

激波辐射对红外成像探测影响的抑制方法研究

杜磊, 赵剡

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 带有红外成像系统的大气层内高速飞行器的头罩窗口外激波的热辐射将降低系统的探测性能。采用单线组模型描述激波的辐射特性。由于激波辐射相对成像系统是近场辐射, 建立相应的模型, 计算了激波辐射在探测器阵列上产生的光子辐射照度, 还计算了激波对目标辐射的吸收特性。得到了如下的计算结果: 激波辐射在探测器阵列上产生的背景辐射可以近似为均匀的背景辐射; 激波对目标辐射的吸收可以忽略; 激波辐射具有强烈的光谱选择性。根据激波的这些辐射性质, 在成像系统中通过分别选用不同的带通滤光片, 不改变成像系统工作波段的波长宽度, 而仅改变其位置, 可以减小激波辐射对目标探测的影响, 提高探测的信噪比。

关键词: 激波辐射; 抑制; 气体辐射; 成像探测; 信噪比

中图分类号: TK124; O434 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0562-07

Method of mitigating shock layer radiation effect on detection performance of an IR imaging system

Du Lei, Zhao Yan

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Radiation from shock layer near a window of an IR imaging detection system carried by an endo-atmospheric high-speed flying vehicle can degrade detection performance of the system. Single Line Group Model (SLG Model) was selected to describe radiation characteristic of the shock layer. Because the shock layer radiation was near field radiation to the imaging system, a relevant physical model was constructed to calculate photon irradiances caused by the shock layer radiation in the detector array. Absorption characteristic of the shock layer to target radiation was also calculated. Calculation results show that background radiation caused by the shock layer radiation in the detector array is nearly uniform and the target radiation absorbed by the shock layer can be neglectable. The magnitude of the shock layer radiation varies greatly with wavelength. In the imaging system, respective selection of different optical bandpass filters can change position of the working wave band of the system without changing wavelength width of the working wave band. According to the characteristics of the shock layer radiation, the change of the working wave band can mitigate the shock layer radiation effect on target detection and improve signal-to-noise ratio of target detection.

Key words: shock layer radiation; mitigation; gas radiation; imaging detection; signal-to-noise ratio

收稿日期: 2012-10-05; 修订日期: 2012-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61074184)

作者简介: 杜磊(1985-), 男, 博士生, 主要从事气动光学的建模与仿真方面的研究。Email: paper_tougao@163.com

导师简介: 赵剡(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事气动光学方面的研究。Email: zhaoyan@buaa.edu.cn

0 引 言

采用红外成像探测的飞行器在大气层内高速飞行时,其头罩窗口附近被气动加热的高温激波流场和高温窗口在探测器阵列上产生强的背景辐射,这将降低成像系统探测目标的性能,严重时可以使探测器饱和而无法接收目标的辐射,这种物理效应称为气动热辐射效应^[1]。国内外研究者对其进行了一些研究。参考文献[2]推导了红外成像导引头的窗口发射率和窗口辐射在焦平面上产生的辐射亮度跟窗口温度之间的函数关系。参考文献[3]计算了大气层内拦截器头罩的辐射特性和其在探测器上产生的热辐射噪声随飞行轨迹的变化情况。参考文献[4]计算了不同马赫数条件下头罩辐射对探测器阵列成像质量的影响。参考文献[5]建立了半球形光学头罩热辐射及其影响的分析模型,预测了飞行过程中头罩辐射使探测器饱和的物理现象。参考文献[6]开展了头罩热辐射的半实物仿真实验,观察到了头罩辐射使探测器阵列饱和,从而目标成像的信号被淹没的现象。总的来说,目前气动热辐射效应的研究主要集中在窗口辐射方面,对激波辐射的研究很少见到相关的报道。文中对激波辐射对红外成像系统探测性能的影响进行建模、分析,并在此基础上提出减小这种影响的技术途径。

1 问题描述

如图 1 所示为平面侧窗红外成像探测系统的等效结构图。当飞行器以高超音速飞行时,被气动加热的高温激波和窗口是成像系统重要的背景辐射源,它们的辐射相对于成像探测系统属于近场辐射。当目标与飞行器相距很远时,目标辐射相对于成像探测系统属于远场辐射。对成像系统探测性能有影响的背景辐射源有很多,为了简化问题的分析,文中暂

