



大疆无人机目标红外辐射特性测量及温度反演

陈超帅^{1,2,3*}, 王世勇^{1,3}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083



摘要: 随着无人机技术在各个领域崭露头角, 无人机目标在红外波段的辐射特性成为人们非常关注的问题。本文首先对中、长波红外探测器进行辐射定标, 针对飞行中的无人机目标的辐射特性进行测量, 对飞行状态下的无人机目标的温度进行了反演, 分别采用了单波段、双波段比色法、基于黑体校正的双波段法进行探测, 结合实测数据对上述各种方法进行了分析对比, 对测量结果进行了精度分析并给出误差源。结果表明, 实验中的无人机中波辐射强度约为 0.04 W/sr、长波辐射强度在 0.5 W/sr 左右, 采用基于黑体校正的双波段测量方法能极大提高无人机目标温度反演的精度。反演温度的绝对误差降低至 2 K, 相对误差仅为 0.5% 左右。

关键词: 无人机; 辐射亮度; 辐射特性; 温度反演

中图分类号: TP732.2

文献标志码: A

Infrared radiation characteristics measurement and temperature retrieval based on DJI unmanned aerial vehicle

Chaoshuai Chen^{1,2,3*} and Shiyong Wang^{1,3}

¹Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract: With the initial applications of unmanned aerial vehicle technology in various fields, the infrared (IR) radiation characteristic of the UAV becomes an issue of mutual concern. In this experiment, the radiometric calibration of middle wave and long wave infrared detectors has been done firstly. The radiation characteristics of the UAV are measured while flying, and the temperature of UAV target is inverted by using single-band method, dual-band colorimetric method and dual-band method based on black-body calibration. Combined with the real measured data, the above methods are analyzed and compared. The measurement precision is analyzed and error source is given. The results show that radiation intensity of UAV is about 0.04 W/sr in middle IR wave, and 0.5 W/sr in long IR wave. Dual-band method based on black-body calibration can improve the precision of UAV temperature inversion greatly, the absolute error of temperature retrieval reduces to 2 K, and relative error is about 0.5%.

Keywords: unmanned aerial vehicle; radiance; radiation characteristics; temperature retrieval

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.007

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(4): 427-434

收稿日期: 2016-10-17; 收到修改稿日期: 2016-12-31

*E-mail: chencs_1991@126.com

1 引言

红外目标辐射特性测量是获取目标特性,对目标进行识别的重要手段之一,无人机体积小,造价低,在工业中发挥着越来越重要的作用,提高对无人机的监测能力有着重要的实际价值。温度是反映物体固有特性的重要参数,温度测量与控制国防技术中十分重要,并且高温测量在航天、材料、能源、冶金等领域都具有极其重要的作用。在自然界中,当物体的温度高于绝对零度时,由于内部热运动的存在,会不断地向四周辐射电磁波,其中就包含了波段位于 $0.75 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 的红外线,因此通过目标红外辐射特性可以反演温度。目标的辐射测量以及温度反演的流程主要包含了三个步骤:红外探测系统的辐射定标、目标探测、目标辐射与温度反演。由于目标处于大气环境之中,当对目标进行辐射测量的时候,大气中的分子和气溶胶粒子也会对目标辐射产生吸收和散射,大气自身的辐射也会进入到探测系统中。在获得目标辐射信号的同时,也需要获得目标与探测系统之间的大气透过率和路径辐射信息,以便在目标辐射以及温度反演过程中对目标数据进行大气修正。曹立华等人对点目标的辐射特性进行了研究^[1],徐顶国等人研究了复杂背景下无人机的辐射特性^[2],李云红等人建立了红外热像仪外场远距离测温的定标模型^[3],杨词银等人对目标红外辐射测量方法做了研究^[4]。但是,针对目标的红外辐射温度反演的精度分析相对较少。Michael Teuts 对军用无人机的红外辐射来源做了详细分析^[5]。国外对直升机、喷气式飞机、导弹等军用飞行器红外辐射特性的研究已比较成熟。北约组织联合开发了空中目标红外辐射模型 NIRATAM 软件^[6]。美国洛克希德·马丁公司研制了光谱影像红外辐射特征 SIMIR 软件,可以对舰船、直升机等复杂目标进行红外系统特征信号预估^[7],但对于新兴的工业级和消费级无人机的研究较少。以上理论和成果均可以在无人机红外辐射特性的研究上借鉴使用。

