

巡飞弹载光电对地扫描方案研究

李佳佳 朱镭 赵雪晨 刘虎 闫伟亮 吴妍 姜伟 龙海波 侯瑞

Research on ground scanning scheme of electro-optic payload for loitering missile

LI Jiajia, ZHU Lei, ZHAO Xuechen, LIU Hu, YAN Weiliang, WU Yan, JIANG Wei, LONG Haibo, HOU Rui

引用本文:

李佳佳, 朱镭, 赵雪晨, 等. 巡飞弹载光电对地扫描方案研究[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 49–54. DOI: 10.5768/JAO202546.0101003

LI Jiajia, ZHU Lei, ZHAO Xuechen, et al. Research on ground scanning scheme of electro-optic payload for loitering missile[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 49–54. DOI: 10.5768/JAO202546.0101003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0101003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型无人机载横滚-俯仰结构光电载荷前向对地扫描技术研究

Forward-ground scanning technology for small UAV-borne roll-pitch structure electro-optic payload

应用光学. 2024, 45(1): 1–7 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0101001>

巡飞弹目标定位精度分析

Target location accuracy analysis on loitering missile platform

应用光学. 2022, 43(4): 592–598 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401002>

一种光电载荷非线性隔振装置的研究

Research on nonlinear vibration isolation device for electro-optic payload

应用光学. 2021, 42(1): 16–22 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101003>

无人机载光电载荷自主侦察的参数计算与分析

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

应用光学. 2024, 45(5): 930–936 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501007>

无人机光电设备对地目标单站无源定位方法

Method of single-station passive location to ground target by UAV photoelectric equipment

应用光学. 2022, 43(4): 599–610 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401003>

机载光电系统目标定位大气折射修正研究

Research on atmospheric refraction correction of airborne electro-optical system target location

应用光学. 2022, 43(4): 641–647 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0049-06

引用格式: 李佳佳, 朱镭, 赵雪晨, 等. 巡飞弹载光电对地扫描方案研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 49-54.

LI Jijia, ZHU Lei, ZHAO Xuechen, et al. Research on ground scanning scheme of electro-optic payload for loitering missile[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 49-54.



在线阅读

巡飞弹载光电对地扫描方案研究

李佳佳¹, 朱镭¹, 赵雪晨¹, 刘虎¹, 闫伟亮¹, 吴妍¹, 姜伟¹, 龙海波², 侯瑞¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 光电载荷技术是巡飞弹的关键技术之一。提出了一种适用于方位-俯仰结构光电载荷的对地扫描方案, 综合考虑巡飞弹在扫描地面目标过程中光电传感器参数、自身姿态以及运动信息等关键因素对扫描视场的影响, 建立了巡飞弹飞行高度、速度、光电载荷框架角度、扫描角速度以及光电传感器视场角与扫描视场覆盖范围之间的数学模型。推导出了对地无缝扫描方案, 给出了实现无缝扫描的约束条件, 并计算了不同飞行速度及扫描角速度下的无缝扫描幅宽。通过仿真对比分析了不同飞行和扫描参数下的扫描视场覆盖范围, 结果表明设计的巡飞弹载光电对地扫描方案能够满足扫描视场无盲区的要求, 且巡飞弹飞行速度与光电载荷扫描角速度间存在最优匹配关系。

关键词: 巡飞弹; 光电载荷; 方位-俯仰结构; 扫描方案

中图分类号: TN209

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0101003

Research on ground scanning scheme of electro-optic payload for loitering missile

LI Jijia¹, ZHU Lei¹, ZHAO Xuechen¹, LIU Hu¹, YAN Weiliang¹, WU Yan¹, JIANG Wei¹,
LONG Haibo², HOU Rui¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Electro-optic payload technology is one of the core technologies of loitering missiles. A ground scanning scheme for the electro-optic payload with azimuth-pitch structure of loitering missiles was proposed to comprehensively consider the key factors affecting the scanning field of view, such as the parameters of the photoelectric sensor, the missile's attitude, and motion information during the process of scanning for ground targets. A mathematical model was established between the flight altitude, velocity, frame angles of electro-optic payload, scanning angular velocity, field of view angle and coverage of scanning field. A seamless ground scanning scheme was derived, the constraints for the seamless scanning scheme was given, and the seamless scanning widths under different flight speeds and scanning angular velocities were calculated. The coverage of the scanning field under different flight and scanning parameters was analyzed by simulation. The results show that the designed ground scanning scheme of electro-optic payload can meet the requirements of no blind area in the scanning field of view, and there is an optimal matching relationship between the flight speed of the loitering missile and the scanning angular velocity of the electro-optic payload.

