

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-0930-07

# 无人机载光电载荷自主侦察的参数计算与分析

贾兆辉, 朱 镭, 金明鑫, 张 芳, 冯 颖, 张晓亮, 龙海波

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 自主侦察是无人机载光电载荷的一种自动化、智能化侦察模式, 参数计算则是自主侦察应用的前提。首先介绍了无人机载光电载荷的自主侦察模式; 然后对该模式无人机自动巡航飞行速度和飞行高度, 光电载荷的传感器视场角、俯仰角、扫描角速度、扫描角度范围等参数进行了计算, 并分析了各个参数的物理意义及相互关系, 以及对目标识别率、侦察时间等自主侦察效果的影响; 最后举例进行仿真计算和分析, 并指出在实际应用中存在的问题, 为该模式的实际应用提供了理论依据。

**关键词:** 无人机; 光电载荷; 自主侦察; 目标识别

中图分类号: TN201

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0501007

## Parameter calculation and analysis of autonomous reconnaissance for UAV-borne photoelectric payload

JIA Zhaohui, ZHU Lei, JIN Mingxin, ZHANG Fang, FENG Ying, ZHANG Xiaoliang, LONG Haibo

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Autonomous reconnaissance is an automatic and intelligent reconnaissance mode of UAV-borne photoelectric payload. Parameter calculation is the premise of autonomous reconnaissance application. The autonomous reconnaissance mode of UAV-borne photoelectric payload was first introduced, then the flight speed and altitude of autonomous UAV cruise, the sensor field angle of view, pitch angle, scan speed and scan angle of photoelectric payload were calculated, the physical meaning and relationship of each parameter were analyzed, and the influence of each parameter on target recognition rate and recon time was analyzed. Finally, simulation calculation and analysis were carried out with examples, and the existing problems in practical application were pointed out, which provided a theoretical basis for practical application of this mode.

**Key words:** UAV; photoelectric payload; autonomous reconnaissance; target recognition

## 引言

无人机作为新型作战力量, 在长航时、高威胁区域、广域预警探测能力等方面发挥了显著作用, 越来越受到世界各国的重视<sup>[1]</sup>。随着无人机越来越多地应用到军事领域中, 传统手动操控方式的工作量急剧增加, 人力耗费大, 侦察效率低, 对于瞬息万变的战场态势, 如果完全依靠人工操作, 必然会贻误最佳作战时机<sup>[2]</sup>, 因此迫切需要实现自动化、智能化的自主侦察方式, 以提高侦察效率<sup>[3]</sup>。

自动目标识别技术是无人机实现自主侦察的关键技术<sup>[4]</sup>。过去由于自动目标识别技术不成熟, 限制了自主侦察模式的应用, 但是近些年来, 受益于计算机硬件性能的提升和深度学习理论不断完善, 加快了目标识别技术从理论研究走向无人机实际作战应用的步伐<sup>[5-9]</sup>。基于深度学习的目标识别算法研究越来越多, 比如文献 [10]~[15] 分别在深度学习算法基础上, 对目标识别的处理速度和准确率进行了提升。在2016年大规模视觉挑战赛 ILSVRC 中, 基于深度

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2024-01-19

作者简介: 贾兆辉 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电系统技术研究。E-mail: jzh-1981@163.com

学习算法的分类错误率低至 2.991%, 远低于人类平均识别错误率 5.1%, 体现了在大规模数据集上的优势<sup>[5, 10]</sup>。随着目标识别算法的应用日渐成熟, 自主侦察模式的应用提上了日程, 但是目前国内鲜有针对自主侦察模式的研究。本文对自主侦察模式参数建立了数学模型, 并针对案例做了仿真计算, 为自主侦察模式的应用提供了理论支撑。

