

文章编号:1001-5078(2018)09-1123-05

· 光电技术与系统 ·

无人机光电探测距离分析

李琳, 陈刚

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:针对低空消费级无人机这种低慢小目标,采用理论建模和对实验中飞行温度参数实测的方法,建立了目标红外辐射模型以及背景辐射参数模型,得到了与实测结果比较相符的红外探测距离。指出了对这类低红外辐射目标,对阳光反射和背景噪声必须精细估算才能得到比较准确的红外作用距离。另外,通过对分析结果的讨论,对未来无人机红外探测系统的设计提出了一些建议。

关键词:四旋翼无人机;红外辐射;背景辐射;作用距离

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.011

Analysis on infrared detection range for unmanned aerial vehicle

LI Lin, CHEN Gang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Aiming at the small consumer UAV with low-altitude, infrared radiation model of the target and radiation parameter model of the background were established by theoretical modeling and experimental measurement of flight temperature parameters, then the infrared detection range was obtained, and it is consistent with the measured results. For the target with weak infrared radiation, the more accurate infrared operating range can be gotten only carefully estimating the sunlight reflection and background noise. Through the analysis of the results, some advice is given for the design of future UAV infrared detection system.

Key words: quad-rotor unmanned aerial vehicle(UAV); infrared radiation; background radiation; atmospheric radiation; operating distance

1 引言

近年来,低慢小(LSS)无人机凭借成本低、生存能力强、机动性好的优势迅猛发展,已经成为一种非传统的空中威胁,成为空中监视与目标定位行动的效力倍增器。根据美国陆军反无人机技术手册,无人机系统被分为从第1类(包括小型和微型无人机系统)到第5类(战略级资产)。其中民间拥有量最大的,美军准备用作集群作战使用的都是成本最低的第2类无人机——消费级无人机。这类无人机采用电池供

电,红外特征不明显,飞行高度低,最大飞行速度慢,横截面积和雷达反射截面小,探测难度大。

本文针对消费级无人机光电探测作用距离的设计难题,通过试验测定和理论建模,探讨了光电探测作用距离的估算模型。通过试验验证,取得了与实际比较相符的估算结果,希望对这一类光电探测系统的设计有所帮助。

2 光电系统对无人机探测的作用距离分析模型

导弹^[1]、战斗机飞机^[2]等传统目标的飞行速度

快,辐射面积大,其蒙皮与空气摩擦产生的红外辐射和尾焰红外辐射^[3]远大于大气的热辐射和大气散射太阳光造成的背景辐射,所以,在对传统目标的作用距离估算中,只考虑蒙皮与空气摩擦产生的红外辐射和尾焰红外辐射,而基本忽略背景辐射。

无人机类目标的自发红外辐射主要来自于机身外壳,和工作状态下发热的电池。由于这样的红外辐射能量很低,和背景辐射在同一数量级,所以还必须细致分析光电探测的背景红外辐射能量。这样才能对光电探测的作用距离有一个比较准确的估算,其辐射示意图如图 1 所示。

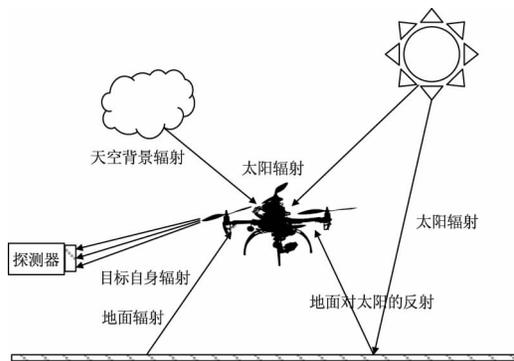


图 1 无人机辐射示意图

Fig. 1 The composition of UAV's radiation

2.1 目标红外特性分析

当无人机飞行在稳态时,无人机的发热部分还比较稳定,容易建模。但电池发热情况和环境条件以及工作时间的长短都有关;另外,在散热部分,小型四旋翼无人机,其机身外壳材料通常为塑胶,以大疆精灵系列为例,其机身外壳主要为白色塑胶,通过查表塑胶的发射率在 $0.7 \sim 0.8$ ^[4];也有机身外壳主要为黑色塑胶的,如零度无人机;极个别的还有金属的,如大疆公司的金属外壳的旋翼无人机。最关键的是热力学方程的边界条件比较难于确定,因为不同的温度、风速、飞行速度和飞行方向的边界条件都是不同的。

