

文章编号: 1672-8785(2016)07-0029-04

红外成像传感器系统非均匀性成因研究

李召龙¹ 史浩然² 娄树理¹

(1. 海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001 ;

2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东烟台 264001)

摘 要: 从探测器的响应特性、光学系统的相对辐射和外壳的杂散光三个方面对红外成像传感器系统非均匀性的产生原因进行了理论研究。红外焦平面阵列中, 探测元与探测元间的结构及材料差异会影响量子效率及暗电流, 从而影响探测元的响应特性。光学系统主要通过光瞳畸变矩阵影响场景辐射通量的分布, 光学系统本身的辐射对非均匀性的贡献可以忽略。外壳的杂散光可分为高温部分和低温部分, 忽略低温部分, 引入系统冷屏效率的概念, 建立了高温组件的辐射模型。该理论研究对光学系统的设计及非均匀性校正具有一定的参考意义。

关键词: IRFPA ; 非均匀性; 探测器响应; 光学系统; 外壳杂散光

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.07.005

Research on Causes for Nonuniformity of IR Imaging Sensor

LI Zhao-long¹, SHI Hao-ran², LOU Shu-li¹

(1. Department of Control Engineering, Navy Aeronautical and Astronautical University,
Yantai, 264001, China ;

2. Postgraduate Training Brigade, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The causes for nonuniformity of infrared imaging systems are theoretically studied in the following three aspects: the response characteristics of detectors, the relative radiation of optical systems and the stray light from system housings. In an Infrared Focal Plane Array (IRFPA), the difference of structures and materials of detection elements may affect their quantum efficiency and dark current and hence affect their response characteristics. The optical system mainly affects the scene flux distribution through its pupil distortion matrix. The contribution of the radiation from the optical system itself to the nonuniformity can be ignored. The stray light from the housing can be divided into the high temperature part and the low temperature part. By ignoring the low temperature part and introducing the concept of System Cold Shield Efficiency (SCSE), a high temperature component radiation model is established. This theoretical research is of a certain referential value to the design and nonuniformity correction of optical systems.

Key words: IRFPA; nonuniformity; detector response; optical system; housing stray light

收稿日期: 2016-04-25

作者简介: 李召龙 (1987-), 男, 山东诸城人, 博士研究生, 主要从事光电制导、图像处理以及红外图像生成等方面研究。 E-mail: zgzb1987@sina.com

0 引言

红外成像传感器系统因灵敏度高、获取目标的信息更多以及帧频较高而成为当今红外成像技术发展的主流,在军用及民用方面得到了越来越多的应用。尽管红外成像技术已发展到较高水平,但是由于制造工艺和使用环境的影响,红外成像传感器系统的非均匀性问题依然存在,这会极大地增加成像系统的空间噪声,降低图像质量,甚至使红外成像系统失去探测能力^[1]。

为了在光学系统设计及红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Array, IRFPA)研制阶段更有针对性地降低非均匀性,以及在后期的非均匀性校正过程中取得更好的效果,有必要对非均匀性的产生原因进行深入研究。本文从探测器的响应特性、光学系统的相对辐射和外壳杂散光对辐射通量的影响三个方面,分析了非均匀性产生的原因并建立了相应的数学模型。

1 探测器的响应特性

IRFPA 中第 m 个探测元对绝对温度 T 的黑体辐射响应为^[2]

$$r_m(T) = r_m^{(d)} + C_0 A_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \eta_m(\lambda) L_\lambda(\lambda, T) \quad (1)$$

式中, $L_\lambda(\lambda, T)$ 是在绝对温度为 T 的黑体辐射下 IRFPA 接收的波长为 λ 的光子光谱亮度, η_m 为第 m 个探测元的量子效率。 λ_1 、 λ_2 分别为光谱响应的起始波长和截止波长, $r_m^{(d)}$ 为第 m 个探测元的暗电流在一个有效积分周期内所积累的电荷数, $r_m(T)$ 则是第 m 个探测元对绝对温度为 T 的黑体在一个有效积分周期内全部响应的电荷数。

