

基于 BRDF 的空中目标红外成像建模与仿真

王 霄^{1,2,3}, 高思莉^{1,3*}, 李范鸣^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:提出了一种空中目标的红外成像仿真方法. 根据能量守恒定律, 利用目标在天空背景中稳态时的热平衡方程, 求解表面温度场; 选取适合的双向反射分布函数模型描述目标表面面元在红外波段的反射特性, 提高面元红外反射的真实感. 综合考虑空中目标的几何模型, 目标自身红外辐射和对背景的反射辐射, 结合计算机图形学相关理论, 渲染输出空中目标的红外图像. 成像仿真的方法为空中目标的探测、识别和跟踪提供了参考依据.

关键词:空中目标; Cook-Torrance; 红外辐射特性; 建模与仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Infrared imaging modeling and simulation of aerial target based on BRDF

WANG Xiao^{1,2,3}, GAO Si-Li^{1,3*}, LI Fan-Ming^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: An infrared imaging simulation method for aerial targets is proposed. According to the law of energy conservation, the surface temperature field is solved by using the thermal equilibrium equation of the target in the sky background. The suitable bidirectional reflection distribution function model is selected to describe the reflection characteristics of the target surface element in the infrared band, which improves the realism of the infrared reflection of face element. Taking into account the geometric model of air target, the infrared radiation of target itself and the reflected radiation to background render the infrared image of aerial target in combination with the relevant theories of computer graphics. The modeling and simulation methods provide a reference for the detection, identification and tracking of aerial targets.

Key words: air targets, Cook-Torrance, infrared radiation characteristics, modeling and simulation

PACS: 02. 90. + p, 05. 70. Ce, 05. 70. Np

引言

随着信息技术和材料科学的发展, 空中目标朝着智能化和隐身化的方向发展, 为探测和跟踪系统的研制与目标识别算法的研究提出了新的挑战. 空中目标的高速运动特性使其具有较明显的红外辐射特征, 使用作用距离远、抗干扰性好、可被动探测、全

天候工作的红外探测技术可进行有效探测. 红外成像探测系统对不同波段、不同类型的目标具有不同的成像性能, 研制成本较高, 因此对不同目标在不同状态下进行红外成像仿真, 根据仿真结果调节探测系统参数, 节约红外成像探测系统的研制成本, 具有较高的价值.

目标红外成像仿真的前提是计算探测器接收的

收稿日期: 2018-06-04, 修回日期: 2018-12-20

Received date: 2018-06-04, revised date: 2018-12-20

基金项目: 国家十三五国防预研项目(Jzx2016-0404/Y72-2), 上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2017xewzk08)

Foundation items: Supported by Thirteenth- Five National Defense Research Foundation(Jzx2016-0404/Y72-2), Shanghai Key Laboratory of Criminal Scene Evidence funded Foundation(2017xewzk08)

作者简介 (Biography): 王 霄 (1993-), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究领域为空中目标的红外成像仿真与目标识别技术
E-mail: wang_xiao529@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: gauss_gao@sina.com

红外辐射能量,对此人们已提出了很多计算红外辐射的方法.文献[1-2]对导弹中段和飞机的红外成像仿真只考虑了目标的自身红外辐射,没有考虑蒙皮对环境辐射的反射,简化了计算,不能较真实地反映目标的反射特性;文献[3]计算蒙皮面元的辐射亮度时,将目标看作朗伯体,计算了蒙皮面元的红外辐射和蒙皮面元对太阳辐射的反射,既简化了计算,又考虑了目标对环境的反射,但是把目标看作朗伯体使仿真的真实度降低;文献[4]进行空中目标场景仿真时使用 Ward 模型对太阳直射辐射和天空背景的反射进行建模;文献[5]根据空间旋转目标的表面状况和实际光照环境,采用 Davies 模型描述空间目标表面面元的光散射特性;文献[6]引入 Torrance-Sparrow 模型描述空间目标表面的反射特性.由此可见,双向反射分布函数在空间目标的红外特性建模中应用的比较成熟,但是在空中目标的红外特性建模中应用较少,并且在场景仿真中几乎没有引入适用于金属材质渲染的 Cook-Torrance 模型.

