

红外探测系统对微型无人机作用距离的理论计算及试验

金伟 商袁昕 冯云松 黄佳豪 王思雨 周长祺 陈友才

Theoretical calculation and experimental verification of the detection range of infrared detection systems for micro rotary-wing UAVs

JIN Wei, SHANG Yuanxin, FENG Yunsong, HUANG Jiahao, WANG Siyu, ZHOU Changqi, CHEN Youcai

引用本文:

金伟, 商袁昕, 冯云松, 等. 红外探测系统对微型无人机作用距离的理论计算及试验[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 58–65. DOI: 10.5768/JAO202647.0101007

JIN Wei, SHANG Yuanxin, FENG Yunsong, et al. Theoretical calculation and experimental verification of the detection range of infrared detection systems for micro rotary-wing UAVs[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 58–65. DOI: 10.5768/JAO202647.0101007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0101007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无人机光电信息装备转型发展思考

Reflections on transformational development of unmanned aerial vehicle electro-optical information equipment

应用光学. 2025, 46(3): 473–480 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311001>

无人机光电对抗技术研究

Research on UAV photoelectric countermeasure technology

应用光学. 2021, 42(3): 377–382 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301001>

迎头方向隐身导弹红外辐射特性分析

Infrared radiation characteristics of head-on stealth missile

应用光学. 2022, 43(1): 41–44 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101007>

无人机对地目标跟踪的快速初始化和自适应优化

Bounding box initialization and optimization for ground target tracking in UAV Videos

应用光学. 2023, 44(6): 1332–1342 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0602003>

基于改进YOLOv4的低慢小无人机实时探测算法

Improved YOLOv4 for real-time detection algorithm of low-slow-small unmanned aerial vehicles

应用光学. 2024, 45(1): 79–88 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102002>

基于MIMO的无人机斜程激光通信性能分析

Laser communication performance of UAV slant based on MIMO

应用光学. 2022, 43(5): 1030–1036 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0058-08

引用格式: 金伟, 商袁昕, 冯云松, 等. 红外探测系统对微型无人机作用距离的理论计算及试验 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 58-65.

JIN Wei, SHANG Yuanxin, FENG Yunsong, et al. Theoretical calculation and experimental verification of the detection range of infrared detection systems for micro rotary-wing UAVs[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 58-65.



在线阅读

红外探测系统对微型无人机作用距离的理论计算及试验

金 伟, 商袁昕, 冯云松, 黄佳豪, 王思雨, 周长祺, 陈友才

(国防科技大学 电子对抗学院 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要: 为实现对低空微小型无人机的精准管控, 需获得红外探测系统对无人机的作用距离, 明确系统的探测能力边界。首先, 考虑到远处无人机所成的像不能充满探测器单个像元, 改进了红外探测系统对点目标作用距离的计算模型。然后, 搭建试验测量系统, 运用红外热像仪和多路测温仪, 测量了不同持续飞行时间下的 DJI AIR 2S 无人机表面多个点的辐射温度和物理温度, 得到了飞行中的无人机达到热平衡状态时的温度。接着, 建立了无人机的三维几何模型, 并基于蒙特卡洛法数值计算得到了无人机 8 μm ~14 μm 波段的辐射强度。最后, 采用所建立的作用距离计算模型, 数值计算得到了热像仪对无人机的作用距离沿探测方向的空间分布。为验证理论计算的精度, 试验测量了热像仪对 DJI AIR 2S 无人机的作用距离。对比数值计算与试验测量的作用距离, 在相同探测方向下, 两者之间的相对误差在 10% 以内。这表明作用距离计算模型和数值模拟的过程是合理、可信的。

关键词: 红外探测系统; 无人机; 作用距离; 辐射强度

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0101007

Theoretical calculation and experimental verification of the detection range of infrared detection systems for micro rotary-wing UAVs

JIN Wei, SHANG Yuanxin, FENG Yunsong, HUANG Jiahao,

WANG Siyu, ZHOU Changqi, CHEN Youcai

(Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: To achieve precise regulation of low-altitude micro/miniature unmanned aerial vehicles (UAVs), it is essential to obtain the effective detection range of infrared detection systems against UAVs and define the boundaries of infrared systems detection capabilities. Firstly, considering that the UAV's image can not cover a single detector pixel, a theoretical model for calculating the detection range of infrared detection systems against point targets is improved. Secondly, an experimental measurement system is constructed, utilizing an infrared thermal imager and a multi-channel temperature tester to measure the radiative and physical temperatures at multiple surface points of the DJI Air 2S under varying continuous flight durations. These measurements enable the determination of the thermal equilibrium temperature of the UAV during flight. Thirdly, a three-dimensional geometric model of the UAV is developed, and the radiative intensity in the 8~

收稿日期: 2025-06-16; 修回日期: 2025-09-16

基金项目: 国家重点实验室开放基金 (PPLT2024ZZ012)

第一作者: 金伟, E-mail: jinwei17@nudt.edu.cn

14 μm wavelength band is numerically calculated using the Monte Carlo method. Finally, based on the established detection range model, the spatial distribution of the detection range for the thermal imager against the UAV is numerically simulated across different detection angles. To validate the theoretical results, experiments are conducted to measure the practical detection range. Comparing the detection ranges derived from numerical calculations and experimental measurements under identical viewing conditions, the relative error between them is within 10%. It demonstrates the rationality and reliability of both the detection range model and the numerical simulation methodology.