本文在前人的研究基础上,为了进行无人机辐射特性测量以及温度反演,首先根据红外辐射测量原理,对双波段红外探测系统进行实验室辐射定标,探讨了采用单波段、双波段比色法以及改进双波段测量方法对目标无人机进行测量,对比不同方法下的无人机辐射强度、辐射亮度、反演温度,分析不同方法下的计算结果并且进行了温度反演的精度分析。

2 辐射定标

在利用红外光电探测器进行目标温度反演之前,需要利用标准辐射源对输出进行辐射定标。辐射定标是在红外光电探测系统的光学入瞳辐射量和显示灰度输出之间建立相应的响应关系,基本原理是采用已知辐射输出的红外辐射照明源对准需要定标的红外光电探测系统,根据不同辐射下的输出信号,建立系统的光学入瞳辐射量与探测器显示输出之间的定量关系,获得红外探测器的响应度。

在红外系统线性响应范围内,系统的输入辐射量和输出灰度值之间满足:

$$D_o = \alpha L(T) + D_{\text{dark}}, \quad (1)$$

式中: D_o 代表红外探测系统的灰度输出值(无量纲单位), D_{dark} 主要为探测器暗电流引起的固定偏置, α 为红外探测系统的响应度(单位为 $(\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2)^{-1}$), $L(T)$ 为探测系统光学入瞳出的辐射亮度(单位为 $\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$)^[12]。

本文对双波段红外探测系统进行实验室辐射定标,选用 320×256 红外焦平面探测器。中波探测器工作波段 $3.7 \mu\text{m} \sim 4.8 \mu\text{m}$, 长波探测器工作波段 $7.7 \mu\text{m} \sim 9.3 \mu\text{m}$ 。采用以色列 CI 系统公司的 SR800R 12D_ET 面源黑体对探测系统进行辐射定标。黑体的参数如下:辐射面积 $357 \text{mm} \times 415 \text{mm}$, 发射率 $\varepsilon = 99\%$, 温度范围 $5^\circ \sim 125^\circ$ 。

实验室辐射亮度定标过程:为了减小大气衰减和大气路径辐射的影响,需要将高精度大面源黑体放置于红外探测器光学系统的入瞳前,覆盖系统入瞳以及整个视场。红外探测器对准黑体中心测量对应不同温度下的灰度输出值 $DN_1, DN_2, DN_3, \dots, DN_n$, 利用普朗克公式计算出不同温度下的黑体辐射亮度,然后利用式(1)对不同的 $(DN_n, L_n(T))$ 进行最小二乘线性拟合,从而得到系统的辐射亮度响应 α , 实验室辐射定标装置如图 1 所示。



图 1 实验室辐射亮度定标装置。

Fig. 1 Radiance calibration device in lab.

图2给出了中波探测器在积分时间为3 ms下完成的实验室辐射亮度定标结果,对图中的数据进行最小二乘线性拟合,得到中波探测器的辐射亮度与灰度输出的响应关系:

$$D_o = 4840 \times L(T) + 1795. \quad (2)$$

图3给出了长波探测器在积分时间为350 μs下辐射亮度定标结果。

此时的辐射亮度与灰度的响应关系为

$$D_o = 338 \times L(T) + 5623. \quad (3)$$

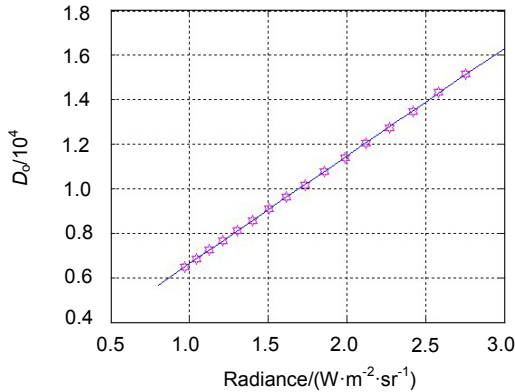


图2 中波红外探测器辐射亮度定标结果.