为简化分析,本文采用试验测定机体和电池盖温度的方法确定目标温度。通过将半导体温度计固定在无人机下方随无人机一起飞行,一个探头固定在电池盖上,另一个探头固定在机身上;应用无人机的摄像头读取半导体温度计在飞行中的温度读数,其测量结果如表 1 和表 2 所示。

试验测定的温度也验证了我们的分析,即使在类似环境温度,风速,飞行速度条件下,机身和电池

盖温度也有一定的差异性。

由表 1 可以看到机身温度比电池盖温度基本低 $2 \sim 5$ °C。机身温度和环境温度差别不大。对于黑色或者贴上黑色加热膜的无人机,起飞前吸收阳光辐射比较多,平衡温度比较高,起飞后与环境温差并不大。现场实验显示电池与环境温差并非为固定值,温度的升高主要与电池连续工作时间有关。

表 1 白色大疆无人机的温度测量结果

Tab. 1 Temperature measurement result of Dji white UAV

测试时间	机身温度/°C	电池盖温度/°C	环境温度/°C
2016. 10. 29	6. 7	10. 9	6. 7
	7. 0	11. 2	6. 2
	10. 0	13. 2	8. 2
2016. 11. 24	11. 2	16. 1	9. 4
	7. 6	12. 7	6. 6
2017. 6. 7	27. 0	27. 3	26. 3
	27. 2	28. 2	27. 0

表 2 黑色大疆无人机的温度测量结果

Tab. 2 Temperature measurement result of Dji black UAV

测试时间	机身温度/°C	电池盖温度/°C	环境温度/°C
2016. 10. 29	7. 0	9. 8	6. 7
	6. 9	11. 4	6. 2

有了无人机的温度,要给出无人机的红外辐射,还需要确定无人机的辐射面积^[4]。无人机平飞时,机身在观测方向上的三维投影面积为:

$$A_t = (ah) \cos\alpha \sin(\beta + 45^\circ) + (ah) \cos\alpha \cos(\beta + 45^\circ) + (aa) \sin\alpha \quad (1)$$

式中, a, h 分别为无人机等效为正方体后的边长、高; α 为光电探测俯仰角; β 为无人机旋翼对角轴线与探测方向的夹角(锐角)。

以大疆精灵 3 系列为例,无人机相邻两旋翼的轴距为 250 mm,除去电池盖,大致可以等效为高度为 30 ~ 50 mm 的线行目标。工作状态下电池暴露在空气中的面积 $75 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 。当距离比较远,而无人机飞行高度为简化运算,可以将横截面简化为一个 $(260 \sim 350) \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的长方形机身加一个 $45 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times \sin(45^\circ + \beta)$ 的电

池盖^[4]。

知道了目标的辐射面积 A_{ii} 以及目标的温度 T_{ii} (单位:K)、目标表面发射率 ε 、红外系统探测器响应波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2 \mu\text{m}$, 可通过普朗克光谱辐射定律计算无人机自身的辐射强度:

$$L_{ii} = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{[e^{C_2/\lambda T_{ii}} - 1]} d\lambda \quad (2)$$

其中, C_1 为第一辐射常数, $C_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^4 \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$; C_2 为第二辐射常数, $C_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

