文章编号：1672-8785(2018)05-0037-05

小目标态势下旋翼飞机红外辐射特性表征及其反演方法

王　冰　高　穹　张岩岫　曲卫东

（中国洛阳电子装备试验中心，河南 洛阳　471003）

摘　要：目标红外辐射特性的研究对红外探测距离的预测和评估具有重要的意义。分析了基于红外图像的面目标红外辐射特性反演方法用于反演点目标特性时的局限和不足。通过对红外图像上点目标的提取，结合辐射基本理论，推导了目标辐射亮度、像元数和目标整体辐射强度之间的关系，提出了一种针对小目标态势下旋翼飞机的红外辐射特性反演算法，并利用该算法对某型旋翼飞机的红外辐射强度进行了反演计算，得到了不同观测角度下 3～5 μm 波段红外辐射强度分布。结果表明，该方法可以实现远距离小目标红外辐射强度的反演，对于红外侦察系统的作用距离评估具有一定的意义。

关键词：红外辐射特性；点目标；红外图像；反演

中图分类号：TN95　**文献标志码：**A　**DOI：**10.3969/j.issn.1672-8785.2018.05.007

Characterization and Inversion Method of Infrared Radiation Properties of Helicopter in Point Source Detection

WANG Bing, GAO Qiong, ZHANG Yan-xiu, QU Wei-dong

(*Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China*)

Abstract: The study of infrared radiation properties of military targets is important for the evaluation of IR detection range. The limitation and defect of the IR property inversion method based on infrared images when it is used to inverse the properties of point targets are analyzed. According to the principle of radiation measurement, the mathematical relationships among the radiance, pixel grey value and radiation intensity are deduced by extracting the point target in an IR image. A new algorithm for inversing the IR radiation properties of a helicopter in point target detection is proposed and is used to inverse the infrared radiation intensity of a certain military helicopter. The radiation intensity distribution of the helicopter at different observational angles in the waveband of 3 to 5 μm is calculated. The results show that the algorithm can implement the inversion of IR radiation properties of small targets in far distance. It is of significance to the evaluation of infrared radiation detection range of IR reconnaissance systems.

Key words: infrared radiation property; point target; infrared image; inversion

收稿日期：2018-03-21

作者简介：王冰(1981–)，男，河南孟州人，工程师，硕士，长期从事光电对抗测试评估技术方面的研究。E-mail: wangbingly@163.com

0 引言

目标红外辐射特性数据是红外探测系统提高探测/识别/跟踪精度的基础数据，能够为目标的识别、辨认和确定提供红外辐射特征库，为目标和背景的红外仿真提供红外辐射特性模型[1]。旋翼飞机作为现代兵器的一种重要武器系统，经常通过超低空或贴地飞行，以躲避地面雷达探测，对地面重要目标进行突袭进攻，其主要威胁来自于红外制导武器。因此，开展旋翼飞机的红外辐射特性分析和测量显得尤为重要，尤其是小目标态势下旋翼飞机的红外辐射强度是影响红外制导武器对其探测、跟踪的重要指标，对红外侦察装备作用距离评估具有重要价值[2~4]，因此研究小目标态势下旋翼飞机的红外辐射特性显得很有必要。

近年来，有关军用目标的红外辐射特性研究成果很多[5~9]，其中文献[5]通过红外图像的分析，得到了固定翼飞机的红外辐射亮度和温度分布情况；文献[6]、[7]、[8]等通过仿真计算不同状态、不同波段的飞机红外辐射，得到了点源目标辐射随方向、速度、高度、发动机状态的变化规律。本文针对远距离小目标的成像机理，分析了基于红外图像的面目标红外辐射特性反演理论存在的局限和不足；结合辐射基本理论，推导了目标辐射亮度、像元数和目标的整体辐射强度之间的关系；提出了一种针对小目标态势下旋翼飞机的红外辐射特性反演算法，并利用该算法对某型旋翼飞机不同观测角度下的红外辐射强度进行了反演计算。结果表明，本文方法可以实现对远距离小目标态势下旋翼飞机的红外辐射强度反演。