## 1 自主侦察模式概述

自主侦察模式把无人机的自动巡航功能和光电载荷的稳瞄稳像、自动扫描、自动识别、自动跟踪、激光测距、目标地理定位等功能有机结合起来, 整个过程不需要人工干预, 具有全自动化、侦察效率高优点, 这种智能化的侦察模式大大节省了人力, 提高了战场作战效率。自主侦察模式的流程如图 1 所示。具体流程为: 无人机起飞前, 根据侦察任务进行模式参数计算, 根据计算结果规划飞行航路和设定光电载荷的参数, 然后无人机按照预定航路飞行到侦察区域上空自动巡航, 光电载荷则对侦察区域进行自动扫描, 同时对目标进行自动识别和分类, 当识别到目标后, 停止自动扫描, 进行自动跟踪、激光测距、目标地理定位、上报目标信息(包括目标类型、地理位置等)等一系列操作。

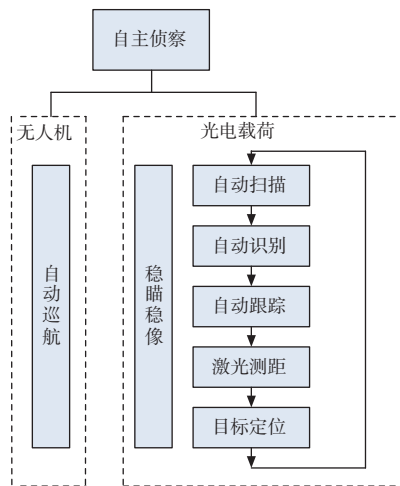


图 1 自主侦察模式流程

Fig. 1 Flow chart of autonomous reconnaissance mode

为了使自主侦察模式达到识别率高、全覆盖、侦察速度快的目的, 需要合理设置无人机和光电载荷的参数, 满足各个参数的约束条件, 根据实际情况确定最佳参数方案。

## 2 自主侦察模式的参数计算

### 2.1 参数介绍及计算链

自主侦察模式涉及无人机的飞行参数、光电载荷参数等, 计算过程中涉及到的主要参数见表 1 所示。本文以光电载荷吊装状态为例, 方位角  $0^\circ$  与无人机机头方向一致, 俯仰角方向定义水平为  $0^\circ$ , 抬头为正。由于实际情况的复杂性, 因此在建立数学模型时做了简化处理。

表 1 自主侦察模式涉及的主要参数

Table 1 Main parameters involved in autonomous reconnaissance mode

序号	参数名称	含义
1	视场角 $\theta_H \times \theta_V / (^\circ)$	光电载荷内的光电传感器的水平视场角和垂直视场角
2	像元尺寸 $\eta \times \eta / \mu\text{m}$	光电载荷内的光电传感器的像元尺寸
3	分辨率 $F_H \times F_V / \text{pixel}$	光电载荷内的光电传感器的分辨率
4	扫描角速度 $V_S / (^\circ)/\text{s}$	光电载荷自动扫描状态下在方位上的角速度
5	扫描角度范围 $\beta_r / (^\circ)$	光电载荷自动扫描状态下在方位上的角度范围
6	俯仰角 $\alpha / (^\circ)$	光电载荷在自动扫描过程中, 其光轴与水平面之间的夹角, 向上为正, 向下为负。
7	飞行速度 $V_f / \text{m/s}$	无人机在自动巡航时的飞行速度
8	飞行高度 $H_f / \text{m}$	无人机在自动巡航时距离地面的高度
9	目标尺寸 $A_H \times A_V / \text{m}$	侦察目标的实际尺寸
10	自动识别的最少目标像素数 $m \times n / \text{pixel}$	自动识别模块可以识别的最少目标的像素数, 由自动识别模块的识别能力决定
11	侦察区域大小 $j \times k / \text{m}$	矩形侦察区域的长和宽
12	扫描纵深 $L_{\text{FOV}} / \text{m}$	扫描时传感器垂直视场在地面上覆盖的宽度
13	纵深时间 $T_{\text{FOV}} / \text{s}$	无人机飞过扫描纵深的的时间
14	中心目标距离 $D_{\text{center}} / \text{m}$	光电载荷视场中心的目标与光电载荷之间的距离
15	视场上极限中心目标距离 $D_{\text{up}} / \text{m}$	光电载荷内的光电传感器视场上极限中心对应的目标和光电载荷之间的距离
16	目标距离阈值 $D_{\text{th}} / \text{m}$	根据最少目标像素数的识别要求而计算的目标距离
17	最大目标距离 $D_{\text{max}} / \text{m}$	视场内的所有目标和光电载荷的距离的最大值
18	投影距离 $L_D / \text{m}$	中心目标距离在地面上的投影距离
19	扫描单程时间 $T_S / \text{s}$	自动扫描时光电载荷的方位角从左极限转到右极限(或从右极限转到左极限)所需的时间
20	原始扫描宽度 $W / \text{m}$	初步计算的扫描宽度
21	重叠率 $p$	两个扫描带重叠部分的尺寸与扫描带尺寸之间的比率
22	修正扫描宽度 $W' / \text{m}$	考虑重叠率之后的扫描宽度
23	航路路程 $Q / \text{m}$	无人机侦察完指定区域需要飞行的路程
24	侦察时间 $T_R / \text{s}$	无人机侦察完指定区域所需的时间