虽然这个积分计算比较复杂,但通过查阅文献黑体函数表,就可算出 L_{ii} 的值^[5]。在已知目标的有效辐射面积 A_{ii} 的情况下,通过式(3)计算出目标的波段辐射强度:

$$J_{ii} = \sum_{i=1}^n \varepsilon \times A_{ii} \times L_{ii} \quad (3)$$

2.2 无人机反射的红外辐射

无人机还能够反射太阳和地面热辐射的相应红外辐射强度^[6]:

$$J_{is} = (1 - \varepsilon) \times (J_s + J_g) \quad (4)$$

式中, J_s 为太阳辐射强度。用 Lowtran 软件可以计算太阳直射辐照度,图 2 为软件计算的美国标准大气下,无气溶胶,波数为 2700 ~ 2080 cm^{-1} (3.7 ~ 4.8 μm 波段)内的大气层外太阳光谱辐照度和海平面太阳光谱辐照度。

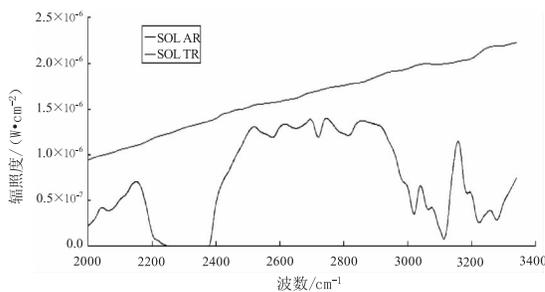


图 2 太阳辐射光谱辐照度

Fig. 2 The distribution of solar radiation

因为本文探究的目标为低空飞行的旋翼无人机,飞行的最大高度不超过 500 m,在与地面接触较近的情况下,无人机还可以反射地面红外辐射光。将地面视为一个朗伯辐射体,传输距离为目标飞行高度,可计算出目标反射的来自地面的红外辐射。地球表面的物质种类太多,但大多数的地物有较高的发射率。在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下,干土壤的辐射发射率为 0.90,麦地的辐射发射率为 0.93,黄土

为 0.85。

地面光谱入射辐射照度表达式为:

$$L_g = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_g}{4} \frac{3.7418 \times 10^4}{\lambda^5 [\exp(14388/293\lambda) - 1]} d\lambda \quad (5)$$

式中, λ 为波长; ε_g 为地面反射率。

2.3 光电探测的背景噪声

不考虑镜头正对太阳探测的情况,红外系统的背景噪声,主要由大气的自身的热辐射和散射的太阳辐射^[7]组成,如图 3 所示。

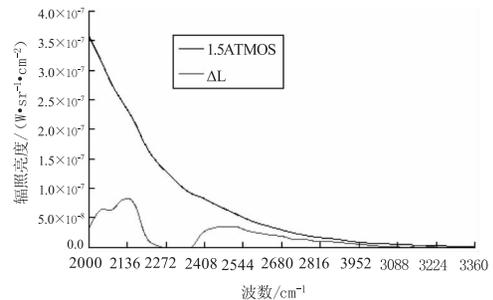


图 3 大气辐射光谱辐照度

Fig. 3 The distribution of atmosphere radiation

大气自身的热辐射和散射的太阳辐射对背景噪声的增强,即大气程辐射。应用 Lowtran 软件,输入大气模式、大气廓线、路径参数、气溶胶类型、缺省气象视距、波段等参数,可得到该条件下的大气的自身的热辐射 J_{br} 和散射的太阳辐射 J_{bs} 。

许多红外设计软件都给出了大气的自身的热辐射和散射的太阳辐射参数计算值,比如 Lowtran 软件。

2.4 大气传输的影响

大气由气体分子、气溶胶、微粒等多种物资组成,其对目标红外辐射传输的影响主要为吸收、散射等衰减。综合表现为红外辐射的大气透射率。用布盖尔-朗伯定律表达大气透过率:

$$\tau_a(\lambda, R) = e^{-[\sigma(\lambda) + K(\lambda)]R} \quad (6)$$

式中, $\sigma(\lambda)$ 为吸收系数; $K(\lambda)$ 为散射系数; R 为穿过大气厚度。

利用 Lowtran 软件也可以得到一定条件下的大气透过率。

2.5 作用距离公式

按照前面的分析,大疆精灵 3 无人机大致可以简化为一个 (260 ~ 350) mm × 50 mm 的长方形机身加一个 45 mm × 75 mm × $\sin(45^{\circ} + \beta)$ 的电池盖。我