Key words: infrared detection systems; unmanned aerial vehicle; detection range; radiative intensity

引言

低慢小无人机由于其体积小、飞行速度快、飞行高度低,具备较强的隐蔽性,容易规避常规雷达和监视系统的探测,已成为战场上执行侦察、攻击和电磁干扰等任务的常用平台。另外,随着低慢小无人机技术的普及,民用领域也开始面临无人机带来的安全挑战,如侵犯隐私、非法飞越禁飞区、干扰航班等问题。红外探测系统可通过捕捉无人机的热辐射特征来检测其存在,研究分析红外探测系统对无人机的作用距离,能够为无人机的管控提供更加精确的技术手段。

近些年,国内外学者开展了针对无人机的红外辐射特性和作用距离的研究。徐顶国等^[1]利用离散传递法计算了某飞翼布局无人机的长波红外辐射强度的空间分布。刘连伟等^[2]建立了地对空探测方向上某大型无人机红外辐射计算模型,获得了波段、光谱红外辐射特性。张艳^[3]和王东^[4]等开展了无人机辐射特性数据的测量研究。陈超帅等^[5]对飞行中无人机的辐射特性进行了测量,采用基于黑体校正的双波段测量方法反演了无人机的温度。FUDALA N等^[6]在不同方位角和不同背景条件下,测量了 DJI Phantom 4 和 DJI Inspire 两款旋翼无人机的中波和长波红外辐射强度的绝对数值。张亦宁等^[7]设置了不同的云雨条件,计算了红外热成像系统对点目标的作用距离。崇元等^[8]推导了考虑点目标像元弥散尺寸因素下的作用距离方程,比较了仿真计算结果与实测值。李琳等^[9]采用理论建模和飞行温度实测的方法,获得了红外探测系统对 DJI Phantom 3 的作用距离。KOU R K 等^[10]改进了作用距离的数学模型,设计了红外搜索与跟踪系统的性能评估仿真系统,交叉验证了仿真结果。

本文在之前的研究基础上,将采用理论计算和试验测量两种方法,获得典型红外探测系统对微型旋翼无人机的作用距离。

1 点目标作用距离计算模型的改进

基于探测能量(或信噪比)的红外探测系统对点目标的作用距离^[10-11]计算公式为

$$R = \left[\frac{D^* \tau_a \tau_o I_t A_o}{S_{NR} \sqrt{A_d \Delta f}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: I_t 为目标在观察方向上的辐射强度; τ_a 为大气透射率; τ_o 为红外探测系统的光学系统透过率; A_o 为光学孔径面积; D^* 为探测器的探测率; A_d 为焦平面探测器单个像元的面积; Δf 为系统信号带宽; S_{NR} 为信噪比; R 为目标与红外探测系统之间的距离。

在推导式(1)的过程中,假设了目标所成的像能够充满探测器单个像元。而在实际情况中,当目标相对于红外探测系统由远及近运动,远处目标相对于探测系统的张角小于系统的瞬时视场,目标的像不能充满探测器单个像元,如图1所示。基于以上分析,将对式(1)作用距离计算模型进行改进,详细推导过程如下。

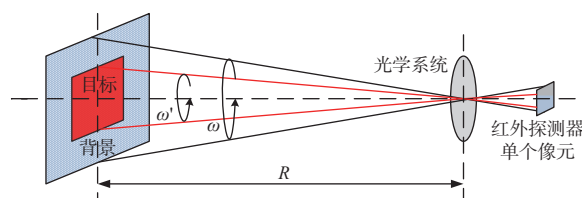


图1 点目标和背景红外辐射在红外系统的传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of point target and background infrared radiation propagation in an infrared system

目标在红外系统入瞳前的辐射照度为

$$E_t(\lambda) = \frac{\tau_a(\lambda) \varepsilon_t L_t(\lambda) A_t}{R^2} = \frac{\tau_a(\lambda) I_t(\lambda)}{R^2} \quad (2)$$

式中: $L_t(\lambda)$ 为目标在红外探测系统观察方向上的光谱辐射亮度; $I_t(\lambda)$ 为目标在观察方向上的光谱辐射强度; ε_t 为目标表面的发射率; A_t 为目标相对于观察方向的投影面积; $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱透射率。

背景完全充满探测系统的瞬时视场,其在红外

系统入瞳前的辐射照度为

$$E_{bg}(\lambda) = \tau_a(\lambda)L_{bg}(\lambda)\omega \quad (3)$$

式中: $L_{bg}(\lambda)$ 为背景的光谱辐射亮度; ω 表示红外探测系统的瞬时视场, 其计算公式为

$$\omega = \frac{A_d}{f^2} \quad (4)$$

式中, f 为光学系统的焦距。

根据式(2)、式(3)和式(4), 目标与背景在入瞳前的辐射照度差为

$$\Delta E(\lambda) = E_t(\lambda) - E_{bg}(\lambda) = \tau_a(\lambda) \left[\frac{I_t(\lambda)}{R^2} - \frac{L_{bg}(\lambda)A_d}{f^2} \right] \quad (5)$$