Fig. 2 Calibration result of middle wave IR detector.

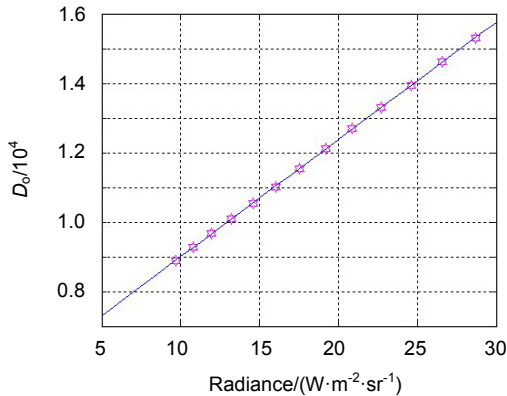


图3 长波红外探测器辐射亮度定标结果.

Fig. 3 Calibration result of long wave IR detector.

3 无人机红外辐射特性测量及温度反演

3.1 单波段测量实验

3.1.1 基本原理

当红外探测系统对被测目标进行探测时,考虑大气衰减以及背景产生的红外辐射,因此在测量系统的线性响应范围内,目标进行辐射测量时的模型如下:

$$D_o = \alpha(\tau L_T + L_{\text{path}}) + D_{\text{dark}}, \quad (4)$$

式中: D_o 为红外探测器所输出的灰度值, D_{dark} 主要为探测器暗电流引起的固定偏置, α 代表红外探测系统的响应度(单位为 $(\text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2)^{-1}$), τ 、 L_{path} 分别是被测目标和红外探测系统之间的大气透过率和大气路径辐射, L_T 为被测目标的辐射亮度^[9]。根据式(4)反演目标的辐射亮度为

$$L_T = \left(\frac{D_o - D_{\text{dark}}}{\alpha} - L_{\text{path}} \right) / \tau. \quad (5)$$

根据辐射亮度计算公式得到:

$$L_T = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda, \quad (6)$$

因此,温度反演方程为

$$\frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda - \left(\frac{D_o - D_{\text{dark}}}{\alpha} - L_{\text{path}} \right) / \tau = 0. \quad (7)$$

采用基于 Matlab 的数值运算,求解式(7)即可得到温度 T 。

3.1.2 理论分析反演结果

反演温度依赖于式(7),对式中每个系数进行分析,可从理论上得出反演温度 T 的精度。

1) 在当前红外成像技术水平下,红外系统输出值的不确定度一般优于 1%,对反演精度影响较小,即 D_o 、 D_{dark} 的不确定度小于 1%。

2) 大气透过率以及路径辐射的不确定度取决于大气参数测量精度和大气传输计算软件的精度,当前技术水平下在 10%~20%左右,即 L_{path} 、 τ 的不确定度在 10%~20%^[10-11]。

3) 在严格控制辐射定标环境的条件情况下,可以将辐射亮度响应度的不确定度控制在 2.2%,即 α 的不确定度在 2.2%^[8]。

4) 估值误差 ε 的不确定度可控制在 10%之内^[9]。

5) 根据 Matlab 数值运算采用默认算法,运算的绝对误差在 10^{-6} 之内,对反演计算精度影响相当小。

采用蒙特卡洛方法来验证仿真实验的温度反演,蒙特卡洛方法通过构造符合上述不确定度的随机数。将产生的随机数带入式(7),通过对 1000 组数据进行处理得到。计算输出反演温度的均值: 319.9 K(目标真实温度 305.5 K),标准差: 4.9 K。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验,输出结果不拒绝为高斯分布。99%的反演结果落在 305.2 K~334.6 K 区间。然而反演温度结果的均值与真实温度存在 14.4 K 的偏差,对反演结果的

影响比较大。

3.1.3 无人机辐射特性测量及温度反演实验

本实验利用大疆创新科技有限公司的 Phantom3 无人机作为模拟目标,根据材质得到其发射率 $\varepsilon = 0.91$ 。实验的大气参数如表 1 所示。