本文基于空中目标温度场的红外辐射特性和辐射理论,引入双向反射分布函数,描述空中目标的反射特性,并结合目标自身发射辐射特性对空中目标进行红外成像仿真.仿真结果对空中目标的探测、跟踪和识别提供依据,为深度学习进行目标识别提供多角度、多状态的数据源,提高了算法研究的效率.

1 理论建模

由目标所处的环境特性、目标的速度和几何特征计算目标的表面温度场,结合目标的表面材料特性得到目标的自身红外辐射;由双向反射分布函数计算目标表面的反射辐射,将二者传输的能量在探测器入瞳处叠加,建立目标红外成像仿真的理论模型.

目标蒙皮达到探测器面元的辐射传输过程如图 1 所示:

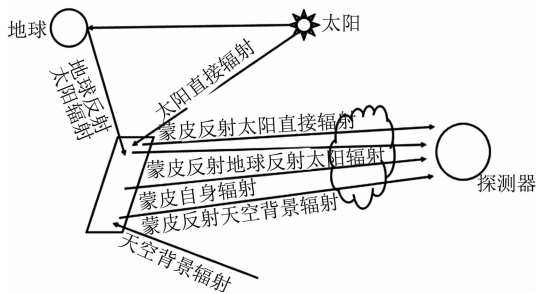


图 1 目标蒙皮的红外辐射传输过程

Fig. 1 Infrared radiation transmission process of the target skin

1.1 天空背景辐射特性建模

空中目标在天空背景中接受的外界环境辐射主要是太阳辐射,包括直接辐射和散射辐射,地球自身红外辐射和对太阳的反射辐射较小,不予考虑.由红外辐射理论计算各部分的红外辐射在蒙皮处的辐照度:

(1) 太阳直接辐照度:

$$E_D = E_0 p^m \cos(\theta_T) \quad (1)$$

其中, E_0 为太阳常数,取 1353 W/m^2 , p 为大气透明度, m 为大气质量, θ_T 为太阳光的入射角.

(2) 太阳散射辐射辐照度^[5]:

$$E_{\text{ref}} = C_1 (\sinh)^{C_2} \times \frac{4.186 \times 10^4}{60} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

其中, C_1 和 C_2 是经验系数,与大气透明度有关, β 为斜面倾角, h 为太阳高度角.

1.2 目标自身红外辐射特性建模

目标自身的红外辐射特性主要与蒙皮的温度有关,而蒙皮的温度主要取决于蒙皮从外界吸收的能量以及向外辐射的能量,稳态时蒙皮微元的热平衡模型如图 2 所示.

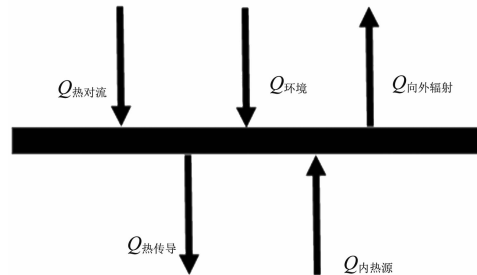


图 2 蒙皮微元的热平衡模型

Fig. 2 Heat balance model of the skin microelements

1.2.1 目标表面温度场计算

本文考虑的是一个稳态的过程,所以此处忽略面元间的热传导,综合考虑面元的内热源、环境辐射和气动加热建立面元的热平衡方程,各部分热量如下所示:

(1) 表面气动加热

$$Q_{\text{热对流}} = \alpha(T_r - T_j) \quad (3)$$

其中, α 为热交换系数, T_r 为恢复温度, T_j 为面元的壁面温度.

(2) 内热源传热

$$Q_{\text{内热源}} = \varepsilon \sigma T_E^4 - k \frac{T_E - T_j}{L_N} \quad (4)$$

其中, T_E 为发动机温度, L_N 为发动机到表面片中心

的距离, k 为导热系数, 常取值 35.