Key words: loitering missile; electro-optic payload; azimuth-pitch structure; scanning scheme

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 某预研项目

作者简介: 李佳佳 (1995—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光电产品结构设计研究。E-mail: lijiajia163mail@163.com

通信作者: 朱镭 (1980—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光电总体设计研究。E-mail: zhulei_cc@163.com

引言

巡飞弹作为弹药技术与无人机技术有机结合的产物,集两者的优势于一身,可实现目标侦察、识别、锁定、跟踪、定位、引导、打击、毁伤评估等多项作战任务^[1-3]。目标侦察是其中重要的一环,巡飞弹通过弹载光电载荷执行目标侦察任务,相较其他光电载荷,其尺寸较小,为了兼顾探测识别距离,其选用的光电传感器视场角较小,导致其对地瞬时视场覆盖范围小,因此需设计扫描方案以增加视场覆盖范围。合理的对地扫描方案可以提高侦察效率,增加对目标的截获概率。

目前针对巡飞弹载光电对地扫描方案的研究较少,文献[4]分析研究了巡飞弹导引头及制导控制关键技术,对比分析了方波和正弦扫描方案,结果表明前者在扫描区域宽度上具有明显优势,而后者对地面扫描区域的覆盖更加均匀。文献[5]针对导弹导引头瞬时视场角小的缺点,提出了定向扫描技术,对比研究了3种扫描方式。文献[6]设计了图像制导导弹一维搜索规律的俯仰和偏航搜索信号,消除了其与导引搜索结合使用时的不对称现象。针对图像导引头搜索方案的研究相对较多^[7-12],文献[13]对比讨论了电视导引头的三种扫描方案:连续往复扫描、单向扫描和分段凝视扫描,提出了最大停留时间平均值和扫描角速度两个评价指标,并选取相同的已知参数对三种扫描方案进行了设计,设计结果表明单向扫描方案优于其他两个方案。文献[14]研究了电视制导攻击型无人机导引头搜索规律,推导出一种电视导引头搜索方案,提高了目标截获概率。文献[15]研究发现采用侧向一维搜索方案时,可以减小搜索过程中图像移动、变化对识别目标带来的不利影响。文献[16]提出了一种基于横滚-俯仰结构光电载荷的前向对地宽区域扫描的技术方案。

巡飞弹侦察过程中,光电载荷搜索视场的覆盖范围受扫描方案及巡飞弹自身运动的影响。一方面,光电载荷的瞬时视场较小,如果光电载荷光轴固定,则随巡飞弹飞行而形成的搜索视场横向宽度较窄,需要更长的飞行路径才能有效覆盖潜在目标区域,侦察效率低;另一方面,光电载荷光轴扫描搜索可以增加搜索视场的横向宽度,但受巡飞弹自身飞行运动的影响易造成搜索盲区,可能漏扫目标。因此,必须结合巡飞弹飞行运动设计合理有效的光电载荷扫描方案,尽可能扩大搜索

视场的覆盖范围,提高侦察效率。

文中涉及参数的单位除有特殊说明外分别取:长度单位米(m),角度单位度(°),时间单位秒(s),速度单位m/s,角速度单位°/s。

1 光电载荷对地瞬时视场

巡飞弹的目标搜索识别能力与巡飞弹飞行高度、光电载荷作用距离、俯仰角(水平前视为0°,下视为正)、光电传感器视场角及分辨率有直接关系。通常而言,飞行高度越高、作用距离越远、俯仰角越小、视场角越大,光电载荷的瞬时视场就越大,对地搜索的覆盖面积也越大。然而考虑到分辨率的限制,视场大小与目标成像像素数成反比,视场越大则目标成像分辨率越低,导致目标难以识别。因此需综合考虑目标的搜索与识别,以期达到理想的效果。