当红外探测器的响应波段在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 时, 产生的累积电压信号 V_s 为

$$V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathfrak{R}_\lambda \Delta E(\lambda) A_o d\lambda = A_o \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathfrak{R}_\lambda \tau_a(\lambda) \left[\frac{I_t(\lambda)}{R^2} - \frac{L_{bg}(\lambda)A_d}{f^2} \right] d\lambda \quad (6)$$

式中, $\mathfrak{R}_\lambda$ 为探测器的光谱响应率, 其计算公式为

$$\mathfrak{R}_\lambda = \frac{D^*(\lambda)}{\sqrt{A_d \Delta f}} V_n \quad (7)$$

式中: V_n 为噪声电压的有效值; $D^*(\lambda)$ 为探测器的光谱探测率。

将式(7)代入式(6)中, 整理后得到:

$$R = \left[\left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \tau_a(\lambda) I_t(\lambda) d\lambda \right) / \left(\frac{S_{NR} \sqrt{A_d \Delta f}}{A_o \tau_o} + V_{bg} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

其中:

$$S_{NR} = \frac{V_s}{V_n} \quad (9)$$

$$V_{bg} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \tau_a(\lambda) L_{bg}(\lambda) A_d d\lambda}{f^2} \quad (10)$$

当红外探测系统接收的目标红外辐射恰好能够满足系统信噪比 S_{NR} 的阈值时, 目标与探测系统之间的距离即为作用距离。根据发现概率、虚警概率和 S_{NR} 之间的函数关系^[12], 当采用理论模型数值计算作用距离时, 若设置系统的虚警概率=10⁻⁴、发现概率=0.9, 则对应的 S_{NR} 数值为 5.0。

根据式(8)可知, 要计算红外探测系统对无人机的作用距离, 除了获得焦平面探测器的性能指标、光学系统的透过率和大气透过率之外, 还需获得无人机的辐射强度 $I_t(\lambda)$ 。为得到无人机的辐射强度, 将采用试验测量的方法获得飞行中无人机的温度, 再运用数值计算方法得到辐射强度。

2 无人机辐射温度和物理温度的试验测量

要计算式(2)中无人机本体的红外辐射强度 $I_t(\lambda)$, 既要获得无人机表面的物理温度 T_p , 又需知道无人机表面的发射率 ϵ_t 。当直接法难以测量无人机表面的发射率时, 可运用红外热像仪测量物体的表面发射率, 其测量原理为^[13]

$$\epsilon_t = \frac{T_r^n - T_u^n}{T_p^n - T_u^n} \quad (11)$$

式中: T_r 和 T_p 分别为辐射温度和物理温度; T_u 为环境背景的温度; 当红外热像仪的工作波段为 8 $\mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 时, $n=3.9889$ 。

以 DJI AIR 2S 微型旋翼无人机作为对象, 先分别使用 FLIR T630 红外热像仪和 SH-X 多路测温仪测量无人机表面多个点的辐射温度和物理温度; 然后, 再运用式(11)计算无人机表面的发射率。

测量步骤为: 1) 操纵无人机起飞并在空中正常飞行; 2) 一边飞行一边计时, 每隔一段时间降下无人机, 立即使用 FLIR T630 和 SH-X 同时测量无人机的辐射温度和物理温度; 3) 测量完成后, 再次将无人机升空飞行, 飞行时间比前一次间隔更长, 然后再降下无人机并测量温度; 4) 如此反复测量。测量时发现, 无人机在飞行过程中, 主要的发热部位是内置飞控模块的底部、4 个机翼的旋轴和电池, 如图 2 所示。

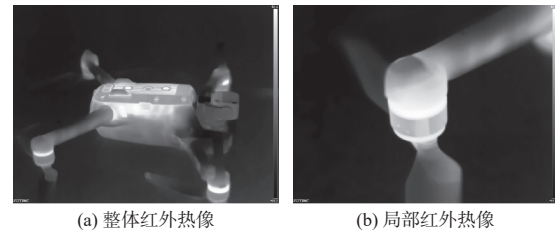


图 2 FLIR T630 获取的 DJI AIR 2S 无人机红外热像图

Fig. 2 Thermal infrared images of DJI AIR 2S acquired by FLIR T630

试验测量了无人机底部、旋轴和电池的物理温度 T_p 和辐射温度 T_r , 如表 1 所示。测量时, 从无人机 3 个发热部位中分别随机选取了 3 个测温点, 其中, p1、p2 和 p3 表示无人机底部的 3 个测温点, p4、p5 和 p6 表示旋轴的 3 个测温点, p7、p8 和 p9 表示电池的 3 个测温点。在测得每个部位 3 个点的温度之后, 用 3 个点的温度值计算出相应部位的平均温度, 如表 1 右侧 3 列所示。

根据表 1 的平均温度值, 绘制了无人机的温度随连续飞行时间的变化曲线, 如图 3 所示。在前 16 min, 无人机的温度随连续飞行时间的增加而

增加;当飞行时间到 20 min 时,无人机的温度与第 16 min 的结果相比几乎没有变化。因此,可以近似认为无人机持续飞行 16 min 后达到了热平衡状

态。根据无人机在热平衡状态下的物理温度和辐射温度,运用式(11)即可计算出无人机表面不同部位的发射率。

表 1 无人机不同部位的物理温度和辐射温度

Table 1 Physical temperatures and radiative temperatures of different regions of DJI AIR 2S