(3) 环境辐射

$$Q_{\text{环境}} = \beta(E_D + E_{\text{ref}}) \quad , \quad (5)$$

其中, β 为蒙皮对太阳辐射的吸收系数, 无量纲, 取值为 0.8.

(4) 自发向外辐射

$$Q_{\text{辐射}} = \varepsilon\sigma(T_j^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad , \quad (6)$$

其中, T_{amb} 为蒙皮所处的环境温度.

综合考虑以上因素, 建立蒙皮表面的热平衡方程:

$$Q_{\text{热对流}} + Q_{\text{环境}} + Q_{\text{内热源}} = Q_{\text{向外辐射}} \quad , \quad (7)$$

利用牛顿迭代法求解蒙皮的热平衡方程, 得到蒙皮的表面温度分布.

对于特定的飞行高度, 目标表面温度受飞行速度的影响最为显著, 并且目标面元间的温度相差不大. 空中目标的飞行高度为 15 km 时飞行速度与面元温度的对应关系如图 3 所示, 从图中可以看出, 面元温度随着目标运动速度的升高而近似线性升高.

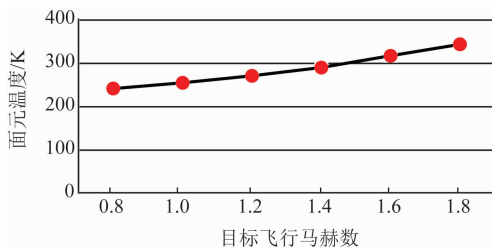


图 3 面元温度与飞行速度的关系

Fig. 3 Relationship between the face element temperature and the flight speed

1.2.2 目标自身红外辐射计算

结合蒙皮的表面材质的发射率, 根据普朗克定律, 对应于探测器响应波段内蒙皮的红外辐射出射度(\cdot)为:

$$W_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \quad , \quad (8)$$

其中, T 为蒙皮的表面温度; ε 为蒙皮表面材质的发射率. 在工程计算中, 建立特定波段范围内的辐射量, 利用插值的方法计算某特定波长的辐射出射度, 可大为减少计算量.

1.3 目标反射辐射特性建模

1.3.1 双向反射分布函数

为了提高对空中目标仿真的真实感, 传统的将目标看作朗伯体计算漫反射的方法已经不能满足需要, 所以引入双向反射分布函数来计算目标表面对外界辐射的反射辐射. 双向反射分布函数 (BRDF)

最早是由美国学者 Nicodemus 提出的^[7], 是关于入射角、反射角和波长的函数, 单位是 sr^{-1} . 可以比较精确地反映不同入射角与观测角度、不同波长、不同表面粗糙度的目标表面的反射特征^[6]. 其模型如图 4 所示:

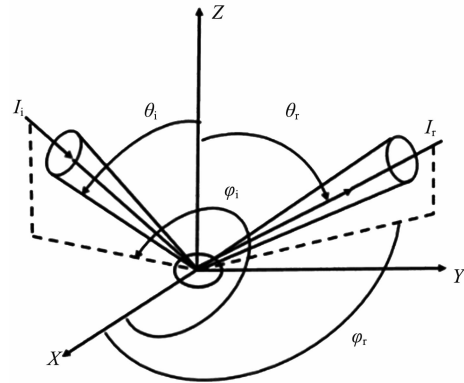


图 4 双向反射分布函数几何定义

Fig. 4 Geometry definition of the Bidirectional Reflectance Distance Function

BRDF 定义当一束光均匀投射到足够大的均匀且各项同性的材料表面上, 材料表面的反射辐亮度与入射辐照度的比值, 其数学表达式为:

$$f_i(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad , \quad (9)$$

式中, θ_i, φ_i 表示入射天顶角和方位角; θ_r, φ_r 表示出射光的天顶角和方位角; λ 为波长; dL 表示面元对经光源照射后在 (θ_r, φ_r) 方向上的辐亮度, 单位为 $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$; dE 是 (θ_i, φ_i) 方向上入射光产生的表面辐照度, 单位为: $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$.