图1为某一时刻光电载荷对地成像示意图, L 为光电载荷距成像视场中心点的距离,也称作用距离,其可表示为下式

$$L = \frac{H}{\sin(\alpha)} \quad (1)$$

式中: H 为巡飞弹飞行高度; α 为光电载荷俯仰角。视场近点和远点沿水平面到光电载荷地面投影点的距离 L_n 和 L_r 分别为

$$\begin{cases} L_n = \frac{H}{\tan(\alpha + \gamma/2)} \\ L_r = \frac{H}{\tan(\alpha - \gamma/2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, γ 为纵向视场角。

如图1所示,光电载荷对地成像视场为梯形。其中,尺寸 B 的计算公式可根据公式(2)推导得到。尺寸 A 和尺寸 C 可基于空间坐标系计算得到,主要步骤为:1)建立空间坐标系,获得视场四个顶点处的视线向量;2)计算视线向量与地面的交点;3)计算交点间的距离。计算可得光电载荷对地成像视场的尺寸为

$$\begin{cases} A = \frac{2H \tan(\beta/2)}{\sin(\alpha) + \tan(\gamma/2) \cos(\alpha)} \\ B = L_r - L_n = \frac{H}{\tan(\alpha - \gamma/2)} - \frac{H}{\tan(\alpha + \gamma/2)} \\ C = \frac{2H \tan(\beta/2)}{\sin(\alpha) - \tan(\gamma/2) \cos(\alpha)} \end{cases} \quad (3)$$

式中, β 为横向视场角。

由公式(3)分析可知,影响光电载荷对地成像瞬时视场大小(A 、 B 、 C)的因素包括飞行高度、俯

仰角、横向视场角和纵向视场角。飞行高度越高、横向视场角越大, 对地瞬时视场的横向尺寸(A 、 C)越大; 飞行高度越高、俯仰角越小、纵向视场角越大, 对地瞬时视场的纵向尺寸(B)越大。

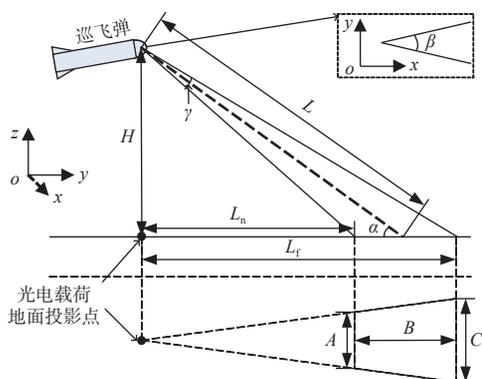


图1 光电载荷对地成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electro-optic payload to ground imaging

2 无缝扫描方案

对于俯仰-方位两轴光电载荷, 俯仰角大小固定, 方位往复匀速扫描搜索, 不同扫描角速度下光电载荷对地视场覆盖范围如图2所示。以光电载荷起始位置处的地面投影点为坐标系原点 O , 飞行方向为 y 轴, 与之垂直的方向为 x 轴建立二维笛卡尔坐标系 xOy 。图2中展示了两个扫描周期, 包含一个去程(从左向右)和一个回程(从右向左), 后续过程与之相同。

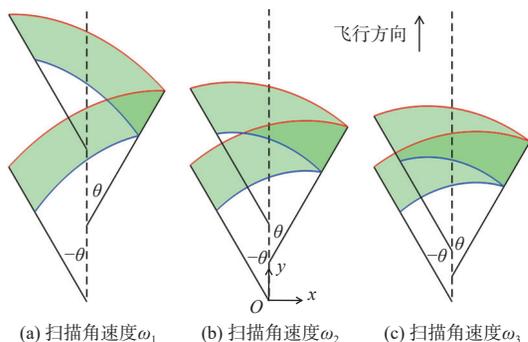


图2 不同扫描角速度下的视场覆盖范围

Fig. 2 Field of view coverage at different scanning angular velocities

图2中, 方位扫描范围为 $-\theta \sim \theta$, 两条曲线分别为视场近点和远点随光电载荷扫描形成的运动轨迹, 两者之间的区域即为视场覆盖范围。图2(a)~(c)中扫描角速度 ω 依次增大, 即 $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ 。对

比可以看到, 当扫描角速度较小时(图2(a)), 相邻视场间存在较大间隙, 无法形成连续的视场覆盖域, 容易漏扫目标。随着扫描角速度的增大, 相邻视场重合区域增加, 可形成连续的视场覆盖域。图2(b)和(c)所示情况均可实现无缝扫描, 区别在于两者的无缝扫描幅宽不同。