℃

飞行时间/min	测量温度	底部			旋轴			电池			均值		
		p1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	底部	旋轴	电池
4	T_p	51.4	47.9	42.3	33.1	36.5	30.9	30.7	35.7	32.9	47.2	33.5	33.1
	T_r	40.0	44.7	41.6	33.2	33.9	32.2	27.2	33.9	30.1	42.1	33.1	30.4
8	T_p	47.3	48.6	53.2	40.5	41.9	38.5	38.5	34.8	40.4	49.7	40.3	37.9
	T_r	48.8	43.1	40.7	40.7	37.5	37.3	32.9	34.6	35.4	44.2	38.5	34.3
12	T_p	54.1	59.3	51.6	48.5	52.9	50.1	41.7	43.9	38.6	55.0	50.5	41.4
	T_r	46.3	47.0	52.5	44.2	49.3	46.9	37.8	36.9	36.9	48.6	46.8	37.2
16	T_p	57.0	58.6	64.4	59.1	53.9	55.6	49.0	44.7	51.2	60.0	56.2	48.3
	T_r	56.4	53.4	48.6	53.5	49.8	50.6	43.4	47.0	38.3	52.8	51.3	42.9
20	T_p	57.7	60.1	62.8	57.9	53.0	57.7	44.6	52.3	48.6	60.2	56.2	48.5
	T_r	54.7	48.6	55.4	50.1	50.0	54.4	44.5	44.8	40.0	52.9	51.5	43.1

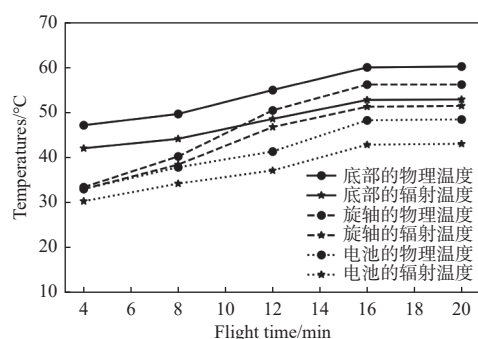


图 3 无人机的物理温度和辐射温度随飞行时间的变化曲线

Fig. 3 Curve of physical temperature and radiative temperature with different flight time

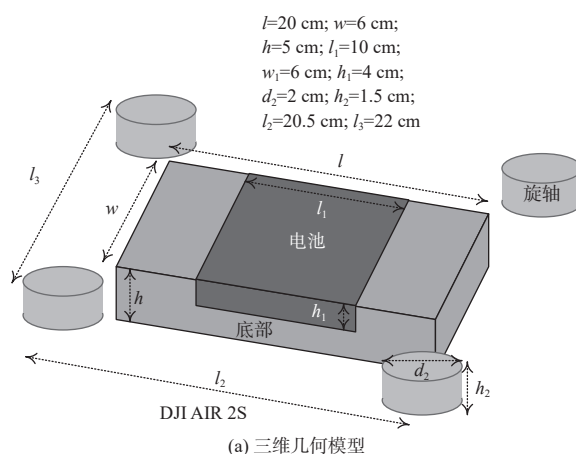
3 无人机红外辐射的计算

3.1 无人机的三维几何模型

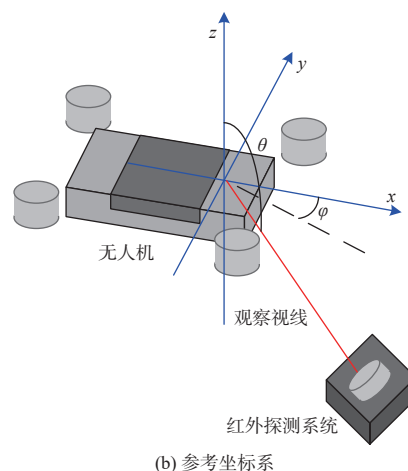
DJI AIR 2S 无人机飞行过程中主要的发热部位是底部、4 个旋轴和电池,这些部位的温度高于周围环境背景温度;而其他部位的温度近似等于背景温度。因此,考虑到其他部位对红外辐射的贡献很小,根据无人机实际的几何参数,建立了简化的三维几何模型,如图 4(a)所示。无人机机身等效为一个长(l)、宽(w)和高(h)的长方体;镶嵌在机身上方的电池等效为长(l_1)、宽(w_1)和高(h_1)的长方体;4 个旋轴等效为直径(d_2)、高(h_2)的圆柱体;无人机前后两个相邻的旋翼的轴距为 l_2 ,左右两个相邻旋翼的轴距为 l_3 。

