindong

(Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

**Abstract:** In infrared detection systems, when the target signal is relatively weak, the noise caused by a spot of stray light will greatly reduce the SNR of system, thus reduce the system's detection capability. For highly sensitive infrared imaging system and low temperature environment simulation system, the thermal radiation emitted from the optical surfaces is the largest source of stray light. In this paper, the certainty and near-field property of self-emitted thermal radiation stray light were analyzed, and a new computational model based on ray optics was proposed. Some key problems in the calculation model were discussed, the solutions were proposed. Moreover, the near-field thermal radiation of objects was accurately numerical simulated. Distribution of irradiance on the detector was gained, the effects of temperature, distance, radiation coefficient and other parameters on the stray light level were analyzed, which has a guiding significance on reducing the system's thermal radiation noise reasonably and efficiently.

**Key words:** self-emitted thermal radiation; infrared imaging system; numerical simulation

收稿日期: 2013-05-11; 修订日期: 2013-06-12

基金项目: 国防科技重点实验室基金

作者简介: 杜渐(1988-), 男, 硕士生, 主要从事红外仿真技术方面研究。Email: chocolatejdj@live.cn

导师简介: 费锦东(1963-), 男, 研究员, 主要从事光学探测制导与仿真技术方面的研究。

## 0 引言

在红外探测系统中,当目标信号比较弱时,少量的杂散光引起的噪声就会大大降低系统的输出信噪比,从而降低系统的探测能力。红外探测系统的杂散光来源主要有三类<sup>[1]</sup>:(1) 视场外的光源通过散射或衍射到达探测器表面;(2) 系统本身的热辐射直接或通过折射、反射或散射到达探测器表面;(3) 视场内的背景光到达探测器表面。其中,第二类杂光为红外系统所特有。对于第一类杂光,红外系统和可见光系统有着相似的抑制方法,常采用遮光罩和光阑等措施加以抑制。第二类杂散光是红外系统特有的杂散光,当目标信号比较弱或背景杂光比较小时,对它的抑制显得尤其重要。

红外探测系统最佳的探测情况为:背景光产生的噪声为探测系统的最大噪声,其他两类杂散光要远小于背景引起的杂散光,即实现背景限探测。在固定的环境中背景噪声为一定值。当探测器工作在常温背景条件下,背景噪声较强,大于其他两类杂光,对探测器灵敏度起主要影响。但当探测器工作在低冷背景条件下<sup>[2]</sup>,实现高灵敏度红外探测时,其自身热辐射产生杂光就成为影响探测器灵敏度的主要因素。如何降低自身热辐射杂光影响,成为提高空间红外探测系统探测能力的关键。

同时,在进行此类系统测试与仿真中,需要精确量化模拟低冷红外辐射环境。但是,红外目标模拟器在既实现远场红外目标模拟的同时,又反射探测系统冷像、光学窗口、复合显示光学系统、目标投影光学系统等均产生红外辐射,抬高了目标模拟器的红外背景限。因此,合理控制视场路径内目标模拟器各单元的辐射,成为实现低冷辐射环境模拟的关键。

## 1 系统自身热辐射杂光的特殊性

在红外波段内,每个光学表面在参与成像的同时自身也是一个辐射源。对于远场探测系统来说,每个光学表面都是一个近场面辐射源。其特殊性表现为两点。

### (1) 近场性

一般的红外探测系统都是对无限远物体进行成像。那么光学系统中的各个光学表面对于探测系统

来说就是一个近场面辐射源,物体上每个点在探测器面上并不存在明显的共轭像点。所以对这类近场问题的分析不注重成像质量和信息的传递,而是要计算能量的通过率和在特定表面上的分布状态。

### (2) 确定性

一般的视场外杂光的传输方式是散射和衍射,传输过程复杂,不确定性因素多。所以对其的计算目前比较成熟的方法还是停留在统计意义上的,通过建立统计模型和大量取样来达到精度要求。但是对于光学系统中的透镜、反射镜、光学窗口等元件,其本身就处于光路中,发出的热辐射通过后续光学系统可以直接到达探测器。其进入光学系统后的传输近似于成像过程(见图 1),在各个界面上发生折射或反射,这就为确定性计算创造了条件。而与这部分能量相比,通过其他方式到达探测器的能量很少,可以忽略。

