doi:10.11887/j.cn.202004007 http://journal.nudt.edu.cn

不确定环境下无人机区域目标搜索及载荷参数影响*

吴岸平[1,2],郭 正[1],侯中喜[1],鲁亚飞[1]
(1. 国防科技大学 空天科学学院,湖南 长沙 410073;
2. 中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所,四川 绵阳 621000)

摘 要:针对不确定环境下无人机区域搜索问题,建立了实时探测更新的搜索方法,提出了机载光电载荷参数优化配置策略。建立了基于二维离散网格的无人机区域搜索模型,采用概率地图描述目标信息的实时获取与更新;引入不确定度指标、目标网格的重访和网格探测次数控制,建立搜索目标函数;建立了基于粒子群算法的搜索路径滚动优化方法;通过对任务区域平均探测时间步数和误判概率的估计分析,建立了机载光电载荷参数优化配置策略。使用蒙特卡洛方法验证了区域搜索方法的有效性和光电载荷参数配置对搜索效率、误判概率的影响。

关键词:目标搜索;概率地图;路径规划;载荷参数配置
中图分类号:V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)04-035-08

Area target search and payload parameters influence for UAV in uncertain environment

WU Anping[1,2], *GUO Zheng*[1], *HOU Zhongxi*[1], *LU Yafei*[1]
(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: A real-time detecting and updating search strategy was presented for UAV area target search in uncertain environment, and an optimal configuration method of airborne photoelectric load parameters was proposed. An area target search model based on a two-dimensional discrete grid was established, and a probability map was used to describe the real-time acquisition and update of target information. A search objective function was built with the introducing of uncertainty index, revisiting of grid with target and controlling of grid detection times. The search route planning method based on particle swarm optimization was established. Through the estimation and analysis of average detection time and misjudgement probability of the task area, the optimal configuration strategy of airborne photoelectric load parameters was proposed. The Monte Carlo method was used to verify the effectiveness of the area target search method and the effect of photoelectric load parameter configuration on search efficiency and misjudgement probability.

Keywords: target search; probability map; route planning; payload parameters configuration

无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)以其成本低、零人员伤亡、隐蔽性好等特点,在现代战争中被广泛使用。侦察和搜索是目前无人机系统最主要的作战任务,采用无人机对作战区域进行目标搜索和情报侦察已经成为战场信息获取的重要手段[1-3]。

通常无人机在执行搜索任务之前,对任务区域的信息知之甚少,除给定的任务区域地理位置和区域大小外,对搜索目标的位置分布和数量信息并不确定,这就决定了无人机在搜索过程中必须根据实时的探测结果进行在线路径决策。在无人机平台确定的条件下,区域搜索能力的提升,一方面取决于搜索路径决策,另一方面取决于机载光电载荷参数配置决策。无人机在搜索路径上的探测收益越高,越有利于搜索效率的提升;机载光电载荷视场范围越大,探测范围越大,但相应的分辨率会降低,而视场范围减小能提高分辨率,但相应减小探测范围。

国内外学者针对这两方面问题开展了大量研究。在搜索路径决策方面,文献[4-6]研究了基于模型预测控制理论的多无人机协同区域搜索算法。文献[7]提出了一种基于协同进化算法的多

* **收稿日期:**2019-01-06
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61703414)
作者简介:吴岸平(1990—),男,湖南涟源人,博士研究生,E-mail:wuanpingtech@163.com;
郭正(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:guozheng@nudt.edu.cn

无人机协同区域搜索算法,比遗传算法具有更高的搜索效能。文献[8]提出了一种使用未来路径规划和过去路径分享的方法,提高了有通信距离限制下多无人机协同搜索移动目标时的效能。文献[9]提出了一种基于改进概率图的多无人机协同搜索策略,采用基于 Agent 的仿真模型分析了通信条件和目标特性对协同策略的影响。文献[10]提出了一种带信息素回访机制的多无人机协同目标搜索方法,使用蒙特卡洛方法验证了无人机数量、光电载荷探测靶面半径、光电载荷性能对搜索效率的影响。文献[11]设计了一种基于一致性的信息融合策略和基于多旅行商问题求解的搜索路径规划方法,提高了多机协同搜索的效率。文献[12]采用改进快速扩展随机树(Rapid-exploring Random Tree, RRT)的 UAV 实时搜索航迹规划算法,提高了航迹规划效率。在机载光电载荷参数配置决策方面,文献[13]构建了光电载荷对海面目标收容能力分析模型,给出了光电载荷的理论"搜参"范围,并根据海面分辨力计算模型得到针对不同海面目标的实用"搜参"范围。文献[14]提出了红外搜索与跟踪(Infrared Search and Track, IRST)系统探测性能评定的方法,研究了目标发现概率与系统作用距离以及载机速度之间的关系。