注意, 为了简化问题此处忽略了光电传感器自身的视场宽度, 只考虑视场纵向中心线扫过的区域, 带来的影响是图2所示的视场覆盖区域的左右边界处各少了半个视场宽度。由于视场角通常较小, 且边界处通常无法形成连续的视场覆盖区域, 因此这样处理的影响很小。

2.1 无缝扫描约束条件推导

观察图2可知, 能否形成无缝扫描的决定性条件是相邻视场边界交点的位置, 因此首先分别建立视场远点和视场近点的轨迹曲线方程, 视场远点曲线和视场近点曲线的参数方程分别为

$$\begin{cases} x = L_f \sin(\theta_{\text{temp}}) \\ y = vt + L_f \cos(\theta_{\text{temp}}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = L_n \sin(\theta_{\text{temp}}) \\ y = vt + L_n \cos(\theta_{\text{temp}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: v 为巡飞弹飞行速度; t 为扫描过程经历的时间; θ_{temp} 为角度变量, 可表示为

$$\theta_{\text{temp}} = \begin{cases} -\theta + (\omega t - 2n\theta) \text{ 去程} \\ \theta - (\omega t - 2n\theta) \text{ 回程} \end{cases} \quad (6)$$

式中, n 为周期计数参数, 可通过下式计算

$$n = \text{floor}(\omega t / 2\theta) \quad (7)$$

式中, $\text{floor}()$ 为向下取整函数, 例如 $\text{floor}(1.6)=1$ 。

观察可知, 当相邻两周期远点和近点曲线交点位于左半区域时, 能实现无缝扫描。如图3所示, 当临界扫描角速度对应的远近点曲线交点位于 y 轴上, 设此时的扫描角速度为 $\underline{\omega}$, 则其满足下式

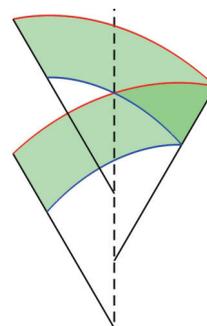


图3 $\omega = \underline{\omega}$ 时的视场覆盖范围

Fig. 3 Field of view coverage at $\omega = \underline{\omega}$

$$v \frac{\theta}{\omega} + L_f = v \frac{3\theta}{\omega} + L_n \quad (8)$$

求解上式可得

$$\underline{\omega} = \frac{2\theta v}{L_f - L_n} \quad (9)$$

由此可得实现无缝扫描的约束条件为 $\omega > \underline{\omega}$ 。

2.2 无缝扫描幅宽计算

无缝扫描条件下,扫描幅宽的计算可分为如图4所示的三种情况。当相邻扫描周期两视场边界交点位于视场左下角点时,如图4(b)所示,此时的扫描角速度 ω_b 满足如下关系

$$\begin{cases} L_f \sin(-\theta + \omega_b t) = L_n \sin(-\theta) \\ vt + L_f \cos(-\theta + \omega_b t) = v \frac{4\theta}{\omega_b} + L_n \cos(-\theta) \end{cases} \quad (10)$$

上述方程组中,未知数为 t 和 ω_b ,可采用数值方法求解,如二分法或牛顿法。此时的无缝扫描幅宽 W 为

$$W = 2L_n \sin(\theta) \quad (11)$$

当 $\underline{\omega} < \omega < \omega_b$ 时,相邻扫描周期的视场远点曲线和视场近点曲线相交,如图4(a)所示,联立两曲线方程可得

$$\begin{cases} L_f \sin(-\theta + \omega t_1) = L_n \sin[\theta - (\omega t_2 - 2\theta)] \\ vt_1 + L_f \cos(-\theta + \omega t_1) = vt_2 + L_n \cos[\theta - (\omega t_2 - 2\theta)] \end{cases} \quad (12)$$

式中未知数为 t_1 和 t_2 ,求解后可得交点位置,进而得到扫描幅宽

$$W = 2L_f \sin(\theta - \omega t_1) \text{ or } 2L_n \sin[(\omega t_2 - 2\theta) - \theta] \quad (13)$$