计算过程中, 自主侦察参数的计算链如图 2 所

示。从图2中可以看出计算过程和各个参数之间的相互关系。

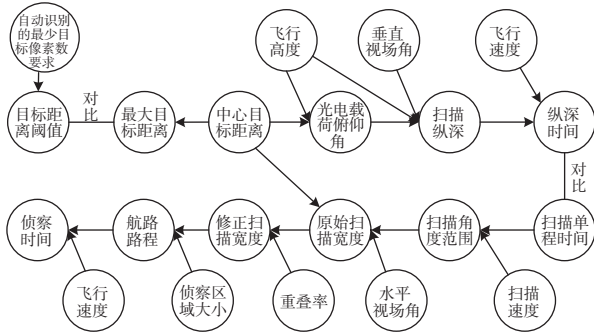


图2 自主侦察参数计算链

Fig. 2 Parameter calculation chain of autonomous reconnaissance mode

### 2.2 目标距离阈值 $D_{th}$

目标距离是光电载荷与目标之间的直线距离，它决定了目标在图像中的像素数。目标识别模块对目标有最少目标像素数要求，如果目标像素数小于要求，则不能识别目标，因此，可根据自动识别的最少目标像素数计算目标距离阈值  $D_{th}$ 。

已知传感器像元尺寸  $\eta \times \eta$ 、传感器视场角  $\theta_H \times \theta_V$ 、传感器分辨率  $F_H \times F_V$ 、自动识别的最少目标像素数  $m \times n$ 、目标尺寸  $A_H \times A_V$ ，分别按照目标水平和垂直2个方向计算，得到  $D_H = \frac{A_H}{\tan(m \times \theta_H / F_H)}$  和  $D_V = \frac{A_V}{\tan(n \times \theta_V / F_V)}$ ，取  $D_H$  和  $D_V$  的最小值为目标距离阈值  $D_{th}$ 。

目标距离与目标识别率成反比，与侦察效率成正比。目标距离越大，扫描时瞬时视场侦察的区域越大，侦察效率越高，但图像上的目标像素数则越少，识别率越低；目标距离越小，图像上的目标的像素数越多，识别率越高，但是扫描时瞬时视场侦察的区域越小，侦察效率越低。

### 2.3 光电载荷俯仰角 $\alpha$

无人机飞行高度  $H_f$ 、中心目标距离  $D_{center}$ 、光电载荷俯仰角  $\alpha$  三者之间的关系如图3所示。因此，由图3几何关系可计算俯仰角  $\alpha$ ：