国内外研究对不确定环境下的无人机协同搜索方法进行了积极探索,但针对机载光电载荷探测结果的不确定性对搜索效能的影响研究较少,如何选择机载光电载荷视场范围以提升搜索效能是亟待解决的实际问题。针对该问题,本文建立了基于概率网格地图的无人机区域搜索模型,以发现目标和降低任务区域不确定度为搜索性能指标,采用粒子群算法对搜索路径进行滚动优化以完成路径决策;通过机载光电载荷视场范围与探测概率关系模型,结合概率地图更新机理,分析得到区域搜索最佳探测概率及对应的视场范围,并使用蒙特卡洛方法进行了对比仿真验证。

1 不确定环境下区域搜索建模

使用无人机对某一特定任务区域进行侦察搜索,任务想定如图1所示,由于目标的位置分布和数量信息具有不确定性,光电载荷的探测结果也存在着随机性,因此必须实时获取和更新目标信息。采用合理的搜索决策方法和光电载荷参数配置,是保证无人机在尽可能短的时间内降低任务区域的不确定度,并发现尽可能多的目标的关键。

搜索问题建模是进行任务决策的基础,概率

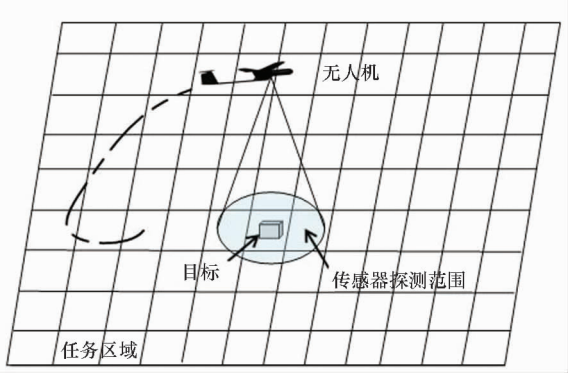

图1 无人机区域搜索任务示意图

Fig. 1 UAV area target search scenario

图模型是图论和概率论按特定方式相结合的成果,是用来处理不确定性数据和知识的主流方法[15]。本文采用二维离散的网格概率地图来描述无人机对当前目标和环境信息的认知,并通过实时更新来反映搜索的动态过程。

1.1 概率地图建模与更新

将任务区域划分为 $L_x \times L_y$ 的离散网格,并将网格按顺序进行编号,$c_{i,j}$ 表示任务区域中第 i 行第 j 列的网格。网格 c 中有没有目标的客观事实用 ω_c 表示,1 代表目标位于网格中,0 代表目标不在网格中。无人机对网格 c 的探测结果用 ξ_c 表示,1 代表在网格中发现目标,0 代表在网格中未发现目标。

无人机载光电载荷的探测概率用 P_d 表示,即 $P_d = P(\xi = 1 \mid \omega = 1)$;虚警概率用 P_f 表示,即 $P_f = P(\xi = 1 \mid \omega = 0)$,且一般情况下探测概率与虚警概率满足 $0 < P_f < 0.5 < P_d < 1$。

网格 c 中 k 时刻的目标存在概率用 $P_c(k)$ 表示,目标存在概率地图的更新实质上是在已知 $k-1$ 时刻网格 c 中目标存在概率 $P_c(k-1) = P_{c,k-1}(\omega_c = 1)$ 的情况下,根据 k 时刻机载光电载荷对网格 c 的探测结果,确定后验概率 $P_c(k) = P_{c,k}(\omega_c = 1 \mid \xi_c)$。根据贝叶斯公式 $P(B_i \mid A) = \dfrac{P(A \mid B_i)P(B_i)}{\sum_j P(A \mid B_j)P(B_j)}$ 推导可得目标存在概率地图的动态更新公式。

$$P_c(k) = \begin{cases} \dfrac{P_d P_c(k-1)}{P_d P_c(k-1) + P_f[1 - P_c(k-1)]} & \xi_c = 1 \\ \dfrac{(1-P_d)P_c(k-1)}{(1-P_d)P_c(k-1) + (1-P_f)[1 - P_c(k-1)]} & \xi_c = 0 \end{cases} \tag{1}$$