们所试验的光电跟踪探测装备能够保证光电探测光轴始终对准目标质心,在此条件下,假定电池盖始终

垂直于探测光轴,目标与背景的红外波段内辐射能量差为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta J = J_{tt} + J_{ts} - J_{br} - J_{bs}, R \leq (50f/a) \\ \Delta J = (J_{tt} + J_{ts}) - (J_{br} + J_{bs}) \times \left[\frac{\frac{aR}{f} \times 50 + 45 \times 75}{\left(\frac{aR}{f}\right)^2} \right], (260f/a) \geq R \geq (50f/a) \\ \Delta J = (J_{tt} + J_{ts}) - (J_{br} + J_{bs}) \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\left(\frac{aR}{f}\right)^2} \right], R \geq (260f/a) \end{array} \right. \quad (7)$$

其中, ΔJ 为目标与背景的红外波段内辐射能量差; a 为探测器的横向、纵向像元尺寸; R 为满足一定侦测概率时的红外系统侦测距离 (cm); f 为红外接收光学系统焦距; 按照红外作用距离方程:

$$R = \left[\frac{\Delta J \pi \delta \tau_0 \tau_\alpha}{\alpha^2 \cdot \text{NETD} \cdot (\Delta M / \Delta T) \cdot (S/N)} \right]^{\frac{1}{2}} f \quad (8)$$

其中, $m = \pi V_{RF} / V_\pi \ll 1$ — 满足一定侦测概率时的红外系统侦测距离 (cm); f 为红外接收光学系统焦距; τ_0 为红外光学系统透过率, 考虑最不利情况, 取 $\tau_0 = 0.8$; α 探测器的横向、纵向像元尺寸; τ_α 为大气透过率; NETD 为红外探测器的噪声等效温差; 取 NETD = 25 mK; ΔJ 为目标与背景辐射辐射能量差 W/sr; $\Delta M / \Delta T$ 为黑体在一个波段内的微分辐射度, 对中波红外 ($\Delta M / \Delta T$) = 1.4463×10^{-5} ; δ 为过程因子 ≤ 1 考虑最不利情况, 取 $\delta = 0.6$; S/N 为满足一定探测概率时所要求的信噪比。

表4 作用距离计算结果

Tab. 4 The calculation results of the model

测试时间	能见度 /km	飞行高度 /m	机身温度 /°C	电池盖温度 /°C	环境温度 /°C	正面作用距离/m	背面作用距离/m	作用距离实测结果/km
2016. 10. 29 白色无人机	15	100	6.7	10.9	6.7	3974	3722	3.6
		120	7.0	11.2	6.2	4128	3843	3.6
2016. 10. 29 黑色无人机	15	120	7.0	9.8	6.7	3156	2998	3.0
2017. 6. 7 白色无人机	15	80	27.0	27.3	26.3	3238	3155	2.9
		120	27.2	28.2	27.0	3396	3297	2.9

实际测量中, 冬天地球中纬地区的实际作用距离为 3.6 km, 夏天的实际作用距离约为 2.9 km。本文计算了两种极端观测角度下的作用距离, 取电池所在面为正面, 电池相反面为背面, 在实际观测中没有记录目标成像角度。本模型估算下, 冬天对正面