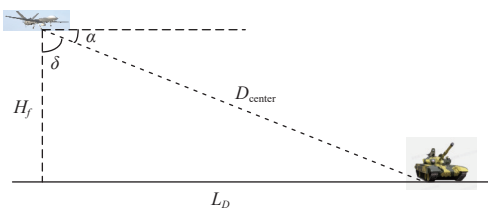


图3 飞行高度、俯仰角和目标距离之间的关系

Fig. 3 Relationship between altitude, pitch angle and target distance

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \times \arcsin\left(\frac{H_f}{D_{center}}\right) \quad (1)$$

由图3可知，光电载荷光轴与垂直方向的夹角  $\delta$  为

$$\delta = 90 - \alpha \quad (2)$$

根据图3可得，中心目标距离  $D_{center}$  在地面上的投影距离  $L_D$  为

$$L_D = D_{center} \times \cos \alpha \quad (3)$$

### 2.4 扫描纵深 $L_{FOV}$

根据光电载荷光轴与垂直方向的夹角  $\delta$ 、无人机飞行高度  $H_f$ 、传感器视场角  $\theta_H \times \theta_V$ ，可计算出扫描纵深  $L_{FOV}$ 。

如图4所示，传感器视场下极限与垂直方向的夹角为  $\delta_{down}$ ，对应在地面上的投影距离为  $L_{down}$ ；传感器视场上极限与垂直方向的夹角为  $\delta_{up}$ ，对应在地面上的投影距离为  $L_{up}$ ，根据文献[16]中分辨能力分析模型，计算扫描纵深  $L_{FOV}$  如下：

$$\delta_{down} = \delta - \theta_V / 2 \quad (4)$$

$$\delta_{up} = \delta + \theta_V / 2 \quad (5)$$

$$L_{down} = H_f \times \tan \delta_{down} \quad (6)$$

$$L_{up} = H_f \times \tan \delta_{up} \quad (7)$$

$$L_{FOV} = L_{up} - L_{down} \quad (8)$$

根据式(2)、式(4)~式(8)，可得：

$$L_{FOV} = H_f \times [\tan(90 - \alpha + \theta_V / 2) - \tan(90 - \alpha - \theta_V / 2)] \quad (9)$$

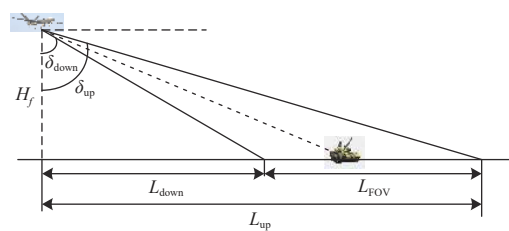


图4 扫描纵深  $L_{FOV}$  计算示意图

Fig. 4 Calculation sketch of scanning depth  $L_{FOV}$

### 2.5 最大目标距离 $D_{max}$

为了判断视场内所有目标是否都满足自动识别的要求，需要计算最大目标距离  $D_{max}$ ， $D_{max}$  的计算示意图如图5所示。

如图5(a)所示，视场上极限中心目标距离  $D_{up}$  可由式(10)计算：

$$D_{up} = \frac{H_f}{\cos \delta_{up}} \quad (10)$$

如图5(b)所示，最大目标距离  $D_{max}$  可由式(11)

计算:

$$D_{\max} = \frac{D_{\text{up}}}{\cos(\theta_{\text{H}}/2)} \quad (11)$$

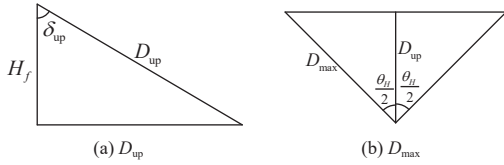


图5 最大目标距离 $D_{\max}$ 的计算示意图

Fig. 5 Calculation sketch of maximum target distance  $D_{\max}$

根据式(2)、式(5)、式(10)和式(11)可推导出:

$$D_{\max} = \frac{H_f}{\cos(90 - \alpha + \theta_V/2) \times \cos(\theta_{\text{H}}/2)} \quad (12)$$