当 $\omega_b < \omega$ 时,前一扫描周期的视场远点曲线与当前扫描周期的视场左边线相交,如图4(c)所示,此时左边线的参数方程为

$$\begin{cases} x = L_{var} \sin(-\theta) \\ y = v \frac{4\theta}{\omega} + L_{var} \cos(-\theta), \quad L_n \leq L_{var} \leq L_f \end{cases} \quad (14)$$

式中, L_{var} 为变量参数。将上式与远点曲线方程(公

式(4))联立可得

$$\begin{cases} L_f \sin(-\theta + \omega t) = L_{var} \sin(-\theta) \\ vt + L_f \cos(-\theta + \omega t) = v \frac{4\theta}{\omega} + L_{var} \cos(-\theta) \end{cases} \quad (15)$$

式中未知数为 t 和 L_{var} ,求解后可得交点位置,进而得到扫描幅宽

$$W = 2L_f \sin(\theta - \omega t) \text{ or } 2L_{var} \sin(\theta) \quad (16)$$

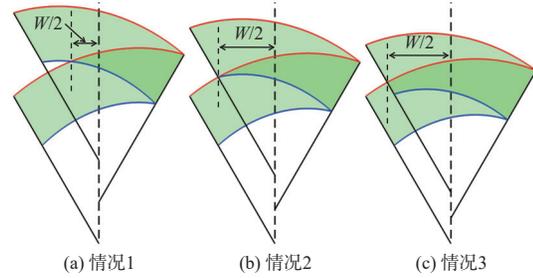


图4 无缝扫描幅宽计算

Fig. 4 Calculation of seamless scanning width

3 建模仿真

本节基于 MATLAB 进行建模仿真,探究扫描幅宽与飞行参数及扫描参数间的关系,为巡飞弹扫描方案的设计提供参考。设巡飞弹飞行高度 $H = 1000$ m,飞行速度 $v = 50$ m/s,光电载荷俯仰角 $\alpha = 30^\circ$,方位扫描范围 $\pm\theta = \pm 30^\circ$,视场角 $\beta \times \gamma = 11.7^\circ \times 8.8^\circ$ 。

联立公式(2)和(9),计算得到实现无缝扫描的临界角速度 $\underline{\omega} = 4.8^\circ/\text{s}$ 。上述飞行及扫描参数下可实现无缝扫描的约束条件为 $\omega > \underline{\omega} = 4.8^\circ/\text{s}$ 。根据公式(10),计算得到相邻两周期视场交点位于角点时的扫描角速度为 $\omega_b = 8.0^\circ/\text{s}$ 。

取不同的扫描角速度 ω ,参考 2.2 节建立的无缝扫描幅宽计算公式,得到如表 1 所示的不同扫描角速度对应的无缝扫描幅宽。可以看到,随着扫描角速度的增大,无缝扫描幅宽逐渐增大。

表 1 不同扫描角速度下的无缝扫描幅宽

Table 1 Seamless scanning widths at different scanning angular velocities

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
扫描角速度/(°/s)	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
无缝扫描幅宽/m	81	274	476	688	915	1166	1460	1496	1528	1556	1582

图 5 给出了无缝扫描幅宽随扫描角速度的变化曲线,可以看到,在扫描角速度增大初期,无缝扫描幅宽大幅增加,当扫描角速度为 $\omega_b = 8.0^\circ/\text{s}$ 时

出现了一个拐点,此后的无缝扫描幅宽的增大速度明显降低。考虑到扫描角速度的增大将降低成像质量,综合权衡侦察效率和成像质量,本文建议

的扫描角速度取值范围为 $\omega < \omega \leq \omega_b$ 。

图6为不同飞行速度下无缝扫描幅宽随扫描角速度的变化规律。可以看到,不同飞行速度下的曲线变化趋势基本一致,随着飞行速度的增大,曲线整体趋于向右平移,形成无缝扫描的最小扫描角速度 ω 和无缝扫描临界角速度 ω_b 均增大。扫描角速度相同的情况下,飞行速度越大,无缝扫描幅宽越小,原因是飞行速度增大使得相邻两视场间的间隙扩大,重合区域减小,对应的无缝扫描幅宽减小。