量子效率 η_m 是只与波长有关的函数。对于 N-on-P 型的 HgCdTe 探测器,如果忽略表面反射和少子吸收, η_m 可写为

$$\eta(\lambda) = 1 - e^{-d\alpha(\lambda)} \quad (2)$$

$\alpha(\lambda)$ 是 HgCdTe 在波长 λ 处的光子吸收系数, d 是 p 区的厚度。褚 (Chu)^[3] 等人对吸收系数给出了改进的经验公式:

$$\alpha(\lambda) = \begin{cases} \alpha_g \exp[\beta(E(\lambda) - E_g)]^{1/2} & \alpha \geq \alpha_g \\ \alpha_0 \exp[\frac{\delta(E(\lambda) - E_0)}{kT}] & \alpha < \alpha_g \end{cases} \quad (3)$$

式中, α_g 、 E_g 、 α_0 、 E_0 为 HgCdTe 组分 x 和探测元工作温度 T 的函数。由式 (3) 计算,可得到不同组分 HgCdTe 在 77 K 时的吸收系数随波长的变化,结果如图 1 所示。根据 E.Finkman^[4] 的资料,取中波波长范围 3.0 μm ~5 μm 、 $x=0.230$,长波波长范围 7.5 μm ~12 μm 、 $x=0.220$,由式 (2) 可得出量子效率在两个波段的计算结果,如图 2 所示。

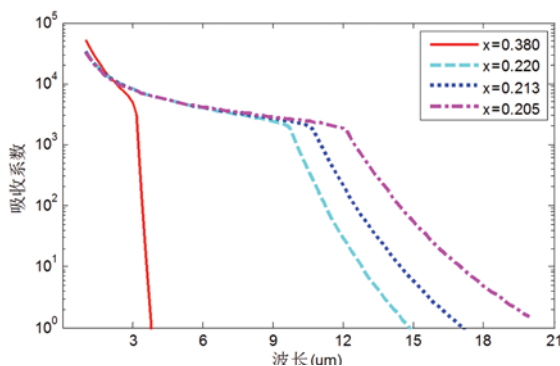


图 1 不同组分 HgCdTe 的吸收系数计算结果

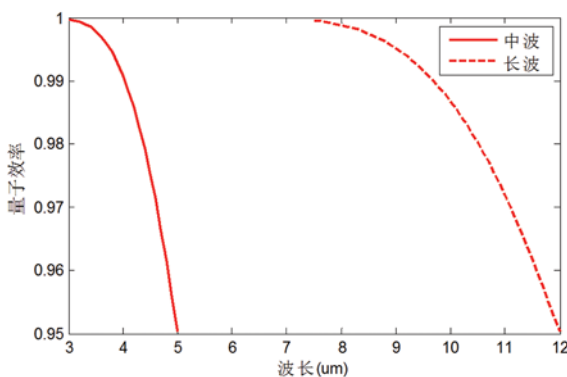


图 2 中波及长波范围内量子效率的计算结果

根据计算得到的吸收系数及量子效率结果,结合给定的探测器光敏元面积和光学系统的参数,便可计算出单个探测元响应的绝对量。由于探测元之间存在着不同的固有缺陷及杂质浓

度、不均匀的成分掺杂, HgCdTe 组分 x 会不一致。另外, 样片材料的厚度不均匀性、机械应力及不同的表面处理方式也会影响 PN 结的结构^[5]。这些都会使不同探测元之间的量子效率具有非均匀性。另外, 探测元结构及材料的差异会引起大小各异的暗电流。由于以上因素的综合作用, 在整个 IRFPA 中即使各个探测单元接收到同样大小的辐射通量, 其输出的响应值也是不同的, 最终导致整个红外成像系统表现出了非均匀性。

受多种因素的影响, 每个探测元的 HgCdTe 组分 x 、暗电流等因素是不可知的。在实际应用中, 可以用一个二阶多项式来近似探测元的响应:

$$R_{ij}(\phi_{ij}) = A_{ij}\phi_{ij}^2 + B_{ij}\phi_{ij} + C_{ij} \quad (4)$$

式中, R_{ij} 为探测元 (i, j) 的近似响应, ϕ_{ij} 为照射到探测元上的辐射通量。 A_{ij} 、 B_{ij} 及 C_{ij} 分别为二次项、一次项及常数项系数。为了表示探测元响应的非均匀性, 分别将三个系数设置为符合高斯分布的随机数, 通过调整高斯分布的均值、方差可实现不同非均匀性的模拟。