将表 1 中的大气参数输入到 MODTRAN 软件中,由中纬度夏季模型测量得到上述参数下的中波红外探测器与目标之间的大气透过率 $\tau = 0.7725$,大气路径辐射亮度 $L_{\text{path}} = 0.26045 \text{ W/sr}\cdot\text{m}^2$,MODTRAN 软件计算结果如图 4 和图 5 所示。长波红外探测器与目标之间的大气透过率 $\tau = 0.8682$,大气路径辐射亮度 $L_{\text{path}} = 1.5959 \text{ W/sr}\cdot\text{m}^2$,反演结果如表 2。

式(7)是一个超越方程,无法得出一个解析解。采用基于 Matlab 的数值求解,设定两个温度。初始温度

T_1 ,终止温度 T_2 ,使之温度范围足够大,包含目标温度(由于辐射亮度是温度的递增函数,所以方程有唯一解)。将 $T_1 \sim T_2$ 划分为 N 份,在每份上采用二分法,设定阈值 t ,当式(7)左边小于阈值时候,此时的温度 T 就是求解的目标温度。

无人机辐射强度计算跟目标的姿态有关,因实验中的无人机在不同姿态下对探测器的投影面积相当,辐射特性变化都不大,所以表 3 给出了五帧图像中的数据来计算目标辐射强度,辐射强度的计算需要进行目标检测识别,通过计算目标在图像上所占的像素个数来分析计算。

计算目标无人机的辐射强度均值为 0.6113 W/sr ,反演温度的绝对误差在 11 K 左右,相对误差达 4% 。这种方法温度反演存在较大的误差。

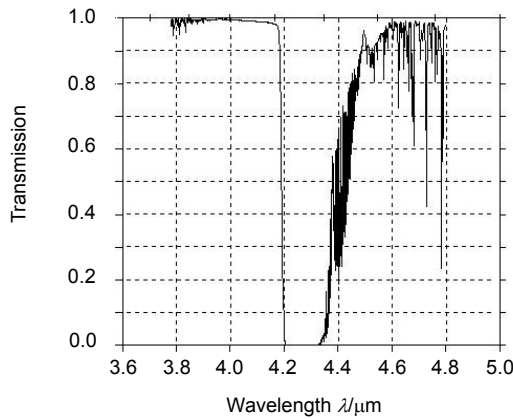


图 4 中波红外大气透过率.

Fig. 4 Atmospheric transmittance of MWIR.

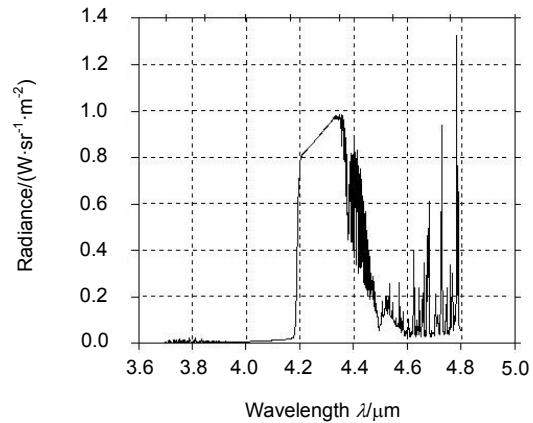


图 5 中波红外路径辐亮度.

Fig. 5 Path radiance of MWIR.

表 1 实验的大气参数.

Table 1 Atmospheric parameters for the experiment.

Temperature/°C	Humidity/(%)	Visibility/km	Atmospheric pressure/hPa	Altitude/m	Longitude	Latitude
31.6	49	12	1008	4	E121°28'	N31°17'

表 2 无人机的长波红外辐射温度反演结果.

Table 2 LWIR temperature retrieval results of UAV.

Location	Gray value of LW	Calculated radiance/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Actual temperature/K	Calculated temperature/K	Absolute error/K	Relative error/(%)
A	11861	19.4204	305.5	316.7	11.2	3.7
B	11818	19.2739	305.5	316.3	10.7	3.5
C	11861	19.4204	305.5	316.7	11.2	3.7
D	11831	19.3182	305.5	316.5	11.0	3.5
E	11833	19.3250	305.5	316.4	10.9	3.6

表3 无人机的长波红外辐射特性结果.

Table 3 LWIR radiation characteristics result of UAV.