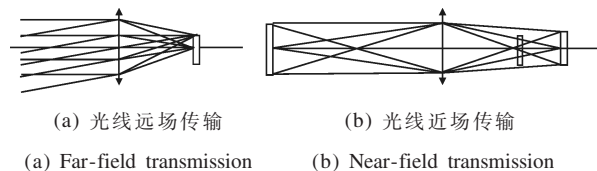


图 1 光学远场与近场传输对比

Fig.1 Optical far-field and near-field transmission contrast

综上,可以说光学表面热辐射杂光的研究综合了成像光学和非成像光学两者的特性,它的传递过程是类似于成像光学,但其评价方法又类似于非成像光学<sup>[3]</sup>。基于以上两点原因,笔者试图建立一种新的计算模型来进行研究。

## 2 计算模型中的相关问题

笔者所建立的计算模型基于光线光学。在光线光学中,可以将光源看成由许多几何点组成,这就是发光点。它们发出的光是像几何直线一样的光线,携带着能量向外传播。光线光学方法虽然只是一种对真实情况的近似处理方法,但在解决杂散光等实际光学技术问题时与实际情况相符,便于实现且满足精度要求。

在计算过程中,每个光学表面都被看作为一个辐射源。其后面的所有光学元件组成一个新的光学系统。文中将辐射能量离散为携带能量的光线向外传播,所有光线从光学表面发出,经过新的光学系统到达探测器,再将探测器面划分为网格,计算落入每

个网格的光线数, 每根光线所携带能量相加就是这块区域所接收到的总能量, 这样就可以得到探测器上的能量分布<sup>[4]</sup>。

### 2.1 黑体辐射能量离散化

由黑体辐射理论可以知道, 任何高于 0 K 的物体都会产生热辐射。若将辐射物体近似看作朗伯辐射体, 按普朗克定律, 其黑体辐射光谱分布为:

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{\varepsilon}{e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1} \quad (1)$$

式中:  $M$  为辐射出射度;  $\lambda$  为波长,  $\mu\text{m}$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $c$  是光速;  $K_B$  是玻耳兹曼常数;  $\varepsilon$  为当前光学表面辐射系数。

由朗伯辐射体性质可知, 辐射亮度为:

$$L_\lambda = \frac{M_\lambda}{\pi} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{\varepsilon}{e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1} \quad (2)$$

将光学表面分割成一个个小区域, 如果每个区域足够小就可以被看作一个点源。这个点源向各个方向辐射能量, 但只有特定立体角内的能量能够进入光学系统到达探测器。再将这个立体角分割成一些小的立体角, 如果分的足够小, 那么每个小立体角内的辐射能量可以用一根光线近似代替<sup>[5]</sup>。

假设这些光线是从一个面积为  $dS$  的小区域出射的, 它与光轴的夹角为  $\theta$ , 它所代表的立体角为  $d\Omega$ 。计算波段为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ , 那么可得这根光线所携带的能量为:

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda \cdot \cos\theta \cdot dS \cdot d\Omega \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \cos\theta \cdot \frac{\varepsilon \cdot dS \cdot d\Omega}{e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1} d\lambda \quad (3)$$

### 2.2 能量计数矩阵

将探测器接收面分割成面积相等的小区域, 每个区域面积为  $dS'$ , 假设它接收到  $N$  条光线, 那么它的辐射照度  $E$  为:

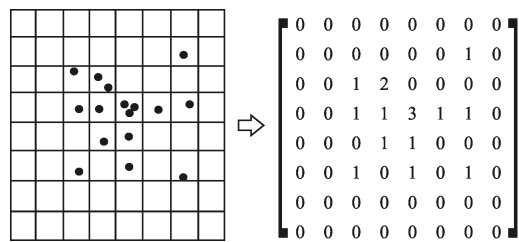
$$E = \frac{\sum_{i=1}^N W_i}{dS'} \quad (4)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  条光线所携带的能量。

这样就能够得到一个或者若干个光学表面热辐射在探测器面上的能量分布。

红外探测器一般都是由若干个探测器单元所组成, 例如  $320 \times 240$ ,  $640 \times 512$ ,  $256 \times 256$  等, 探测元有效光敏面积与整个探测元几何面积之比称为(几何)填