1 红外辐射特性反演的基本原理和局限性

红外图像与目标红外辐射特性、大气辐射传输特性之间存在复杂的数学关系。通过对红外图像的分析研究，可以获取目标与其所处环境的红外辐射特征，对红外图像进行解析，从而反演出图像所蕴涵的目标红外辐射特性。目前，红外目标辐射测量模型一般可表示为[5]

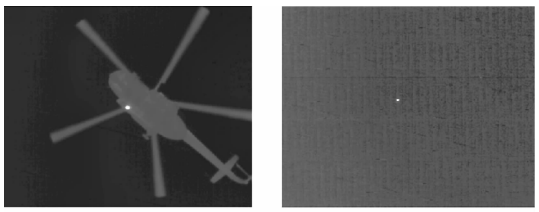
$$DN=\alpha(\tau_a L_t+L_{path})+DN_0 \tag{1}$$

式中，DN 为目标在红外探测系统中对应的灰度值，τ_a 和 L_{path} 为大气透过率和大气程辐射亮度；L_t 为目标的辐射亮度；α 和 DN_0 为系统辐射亮度响应度和灰度偏移值[5]。

由式(1)可得到目标的辐射亮度 L_t：

$$L_t=\frac{1}{\tau_a}\left(\frac{DN-DN_0}{\alpha}-L_{path}\right) \tag{2}$$

如果已知目标的发射率，可以进一步得到目标温度分布。该方法通常针对面目标的红外热图像进行反演，如图 1(a)所示，可以计算出每一像素对应的目标部位的辐射亮度和温度，从而得到目标的红外辐射亮度和温度分布特征。



(a)面目标 (b)点目标

图 1 相同目标在不同距离处的成像结果

但是，在小目标态势下，目标相对于红外探测系统比较远，在探测系统上所成的像很小，一般为 1 个或几个像素。目标不同部位不同温度的红外辐射叠加在探测系统的几个光敏面上，从红外图像上无法分辨目标的外形，如图 1(b)所示。其次，点目标通过光学系统成像时，由于光学系统的衍射效应，成像点会弥散，目标成像会比理想成像大一些。此时，通过面目标辐射模型计算得到的目标辐射亮度与实际辐射亮度之间存在较大的误差，计算得到的目标表面温度分布也不能反映目标的真实红外特性。另外，对于红外点源制导导引头来说，目标红外辐射强度更能够反映目标的红外辐射特性。因此，以面目标为反演对象得到的目标表面红外辐射亮度及温度分布特性并不适于表征点目标的红外辐射特性。

2 小目标态势下红外辐射特性反演方法

2.1 远距离小目标红外辐射特性分析

小目标态势下，目标距离探测系统很远，不能充满探测器视场，目标和传输路径上的大气程辐射同时作用在探测器像面上。

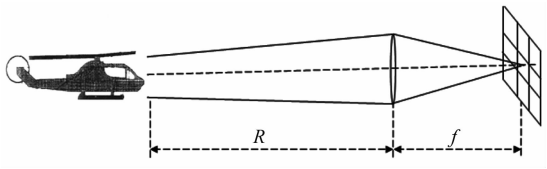


图 2 目标成像的原理图

假设目标在像面上成像为 n 个像元，则目标到达探测系统入瞳处的辐射通量 Φ_t 与大气程辐射通量 Φ_b 之和与像面接收的 n 个像元的总辐射通量 Φ 是相等的，即：

$$\Phi=\Phi_t+\Phi_b \tag{3}$$

设像面上单个像元接收到的目标辐射亮度为 L_i，像元面积为 A_s，像元个数为 n，探测系统焦距为 f，那么像面接收到的总辐射通量为

$$\Phi=\frac{\pi D^2}{4f^2}\sum_{i=1}^{n}(A_s L_i) \tag{4}$$

远方袭来的飞机对红外探测系统来说是小目标，但这是相对于探测系统的接收角而言的，并不是数学上的点。实际上它由辐射亮度不同的多个面元组成。假设目标的平均辐射亮度为 L_t，大气程辐射亮度为 L_{path}，那么目标和路径大气到达探测系统入瞳处的辐射通量分别为

$$\Phi_t=\frac{\pi D^2}{4R^2}\tau_a I_t \tag{5}$$

$$\Phi_b=\frac{\pi D^2}{4f^2}\mathrm{nA}_s L_{\text{path}} \tag{6}$$

式中，$I_t=L_t A_t$ 为目标的总体辐射强度，R 为探测距离，D 为入瞳直径，τ_a 为大气透过率，A_t 为目标的有效辐射面积。

将式(4)、(5)和(6)代入式(3)，整理后得到：

$$I_t=\frac{n}{\tau_a}\frac{R^2}{f^2}A_s\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}L_i-L_{path}\right) \tag{7}$$