1.2 无人机运动模型

无人机在执行侦察任务时,通常只考虑等高飞行的航迹问题,把无人机视作二维空间运动的

质点,用网格编号和航向角的变化来反映无人机的运动过程,k 时刻无人机的状态为$(i(k), j(k), \psi(k))$,受无人机平台的飞行性能约束,在 $k+1$ 时刻无人机的航向只能在 k 时刻航向的基础上左转 45°、直行或右转 45°,则无人机航向角满足:

$$\psi(k+1)=\begin{cases}[\psi(k)-45] \bmod 360 & \sigma=-1\\ \psi(k) & \sigma=0\\ [\psi(k)+45] \bmod 360 & \sigma=1\end{cases} \tag{2}$$

无人机 $k+1$ 时刻的位置变化可以根据航向角进行求解,8 个航向角所对应的无人机位置变化如图 2 所示,其中"→"为 k 时刻的航向,"→"为 $k+1$ 时刻的航向。

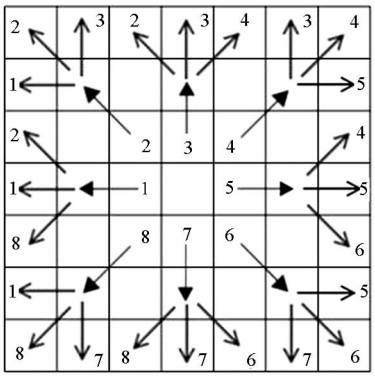

图 2　无人机航向对应的位置变化图

Fig. 2　Illustration of possible orientation and location

1.3　光电载荷探测模型

光电载荷探测模型描述了无人机对搜索目标的探测与发现关系,一般采用探测概率 P_d、虚警概率 P_f、探测范围 d_s 和探测距离 R_s 等来综合表达。这里考虑竖直向下固定安装的光电载荷,由光学成像原理可知,目标在机载光电载荷成像面上的成像大小 δ 为:

$$\delta=\frac{f}{R_s}d_c \tag{3}$$

式中,f 为光电载荷焦距,d_c 为目标的特征尺寸。由此,可计算出目标在光电载荷成像靶面上覆盖目标临界尺寸的线对数 N 为:

$$N=\frac{N_s}{b}\delta=\frac{N_s}{2\tan\frac{\beta_s}{2}}\cdot\frac{d_c}{R_s} \tag{4}$$

式中,b 为光电载荷的靶面成像尺寸,β_s 为光电载荷垂直视场角,N_s 为光电载荷的行扫描线数。

对于特定目标的识别,目前已建立了所需目标分辨率的经验规则,最常用的是 Johnson 准则,它给出了特定目标在图像中被发现、定向、识别和确认所需的经验数据,根据数据表可以反向推导出目标传递概率函数的计算公式[16]。

$$P(N)=\frac{(N/N_{50})^{2.7+0.7(N/N_{50})}}{1+(N/N_{50})^{2.7+0.7(N/N_{50})}} \tag{5}$$

取机载光电载荷行扫描线数 $N_s=1080$,发现目标的最小维方向分辨率 $N_{50}=1.0$,则机载光电载荷针对特征尺寸为 1 m 的目标,视场范围与探测概率之间的关系如图 3 所示。

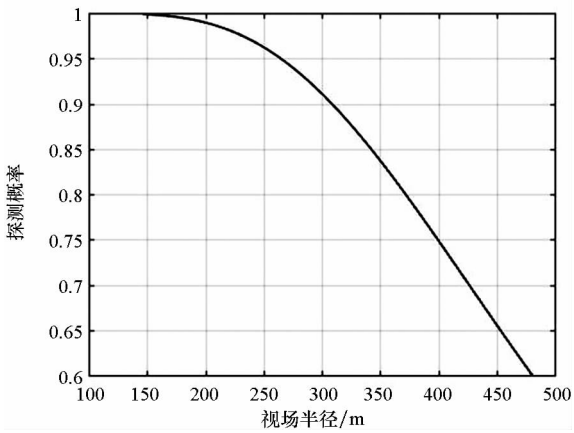

图 3　视场范围与探测概率关系图

Fig. 3　Relationship between field range and detection probability

2　不确定环境下区域搜索方法

为提高无人机的搜索效率,性能指标函数的建立和优化算法的选择非常关键。引入不确定度概念,建立包含不确定度指标以及对探测结果为发现目标的网格重访和网格探测次数控制的搜索性能指标函数,选择优化效率较高的粒子群算法进行搜索航迹规划,以提高搜索效率。