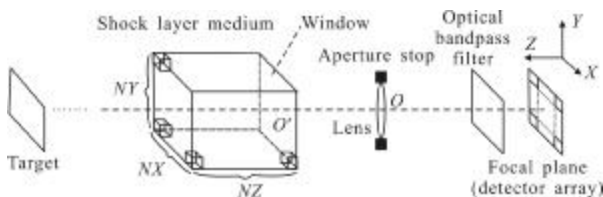


图 1 物理模型和坐标系

Fig.1 Physical model and reference frame

不考虑窗口辐射和其他背景辐射的影响,仅针对激波辐射的影响及其抑制方法进行分析。

在该系统中,在圆形镜头的周围设置了光阑,在镜头和探测器阵列之间有带通滤光片,因此,目标辐射和激波辐射只有先经过镜头折射,然后经过滤光片,才能到达探测器阵列。设探测器阵列为光子探测器阵列,其响应波段为 $[0, \lambda_p]$ 。设带通滤光片为理想的带通滤光片,即通带的光谱透过率为 1,阻带的光谱透过率为 0,设其通带为 $[\lambda_1, \lambda_2]$,且 $[\lambda_1, \lambda_2] \subset [0, \lambda_p]$,所以成像系统的工作波段为 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 。对于激波介质,只有它的近轴部分发射的辐射才可能被探测器阵列接收,因此,只需选取光轴附近的长方体形状的关于光轴对称分布的激波介质进行研究。被研究的激波介质的 3 条边分别沿着 X、Y、Z 轴方向。为了便于计算,需要对该激波介质相关的参数进行离散化。将该介质离散化为 $NX \times NY \times NZ$ 个小立方体网格,每个立方体网格的边长为 d ,同一网格内的温度、密度是均匀分布的,不同网格之间的温度、密度可能不同。光轴沿着 Z 轴方向,设目标是正方形的面辐射源,其中心点恰好经过光轴,其各条边分别与 X、Y 轴平行,窗口、镜头平面、带通滤光片均与 X、Y 轴平行,探测器阵列的各条边分别与 X、Y 轴平行。

2 激波热辐射分析

激波热辐射属于介质的热辐射,其辐射的发射和吸收是在介质的容积内进行的。对于成像系统,要计算探测器阵列接收的激波辐射产生的光子通量,可以将激波辐射等效为激波与窗口的界面上的面辐射源发射的辐射,如图 2 所示。可以将该面辐射源离

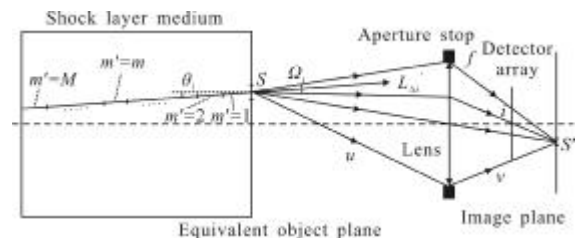


图 2 激波介质的近场辐射光路和介质中的辐射计算

Fig.2 Near field light path of shock layer radiation and radiative calculation in shock layer medium

散化为多个小面元。对于等效的小面辐射源 S,已知物距 u ,根据凸透镜成像的高斯公式,可以得到其像

面元 S' 和像距 v 。设某个小立体角的大小为 Ω_1 , 其中心线方向与 S 的法线方向的夹角为 θ_1 , 小面辐射源 S 在该立体角内发射的光束经过镜头折射后恰好到达探测器阵列的第 i 个像元。设小面辐射源 S 在该立体角的中心线方向在 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 内发射的光子辐射亮度为 $L'_{\Delta\lambda}$, 则小面辐射源 S 发射的被第 i 个像元接收的光子通量为:

$$\phi_i^s = L'_{\Delta\lambda} \cdot A_s \cdot \Omega_1 \cdot \cos\theta_1 \quad (1)$$

式中: A_s 为 S 的面积; $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 。对于激波与窗口界面上的所有的等效小面辐射源, 均使用公式 (1) 计算, 再把计算结果求和, 即可得到第 i 个像元接收的整个激波介质发射的光子通量。对每个像元重复以上计算, 即可得到探测器阵列上所有像元接收的激波介质发射的光子通量。