Cook-Torrance 模型是在 Torrance-Sparrow 模型的基础上提出的更具有光照真实感的计算模型^[8], 其镜面反射率是波长的函数, 弥补了 Torrance-Sparrow 模型不能区分不同材质的目标和不同属性光源的不足. 它指出只有朝向视线方向和反射方向的中线方向的微平面对表面反射项有贡献, 简化了模型并且提高计算的速度, 适用于实时仿真. 所以本文选择 Cook-Torrance 模型来描述目标表面的反射特性.

Cook-Torrance 模型的几何模型如图 5 所示:

其中, \mathbf{N} 为微平面的法线方向; \mathbf{L} 为入射光的方向向量; \mathbf{V} 为观察方向向量; \mathbf{H} 为入射方向 \mathbf{L} 和观察方向 \mathbf{V} 的半角方向向量.

Cook-Torrance 光照模型的镜面反射公式如下:

$$R_s = \frac{\mathbf{F}}{\pi} \frac{\mathbf{DG}}{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})} \quad , \quad (10)$$

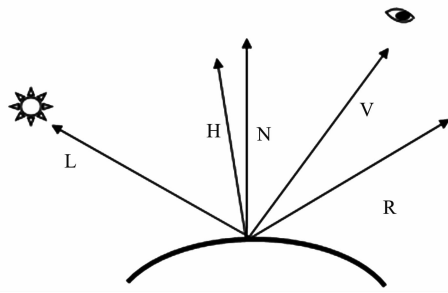


图5 Cook-Torrance 几何模型

Fig. 5 Geometry model for the Cook-Torrance model

其中, F 为菲涅尔反射率, 取决于表面材料的性质:

$$F = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\phi - \theta)}{\sin^2(\phi + \theta)} + \frac{\tan^2(\phi - \theta)}{\tan^2(\phi + \theta)} \right], \quad (11)$$

其中, $\phi = \arccos(\mathbf{L} \cdot \mathbf{H})$ 为入射角, θ 为折射角

在实时 3D 图形学中常用近似计算, 即:

$$F = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \right] (1 - \cos\theta)^5, \quad (12)$$

n_1 和 n_2 是两种介质的折射率, $\cos\theta = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$.

D 为微平面法线分布函数, 通常为高斯分布:

$$D = \frac{1}{\pi m^2 \cos^4(\alpha)} \cdot \exp\left(\frac{(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^2 - 1}{m^2 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^2} \right), \quad (13)$$

m 反映表面材质的粗糙度.

G 为几何衰减因子, 主要考虑微面元之间的遮挡使部分光线不能反射出去而引起的镜面反射分量的衰减:

$$G = \min\left(1, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}\right). \quad (14)$$

1.3.2 反射辐射计算

根据 BRDF 的定义, 面元的反射辐射亮度 ($\text{w}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$) 为:

$$\begin{aligned} dL(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) &= f_i(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot dE(\theta_i, \varphi_i, \lambda) \\ &= R_s \cdot E_s(\lambda) \cdot \cos(\theta_i), \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $E_s(\lambda)$ 为环境光的光谱辐照度, $\text{w}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$; θ_i 为环境光与面元法线的夹角, rad; R_s 为面元的 Cook-Torrance (双向反射分布函数的一种) 值, sr^{-1} .

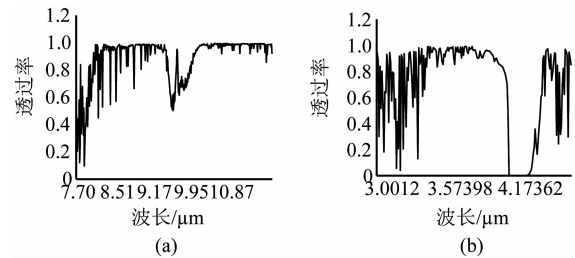
将目标视为灰体, 在探测器响应波段某方向的辐亮度为:

$$L = \frac{W_{\lambda_1 - \lambda_2}}{\pi} + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dL. \quad (16)$$