2.1　无人机搜索性能指标函数

无人机在进行搜索探测时,网格内大概率存在目标和大概率不存在目标都是所期望的结果,而两者概率相近时则需要继续探测加以甄别。为描述这种探测需求,引入不确定度概念。

$$W_c(k)=e^{-\frac{1}{2}\left[\ln\left(\frac{1}{P_c(k)}-1\right)\right]^2} \tag{6}$$

目标存在概率 $P_c(k)$ 与不确定度 $W_c(k)$ 的对应关系如图 4 所示。当网格 c 内目标存在概率为 0.5 时,存在目标和不存在目标的可能性相等,不确定度最大;当网格 c 内目标存在概率为 0 或 1 时,目标是否存在的确定性最强,不确定度为 0。

无人机进行搜索决策时主要考虑两方面内容:一是尽可能探测不确定度较高的区域;二是当上一次探测结果为发现目标时尽可能进行重访确认。因此,搜索性能指标函数定义为:

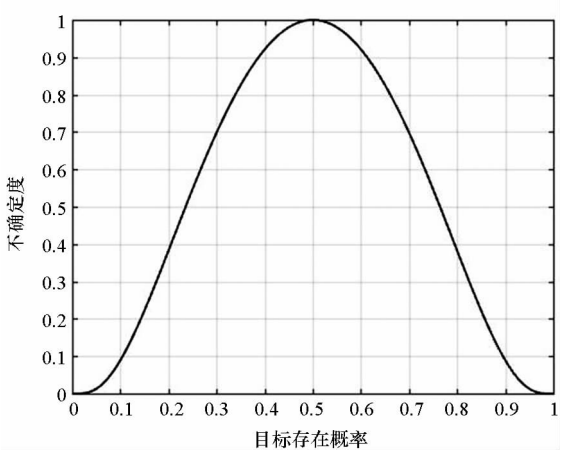

图 4　目标存在概率与不确定度对应关系

Fig. 4　Relationship between field range and detection probability

$$J = \sum_{l=1}^{L} \omega_2 (1 - W_l) + \sum_{q=1}^{M} \omega_3 B1_q + \sum_{q=1}^{M} \omega_1 W_q \cdot [1 - \mathrm{sign}(2 \cdot B2_q^* - B2_q)][\mathrm{mean}(B2) - B2_q] \tag{7}$$

等式右边第一项反映了无人机搜索对整个任务区域不确定度下降程度的度量；等式右边第二项中 $B1_q$ 表示无人机上一时间步对网格 q 的探测结果，第二项反映了当前时间步内对上一探测结果为发现目标的网格的重访；等式右边第三项中 sign 为符号函数，mean 为求平均值，$B2_q$ 表示无人机对网格 q 的探测次数，$B2_q^*$ 表示无人机对网格 q 的探测结果为发现目标的次数，$2 \cdot B2_q^* - B2_q$ 表示对网格 q 的探测结果为发现目标与未发现目标的差值，第三项反映了对尚未进行探测的网格或探测结果为未发现目标次数多余发现目标次数的网格的探测需求的控制。

2.2　基于粒子群算法的滚动搜索方法

针对无人机不确定环境下的区域搜索问题，搜索路径的实时决策是解决问题的关键，这就要求搜索算法在保证效率的同时提高航路生成速率。粒子群算法是一种模拟鸟群捕食行为的生物进化算法，常用于解决复杂的非线性问题，具有简单易实现、优化效果较好等优点，本文采用粒子群算法对搜索路径进行优化。

根据 1.2 节所述的无人机运动模型，对每一步飞行决策进行编码，构造解空间（0，1，－1，0，…），其中 －1 代表左转，0 代表直行，1 代表右转。粒子群进行位置和速度的更新后，新产生的解向量各分量可能不再是｛－1，0，1｝，而是其他实数，需经式（8）所示关系对解进行规范化，将其转化为合理解向量。

$$\sigma(i) = \begin{cases} -1 & \sigma^*(i) \in [-M, -M/3] \\ 0 & \sigma^*(i) \in [-M/3, M/3] \\ 1 & \sigma^*(i) \in [M/3, M] \end{cases} \tag{8}$$