公式(1)的计算要求先求出 $L'_{\Delta\lambda}$, 它表示激波介质在小面元 S 处沿某个方向发射的某个波段内的光子辐射亮度, 这需要选取激波介质中主要辐射性组分的气体辐射模型, 并求解辐射传递方程来计算。

3 高温气体辐射模型

因为文中研究的激波流场的来流马赫数小于 8, 所以激波中的化学反应可以忽略不计。此时, 激波中的气体介质和自然大气的区别表现为密度、温度显著增大。自然大气中产生热辐射的主要组分为 H_2O 和 CO_2 , 所以激波中产生热辐射的主要组分也是这两种气体。参考文献[7]是高温气体辐射研究的代表性著作, 该文献推荐使用单线组模型 (Single Line Group Model, SLG Model) 描述这两种气体的热辐射特性。SLG 模型是一个谱带模型, 其基本思想^[7]是假设在某个基准谱带内的所有谱线的强度相近, 将它们分成一个线组, 并直接使用 Curtis-Godson 近似来计算该谱带的参数。参考文献[7]针对大量的气体辐射研究实例, 将基于 SLG 模型的计算结果和实验测试结果进行对比, 发现两者具有良好的一致性, 从而说明 SLG 模型具有很高的计算精度。并给出了基于 SLG 模型的计算流程及相关的计算公式, 现针对 $L'_{\Delta\lambda}$ 的计算简述如下。

如图 2 所示, 对于激波介质在小面元 S 的中心点沿着立体角 Ω_1 的中心线发射的辐射线, 其在激波介质内与多个介质网格相交, 其被介质网格截成了

M 个小段。设每个小段的编号为 m' , ($m'=1, 2, \dots, M$)。设第 m' 个小段的长度为 $\Delta l_{m'}$, 对于激波介质中的第 j 种辐射性气体 (CO_2 或 H_2O), 设其在第 m' 个小段所在的介质网格中的分压为 $P_{m'}^j$, 该介质网格的温度为 $T_{m'}$, 则介质中第 j 种辐射性气体在第 m' 个小段的光学厚度为

$$(\Delta u)_{m'}^j = \Delta l_{m'} \cdot (273/T_{m'}) \cdot P_{m'}^j \quad (2)$$

计算中选取的基准谱带的波数宽度为 $\Delta\omega$, 其中心波数为 ω_0 。因为第 j 种组分在特定波数 ω 和温度 T 下的谱带平均吸收系数 $k^j(\omega, T)$ 、线密度 $(1/d)^j(\omega, T)$ 已经在参考文献[7]中被分别列成相关的表格, 所以已知 ω_0 和 $T_{m'}$, 对这些表格中的数据采用线性插值的办法就可以计算出第 j 种辐射性气体在第 m' 个小段所在的介质网格在上述基准谱带的 $k^j(\omega_0, T_{m'})$ 、 $(1/d)^j(\omega_0, T_{m'})$ 。第 j 种辐射性气体在第 m' 个小段所在的介质网格的碰撞半宽满足下式:

$$(\gamma_c)_{m'}^j = \sum_q (r_{j,q})_{273} \cdot P_{m'}^q \cdot (273/T_{m'})^{\eta_{j,q}} + (r_{j,j})_{273} \cdot P_{m'}^j \cdot (273/T_{m'})^{\eta_{j,j}} \quad (3)$$

式中: q 为增宽气体组分, 在文中研究的激波介质中, q 指的是 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 这 4 种气体中的任何一种; $P_{m'}^q$ 为第 q 种增宽气体组分在第 m' 个小段所在介质网格的分压。对于不同的辐射性气体 j 和增宽气体组分 q , 参考文献[7]用一个表格列出了 $(r_{j,q})_{273}$ 、 $\eta_{j,q}$ 、 $(r_{j,j})_{273}$ 、 $\eta_{j,j}$ 这 4 个参数的数值。第 j 种辐射性气体在第 m' 个小段所在的介质网格在上述基准谱带的多普勒半宽为:

$$(\gamma_b)^j(\omega_0, T_{m'}) = 5.94 \times 10^{-6} \cdot \omega_0 / (\text{mol.wt})_j \cdot \sqrt{T_{m'}/273} \quad (4)$$