同一个视场内,不同位置的目标距离是不一样的,因此,应保证最大目标距离 $D_{\max} \leq D_{\text{th}}$ ,才能满足在自动扫描时图像上所有目标都能够满足识别要求。

## 2.6 纵深时间 $T_{\text{FOV}}$ 和扫描单程时间 $T_S$

扫描角度范围 $\beta_r$ 、扫描单程时间 $T_S$ 、扫描角速度 $V_S$ 三者之间的关系为

$$T_S = \beta_r / V_S \quad (13)$$

无人机飞行速度 $V_f$ 、扫描纵深 $L_{\text{FOV}}$ 、纵深时间 $T_{\text{FOV}}$ 三者之间的关系为

$$T_{\text{FOV}} = L_{\text{FOV}} / V_f \quad (14)$$

为使侦察效率最大,应遵循不漏扫、重复扫描区域最小的原则,如图6(a)所示。因此,光电载荷从右极限向左极限扫描,然后再从左极限向右极限扫描,时间应等于纵深时间 $T_{\text{FOV}}$ ,即:

$$T_{\text{FOV}} = 2 \times T_S \quad (15)$$

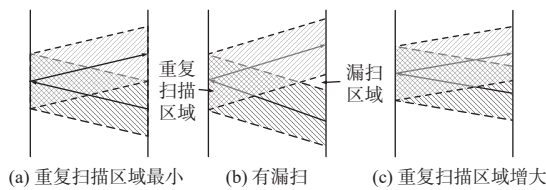


图6 扫描时在地面上产生的简化带状示意图

Fig. 6 Simplified banded diagram produced on ground during scanning

如果式(14)不成立,则会出现以下两种情况:

1)  $T_{\text{FOV}} < 2 \times T_S$ , 该情况下会漏扫,如图6(b)所示, $T_{\text{FOV}}$ 越小,漏扫的区域越大;

2)  $T_{\text{FOV}} > 2 \times T_S$ , 该情况下重复扫描区域增大,如图6(c)所示, $T_{\text{FOV}}$ 越大,重复扫描区域越大,侦察效率越低。

在实际应用中,要保证 $T_{\text{FOV}} \geq 2 \times T_S$ ,即不出现漏扫情况。根据式(13)、式(14)和式(15)可推导出:

$$\beta_r = \frac{V_S \times L_{\text{FOV}}}{2 \times V_f} \quad (16)$$

扫描速度对图像质量和侦察效率有影响。自动扫描时,积分时间内成像在传感器光敏面上的场景有像移,导致图像模糊,降低了图像质量<sup>[17-18]</sup>。扫描越快,侦察效率越高,但图像质量越差,识别率越低,虚警率越高,因此,需要合理设置扫描速度。

## 2.7 原始扫描宽度 $W$ 和修正扫描宽度 $W'$

自主侦察时,在光电载荷自动扫描与无人机直线飞行共同作用下,会扫描一个带状区域(简称扫描带)。为了简化计算,扫描带指传感器光轴的扫描覆盖范围,而不是传感器整个瞬时视场的扫描覆盖范围。

如图7所示,根据中心目标距离 $D_{\text{center}}$ 和扫描角度范围 $\beta_r$ ,计算原始扫描宽度 $W$ 为

$$W = 2 \times D_{\text{center}} \times \tan \frac{\beta_r}{2} \quad (17)$$

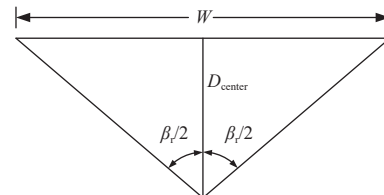


图7 扫描宽度计算示意图

Fig. 7 Calculation sketch of scanning width

实际扫描带两端并不是整齐的,而是锯齿状的,如图8所示。为了避免由于锯齿问题出现漏扫的情况,在实际扫描时,可以把2个扫描带之间进行重叠。假设重叠率为 $p$ ,那么考虑重叠率之后的修正扫描宽度 $W'$ 为