参考坐标系统的 x 轴与无人机中轴线一致,其正方向指向无人机机头(带摄像头一侧)方向, y 轴与 x 轴同处于机身上表面的平面。观察视线在 x -

y 平面的投影与 x 轴的夹角为方位角 φ ;视线与 z 轴正方向的夹角为俯仰角 θ ,如图 4(b)所示。



(a) 三维几何模型



(b) 参考坐标系

图 4 无人机三维几何模型和参考坐标系示意图

Fig. 4 Diagram of DJI AIR 2S geometric model and reference coordinate system

3.2 红外辐射强度的数值计算

由于无人机较为复杂的几何形状,其表面向外进行红外辐射传播时,自身会存在辐射反射和相互作用的影响,将运用蒙特卡洛法模拟无人机红外辐射传播的过程^[14-15],其计算流程如图5所示。其中, $N_{MCM,i}$ 为单元 i 蒙特卡洛法模拟的光束总数; $n_{MCM,i}$ 为单元 i 模拟的光束编码; M_s 、 M_v 、 M_l 分别为系统内总的面元数、系统内总的体元数、系统内总单元数。

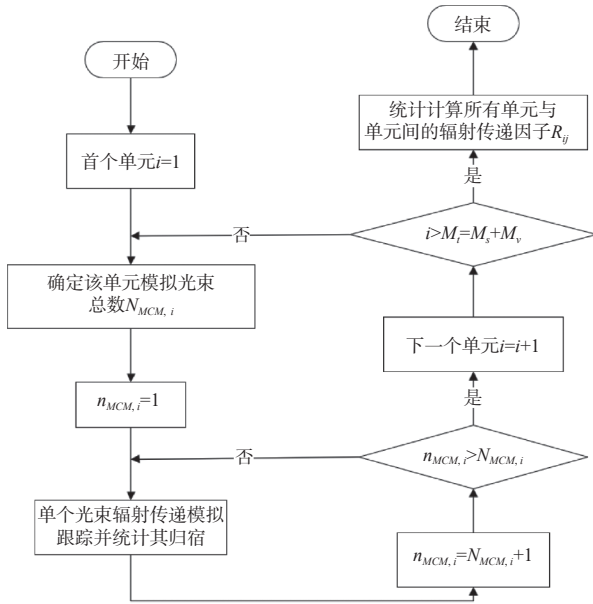


图5 蒙特卡洛法计算红外辐射流程图

Fig. 5 Flow chart of calculating infrared radiation by Monte Carlo method

首先,统计计算得到单元之间的辐射传递因子 R_{ij} , 然后,根据各面元热平衡时的温度,计算出发射的总辐射通量并与辐射传递因子相乘,即可得到面元 j 接收到的总辐射通量 Q_j ^[16] 为

$$Q_j = \sum_{i=1}^{M_s} R_{ij} Q_i \quad (12)$$

式中 Q_i 表示无人机面元 i 发射的总辐射通量。

在接收面面元 j 方向上的无人机红外辐射强度 I_j 为

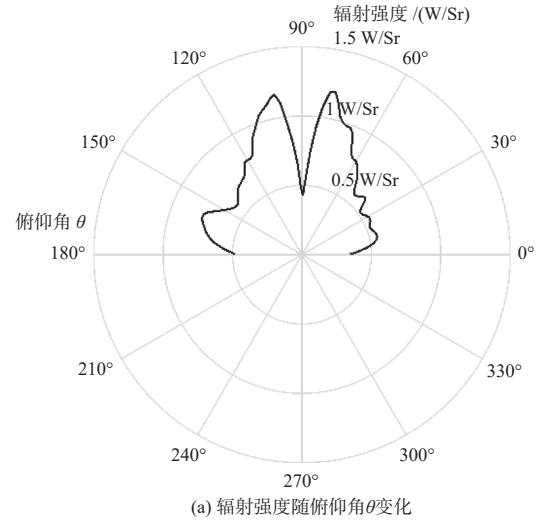
$$I_j = \frac{Q_j}{\Omega_j} \quad (13)$$

式中 Ω_j 表示接收面面元 j 对无人机所张的立体角。

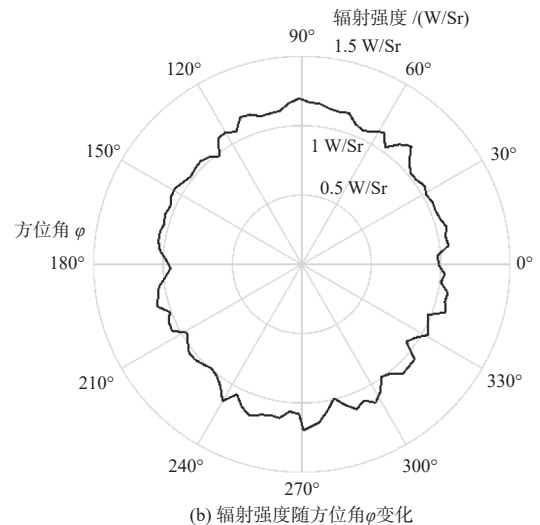
3.3 计算结果

运用蒙特卡洛法,数值计算了无人机的 $8\mu\text{m}$ ~ $14\mu\text{m}$ 波段辐射强度。当 $\varphi=90^\circ$ 时,辐射强度随俯仰角 θ 变化的方向图如图6(a)所示。此时, $\theta=78^\circ$

和 $\theta=101^\circ$,无人机的波段辐射强度出现峰值,最大值约为 1.2 W/Sr 。当 $\theta=78^\circ$ 时,无人机辐射强度随方位角的变化情况如图6(b)所示。此时, $\varphi=90^\circ$ 和 $\varphi=270^\circ$,无人机辐射强度相对较强。