式中: mol.wt 为第 j 种辐射性气体的分子量。

对于 $m'=1, \dots, m$ ($m=1, 2, \dots, M$) 的这些小组, 第 j 种辐射性气体在这些小组在上述基准谱带的弱线极限的光学深度为^[7]:

$$(X^j)^j(\omega_0, m) = \sum_{m'=1}^m k^j(\omega_0, T_{m'}) \cdot (\Delta u)_{m'}^j \quad (5)$$

第 j 种辐射性气体在这些小组在上述基准谱带的碰撞增宽精细结构参数、多普勒增宽精细结构参数分别为:

$$(a_c)^j(\omega_0, m) = 1/(X^j)^j(\omega_0, m) \cdot \sum_{m'=1}^m (\gamma_c)_{m'}^j \cdot (1/d)^j(\omega_0, T_{m'}) \cdot k^j(\omega_0, T_{m'}) \cdot (\Delta u)_{m'}^j \quad (6)$$

$$(a_D)^j(\omega_0, m) = 1/(X^j)^j(\omega_0, m) \cdot \sum_{m'=1}^m (\gamma_b)^{j \cdot m'}$$

$$(\omega_0, T_m)(1/d)^j(\omega_0, T_m) \cdot k^j(\omega_0, T_m) \cdot (\Delta u)_{m'}^j \quad (7)$$

第 j 种辐射性气体在这些小段在上述基准谱带的纯碰撞生长曲线的光学深度、纯多普勒生长曲线的光学深度、碰撞和多普勒组合的光学深度分别为^[7]:

$$(X_C)^j(\omega_0, m) = (X^j)^j(\omega_0, m) \cdot [1 + (X^j)^j(\omega_0, m)/4/(a_C)^j(\omega_0, m)]^{-1/2} \quad (8)$$

$$(X_D)^j(\omega_0, m) = 1.7 \cdot (a_D)^j(\omega_0, m) \cdot \sqrt{\ln\{1 + [(X^j)^j(\omega_0, m)/1.7/(a_D)^j(\omega_0, m)]^2\}} \quad (9)$$

$$Y^j(\omega_0, m) = \{1 - [(X_C)^j(\omega_0, m)/(X^j)^j(\omega_0, m)]^2\}^{-2} + \{1 - [(X_D)^j(\omega_0, m)/(X^j)^j(\omega_0, m)]^2\}^{-2} - 1 \quad (10)$$

第 j 种辐射性气体在这些小段在上述基准谱带的光学深度为^[7]:

$$X^j(\omega_0, m) = (X^j)^j(\omega_0, m) \cdot \sqrt{1 - [Y^j(\omega_0, m)]^{-1/2}} \quad (11)$$

两种辐射性气体在这些小段在上述基准谱带的总的光学深度为^[7]:

$$X(\omega_0, m) = \sum_{j=1}^2 X^j(\omega_0, m) \quad (12)$$

激波介质在这些小段在上述基准谱带的谱带平均光谱透过率为:

$$\bar{\tau}(\omega_0, m) = \exp[-X(\omega_0, m)] \quad (13)$$

根据介质中的辐射传递关系可得, 激波介质在小面元 S 的中心点沿着立体角 Ω 的中心线, 在上述基准谱带发射的谱带平均光谱辐射亮度为:

$$\bar{L}(\omega_0, M) = - \sum_{m=1}^M L_b(\omega_0, T_m) \cdot [\bar{\tau}(\omega_0, m) - \bar{\tau}(\omega_0, m-1)] \quad (14)$$

式中: T_m 指的是第 m 个小段所在的介质网格的温度; $L_b(\omega_0, T_m)$ 指的是温度为 T_m 的黑体在波数为 ω_0 处发射的光谱辐射亮度。则激波介质在上述位置沿着上述方向在上述基准谱带发射的光子辐射亮度为:

$$L'_{\Delta\omega} = \frac{\bar{L}(\omega_0, M)}{hc \cdot \omega_0} \cdot \Delta\omega \quad (15)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为真空中的光速。

设 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 包含了 n 个基准谱带, 则先根据 SLG 模型的公式、参数分别计算这 n 个基准谱带的 $L'_{\Delta\omega}$, 然后求和, 即可得到 $L'_{\Delta\lambda}$ 。

4 目标辐射穿过激波后成像

设目标离镜头很远, 目标仅成像于探测器阵列

的中间几个像素。探测器阵列仅能接收到目标辐射中被自然大气和激波介质吸收后透过光子通量。文中为了简化问题的分析, 暂不考虑自然大气对目标辐射的吸收作用, 仅考虑激波介质对其的吸收。