Gray value of LW	Number	Radiance of LWIR/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Radiation intensity of LWIR/(W·sr ⁻¹)
11797	100	19.2011	0.6240
11805	86	19.2283	0.5374
11800	97	19.2113	0.6056
11810	99	19.2454	0.6192
11817	107	19.2692	0.6701

3.2 双波段比色法测量实验

3.2.1 实验原理

双波段比色测温法是要测量被测目标在两个波段上的辐射积分, 然后由其比值来确定被测目标的辐射温度^[13]. 由式(4)得出目标的辐射亮度为 $L_T = [(D_o - D_{\text{dark}}) \cdot \alpha^{-1} - L_{\text{path}}] / \tau$, 实验选取中、长波波段对目标进行测量. 温度反演方程式为

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} d\lambda} = \frac{(D_{o1} - D_{\text{dark1}} - L_{\text{path1}}) / \tau_1}{(D_{o2} - D_{\text{dark2}} - L_{\text{path2}}) / \tau_2} \cdot \alpha_2 \quad (8)$$

采用基于 Matlab 的数值求解, 利用二分法求解式(8)可得目标温度 T .

3.2.2 理论分析反演结果

反演温度依赖于式(8), 因此对式中的 D_{o1} 、 D_{dark1} 、 D_{o2} 、 D_{dark2} 、 L_{path1} 、 L_{path2} 、 τ_1 、 τ_2 、 α_1 、 α_2 的不确定度进行分析, 可从理论上得出反演温度 T 的精度, 如表4所示. 分析各个参数如下:

- 1) 在当前红外成像技术水平下, 红外系统输出值的不确定度一般优于 1%, 对反演精度影响较小, 即 D_{o1} 、 D_{dark1} 、 D_{o2} 、 D_{dark2} 的不确定度小于 1%.
- 2) 大气透过率路径辐射的不确定度取决于大气

参数测量精度和大气传输计算软件的精度, 当前技术水平下, L_{path1} 、 L_{path2} 、 τ_1 、 τ_2 的不确定度在 10%~20%^[10-11].

3) 在严格控制辐射定标环境的条件情况下, 可以将辐射亮度响应度的不确定度控制在 2.2%^[8]. α_1 、 α_2 的不确定度在 2.2%.

4) 根据 Matlab 数值运算采用默认算法, 运算的绝对误差在 10^{-6} 之内, 对反演计算精度影响相当小.

采用蒙特卡洛方法来验证仿真实验的温度反演, 蒙特卡洛方法通过构造符合上述不确定度的随机数. 将产生的随机数带入式(6), 通过对 1000 组数据进行处理得到, 计算输出反演温度: 均值为 301.9 K (目标真实温度 305.5 K), 标准差为 5 K, 采用 Kolmogorov-Smirnov 检验, 输出结果不拒绝为高斯分布. 99% 的反演结果落在 286.9 K~316.9 K 区间, 反演的不确定度在 5%, 并且反演温度的均值和真实温度有 3.6 K 的偏差, 如表5所示.

3.2.3 实验结果与分析

通过表4、表5可知无人机在中波段的辐射强度均值约为 0.0486 W/sr, 长波段的辐射强度在 0.6113 W/sr 左右. 反演温度的绝对误差在 4 K 左右, 相对误差 2% 内. 采用这种方法的温度反演较之单波段温度反演精度有所提升, 消除了发射率带来的影响. 但是, 通过大气模式进行计算, 大气状况带来的影响依然存在较大的误差.

表4 基于传统的双波段温度反演结果.

Table 4 Temperature retrieval results based on traditional dual waveband.

Location	Gray value of MW	Gray value of LW	Calculated radiance of MW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Calculated radiance of LW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Actual temperature/K	Calculated temperature/K	Absolute error	Relative error/(%)
A	9250	11861	1.6567	19.4205	305.5	301.5	4.0	1.3
B	9135	11818	1.6260	19.2739	305.5	300.9	4.6	1.5
C	9222	11861	1.6493	19.4205	305.5	301.2	4.3	1.4
D	9223	11831	1.6495	19.3182	305.5	301.6	3.9	1.3
E	9248	11833	1.6562	19.3251	305.5	301.8	3.8	1.2

表5 无人机的中、长波红外辐射特性结果.