(a) 辐射强度随俯仰角 θ 变化



(b) 辐射强度随方位角 φ 变化

图6 无人机波段辐射强度随辐射角度变化的方向图

Fig. 6 Band radiation intensity pattern of DJI AIR 2S versus radiation angle

4 无人机作用距离的数值计算和试验测量

4.1 作用距离的理论计算

由式(8)可知,要计算红外系统对无人机的作用距离,除了需计算无人机自身的红外辐射之外,还需计算传输路径上的大气透过率。由于大气透过率是随传输距离变化的,采用 LOWTRAN 软件,每隔 50 m 距离计算 1 次大气透过率,其他传输距离上的透过率采用线性插值的方法获得。

另外,在计算作用距离之前,还需明确红外探

测系统的性能参数。为了开展理论与试验的对比研究,理论计算的性能参数须与试验中使用的保

持一致。试验使用的红外探测设备是 FLIR T630 红外热像仪,其基本参数如表 2 所示。

表 2 FLIR T630 的基本性能参数
Table 2 Key specifications of FLIR T630

像元尺寸/ μm	f/mm	$D^*/(\text{cm}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{Hz}^{1/2})$	光学孔径/ mm	$\Delta f/\text{Hz}$	τ_0	响应波段/ μm
17	25	2.0×10^{10}	25	2500	0.7	7.5~14.0

根据式(8),考虑到大气透过率也随距离发生变化,采用逐步逼近的方法得到了环境背景温度为 300 K 时,红外热像仪对无人机的作用距离,如图 7 所示。当 $\varphi=90^\circ$ 时,热像仪对无人机的作用距离随俯仰角变化如图 7(a) 所示。此时, $\theta=78^\circ$ 和 $\theta=101^\circ$ 时,作用距离出现了两个峰值,分别为 233 m 和 231 m。当 $\theta=78^\circ$ 时,作用距离随方位角的变化情况如图 7(b) 所示。此时,作用距离的最大值和最小值分别为 233 m 和 206 m。

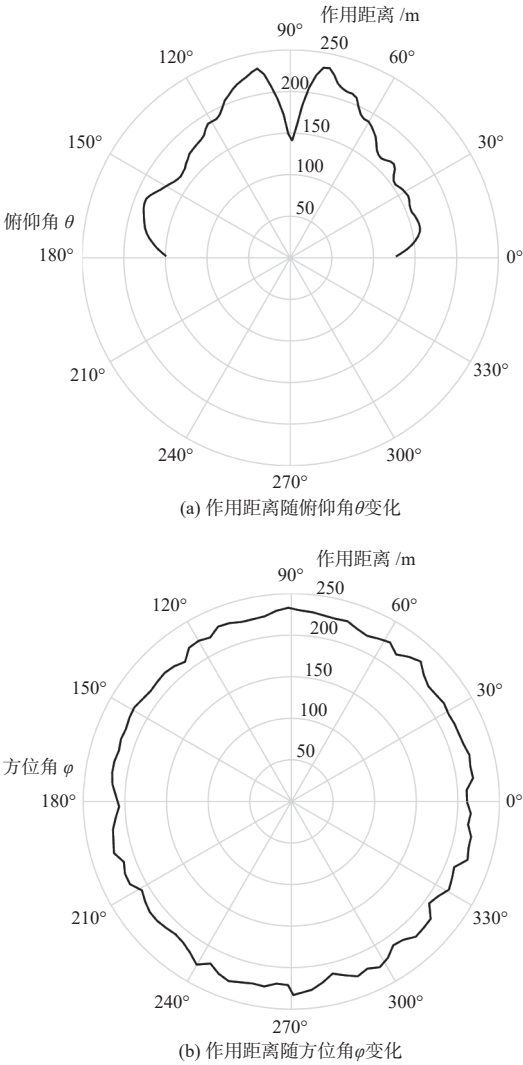


图 7 作用距离随辐射角度变化的方向图
Fig. 7 Detection range pattern versus radiation angle

4.2 作用距离的试验测量

为验证理论计算的准确度,运用 FLIR T630 红外热像仪观察飞行中的 DJI AIR 2S 无人机,并测量对无人机的作用距离。试验时的条件为:环境背景温度为 20.7 $^\circ\text{C}$,天气为晴天有积状云。试验步骤为:首先,无人机在空中持续飞行约 16 min,达到热平衡状态;然后,控制和改变无人机的飞行方位角 φ 、飞行高度 h 和飞行距离 l (无人机在地面的投影到返航点的水平距离) 等飞行参数,用热像仪观察无人机并拍摄红外图像。

当红外热像仪对无人机的观测方位角 $\varphi\approx 0^\circ$,无人机的飞行高度 $h=50\text{ m}$ 时,控制无人机的飞行距离 l ,每向远处移动 20 m,拍摄一次无人机的红外图像,如图 8 所示。当 $l=120\text{ m}$ 时,无人机在红外图像中已变成一个点,为图 8(a) 中红色框内的亮点;当 $l=180\text{ m}$ 时,图像中的无人机像点已消失不见,被背景淹没,人眼无法检测出来,如图 8(d) 所示。