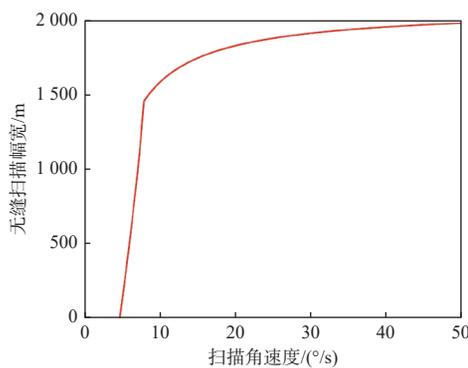


图5 无缝扫描幅宽随扫描角速度的变化规律

Fig. 5 Seamless scanning width varies with scanning angular velocity

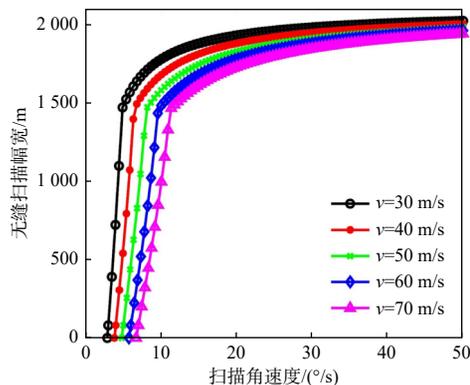


图6 不同飞行速度下无缝扫描幅宽随扫描角速度的变化规律

Fig. 6 Seamless scanning width varies with scanning angular velocity at different flight speeds

图7为不同扫描角速度下无缝扫描面积随飞行速度的变化规律。可以看到,给定扫描角速度,随飞行速度的增大,单位时间内扫描面积(即扫描效率)先增大后减小,存在一个最大值点,这说明扫描角速度与飞行速度间存在最优匹配关系。飞行速度不变的情况下,扫描角速度越大,单位时间内的无缝扫描面积越大。

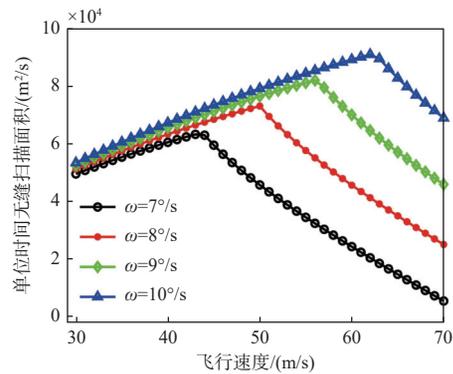


图7 不同扫描角速度下无缝扫描面积随飞行速度的变化规律

Fig. 7 Seamless scanning area varies with flight speed at different scanning angular velocities

注意到,公式(10)、(12)、(15)均为非线性方程组,因此无法给出无缝扫描幅宽的解析表达式,进而也无法给出扫描效率(单位时间内扫描面积)的解析表达式。因此在扫描方案设计中,可先计算得到类似图5~图7的变化规律曲线图,然后进行参数优选。

4 结论

本文提出了一种适用于巡飞弹载光电的对地扫描方案。基于巡飞弹飞行高度、飞行速度等飞行参数和光电载荷框架角、视场角、扫描角速度等扫描参数建立了计算视场覆盖范围的数学模型,推导给出了实现无缝扫描方案的约束条件。基于所构建的数学模型,可推导出不同飞行和扫描参数下的无缝扫描方案,并计算得到对应的无缝扫描幅宽。仿真分析验证了所提出的无缝扫描方案的有效性。对比发现,无缝扫描幅宽随扫描角速度的增大而增大,且增大速度逐渐减小,因此综合考虑扫描效率和成像质量给出了扫描角速度的建议取值范围。此外,仅就扫描效率来看,飞行速度与扫描角速度间存在最优匹配关系。综合考虑模型的准确性和易用性,本文只引入了影响侦察的主要因素,在未来工作中可以考虑引入探测器响应速度、成像质量等因素来进一步完善模型。

参考文献:

- [1] 庞艳珂, 韩磊, 张民权, 等. 攻击型巡飞弹技术现状及发展趋势[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 149-152.
PANG Yanke, HAN Lei, ZHANG Mingquan, et al. Status and development trends of loitering attack missiles[J].