因此，辐射亮度不均匀分布的面目标在红外探测系统上成像后，可以被看成一个平均辐射亮度为 L_t、有效辐射面积为 A_t、总体辐射强度为 I_t 的点目标。

2.2　反演实现过程

从式(7)可以看出，在探测系统参数、探测距离、气象条件等已知的情况下，若要从红外图像中反演得到目标的总体辐射强度，首先需要得到像面上单个像元接收到的辐射亮度信息。

若目标在探测系统上成像的像元数为 n，每个像元的成像灰度值为 DN_{i}，那么每个像元接收到的目标辐射亮度为

$$L_i=\frac{1}{\alpha}(DN_{\text{i}}-DN_0) \tag{8}$$

式中，α 和 DN_0 分别为系统辐射亮度响应度和灰度偏移值。

将式(8)代入式(7)，得到目标的总体辐射强度：

$$I_t=\frac{1}{\alpha}\frac{n}{\tau_a}\frac{R^2}{f^2}A_s\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(DN_i-DN_0)-\alpha L_{path}\right] \tag{9}$$

若已知目标的有效辐射面积 A_t，那么目标的平均辐射亮度可以表示为

$$L_t=\frac{I_t}{A_t}=\frac{1}{\alpha}\frac{n}{\tau_a}\frac{R^2}{f^2}\frac{A_s}{A_t}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(DN_i-DN_0)-\alpha L_{path}\right] \tag{10}$$

总的来说，小目标红外辐射特性的反演分为以下几个步骤：

(1)通过辐射定标得到系统辐射亮度响应系数 α 和系统灰度偏移值 DN_0；

(2)从目标的红外热图像中提取目标像对应的像元个数 n 和灰度值 DN_{i}；

(3)利用大气辐射传输软件计算传输路径的大气光谱透过率 τ_{a} 和大气程辐射亮度 L_{path}；

(4) 利用式(9)和(10)反演得到用于表征点目标红外辐射特性的总体辐射强度和平均辐射亮度。

2.3　需要解决的两个问题

在算法实现过程中，主要需要解决两个问题，一是系统的辐射定标，二是目标像的提取。

(1)辐射定标

红外辐射定标主要用黑体进行。根据黑体的温度，计算红外探测系统入瞳处接收到的辐射亮度。通过改变黑体温度，测量不同辐射亮度 L 下测量系统的输出灰度值，建立测量系统

与入射辐射亮度之间的函数关系：

$$DN=\alpha L+DN_0 \tag{11}$$

(2)目标提取

反演过程要利用目标成像的像元个数和对应的灰度值，因此目标像的提取是影响点目标红外辐射反演的重要因素之一。

当目标距离较远时，目标所成的像所占的像素很少，目标提取要考虑成像弥散的问题。本文通过在图像上选取一个包含点目标和背景的小区域，采用灰度阈值分割算法对目标区域进行判定，获取目标对应的像素点。