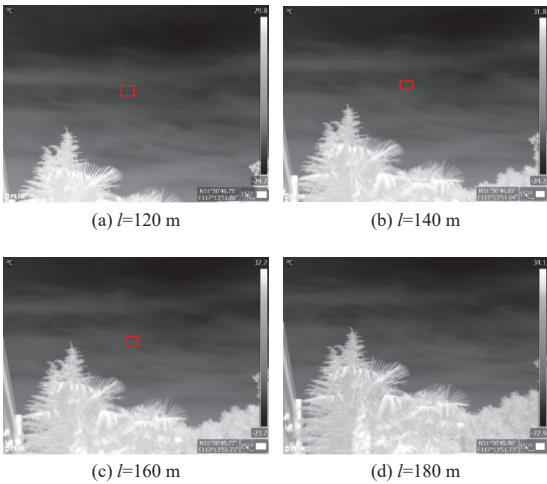


图 8 方位角 $\varphi\approx 0^\circ$ 不同飞行距离下的无人机红外图像
Fig. 8 Infrared images of DJI AIR 2S at various flight distances with $\varphi\approx 0^\circ$

前一段采用了人眼主观判断是否能够检测出无人机目标。为了判别目标的客观性,本文将采用罗斯准则^[17]。该准则认为:要从背景中以高置信度分辨出一个微小目标,其图像中目标与背景的信噪比最小值为 5.0。罗斯信噪比的计算方法如式(14)

所示。按照罗斯准则,若要从红外图像中发现无人机目标,则 $S_{\text{NRRose}} \geq 5.0$ 。运用式(14)计算得到了图 8(c)和图 8(d)的信噪比分别为 5.15 和 2.37。因此,根据罗斯准则,从图 8(c)中能够判别目标,而从图 8(d)不能辨别出目标,与主观判别结果一致。

$$S_{\text{NRRose}} = \frac{g_t - \bar{g}_b}{\sigma_b} \quad (14)$$

式中: g_t 表示目标灰度值; $\bar{g}_b$ 表示目标周围背景灰度值的均值; σ_b 表示背景灰度值的标准差。根据以上判别结论,此时无人机与热像仪之间的实测作用距离 R_t 为

$$R_t = \sqrt{l^2 + h^2} = \sqrt{180^2 + 50^2} = 187 \text{ m} \quad (15)$$

调整观测方位角 $\varphi \approx 90^\circ$,控制无人机飞行,在不同的飞行高度 h 和飞行距离 l 下,用热像仪记录无人机的红外图像,如图 9 所示。当 $h=80 \text{ m}$, $l=190 \text{ m}$ 时,无人机与背景之间的灰度值相差很小,人眼只有仔细观察才能发现无人机,如图 9(c)所示。当 $h=100 \text{ m}$, $l=200 \text{ m}$ 时,无人机已经完全淹没在背景中,无法被检测出来。

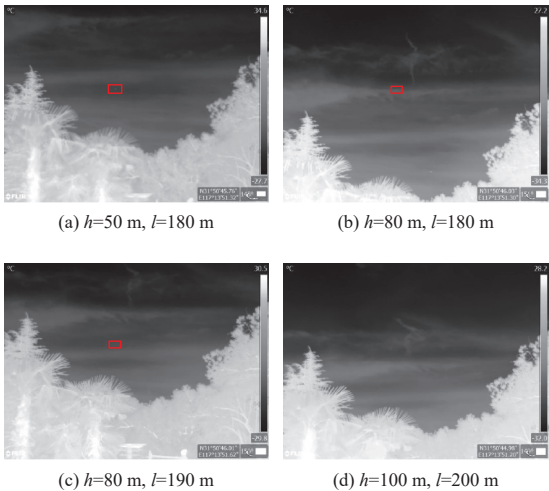


图 9 方位角 $\varphi \approx 90^\circ$ 不同飞行距离和高度下的无人机红外图像
Fig. 9 Infrared images of DJI AIR 2S at various flight heights and distances with $\varphi \approx 90^\circ$

运用式(14)分别获得了图 9(c)和图 9(d)的罗斯信噪比 S_{NRRose} 分别为 3.84 和 2.20。根据罗斯准则,从图 9(c)和 9(d)都不能检测出目标。对图 9(c)的主观判别和客观判别结果不一致。当主观与客观判别结果出现分歧时,本文以能成功检测到目标为最终判别依据。按照此原则,即认为能从图 9(c)中判别出目标。根据以上分析,此时红外系统对无人机的实测作用距离为

$$R_t = \sqrt{l^2 + h^2} = \sqrt{190^2 + 80^2} = 206 \text{ m} \quad (16)$$

根据上述测量步骤和方法,反复进行多次试验,可获得不同观测角度下热像仪对无人机的作用距离。

4.3 对比分析

在不同观测角度下,通过试验测量了红外热像仪对无人机的作用距离之后,可以采用式(8)计算得到对应观测角度下的作用距离。试验结果与数值计算结果之间的对比如表 3 所示,相同观测角度下,两者之间的相对误差在 10% 以内。

表 3 数值计算的作用距离与试验测量结果之间的对比
Table 3 Quantitative comparison between numerical simulations and experimental validations of operation ranges