充因子<sup>[6]</sup>。对于文中的分析计算, 假设填充因子等于 1, 则探测元排列如图 2 所示。



(a) 探测器光敏源坐标格式 (b) MATLAB 计数矩阵的排列格式  
(a) Detector pixel coordinate (b) MATLAB count matrix

图 2 探测器光敏源坐标格式与 MATLAB 计数矩阵排列格式对应关系

Fig.2 Detector pixel coordinate and MATLAB count matrix contrast

图中, 每一个小格代表一个光敏单元, 坐标原点取在中心位置。而在 MATLAB 中的矩阵格式如图 2(b) 所示, 矩阵的每个元素代表落入相应单元格的能量值, 两者之间的对应关系可以通过子程序实现。

## 3 仿真结果与分析

文中对如图 3 光学系统进行近场热辐射分析。光学系统焦距  $f=50 \text{ mm}$ , 探测器位于焦平面处, 入瞳直径  $10 \text{ mm}$ , 位于第一块透镜前表面上, 系统由三片透镜组成, 设每块透镜透过率为  $90\%$ , 计算波段为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

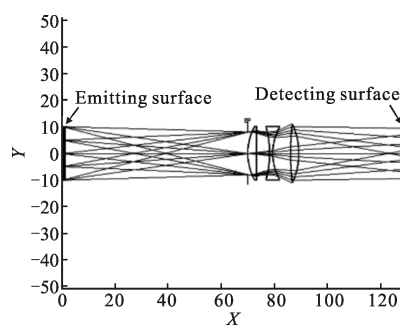


图 3 光学系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical system

待计算表面为一块  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的红外投射窗口或平面反射镜, 设其辐射系数  $\varepsilon=0.1$ , 初始温度  $T=300 \text{ K}$ 。探测器大小为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 划分为  $10 \times 10$  的网格, 那么每个小格大小为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。分别计算不同物距  $l$ , 不同温度  $T$  下, 探测器处接收到的能量分布情况。计算结果如下。

令  $T=300\text{ K}$ , 分别计算  $l=100\text{ mm}, 200\text{ mm}, 500\text{ mm}$  时的情况, 结果分别如图 4~6 所示。可以看出: 首先, 同一平面放在不同位置上时, 探测器接收到的辐射照度分布相差很大, 距离越远能量分布越集中, 距离越近能量分布越分散。这与直观上看到的弥散圆大小随距离的增大而减小的现象是一致的。其次, 能量峰值与距离成反比。辐照度峰值随物距的增加而减小, 如表 1 所示。

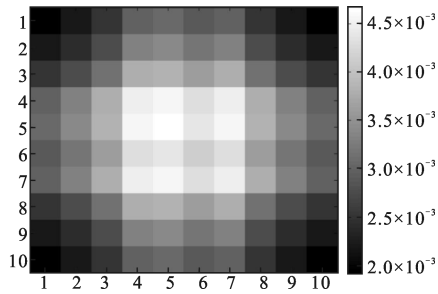


图 4  $l=100\text{ mm}, T=300\text{ K}$  时探测器处辐照度分布情况

(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Fig.4 Detector irradiance distribution when  $l=100\text{ mm}, T=300\text{ K}$

(Unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

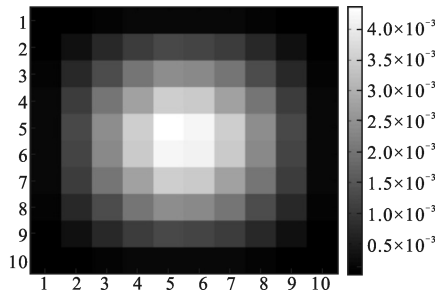


图 5  $l=200\text{ mm}, T=300\text{ K}$  时探测器处辐照度分布情况

(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Fig.5 Detector irradiance distribution when  $l=200\text{ mm}, T=300\text{ K}$

(Unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

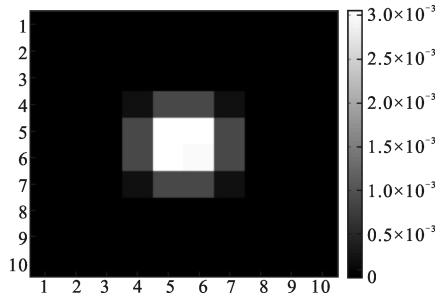


图 6  $l=500\text{ mm}, T=300\text{ K}$  时探测器处辐照度分布情况

(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Fig.6 Detector irradiance distribution when  $l=500\text{ mm}, T=300\text{ K}$

(Unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

表 1 温度  $T$  确定情况下, 不同物距  $l$  处的探测器峰值辐照度

Tab.1 Peak value of detector irradiance at different object distance  $l$

Distance/mm	Temperature/K	Peak irradiance / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
100	300	$2.2 \times 10^{-3}$
200	300	$2.1 \times 10^{-3}$
500	300	$1.5 \times 10^{-3}$

如果改变物体温度, 令  $l=200, T=250\text{ K}$ , 辐照度分布如图 7 所示。可以看出能量分布状态不变, 但辐照度峰值衰减明显。不同温度下的探测器峰值辐照度对比如表 2 所示。

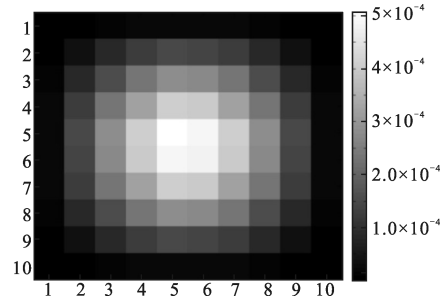


图 7  $l=200\text{ mm}, T=250\text{ K}$  时探测器处辐照度分布情况

(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Fig.7 Detector irradiance distribution when  $l=200\text{ mm}, T=250\text{ K}$

(Unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

表 2 物距  $l$  确定情况下, 不同温度  $T$  时的探测器峰值辐照度

Tab.2 Peak value of detector irradiance at different temperature  $T$

Distance/mm	Temperature/K	Peak irradiance / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
200	300	$2.2 \times 10^{-3}$
200	250	$2.5 \times 10^{-3}$
200	200	$1.1 \times 10^{-3}$

笔者还可以通过改变辐射系数, 透过率等参数, 观察探测器面能量分布及量级的变化, 逐个分析处在光路中不同位置的元件, 在不同状态下所产生的杂光对探测器的影响。

## 4 结论

由于红外探测系统的成像波段在红外区域, 所

以来自系统视场内的各个光学元件产生的热辐射会成为系统的一种重要噪声来源。当目标能量较小且处于低冷背景中时,目标信号可能会湮没于这种噪声信号当中,影响探测能力。文中通过对光学系统自身热辐射杂光特性的分析,提出了一种新的计算模型,基于此计算模型通过编程实现了对近场面元红外辐射的精确数值模拟。讨论了编程时遇到的一些关键问题的解决方法,最后通过实例计算对比了不同条件下同一面辐射源在探测器面产生的能量分布及量级,为降低此类杂光对系统的影响提供了指导。

#### 参考文献:

- [1] Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010(8): 2267-2271. (in Chinese)  
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010(8): 2267-2271.
- [2] Wang Wenfang, Yang Xiaoxu, Jiang Kai. Analysis of stray light of wide field infrared catadioptric optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 138-142. (in Chinese)  
王文芳, 杨晓许, 姜凯. 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.
- [3] An Liansheng, Li Guodong. Computer simulation and analysis for the intensity distribution of illumination systems [J]. *Optical Technique*, 1998(6): 46-48, 74. (in Chinese)  
安连生, 李国栋. 照明光学系统照度分布的计算机模拟分析[J]. 光学技术, 1998(6): 46-48, 74.
- [4] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng, Deng Shitao. Analysis of ghost image of high power laser device terminal optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 839-842. (in Chinese)  
李晓彤, 岑兆丰, 邓诗涛. 高功率激光装置中终端光学系统的鬼像分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 839-842.
- [5] Xi Xiao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Influence of thermal radiations in infrared optical systems [C]//SPIE, 2005, 5638: 362-367.
- [6] Wang Yifeng, Mao Jingxiang, Fan Naihua. Computation of distribution of radiant rays from inner wall surface of cold shield on the detector chip with Monte Carlo method and MATLAB [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010 (3): 39-44. (in Chinese)  
王忆锋, 毛京湘, 范乃华. 用蒙特卡罗方法和MATLAB计算冷屏内壁表面辐射光线在探测器芯片上的分布状态[J]. 光电技术应用, 2010(3): 39-44.