1.4 红外辐射的大气衰减

大气中的光电成像设备接收的目标红外辐射是

经过大气衰减后的红外辐射量, 其中大气衰减主要来自大气中某些气体分子的吸收和大气分子的散射. 利用软件 MODTRAN 对大气透过率进行分析, 采用中纬度夏季的大气模型, 能见度为 50 km 的城市气溶胶模型, 红外探测器响应波段分别为 (3 ~ 5 μm) 和 (7.7 ~ 11.9 μm). 图 6 分别给出响应波段的大气透过率.

图6 大气透过率 at (a) 3 ~ 5 μm , (b) 7.7 ~ 11.9 μm Fig. 6 Atmospheric transmittance at (a) 3 ~ 5 μm , (b) 7.7 ~ 11.9 μm

1.5 量化

目标在探测器光敏元上的成像是其红外辐射量经过大气衰减、光学相机的光学和电学衰减后, 表现为探测器输出端电压信号 V_s , 并对输出电压进行量化的过程.

$$V_s = P \cdot A_d \cdot J, \quad (17)$$

其中, P 是探测器的灵敏度; A_d 是探测器光敏元的面积; J 是空间目标经过大气衰减和光学、电学衰减后入射在探测器光敏元上的辐射照度.

$$J = \frac{L \cdot \text{opttran} \cdot (D/2)^2}{f^2}, \quad (18)$$

其中, L 是入射在光学系统上的辐射能量; opttran 是相机光学系统的光学透过率; D 是光学系统的口径; f 是有效焦距.

探测器输出电压量化为图像灰度后, 由图像渲染引擎渲染输出. 电压值对应的图像灰度值为:

$$G = G_{\min} + \frac{(V_s - V_L)(G_{\max} - G_{\min})}{V_H - V_L}, \quad (19)$$

其中, $G_{\min} \sim G_{\max}$ 为对应的灰度量级, 输出电压的上限为 V_H , 下限为 V_L .

1.6 几何建模

使用 3D MAX 建立目标的三维几何模型, 设置目标的质心为坐标原点, 原点指向机头方向为 Ox 轴, 原点指向右机翼且垂直于 Ox 轴的方向为 Oy 轴, Oz 轴垂直于 XY 平面且方向向下, 飞机目标坐标系及其与地面坐标系的关系如图 7 所示:

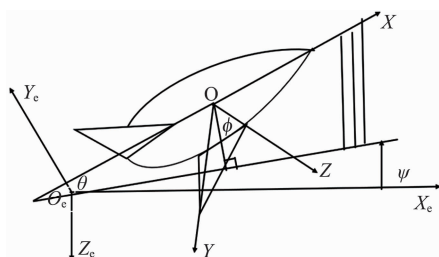


图7 飞机目标运动姿态
Fig.7 The aircraft's flight attitude

图中 O_e 是地面坐标系的原点, X_e, Y_e, Z_e 为地面坐标系的坐标轴, θ 为目标的俯仰角, ϕ 为目标的横滚角, ψ 为目标的偏航角.

由于目标相对于地面坐标系有一定的姿态角, 所以要将目标的顶点坐标根据特定的姿态角和位置信息变换到与相机同在地面坐标系中, 以实现目标的投影变换. 设置目标坐标系中的顶点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 对应的地面坐标系中的顶点坐标为 (x_{ei}, y_{ei}, z_{ei}) , 目标的原点在地面坐标系中的位置为 (X_0, Y_0, Z_0) , 变换过程如下:

$$\begin{bmatrix} x_{ei} \\ y_{ei} \\ z_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_q + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中, \mathbf{M}_q 是俯仰角、偏航角和横滚角的旋转矩阵.