3 基于实测数据的红外辐射强度反演

3.1 系统辐射定标

系统辐射定标结果如图 3 所示。其中横坐标为辐射亮度，纵坐标为红外探测系统输出的灰度值。

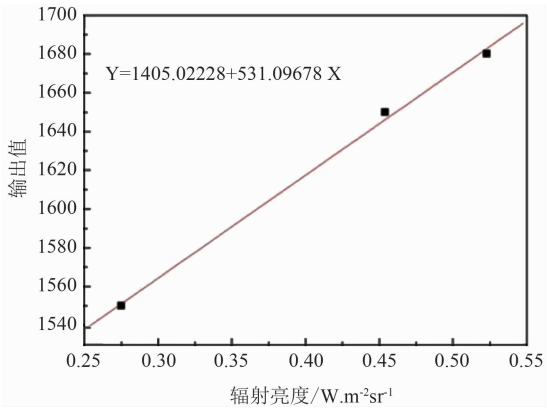


图 3 红外探测系统的辐射定标

对辐射定标结果进行线性拟合，得到红外探测系统的辐射亮度响应关系为

$$DN=531\times L+1405 \tag{12}$$

3.2 反演结果分析

图 4 是某时刻拍摄的某型旋翼飞机的 3～5 μm 波段红外图像，像素为 320×256，目标飞行高度为 2.0 km，距离为 22.5 km。

将拍摄图 4 图像的试验条件输入 Lowtran7，可得到辐射传输路径上 3～5 μm 红外波段的背景光谱辐射亮度和大气透过率，如图 5 和图 6 所示。

图 7 和图 8 为目标在观测角度 0～90°范围

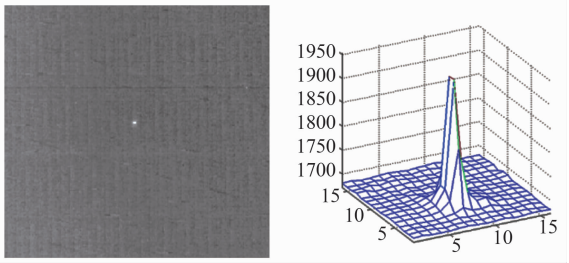


图 4 点目标的红外热图及其灰度分布

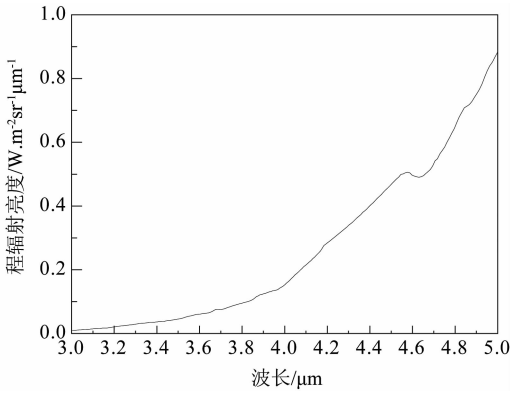


图 5 3～5 μm 波段的背景光谱辐射亮度

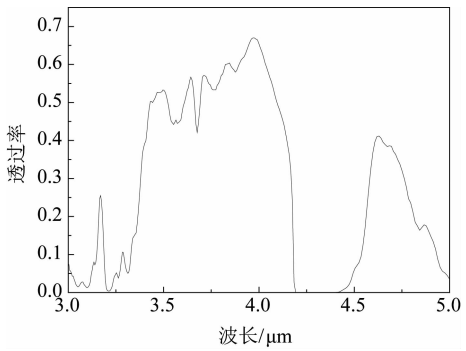


图 6 3～5 μm 波段的大气透过率

内 3～5 μm 波段的平均辐射亮度分布和总体辐射强度分布曲线。从反演结果可以看出，无论是平均辐射亮度还是总体辐射强度，均具有很强的方向性，其数值与观测角度有很大关系。迎头方向辐射最小，机体腹部的辐射最强。在 0～20°范围内俯仰角度较小时，目标平均辐射亮度和总体辐射强度变化较小，红外辐射主要来自迎头正面蒙皮的辐射；随着观测角度的增大，平均辐射亮度和总体辐射强度大体呈上升的趋势，其红外辐射主要来自机身发动机和排气系统的高温辐射；其中，在俯仰角 30°和 60°附近有个辐射极小值，原因可能是因为在俯仰