设目标离镜头的距离为 $s=10$ km, 镜头直径为 $D=30$ mm, 则目标发射的到达镜头边缘的辐射线与光轴的夹角为:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D}{2s}\right) = 0.3'' \quad (16)$$

这说明目标发射的到达镜头的辐射线与光轴的夹角非常小, 所以这些辐射线可以近似看成在激波介质中与光轴平行的路径中传输。因此, 在评估激波介质对目标辐射的吸收特性时, 可以先取激波介质中与光轴平行且与镜头相交的所有不同的辐射传输路径, 然后计算激波介质在这些路径上的光谱吸收特性, 如图 3 所示。

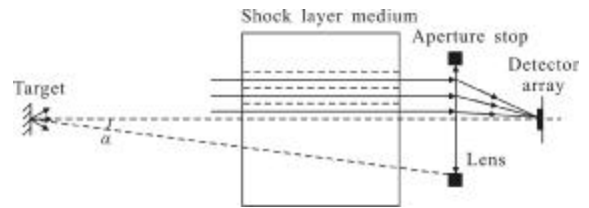


图 3 目标辐射成像的光路

Fig.3 Light path of target radiation imaging

计算激波介质的光谱吸收特性要用到光谱法^[8], 它包含了逐线计算法和谱带模型法。本质上, 各种不同的光谱法是在不同大小的光谱间隔内对气体光谱吸收特性的近似^[8]。在 SLG 模型中先选择合适的基准谱带的宽度, 然后用该模型计算出激波介质在上述路径中在各个基准谱带的谱带平均的光谱吸收率, 以表征激波介质在上述路径中的光谱吸收特性, 该计算结果的光谱分辨率能满足工程计算的要求。

对于中心波数为 ω_0' , 波数宽度为 $\Delta\omega'$ 的某个基准谱带, 激波介质中某一条与光轴平行且与镜头相交的辐射传输路径中的谱带平均的光谱透过率为 $\bar{\tau}'(\omega_0', NZ)$, 则激波介质在该路径中在该基准谱带的谱带平均的光谱吸收率为:

$$\alpha'(\omega_0', NZ) = 1 - \bar{\tau}'(\omega_0', NZ) \quad (17)$$

重复以上计算, 可以求出 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 中所有基准谱带的所有不同的上述传输路径中的 $\bar{\alpha}'(\omega_0', NZ)$ 。

5 仿真实验与结果分析

文中激波流场的来流马赫数分别为 5 和 7, 飞行高度为 30 km, 头罩相对来流的攻角为 0。对于选取的激波介质, $NX=NY=64, NZ=80, d=1$ mm。成像系统的光学参数为 $f=60$ mm, $u=400$ mm, 探测器阵列的像元数为 64×64 , 像元大小为 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 。设目标的边长为 6 m, 且目标是均匀发射的朗伯面辐射源。

设探测器阵列的 $\lambda_p \geq 5 \mu\text{m}$, 其参数不发生变化, 在成像系统中分别选用 3 个通带分别为 $[2.67, 2.87]$ 、 $[4.57, 4.77]$ 和 $[2.87, 3.07]$ 的理想带通滤光片(单位为 μm), 从而将成像系统的工作波段分别设置于这 3 个波长宽度相同、但波长位置不同的波段。