2 仿真分析

以 F-18 战斗机模型为例, 进行空中目标红外成像仿真. 由于座舱盖多采用高强度有机玻璃, 不会与内热源产生热传导, 并且其表面发射率大于 $0.9^{[9]}$, 比蒙皮的表面辐射率大, 所以将目标分为座舱盖、尾喷口和蒙皮三个部分分别计算表面温度和红外辐射. 使用 Cook-Torrance 双向反射分布函数模型计算目标表面面元对背景辐射的反射辐射.

2.1 仿真场景与参数

(1) 目标参数

a. 飞行参数

飞行高度: 15 km

飞行速度: 1.2 Ma

b. 物性参数

目标的物性参数如表 1 所示:

表 1 目标物性参数

Table 1 Target property parameters

参数	粗糙度	反射率
座舱盖	0.8	0.95
蒙皮、尾喷口	0.8	0.8

(2) 探测器参数

探测器的主要参数如表 2 所示.

表 2 探测器参数

Table 2 Detector parameters

像元数	焦距/mm	响应波段/ μm
320 * 256	250	3 ~ 5 (7.7 ~ 11.9)

2.2 仿真结果

根据目标的飞行条件和位置信息计算目标的表面温度场, 结合不同的表面发射率计算表面辐射, 使用 Cook-Torrance 模型计算反射辐射, 二者结合得到探测器表面的辐照度. 利用此方法可以获得不同角度、不同状态下的目标红外辐射图像. 在给定目标参数的条件下, 目标的自发辐射能量和加入目标对环境辐射的反射能量经过大气衰减后的辐射量表 3 所示.

表 3 目标的红外辐射量(单位: $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Table 3 Target property parameters (units: $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

波段	3 ~ 5 μm	7.7 ~ 11.9 μm
自发辐射	1.22×10^{-4}	6.05×10^{-3}
加入环境反射	8.25×10^{-3}	1.64×10^{-2}

图 8 和图 9 分别为中波和长波下不同角度、不同波段的目标红外图像. 图 8 (a-c) 为中波段 3 ~ 5 μm 的正上方、侧方和正后方目标的红外辐射图像; 图 8 (d-f) 为中波段 3 ~ 5 μm 加入使用 Cook-Torrance 双向反射分布函数计算的目标对背景反射辐射的红外辐射图像.

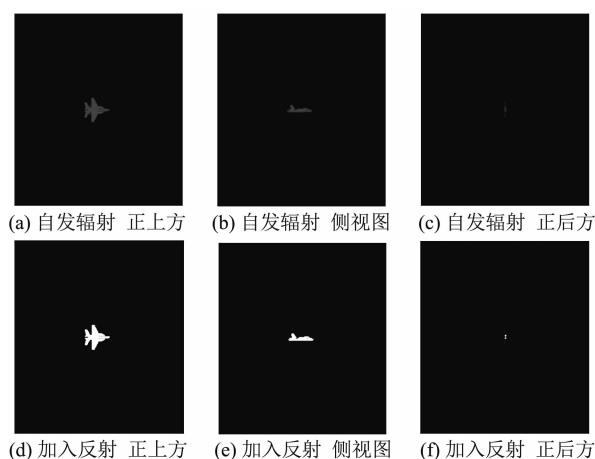


图 8 3 ~ 5 μm 目标的红外辐射图像

Fig. 8 Infrared radiation image of the target between 3 ~ 5 μm

图 9 (a-c) 为长波段 7.7 ~ 11.9 μm 的正上方、侧方和正后方目标的红外辐射图像; 图 9 (d-f) 所示

为中波段 $7.7 \sim 11.9 \mu\text{m}$ 中加入使用 Cook-Torrance 双向反射分布函数计算的目标对背景反射辐射的红外辐射图像。