$$W' = W \times (1 - p) \quad (18)$$

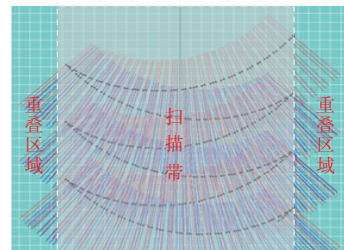


图8 实际产生的扫描带

Fig. 8 Actual generated scanning band

### 2.8 航路路程 $Q$ 和侦察时间 $T_R$

假设对一个指定矩形区域 $j \times k$ 进行侦察,那么需要计算侦察该区域所需的时间,即侦察时间 $T_R$ 。首先对无人机规划“S”形的航路,航路之间的间距设置为修正扫描宽度 $W'$ ,如图9所示。规划完航路之后,计算航路路程 $Q$ ,最后结合无人机飞行速度 $V_f$ ,计算侦察时间 $T_R$ :

$$T_R = Q/V_f \quad (19)$$

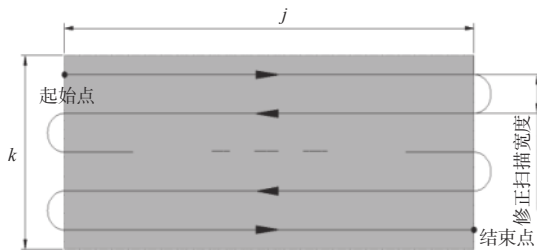


图9 无人机航路规划

Fig. 9 UAV route planning

需要注意的是,无人机在“S”形航路两端掉头过程中,由于无人机位置与扫描区域位置存在偏差(其偏差大小为投影距离 $L_D$ ),容易在侦察区域边缘出现漏扫问题,可结合参数 $L_D$ 延长侦察区域外的航路,以保证不漏扫。为了简化计算,航路掉头的飞行时间不计入侦察时间内。

### 2.9 计算过程特点分析

计算过程有如下特点:

- 1) 涉及的参数多,约束条件多,需要在符合各参数约束条件前提下,计算出最佳自主侦察参数。
- 2) 由于不同侦察系统的约束条件不一定相同,因此哪些参数是已知的,哪些参数是计算结果,以及计算顺序等情况也不尽相同,需要根据实际情况进行分析。
- 3) 在建立数学模型时,对实际应用中的复杂情况进行了简化,例如把实际产生的扫描带两端类似锯齿的形状简化为直线,计算侦察时间时不考虑无人机在航路两端掉头时的飞行时间等。

## 3 仿真计算

以某无人机侦察系统为例,假设对 $5\,000\text{ m} \times 5\,000\text{ m}$ 的矩形区域执行自主侦察任务,在达到自动识别最少目标像素数要求、侦察区域全覆盖的前提下,计算所需的侦察时间。已知条件有:目标尺寸 $2.3\text{ m} \times 2.3\text{ m}$ ;传感器参数为连续变焦,视场 $3^\circ \times 1.7^\circ \sim 55^\circ \times 30.9^\circ$ ,分辨率 $1\,920\text{ pixel} \times 1\,080\text{ pixel}$ ,

像元尺寸 $3.45\text{ }\mu\text{m}$ ,自动识别要求最少目标像素为 $20\text{ pixel} \times 20\text{ pixel}$ ,重叠率 $p$ 为10%。