- Acta Armamentarii, 2010, 31(2): 149-152.
- [2] 刘召庆, 张芳, 朱镭, 等. 巡飞弹目标定位精度分析[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 592-598.
LIU Zhaoqing, ZHANG Fang, ZHU Lei, et al. Target location accuracy analysis on loitering missile platform[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 592-598.
- [3] 李超, 李浩, 苏号然. 国外小型巡飞弹发展分析及其预警系统应对策略研究[J]. *空天防御*, 2023, 6(3): 58-65.
LI Chao, LI Hao, SU Haoran. Analysis of the development of foreign small loitering munitions and their early warning system response strategy[J]. *Air & Space Defense*, 2023, 6(3): 58-65.
- [4] 李怀涛. 巡飞弹导引头及制导控制技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
LI Huaitao. Research on seeker, guidance and control technology for loitering munition[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [5] 吴文超, 黄长强, 王志军, 等. 某型导弹导引头定向扫描技术[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2010, 11(3): 30-34.
WU Wenchao, HUANG Changqiang, WANG Zhijun, et al. Research on beamed scan technology for a missile seeker[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2010, 11(3): 30-34.
- [6] 王晓芳, 林海. 图像制导弹搜索规律设计与仿真研究[J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(10): 854-857.
WANG Xiaofang, LIN Hai. Design and simulation of searching law for image guided missile[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(10): 854-857.
- [7] 张鹏飞, 朱鸿翔, 王萧. 几种扫描搜索规律的对比研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(2): 45-47.
ZHANG Pengfei, ZHU Hongxiang, WANG Xiao. The compare of several scan model[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(2): 45-47.
- [8] 唐学军, 江言林, 王海滨. 红外成像制导弹搜捕概率仿真研究[J]. *舰船电子工程*, 2009, 29(6): 132-135.
TANG Xuejun, JIANG Yanlin, WANG Haibin. Study on simulation of scout & capture probability of infrared imaging guided missile[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(6): 132-135.
- [9] 张晓阳, 徐琰珂, 付奎生. 红外成像导引头视场选择及搜索策略设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3866-3871.
ZHANG Xiaoyang, XU Yanke, FU Kuisheng. Field of view selection and search strategy design for infrared imaging seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3866-3871.
- [10] 赵涛, 卢福刚, 宋羽, 等. 极小瞬时视场导引头目标扫描搜索方法对比[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(1): 16-20.
ZHAO Tao, LU Fugang, SONG Yu, et al. A comparative study on the target-searching methods as of seekers with tiny instantaneous field of view[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(1): 16-20.
- [11] 徐丹, 彭明焱, 徐琰珂. 红外成像导引头搜索策略优化设计[J]. *红外技术*, 2017, 39(2): 136-142.
XU Dan, PENG Mingyan, XU Yanke. An optimal design of search strategy for infrared imaging seeker[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(2): 136-142.
- [12] 陆红强, 张璟玥, 刘超, 等. 内埋式光电搜索瞄准指示系统的广域扫描控制技术[J]. *应用光学*, 2023, 44(1): 1-5.
LU Hongqiang, ZHANG Jingyue, LIU Chao, et al. Wide-area scanning control technology of embedded photoelectric search aiming and indication system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 1-5.
- [13] 王子梁, 齐占元. 电视导引头扫描方案的对比研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(2): 305-307.
WANG Ziliang, QI Zhanyuan. Comparison researches on scan modes of television seeker[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(2): 305-307.
- [14] 杨俊鹏, 祝小平. 电视制导攻击型无人机导引头搜索规律研究[J]. *西北工业大学学报*, 2015, 33(5): 827-830.
YANG Junpeng, ZHU Xiaoping. A searching law for seeker for television image guided attack UAV(unmanned aerial vehicle)[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(5): 827-830.
- [15] 陈韵, 王根, 苗昊春, 等. 图像导引头搜索方案研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2018, 38(1): 45-48.
CHEN Yun, WANG Gen, MIAO Haochun, et al. Research on searching scheme of image seeker[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2018, 38(1): 45-48.
- [16] 袁屹杰, 张卫国, 王谭, 等. 小型无人机载横滚-俯仰结构光电载荷前向对地扫描技术研究[J]. *应用光学*, 2024, 45(1): 1-7.
YUAN Yijie, ZHANG Weiguo, WANG Tan, et al. Forward-ground scanning technology for small UAV-borne roll-pitch structure electro-optic payload[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 1-7.