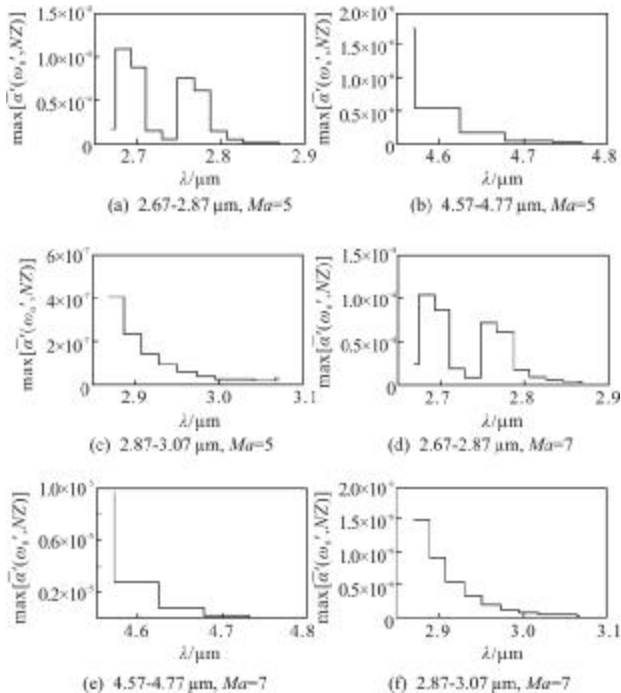


图 4 当成像探测系统取不同的工作波段, $Ma=5, 7$ 时, 激波介质对目标辐射的吸收特性

Fig.4 Shock layer's absorbing characteristics to target radiation with different working bands of the imaging system when mach numbers are 5 and 7 respectively

在研究激波介质对目标辐射的吸收特性时, 根据参考文献[7]推荐使用的参数值, 选取 SLG 模型的基准谱带的波数宽度为 25 cm^{-1} 。这 3 个工作波段分别包含(或占据)了几个基准谱带, 对于其中每个基准谱带, 将该谱带内所有的 $\bar{\alpha}'(\omega', NZ)$ 取最大值, 得

到 $\max[\bar{\alpha}'(\omega', NZ)]$ 。图 4(a)-(f) 示出对于这 2 个流场数据, 将这 3 个工作波段分别包含(或占据)的所有基准谱带及其值 $\max[\bar{\alpha}'(\omega', NZ)]$ 。在这 3 个工作波段包含(或占据)的所有基准谱带, 在 $[2.67, 2.87]$ 波段中的某个基准谱带中, 对于马赫数 5 和 7, $\max[\bar{\alpha}'(\omega', NZ)]$ 取最大值, 分别为 1.1×10^{-4} 和 1.05×10^{-4} 。这说明激波介质对目标辐射的吸收比例非常小, 可以忽略不计。

根据目标的边长、目标和镜头的距离、镜头的焦距和像元的尺寸可以计算出目标所成的像恰好占据了探测器阵列的中间 4 个像素。

在 SLG 模型中仍选取基准谱带的宽度为 25 cm^{-1} , 对于马赫数 5 和 7、上述 3 个工作波段计算探测器阵列上激波辐射产生的光子辐射照度 E' , 分别如图 5 的各个子图所示, 单位为 $\text{pho} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

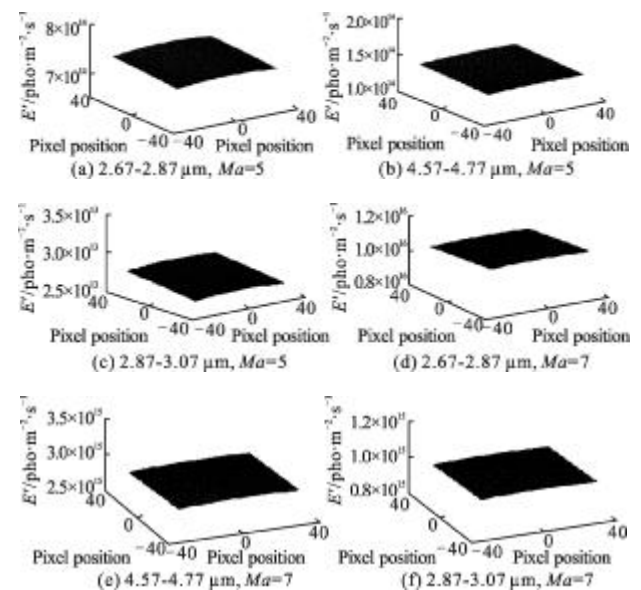


图 5 当成像探测系统取不同的工作波段时, 分别对于马赫数 5 和 7, 探测器阵列上的激波辐射产生的光子辐射照度

Fig.5 Photon irradiances caused by shock layer radiation in the detector array with different working bands of the imaging system when mach numbers are 5 and 7 respectively

由图 5 可知, 当系统的工作波段分别取 $[2.67, 2.87]$ 、 $[4.57, 4.77]$ 和 $[2.87, 3.07]$ 时, 对于马赫数为 5 和 7, 激波辐射在探测器阵列上产生的光子辐射照度均依次减小。这是因为激波辐射的本质是高温气体辐射, 它具有强烈的光谱选择性, 高温气体在波长宽度相同、但波长位置不同的波段内分别发射的光子辐射通量有显著的差异。