根据建立的数学模型进行仿真计算,得到了3个方案,如表2所示。

表2 自主侦察仿真计算的3个方案

Table 2 Three schemes for simulation calculation of autonomous reconnaissance

序号	参数名称	方案1	方案2	方案3
1	飞行高度 $H_f/\text{m}$	300	300	600
2	飞行速度 $V_f/\text{m/s}$	35	35	35
3	视场角 $\theta_H \times \theta_V/(\text{ }^\circ)$	$5.5 \times 3.09$	$3 \times 1.75$	$5 \times 3.09$
4	俯仰角 $\alpha/(\text{ }^\circ)$	-9.59	-9.59	-19.4
5	扫描角度范围 $\beta_r/(\text{ }^\circ)$	14	7	7
6	扫描角速度 $V_S/(\text{ }^\circ/\text{s})$	1.7	1.7	1.7
7	中心目标距离 $D_{\text{center}}/\text{m}$	1 800	1 800	1 800
8	目标距离阈值 $D_{\text{th}}/\text{m}$	2 300	4 216	2 300
9	最大目标距离 $D_{\text{max}}/\text{m}$	2 144	1 973	1 950
10	纵深时间 $T_{\text{FOV}}/\text{s}$	17.1	9.1	8.4
11	扫描单程时间 $T_S \times 2/\text{s}$	16.4	8.2	8.2
12	修正扫描宽度 $W'/\text{m}$	393	197	197
13	侦察时间 $T_R/\text{s}$	1 857	3 714	3 714

经过对3个方案进行分析,得到如下结论:

- 1) 这3个方案都满足了 $D_{\text{max}} \leq D_{\text{th}}$ 、 $T_{\text{FOV}} \geq 2 \times T_S$ ,说明满足自动识别对目标像素数的要求,没有漏扫,并且也说明方案并不是唯一的。
- 2) 方案2和方案1对比可知,视场越小,目标的像素数就越大,识别率越高,但是航路间距也越小,侦察时间越长。
- 3) 方案3和方案1对比可知,飞行高度不同,导致俯仰角、扫描角度范围、目标像素数、航路间距等参数也不同。飞行高度越大,扫描角度越小,航路间距越小,侦察时间越长。
- 4) 方案2和方案3对比可知,虽然侦察时间相同,但是参数方案不同,最终的实际侦察效果也不一样。

总之,3个方案各有特点,方案1的侦察时间最短;方案2的目标距离阈值最大,相同距离时识别目标的像素数最多,识别率最高;方案3的俯仰角绝对值最大,侦察时目标不容易被遮挡。因此,应用时根据实际情况计算参数方案。