2 红外光学系统及外壳的影响

红外辐射透过光学系统照射到 IRFPA 上, IRFPA 将该辐射通量转换为电子。这些电子被积分电容收集, 通过电路转化为电压或电流^[6]。假设 IRFPA 中每一个探测元接收的辐射通量来自于一个位于冷屏孔径处 (光学系统出瞳处) 的等效辐射源, 其辐射强度为 ϕ_{ij} , 可写为^[7]:

$$\phi_{ij} = \phi_{sce,ij} + \phi_{opt} + \phi_{hou,ij} \quad (5)$$

式中, $\phi_{sce,ij}$ 是场景的辐射通量, ϕ_{opt} 是光学系统自身的辐射通量, $\phi_{hou,ij}$ 是系统外壳的辐射通量。

2.1 场景的相对辐射

光学系统可以用一个入射辐射通量与照射到探测器冷屏处的辐射通量之间的传递函数表

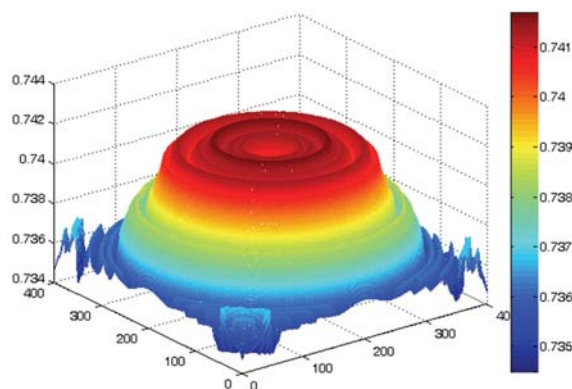
示。设 ϕ_s 是光学系统前的场景辐射通量, 则冷屏处的辐射通量 $\phi_{sce,ij}$ 可表示为

$$\phi_{sce,ij} = \tau_{sys} \cdot g_{ij} \cdot \phi_s \quad (6)$$

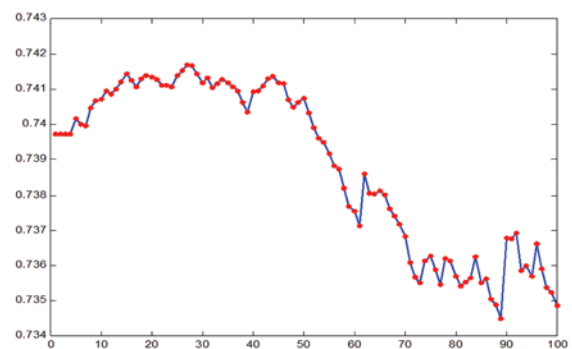
式中, τ_{sys} 是系统的透射率, 可作为常数处理。 g_{ij} 是光瞳畸变矩阵, 每个探测元的 g_{ij} 是不同的。设 A_{ij} 是实际入瞳面积, A_0 是标称入瞳面积, 则

$$g_{ij} = A_{ij}/A_0 \quad (7)$$

式中, $A_0 = \frac{\pi}{4}(\frac{f}{F_{opt}})^2$, f 为光学系统的焦距, F_{opt} 为光学系统的标称 f 数。可由 OAS、ZMAX 等软件计算得到。



(a)



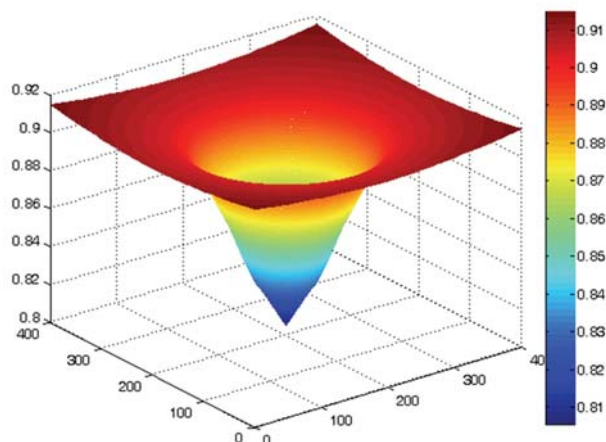
(b)