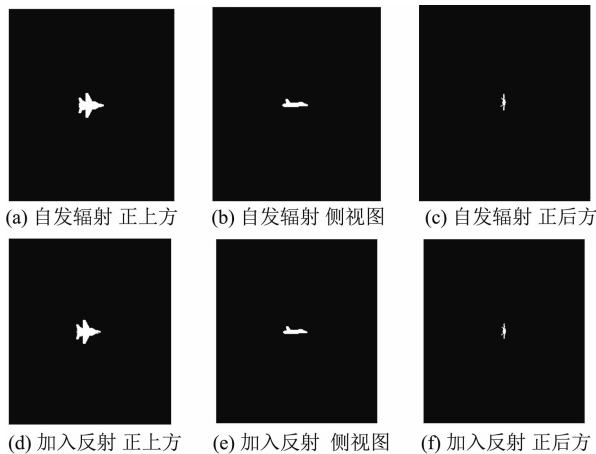


图9 $7.7 \sim 11.9 \mu\text{m}$ 目标的红外辐射图像

Fig.9 Infrared radiation image of the target between $7.7 \sim 11.9 \mu\text{m}$

对比图 8 只有自发辐射的图(a-c)和加入反射辐射的图(d-f),尤其是图(c)和(d)正后方的红外辐射图像,可以看出加入目标的反射辐射后,目标红外辐射图像的灰度值变大,轮廓变得明显,有利于对目标的探测.对比图 8 或图 9 不同角度的图片,可以看出,改变目标的探测角度,得到的目标红外图像差别很大,尤其是对正后方的探测,如不考虑尾焰,只有尾喷管的轮廓比较明显.对比图 8 和图 9 的(a-c)和(d-f),可以看出加入对背景(此处指太阳辐射)的反射辐射对中波的影响远远大于对于长波的影响,证实了太阳在中短波的辐射量远远大于长波的辐射量.

3 结论

对空中目标的红外成像建模与仿真方法进行了研究,仿真获得了不同探测角度下目标的红外自发辐射的红外辐射图像和加入反射辐射的红外辐射图

像,得出了加入反射辐射对目标探测的重要性.多角度、多波段的仿真结果充分验证了方法的有效性.对空中目标进行红外成像仿真可以为探测器参数的设计和探测系统的性能评估提供了参考依据,为图像处理算法的研究提供数据源.

References

- [1] LIN Liang-Kui, XIE Kai, XU Hui, *et al.* Research on infrared imaging simulation of midcourse ballistic object target complex[J]. *J. Infrared Millim Waves* (林两魁,谢恺,徐晖,等.中段弹道目标群的红外成像仿真研究. *红外与毫米波学报*),2009,28(3):218-223.
- [2] ZOU Tao, TONG Zhong-Xiang, WANG Chao-Zhe, *et al.* Research on infrared image simulation of air targets based on tactic fusion[J]. *Laser & Infrared* (邹涛,童中翔,王超哲,等.基于战技融合的空中目标红外图像仿真研究. *激光与红外*),2016,46(4):444-451.
- [3] WANG Biao, TONG Zhong-Xiang, WANG Chao-Zhe, *et al.* Simulation of imaging for Airplane[J]. *Laser & Infrared* (王彪,童中翔,王超哲,等.飞机的红外图像仿真. *激光与红外*),2015,45(8):911-917.
- [4] RUAN Ri-Quan. Research on the simulation of infrared multi-bands for the aerial target scene[D]. Xian: Xidian University(软日权.空中目标场景红外多波段仿真研究)2013.
- [5] ZHANG Wei, WANG Hong-Yuan, WANG Zhi-Le, *et al.* Research on modeling method of visible light scattering characteristics of space objects[J]. *Acta Photonica Sinica* (张伟,汪洪源,王治乐,等.空间目标可见光散射特性建模方法研究. *光子学报*),2008,37(12):2462-2467.
- [6] WANG Hong-Yuan, CHEN Yun. Modeling and simulation of space target infrared dynamic radiation characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering* (汪洪源,陈贇.天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真. *红外与激光工程*),2016,45(5):0504002-1-0504002-7.
- [7] Nicodemus F E. Reflectance, nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6):1474-5.
- [8] Cook R L, Lucasfilm Ltd., Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Transaction on Graphics*, 1982,1(1):7-24.
- [9] LI Hui-ping. Modeling and simulation of dynamic infrared target and background [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences(李惠萍.动态红外目标、背景的建模与仿真)2008.