## 4 结论

本文研究了无人机载光电载荷的自主侦察模

式主要参数的计算方法,分析了各参数的意义及各个参数之间的相互影响,进行了仿真计算,并对仿真结果进行了分析,对自主侦察模式的应用起到了理论指导作用。但是由于实际情况的复杂性,有些问题尚未展开分析,比如扫描带的重叠率设置多大合适,扫描角速度对图像模糊的影响程度如何,光电载荷横滚安装状态的参数计算,多目标识别的策略等,这些问题可作为下一步的研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 杜薇,陈飞. 侦察无人机协同运用的关键技术[J]. *电子信息对抗技术*, 2018, 33(1): 12-17.  
DU Wei, CHEN Fei. Key technologies of collaborative application with reconnaissance UAVs[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2018, 33(1): 12-17.
- [2] 张安,曹璐,郭凤娟. 无人作战飞机侦察/打击一体化自主控制关键技术探讨[J]. *电光与控制*, 2010, 17(1): 1-6.  
ZHANG An, CAO Lu, GUO Fengjuan. Survey of key technologies of autonomous control on integration of reconnaissance and attack forUCAVs[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(1): 1-6.
- [3] JAGANNATH J, JAGANNATH A, FURMAN S, et al. Deep learning and reinforcement learning for autonomous unmanned aerial systems: roadmap for theory to deployment[J/OL]. *Engineering Computer Science*, 2020, 984:25-82[2023-03-16]. <https://www.semanticscholar.org>.
- [4] 赵燕,龙国庆. 侦察/打击一体化无人机自动目标识别研究[J]. *中国人民解放军电子工程学院学报*, 2014, 33(2): 67-70.  
ZHAO Yan, LONG Guoqing. On the automatic target recognition for the reconnaissance/strike integration system of UAV[J]. *Journal of PLA Electronic Engineering Institute*, 2014, 33(2): 67-70.
- [5] 张中伟,付泐,刘辉. 无人机自动目标识别算法研究综述[C]//第四届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2019.  
ZHANG Zhongwei, FU Yang, LIU Hui. Overview of UAV automatic target recognition algorithm[C]//Fourth China aviation science and technology conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [6] 吕攀飞,王曙光. 无人机作战平台的智能目标识别方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 116-122.  
LÜ Panfei, WANG Shuguang. Intelligent target recognition method of unmanned aerial vehicle combat platform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 116-122.
- [7] 李伦平,刘达. 机载光电侦察吊舱综合信息处理技术发展与分析[J]. *光学与光电技术*, 2017, 15(6): 29-35.  
LI Lunping, LIU Da. Development and analysis of synthetic information process technology for airborne electro-optical reconnaissance pod[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(6): 29-35.
- [8] POUYANFAR S, SADIQ S, YAN Y, et al. A survey on deep learning: algorithms, techniques, and applications[J]. *Acm Computing Surveys*, 2019, 51(5): 92-1-36.
- [9] SRIVASTAVA S, NARAYAN S, MITTAL S. A survey of deep learning techniques for vehicle detection from UAV images[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2021(1): 1-27.
- [10] 刘士建,金璐. 自动目标识别算法发展综述[J]. *电光与控制*, 2016, 23(10): 1-6.  
LIU Shijian, JIN Lu. A survey on algorithms for automatic target recognition[J]. *Electronics Optics & Control*, 2016, 23(10): 1-6.
- [11] 陆红强,王俊林,王亚楠,等. 基于深度聚类的目标细粒度分类方法[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 669-675.  
LU Hongqiang, WANG Junlin, WANG Ya'nan, et al. Fine-grained target classification method based on deep clustering[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 669-675.
- [12] 陶磊,洪韬,钞旭. 基于YOLOv3的无人机识别与定位追踪[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(4): 463-468.  
TAO Lei, HONG Tao, CHAO Xu. Drone identification and location tracking based on YOLOv3[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(4): 463-468.
- [13] 蔡伟,徐佩伟,杨志勇,等. 复杂背景下红外图像弱小目标检测[J]. *应用光学*, 2021, 42(4): 643-650.  
CAI Wei, XU Peiwei, YANG Zhiyong, et al. Dim-small targets detection of infrared images in complex backgrounds[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 643-650.
- [14] 王宁,李哲,梁晓龙,等. 无人机自主目标识别与定位应用研究[J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29(5): 215-219.  
WANG Ning, LI Zhe, LIANG Xiaolong, et al. Research on application of UAV autonomous target recognition and positioning[J]. *Computer Measurement & Control*, 2021, 29(5): 215-219.

- [15] 李良福, 陈卫东, 高强, 等. 基于深度学习的光电系统智能目标识别[J]. *兵工学报*, 2022, 43(1): 162-168.  
LI Liangfu, CHEN Weidong, GAO Qiang, et, al. Deep learning-based intelligent target recognition technology for electro-optical system[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(1): 162-168.
- [16] 张志明, 黄种荣. 无人机光电载荷主要战技指标的需求分析与设计[J]. *舰船光学*, 2011, 47(2): 1-4.  
ZHANG Zhiming, HUANG Zhongrong. Technical specification oriented demand analysis and design consideration for UAV optronic payload[J]. *Ship Optics*, 2011, 47(2): 1-4.
- [17] 袁涛, 陈建发, 潘枝峰, 等. 光电侦察系统分辨能力研究分析[J]. *电光与控制*, 2019, 26(6): 85-91.  
YUAN Tao, CHEN Jianfa, PAN Zhifeng, et, al. Analysis on resolution of electro-optical reconnaissance system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(6): 85-91.
- [18] 朱华征, 范大鹏, 马尔玺, 等. 载体运动对光电成像系统性能的影响分析[J]. *红外技术*, 2008, 30(10): 586-590.  
ZHU Huazheng, FAN Dapeng, MA Erxi, et, al. The effect of the carrier movement on the photoelectric imaging system performance[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(10): 586-590.