观察角度/(°)		计算得到的 作用距离/m	试验得到的 作用距离/m	绝对 误差/m	相对 误差/%
φ	θ				
0	106	172	187	15	8
0	120	161	173	12	7
90	117	188	206	18	9
90	133	175	194	19	10

5 结 论

本文分别运用了理论计算和试验测量两种方法,获得了红外探测系统对微型旋翼无人机的作用距离。在相同观测角度下,理论计算的作用距离与试验测量的结果相比,相对误差在 10% 以内,验证了作用距离模型的合理性和数值计算的可信性。本文的研究结论可用于获取不同红外探测系统对无人机的作用距离,为无人机的精确管控奠定了技术基础。

参考文献:

[1] 徐顶国, 桑建华, 罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 880-884.
XU Dingguo, SANG Jianhua, LUO Mingdong. Study on infrared radiation characteristics of UAV skin[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 880-884.

[2] 刘连伟, 杨森森, 邹前进, 等. 无人机红外辐射建模与图像仿真[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 207-213.
LIU Lianwei, YANG Miaomiao, ZOU Qianjin, et al. Infrared radiation modeling and image simulation of UAV[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 207-213.

- [3] 张艳, 宋敏敏, 苏建平, 等. 某小型无人机中长波辐射特性测量及辐射强度反演[J]. *飞控与探测*, 2023, 6(2): 87-93.
ZHANG Yan, SONG Minmin, SU Jianping, et al. Measurement of long-wave radiation characteristics and inversion of radiation intensity in a small UAV[J]. *Flight Control & Detection*, 2023, 6(2): 87-93.
- [4] 王东, 邹前进, 刘小虎. 无人机地面滑跑状态红外辐射特性测量及分析[J]. *红外技术*, 2023, 45(8): 845-848.
WANG Dong, ZOU Qianjin, LIU Xiaohu. Measurement and analysis of infrared radiation characteristics of UAV in ground sliding state[J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(8): 845-848.
- [5] 陈超帅, 王世勇. 大疆无人机目标红外辐射特性测量及温度反演[J]. *光电工程*, 2017, 44(4): 427-434.
CHEN Chaoshuai, WANG Shiyong. Infrared radiation characteristics measurement and temperature inversion of UAV target in DJI[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(4): 427-434.
- [6] FUDALA N, SHORT R, HEWITT J, et al. Comparison of midwave versus longwave intensity signatures for infrared search and track of small rotorcraft unmanned aerial vehicles[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(4): 043107-1-11.
- [7] 张亦宁, 张昊春, 马锐, 等. 不同云雨条件下红外热成像系统作用距离评估[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 288-296.
ZHANG Yining, ZHANG Haochun, MA Rui, et al. Evaluation of operating range of infrared thermal imaging system under different cloud and rain conditions[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 288-296.
- [8] 崇元, 艾葳, 王玉坤. 红外点目标探测距离估算模型[J]. *指挥控制与仿真*, 2020, 42(6): 59-62.
CHONG Yuan, AI Wei, WANG Yukun. Estimation model of detection distance of infrared point target[J]. *Command Control & Simulation*, 2020, 42(6): 59-62.
- [9] 李琳, 陈刚. 无人机光电探测距离分析[J]. *激光与红外*, 2018, 48(9): 1123-1127.
LI Lin, CHEN Gang. Analysis of photoelectric detection distance of UAV[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(9): 1123-1127.
- [10] KOU R K, WANG C P, FU Q, et al. Detection model and performance evaluation for the infrared search and tracking system[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(2): 398-410.
- [11] 赵丽, 杨国庆, 李周, 等. 红外系统点目标作用距离计算方法分析与实例[J]. *红外技术*, 2022, 44(12): 1273-1277.
ZHAO Li, YANG Guoqing, LI Zhou, et al. Analysis and example of calculation method of point target action distance in infrared system[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(12): 1273-1277.
- [12] 寇人可, 王海晏, 吴学铭. 机载红外搜索跟踪系统的最佳阈噪比[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 134-141.
KOU Renke, WANG Haiyan, WU Xueming. Optimal threshold-to-noise ratio of airborne infrared search and tracking system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 134-141.
- [13] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 10-18.
ZHANG Zhiqiang, WANG Ping, YU Xudong, et al. Research on high-precision infrared thermal imaging temperature measurement technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 10-18.
- [14] BONIN J, MUNDT C. Full three-dimensional Monte Carlo radiative transport for hypersonic entry vehicles[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2019, 56(1): 44-52.
- [15] 郑海晶, 白廷柱, 王全喜. 基于蒙特卡洛法的尾焰红外辐射特性仿真与试验[J]. *光子学报*, 2018, 47(8): 0826001.
ZHENG Haijing, BAI Tingzhu, WANG Quanxi. Simulation and experiment of infrared radiation characteristics of tail flame based on Monte Carlo method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(8): 0826001.
- [16] 冯云松, 王同, 王思雨, 等. 基于蒙特卡洛法旋翼飞行器红外辐射特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(9): 20240248.
FENG Yunsong, WANG Tong, WANG Siyu, et al. Study on infrared radiation characteristics of rotorcraft based on Monte Carlo method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(9): 20240248.
- [17] BURGESS A E. The rose model, revisited[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(3): 633-646.