3 实验验证

实验采用的红外搜索跟踪系统参数如表 3 所示。环境条件为: 无云背景、海拔 0.004 km 处。

表3 红外系统参数

Tab. 3 Infrared system parameters

探测器参数	尺寸	像元数	帧频	探测率
	15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$	640 \times 512	25 Hz	5×10^{13}
光学系统参数	f	D_0	F	τ_0
	300 mm	75 mm	4	0.8
系统参数	SNR	工作波段	NETD	δ
	2	3.7 ~ 4.8 μm	25 mK	0.6

按照上述作用距离分析模型, 可以得到作用距离估算结果。与试验中的实测结果对比如表 4 所示。

观测最远作用距离为 4.0 km 侧面为 3.8 km, 夏天对正面最远作用距离 3.4 km 侧面为 3.2 km。该算法估算结果与实际观测结果有一定偏差, 在 10 月 29 日对黑色外壳无人机的观测结果和估算结果都小于同日对白色无人机的作用距离, 分析原因主要

是黑色无人机的电池温度升高较白色的低,且黑色外壳对太阳光直射的反射低,导致黑色目标整体红外辐射强度小于白色。

4 结 论

通过对凝视型红外搜索跟踪系统作用距离算法的推导和实际实验观测结果的分析,可以得出以下结论:

1) 四旋翼无人机的红外辐射主要是工作状态下发热的电池、机身外壳和反射的太阳辐射,且最佳观测角度比最不利角度下的估算作用距离大5%左右。

2) 同一纬度、相同能见度、相同飞行高度条件下,凝视型红外搜索跟踪系统在冬季对于无人机的作用距离大于夏天,这和夏天的太阳直射辐射小、大气透过率小、背景噪音大等有关。

3) 黑色无人机在相同条件下自身辐射比白色机身无人机的强度大,但黑色机身反射的太阳的辐射小,本文实验数据下黑无人机的估算作用距离和实际观测距离都比白色无人机还小。

4) 背景辐射的主要影响来自太阳散射和大气自身的辐射,对于自身红外辐射低的目标,精准估算背景辐射对估算作用距离十分重要。

参考文献:

- [1] MU Da, WANG Jian li, CHEN Tao. Analysis on operating range of a staring infrared search and track system for high-speed aircraft [J]. *Optical Technique*, 2007, (3): 420 - 423. (in Chinese)
牟达,王建立,陈涛. 凝视型红外搜索跟踪系统对高速飞机作用距离的分析[J]. *光学技术*, 2007, (3): 420 - 423.
- [2] FAN Xiang, REN B iao, DENG Pan. Analysis on operating

range of the staring infrared search and track system for cruise missile[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(5): 503 - 506. (in Chinese)

樊祥,任彪,邓潘. 凝视型红外搜索跟踪系统对巡航导弹作用距离分析[J]. *激光与红外*, 2009, 39(5): 503 - 506.

- [3] LI Taorui, TOHG Zhongxiang, HUANG Hesong, et al. Study on infrared radiation characteristics of aircraft[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2): 189 - 194. (in Chinese)
李韬锐,童中翔,黄鹤松,等. 飞机红外辐射特征仿真研究[J]. *激光与红外*, 2017, 47(2): 189 - 194.
- [4] MU Da, WANG Jianli, CHEN Tao. Analysis on operating range of a staring infrared search and track system for armed helicopter[J]. *Acta Armamentarii*. 2008, 29(3): 313 - 317. (in Chinese)
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.
- [5] ZHANG Jianqi. *Infrared physics*. 2nd ed [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013. (in Chinese)
张建奇. *红外物理*. 第2版[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2013.
- [6] MU Da, WANG Jianli, CHEN Tao. Analysis for operating range of IR search & track system. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 6(s1): 93 - 95. (in Chinese)
牟达,王建立,陈涛. 红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 6(s1): 93 - 95.
- [7] REN Lifeng. Modeling of helicopter rotor flowfield and analysis of helicopter infrared radiation characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
任利锋. 直升机旋翼下洗流场建模与整机红外辐射特性分析[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.