Table 5 LWIR and MWIR radiation characteristics results of UAV.

Gray value of MW	Gray value of LW	The number in MWIR	The number in LWIR	Radiance of MW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Radiance of LW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Radiation intensity of MWIR/(W/sr)	Radiation intensity of LWIR/(W/sr)
9002	11797	99	100	1.5904	19.2011	0.0512	0.6240
9003	11805	86	86	1.5907	19.2283	0.0445	0.5374
8959	11800	90	97	1.5789	19.2113	0.0462	0.6056
8902	11810	99	99	1.5637	19.2454	0.0503	0.6192
8973	11817	99	107	1.5827	19.2692	0.0509	0.6701

3.3 基于黑体校正的比色温度反演及辐射测量实验

3.3.1 基于黑体校正的双波段测温原理

红外图像温度反演要得到较高的精度,必须解决如下两个问题:

- 1) 物体发射率带来的影响;
- 2) 大气透过率、大气路径辐射所造成的影响。

3.2 节使用的双波段比色法消除物体发射率 ϵ 所带来的影响,但是大气透过率 τ 以及大气路径辐射 L_{path} 的测量精度依然是影响目标温度反演的重要因素。为此,下文利用参考黑体对目标与红外测量系统之间的大气透过率进行高精度测量,进而提高目标的反演精度。图6、图7为无人机的中、长波图像。

大气传输软件 MODTRAN 计算的透过率和大气路径辐射精度有限,与现场真实的情况存在差别,为此,实验中采用标准黑体对现场环境的透过率以及路

径辐射进行测量,测量情况如表6所示。公式中有两个未知量 τ 、 L_{path} ,若能够准确的得到两组 D_{oT} 、 L_T ,即可计算出 τ 、 L_{path} 。利用标准黑体放置在被测目标旁边,实验中无人机飞行高度 32 m,距离探测器水平距离 105 m,二者直线距离 110 m,仰角为 17°。标准黑体放置在距离探测器 110 m 处,近似认为从黑体到探测器和从无人机到探测器的大气状况相同。设置两组不同温度,得到不同的 D_{oT} 、 L_T 。通过联立两式,计算出实验环境下的大气透过率以及大气路径辐射。根据式(2),首先用中波探测器观测,将参考黑体放在指定地点,设置一个高温工作环境 T_H ,由普朗克公式计算黑体辐射亮度 L_H ,红外探测系统将得到一个灰度输出 D_{oH} ,其次设置一个低温工作环境 T_L ,计算黑体辐射亮度 L_L ,得到系统的灰度输出 D_{oL} 。

根据公式:



图6 无人机中波红外图像.
Fig. 6 MWIR image of UAV.



图7 无人机长波红外图像.
Fig. 7 LWIR image of UAV.

表6 利用黑体计算大气透过率和大气路径辐射亮度实验结果.

Table 6 Atmospheric transmittance and path radiance experimental results calculated from black body.

Blackbody temperature/K	Radiance of MW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Radiance of LW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Gray value of MW	Gray value of LW
308	1.6742	17.5531	10071	12226
323	2.7543	22.6943	13430	13293

$$D_{oH} = \alpha(\tau L_H + L_{path}) + D_{dark}, \quad (9)$$

$$D_{oL} = \alpha(\tau L_L + L_{path}) + D_{dark}, \quad (10)$$

计算出大气透过率和大气路径辐射:

$$\tau = \frac{D_{oH} - D_{oL}}{\alpha(L_H - L_L)}, \quad L_{path} = \frac{D_{oL} - D_{dark}}{\alpha} - \tau L_L.$$

将 τ 、 L_{path} 带入式 $D_o = \alpha(\tau L_T + L_{path}) + D_{dark}$ 得出:

$$L_T = \frac{L_H - L_L}{D_{oH} - D_{oL}} (D_{oT} - D_{oH}) + L_H, \quad (11)$$

因此, 温度反演方程式为

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)} d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)} d\lambda} - \frac{\frac{L_{H1} - L_{L1}}{D_{oH1} - D_{oL1}} (D_{oT1} - D_{oH1}) + L_{H1}}{\frac{L_{H2} - L_{L2}}{D_{oH2} - D_{oL2}} (D_{oT2} - D_{oH2}) + L_{H2}} = 0, \quad (12)$$