由图 5 可知,对于 3 个工作波段,激波辐射在探测器阵列上分别产生的光子辐射照度的起伏均比较小。设目标辐射在探测器阵列上产生的光子辐射照度均比激波辐射产生的小很多,则探测器阵列上目标、激波辐射分别产生的光子辐射照度分布如图 6(a)所示。因为探测器阵列接收的激波辐射的起伏较小,所以文中将其近似为均匀的背景辐射来估计其对成像系统探测性能的影响,如图 6(b)所示。

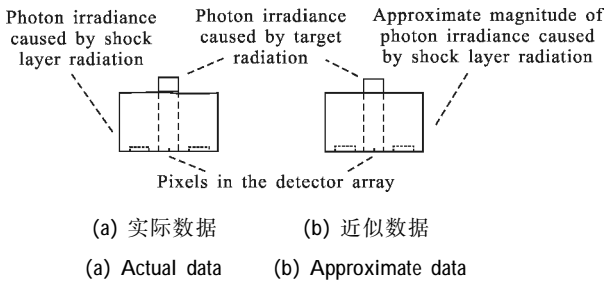


图 6 探测器阵列上的目标、激波辐射分别产生的光子辐射照度
Fig.6 Photon irradiances caused by target and shock layer radiation respectively in the detector array

热成像系统的信噪比(SNR)的表达式^[9]如下:

$$SNR = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta V_s(\lambda) d\lambda}{V_n} = \frac{\Delta V_s}{V_n} \quad (18)$$

式中: $\Delta V_s(\lambda)$ 、 ΔV_s 分别为相邻像元产生的光谱信号电压差、信号电压差; V_n 为热成像系统的噪声电压。由图 6(b)可知, ΔV_s 仅由目标辐射在探测器阵列上产生的光子辐射照度产生。

设在 3 个工作波段内,目标辐射的光谱光子辐射亮度 $L_T(\lambda)$ 的波形相同,如图 7 所示。

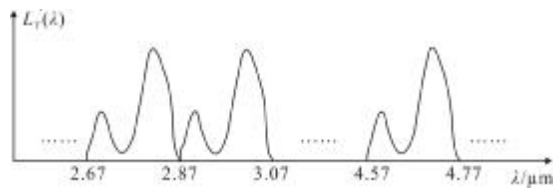


图 7 目标的光谱光子辐射亮度
Fig.7 Spectral photon radiance of target

用 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 表示 3 个工作波段中的任何一个。因为光子探测器的理想的光谱响应率与 λ 成正比,故可以假设 $R(\lambda)=K\lambda$ (K 为常数),因为

$$R(\lambda)=\Delta V_s(\lambda)/\Delta P(\lambda) \quad (19)$$

式中: $\Delta P(\lambda)$ 为目标辐射在单个像元上产生的光谱功率。设 $\Delta\phi'(\lambda)=\Delta P(\lambda)/(hc/\lambda)$, 则 $\Delta\phi'(\lambda)$ 称为目标辐射

在单个像元上产生的光谱光子辐射通量。那么

$$\Delta V_s(\lambda)=R(\lambda) \cdot \Delta P(\lambda)=K \cdot hc \cdot \Delta\phi'(\lambda) \quad (20)$$

因为

$$\Delta\phi'(\lambda)=L_T(\lambda) \cdot A_{lens} \cdot \Omega' \quad (21)$$

式中: A_{lens} 为镜头的面积; Ω' 为一个像元对镜头中心所张的立体角。所以

$$\Delta V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta V_s(\lambda) d\lambda = K \cdot hc \cdot A_{lens} \cdot \Omega' \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_T(\lambda) d\lambda \quad (22)$$

由前述假设可知, $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_T(\lambda) d\lambda$ 的值对于上述 3 个工作波段均是相同的, 所以 ΔV_s 的值对于上述工作波段均是相同的。

设探测器阵列中的探测器是背景限光子探测器^[9-10], 即探测器自身不产生噪声, 探测器上入射的光子产生的光子噪声是探测器唯一的噪声源, 且探测器接收的背景辐射比目标辐射强很多, 那么背景辐射产生的光子噪声是探测器最主要的噪声源。当背景限光子探测器阵列上的均匀背景辐射的光子辐射照度越小, 探测器阵列的 V_n 就越小^[9-10]。