图 3 红外成像系统相对辐射率 g_{ij} 的计算值

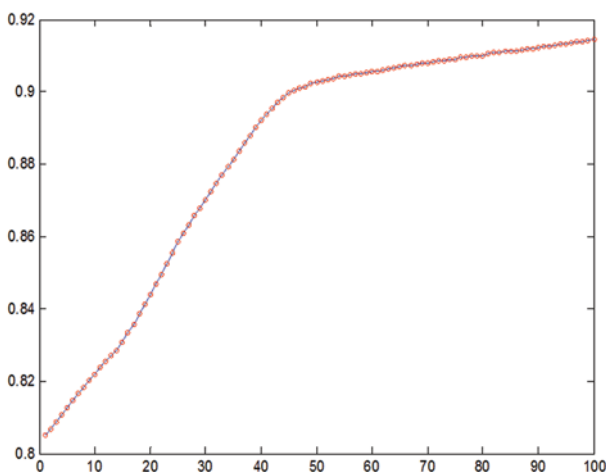
图 3(a) 是一个 400×400 的 IRFPA 的三维分布视图。图 3(b) 中横坐标表示目标探测元到中心探测元的百分比距离。从图 3 中可以看出, 受探测元位置的影响非常明显。在均匀场景的辐射下, 不同位置的探测元因其所在位置不同, 接

收到的红外辐射强度不同,这导致不同位置的探测元的响应不同,从而产生了非均匀性。

2.2 光学系统自身的辐射



(a)



(b)

图 4 红外成像系统 $SCSE_{h,ij}$ 计算值

镜头自身的辐射对红外辐射通量的贡献也是不可忽视的。假设 ϕ_{len} 是光学系统的辐射,则到达探测元 (ij) 的辐射通量是 $\phi_{opt} = \varepsilon_{len}\phi_{len}$ 。 ε_{len} 是等效光学系统辐射率,与系统材料、镀膜及透镜数量有关系。大多数红外光学系统的出瞳位于冷屏口径处,光学系统辐射对于每一探测元来说基本一致,可以认为对非均匀性无影响。

2.3 外壳的杂散光

外壳的杂散光来自于系统内部组件产生的红外辐射。经光学系统反射到探测器上后,它会

使探测器产生响应。杂散光来自两部分:一是机械结构以及电子线路等温度较高的组件,二是探测器自身、冷屏等温度较低的组件。将两部分组件分别看作温度为 T_h (外壳平均温度) 和温度为 T_d (探测器冷屏温度) 的黑体, ϕ_h 为高温组件产生的红外辐射, ϕ_d 为低温组件产生的红外辐射。入射到探测元 (ij) 上的辐射通量为

$$\phi_{hou,ij} = h_{h,ij}\phi_h + h_{d,ij}\phi_d \quad (8)$$

探测器工作在制冷条件下 (70 K~80 K), ϕ_d 可忽略。 $h_{h,ij}$ 是一个矩阵:

$$h_{ij} = r_{sys} \cdot (1 - SCSE_{h,ij}) \quad (9)$$

式中, $r_{sys} = r_{surf,max} \cdot N_{surf}$ 。 $r_{surf,max}$ 是光学系统透镜表面反射率的最大值, N_{surf} 是光学系统的透镜数量, $SCSE_{h,ij}$ 是探测器系统的冷屏效率 (System Cold Shield Efficiencies, SCSE):

$$SCSE_{h,ij} = 1 - \frac{\sum_{l=1}^{N_{surf}} CSE_{l,ij}}{N_{surf}} \quad (10)$$

图 4 是利用 OAS 软件得到的 $SCSE_{h,ij}$ 计算值。图 4(a) 是 $SCSE_{h,ij}$ 的三维分布视图,图 4(b) 的横坐标表示目标探测元到中心探测元的百分比距离。从曲线中可以看出, $SCSE_{h,ij}$ 受探测元位置的影响非常明显。IRFPA 中探测元的位置不同,其冷屏效率不同,红外成像系统外壳产生的杂散光对 IRFPA 不同探测元产生的影响就不同,从而产生了 IRFPA 的非均匀性。

3 系统的响应方程

考虑上文提到的所有非均匀性噪声源^[7], 红外成像系统总的响应方程可表示为

$$\begin{aligned} R_{ij}(\phi_{ij}) = & A_{ij}(\tau_{sys} \cdot g_{ij} \cdot \phi_s + r_{sys} \cdot (1 - SCSE_{h,ij})\phi_h \\ & + \varepsilon_{len}\phi_{len})^2 + B_{ij}(\tau_{sys} \cdot g_{ij} \cdot \phi_s + r_{sys} \cdot (1 - SCSE_{h,ij})\phi_h \\ & + \varepsilon_{len}\phi_{len}) + C_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

(下转第 42 页)