其中: 角标为 1 的代表中波, 角标为 2 的代表长波, 式(12)采用 Matlab 数值求解, 即可反算出温度 T 。

3.3.2 理论分析反演结果

根据式(12), 反演精度取决于参数 D_{oH1} 、 D_{oL1} 、 D_{oH2} 、 D_{oL2} 、 D_{oT1} 、 D_{oT2} 、 L_{H1} 、 L_{H2} 、 L_{L1} 、 L_{L2} , 从理论上分析反演精度如下:

1) 在当前红外成像技术水平下, 红外系统输出值的不确定度一般优于 1%, 即 D_{oH1} 、 D_{oL1} 、 D_{oH2} 、 D_{oL2} 、 D_{oT1} 、 D_{oT2} 不确定度优于 1%, 对反演精度影响较小。

2) 在当前黑体制造水平下, 黑体辐射亮度 L_{H1} 、 L_{H2} 、 L_{L1} 、 L_{L2} 的不确定度优于 2%。

3) 根据 Matlab 数值运算采用默认算法, 运算的绝对误差在 10^{-6} 之内, 对反演计算精度影响相当小。

采用蒙特卡洛方法来验证仿真实验的温度反演, 蒙特卡洛方法通过构造符合上述不确定度的随机数。将产生的随机数带入式(12), 通过对 1000 组数据进行处理得到反演温度分布如图 8 所示。计算输出反演温

度均值: 305.1 K(目标真实温度 305.5 K), 标准差: 3 K。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验, 输出结果不拒绝为高斯分布, 99%的反演结果落在 294.1 K~314.1 K 区间, 反演的不确定度在 2.9%之内。

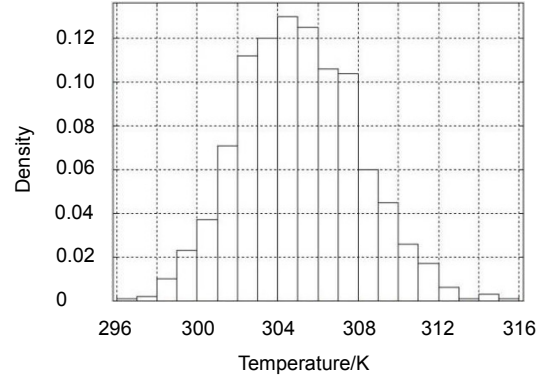


图 8 温度反演的分布图。

Fig. 8 Distribution of temperature retrieval.

3.3.3 实验结果与分析

由表 7 和表 8 可知, 目标无人机中波辐射强度约为 0.04 W/sr、长波辐射强度在 0.5 W/sr 左右。反演温度的绝对误差在 2 K 左右, 相对误差 1%内。相较于前两种方法, 误差明显减小。对比分析三种方法得出的结果可知: 基于黑体校正的红外图像温度反演不管从理论上还是实验数据上都优于前两种, 极大地提升了红外图像温度反演的精度。

4 结论

本文针对无人机目标特性进行了探测, 计算结果和分析相吻合, 证实了分析的合理性。由结果分析, 初步得出以下结论:

1) 无人机中波辐射强度约为 0.04 W/sr、长波辐射强度在 0.5 W/sr 左右。在长波波段的辐射强度是在中波波段的辐射强度 10 倍以上, 热辐射能量主要集中在

表 7 基于黑体校正的双波段温度反演结果。

Table 7 Dual waveband temperature retrieval results based on black body calibration.

Location	Gray value of MW	Gray value of LW	Calculated radiance of MW/(W/sr·m ²)	Calculated radiance of LW/(W/sr·m ²)	Actual temperature/K	Calculated temperature/K	Absolute error	Relative error/(%)
A	9250	11861	1.4102	15.7944	305.5	304.1	1.4	0.46
B	9135	11818	1.3732	15.5872	305.5	303.4	2.1	0.69
C	9222	11861	1.4012	15.7944	305.5	303.7	1.8	0.59
D	9223	11831	1.4015	15.6498	305.5	304.3	1.2	0.39
E	9248	11833	1.4096	15.6595	305.5	304.6	1.1	0.36

表8 无人机的中、长波红外辐射特性结果.