角 30°和 60°附近目标本身对其红外辐射的遮挡。

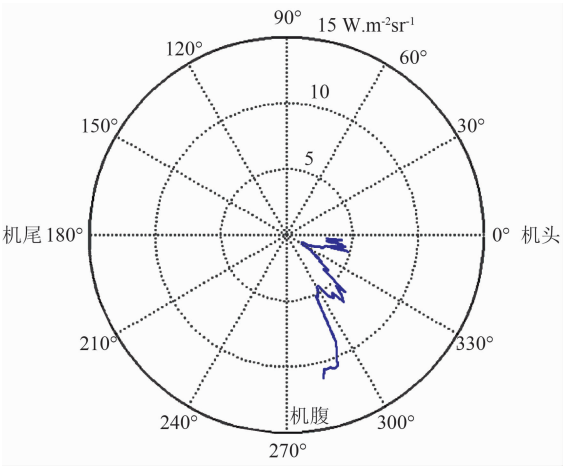


图 7 不同观测角下的平均辐射亮度

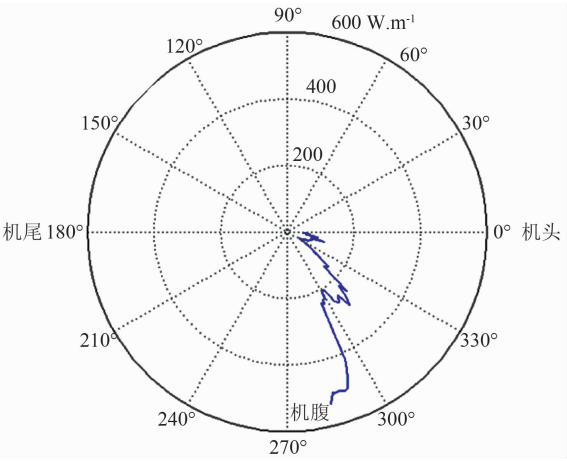


图 8 不同观测角下的总体辐射强度

3.3 误差原因分析

从反演方法上来看，误差主要来自两个方面：

(1)Lowtran7 计算误差

测量过程中的大气透过率和大气程辐射需通过 Lowtran7 计算获取，尽管 Lowtran7 考虑的因素已经很详细周到，但由于计算时选用的大气模式与实际测量时大气条件之间存在差异，导致计算结果有一定的误差。

(2)目标提取误差

目标像提取得过大或过小，都会影响最终目标像的像素数和对应的灰度值，导致目标的总体辐射强度与真实值产生偏差。

4 结束语

目标红外辐射特性反演研究是目前红外辐射特性的研究热点之一，从红外图像反演目标的红外特性是目标红外辐射特性研究的一个基本途径。本文结合黑体辐射基本理论，推导了目标辐射亮度、像元数和目标的整体辐射强度之间的关系；提出了一种以总体辐射强度和平均辐射亮度表征的点目标红外辐射特性反演方法；通过用该方法对某型旋翼飞机 3～5 μm 波段红外辐射特性数据进行反演计算，得到了不同观测角度下 3～5 μm 波段的红外辐射强度分布。该方法可以实现对远距离小目标红外辐射特性的反演，对红外侦察系统设计和作用距离评估具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 曹立华，万春明，张云峰，等.点目标的红外辐射特性测量方法[J]. **红外与毫米波学报**，2015，**34**(4):460-464.

[2] 张敬贤，李玉丹，金伟其. **微光与红外成像技术**[M]. 北京：北京理工大学出版社，1995：251-258.

[3] 牟达，王建立，陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对武装直升机作用距离的分析[J]. **兵工学报**，2008，**29**(3)：313-317.

[4] 成声月，刘朝辉，邓智平，等.军用目标红外辐射特征研究进展[J]. **红外技术**，2014，**36**(7):577-581.

[5] 王东，赵威，邵铭，等. 固定翼飞机地面红外辐射特性测量与分析[J]. **红外技术**，2015，**37**(6):519-522.

[6] 柴世杰，童中翔，李建勋，等. 典型飞机红外辐射特性及探测仿真研究[J]. **火力与指挥控制**，2014，**39**(8)：26-33.

[7] 王超哲，童中翔，李建勋，等.战斗机红外点源目标特性计算方法[J]. **红外技术**，2012，**34**(11):666-671.

[8] 赵永，姚连钰，李松维. 直升机红外辐射的理论计算[J]. **飞机设计**，2010，**30**(5):36-38.

[9] 赵楠，李晓霞，马森，等. 来袭飞机的红外辐射及其大气传输特性研究[J]. **激光与红外**，2012，**42**(8)：890-893.