当成像系统分别取上述 3 个工作波段时, 将探测器阵列上的激波辐射产生的起伏较小的光子辐射照度均近似为均匀背景辐射, 可得成像系统的工作波段分别取 $[2.67, 2.87]$ 、 $[4.57, 4.77]$ 和 $[2.87, 3.07]$ 时, 探测器阵列的 V_n 将依次减小, 因此, 成像系统对目标探测的 SNR 将依次增大。

6 结 论

文中构造了一个红外成像探测系统的物理模型。用 SLG 模型描述激波介质的辐射特性, 并考虑到激波辐射对于光学系统属于近场辐射, 计算了激波辐射在探测器阵列上产生的光子辐射照度。文中还分析了激波对目标辐射的吸收特性, 得到了如下的计算结果: 当成像系统的工作波段分别设置于 3 个波长宽度相同、但波长位置不同的波段时, 上述光子辐射照度均可近似为均匀的背景辐射, 但不同波段的光子辐射照度有显著的差异; 在上述 3 个波段中, 激波对目标辐射的吸收均可以忽略。计算结果表明: 当探测器阵列为背景限光子探测器阵列时, 对于上述 3 个工作波段, 上述光子辐射照度越小, 探测器阵列的噪声电压就越小, 则目标探测的信噪比越高。因此, 可以据此改变成像系统的工作波段, 抑制激波

辐射对目标探测的影响,提高探测的信噪比。

参考文献:

- [1] Yin Xinliang. Aero-optics Theory [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003: 187-199. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 187-199.
- [2] Cross Edward F. Analytical method to calculate window heating effects on IR seeker performance [C]//SPIE, 1994, 2286: 493-499.
- [3] Sutton George W, Troler James W, Carlson Dale R, et al. Thermal stresses and radiation of an uncooled optical dome due to transient aerodynamic heating[C]//AIAA, 1995, 2014: 1-9.
- [4] Zhang Zhenjun, Cao Zhiguo, Wang Wenwu. Effects of hypersonic vehicle's optical dome on infrared imaging [J]. Optical Engineering, 2011, 50(9), 093201: 1-7.
- [5] Liu Li, Meng Weihua, Pan Guoqing. Modeling and analysis of infrared radiation from the dome flying at supersonic speed [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1193-1198. (in Chinese)
刘立, 孟卫华, 潘国庆. 超音速飞行环境中光学头罩热辐射建模与分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1193-1198.
- [6] Zhao Hongwei, Hou Tianjin, Zhu Bin. Experimental research of aerodynamic effects of spinel domes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 297-303. (in Chinese)
赵洪卫, 侯天晋, 朱斌. 尖晶石整流罩气动效应的试验研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 297-303.
- [7] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases [R]. NASA-SP-3080, 1973: 214-486.
- [8] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, et al. Numerical Calculation of Infrared Radiation Characteristics and Radiative Transfer [M]. Harbin: Press of Harbin Institute of Technology, 2006: 69-70. (in Chinese)
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 69-70.
- [9] Zhang Youwen. Infrared Optics Engineering [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1982: 424-434. (in Chinese)
张幼文. 红外光学工程 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 424-434.
- [10] Arnold Daniels. Field Guide to Infrared Systems [M]. Bellingham, Washington SPIE Press, 2006: 49-55.

下期预览

水下单光束脉冲激光方位识别系统角度参数优化设计

查冰婷, 张 合, 张祥金, 许 敬

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对水下弹目交汇时, 引信需在近程(大于 10 m)获取目标的距离和方位信息, 为充分利用发射激光能量, 增大激光回波功率, 对水下单光束脉冲激光方位识别系统角度参数进行优化设计。通过推导水下脉冲激光方位识别系统探测目标的回波功率方程, 建立回波功率与系统角度参数之间的关系, 得出水下脉冲激光方位识别系统角度要求和充满区距离表示式, 利用 ISIGHT 软件, 基于多岛遗传算法, 对角度参数进行优化计算。结果表明: 在不考虑其他影响因素的情况下, 发射光束中心与弹轴的夹角取 30° , 接收视场中心与弹轴的夹角取 34.5° , 接收视场角取 10° 时能获得系统最小的充满区距离。所得计算结果可为水下单光束脉冲激光方位识别系统角度参数的设计提供理论依据。