Table 8 LWIR and MWIR radiation characteristics of UAV.

Gray value of MW	Gray value of LW	The number in MWIR	The number in LWIR	Radiance of MW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Radiance of LW/(W·sr ⁻¹ ·m ⁻²)	Radiation intensity of MWIR/(W·sr ⁻¹)	Radiation intensity of LWIR/(W·sr ⁻¹)
9002	11797	99	100	1.3305	15.4860	0.0428	0.5033
9003	11805	86	86	1.3308	15.5245	0.0372	0.4339
8959	11800	90	97	1.3166	15.5005	0.0385	0.4887
8902	11810	99	99	1.2983	15.5486	0.0418	0.5003
8973	11817	99	107	1.3211	15.5486	0.0425	0.5419

长波波段。

2) 无人机部件中温度较高的部分,如螺旋桨电机马达、电池,被表面外壳挡住,其表面温度并不高,所以在图像上表现的并不明显。

3) 通过改进方法,反演温度绝对误差降低到2 K左右,相对误差在0.5%左右。

文章对比三种反演目标无人机辐射特性以及温度的方法,并进行了影响结果的不确定度分析。其中被测目标发射率以及大气透过率是影响红外辐射特性极其重要的因素,本文实现了红外探测系统与无人机目标之间的大气透过率的高精度测量。基于黑体校正的温度反演方法有效地避免了未知物体发射率以及大气状况所造成的精度下降,有效地减少测量误差,提升了无人机温度反演的准确性。在今后的工作中如果采用高精度标定设备及定标方法,能够进一步提升温度反演的准确性。

基金项目

国家“十二五”国防预研项目(41101050501);上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2011xcwzk04)。

参考文献

- Cao Lihua, Wan Chunming, Zhang Yunfeng, et al. Infrared radiation characteristic measure method of point Target[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, **34**(4): 460-464. 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.
- Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Simulation study on the infrared radiation characteristics of UAV under the background radiation[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(6): 649-653. 徐顶国, 桑建华, 罗明东. 背景辐射下的无人机红外辐射特征仿真研究[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(6): 649-653.
- Li Yunhong, Zhang Long, Wang Yannian. Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2143-2149.

- 李云红, 张龙, 王延年. 红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(10): 2143-2149.
- Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on real-time correction[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, **30**(3): 284-288. 杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(3): 284-288.
- Teutsch M, Krüger W, Heinze N. Detection and classification of moving objects from UAVs with optical Sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **80501**: 80501J.
- Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, **43**(7-8): 218-245.
- Bakker E J, Fair M L, Schleijpen H M A. Modeling multispectral imagery data with NIRATAM v3.1 and NPLUME v1.6[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3699**: 80-91.
- Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguo, et al. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electronic system on spot[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2006, **17**(2): 175-178. 李宪圣, 任建伟, 张立国, 等. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研制[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(2): 175-178.
- Zhang Liru. Colorimetric and Radiance temperature Pyrometer Measurement Accuracy Analysis[J]. *Journal of Tianjin University*, 1963, **12**(1): 75-81. 张立儒. 比色和亮度高温计测量精度的分析[J]. *天津大学学报*, 1963, **12**(1): 75-81.
- Wei Heli, Chen Xiuhong, Zhan Jie, et al. Atmospheric correction in the measurement of infrared radiance[J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 472-478. 魏合理, 陈秀红, 詹杰, 等. 红外辐射测量的大气修正[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(6): 472-478.
- Engel M Y, Balfour L S. Quantitative evaluation of errors in remote measurements using a Thermal Image[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, **1442**: 298-307.
- Cao Lihua, Yang Ciyin, Wan Chunming. Correction-based dual-waveband color comparison thermometric method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(8): 1882-1888. 曹立华, 杨词银, 万春明. 基于标校的双波段比色测温法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, **33**(8): 1882-1888.
- Li Yunhong, Wang Ruihua, Li Yuxuan. Dual waveband colorimetric temperature measurement technology and Experiment[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(1): 71-75. 李云红, 王瑞华, 李禹萱. 双波段比色测温技术及实验测试[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(1): 71-75.