采用 2.1 节中所述的搜索性能指标函数对解向量进行评价，经迭代更新后得到最优搜索路径，并根据探测结果对概率地图进行更新，滚动优化直至任务区域不确定度达到指标要求。

3　光电载荷参数影响分析

合理的机载光电载荷参数配置能大大提高区域搜索效率，通过对单个网格内是否存在目标所需的平均探测次数估计、任务区域平均探测步数估计和误判概率估计的分析，优化出最合理的光电载荷参数配置，以提升搜索效率。

3.1　单个网格平均探测次数估计

为便于对网格多次探测结果进行分析，引入非线性变换公式 $Q_c(k) = \ln\left[\frac{1}{P_c(k)} - 1\right]$ 将概率地图更新公式改写为：

$$Q_c(k) = Q_c(k-1) + \begin{cases} \ln \dfrac{P_f}{P_d} & \xi_c = 1 \\ \ln \dfrac{1-P_f}{1-P_d} & \xi_c = 0 \end{cases} \tag{9}$$

无人机单次探测结果是独立同分布的，根据大数定律，随着探测次数 $m_\xi \to +\infty$，若网格内存在目标，则探测结果为发现目标的次数为 $m_\xi \cdot P_d$，未发现目标的次数为 $m_\xi \cdot (1 - P_d)$。由概率更新公式可得：

$$\frac{Q_c(m_\xi)}{m_\xi} = \frac{Q_c(0)}{m_\xi} + P_d \cdot \ln \frac{P_f}{P_d} + (1 - P_d) \cdot \ln \frac{1-P_f}{1-P_d} \tag{10}$$

当网格内目标存在概率大于 P_{max} 时，可认为该网格内存在目标，所需的平均探测次数估计公式为：

$$m_{avg}^{+} \geqslant \frac{\ln \dfrac{P_c(0) \cdot (1 - P_{max})}{P_{max}(1 - P_c(0))}}{P_d \cdot \ln \dfrac{P_f}{P_d} + (1 - P_d) \cdot \ln \dfrac{1-P_f}{1-P_d}} \tag{11}$$

同理可得网格内不存在目标时，达到判断标准所需的平均探测次数估计公式为：

$$m_{avg}^{-} \geqslant \frac{\ln \dfrac{P_c(0) \cdot (1 - P_{min})}{P_{min}(1 - P_c(0))}}{P_f \cdot \ln \dfrac{P_f}{P_d} + (1 - P_f) \cdot \ln \dfrac{1-P_f}{1-P_d}} \tag{12}$$

无人机对任务区域没有先验信息的条件下，$P_c(0) = 0.5$，取 $P_{max} = 0.95$，$P_{min} = 0.05$，得到机

载光电载荷探测概率与单个网格平均探测次数之间的关系如图 5 所示。随着探测概率增加和虚警概率降低,所需的平均探测次数逐渐减少,且确认网格内存在目标所需的平均探测次数的减少速率小于不存在目标的平均探测次数。

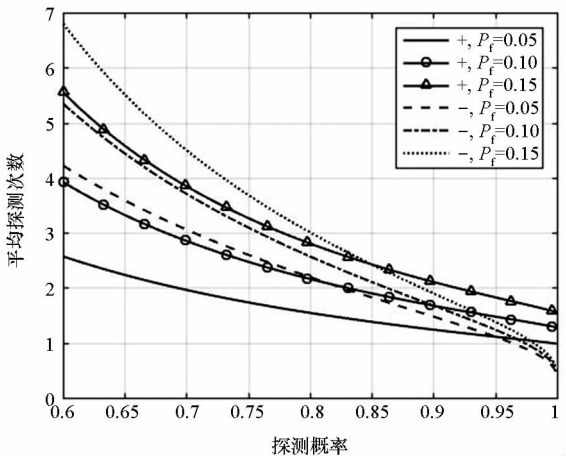

图 5　探测概率与单个网格平均探测次数关系图

Fig. 5　Relationship between detection probability and detection times of single grid

3.2　任务区域平均探测步数估计

无人机机载光电载荷的探测半径为 $H\tan(\beta_s/2)$,取探测圆的内接正方形对任务区域进行网格划分,网格边长为$\sqrt{2}H\tan(\beta_s/2)$。由于搭载不同参数机载光电载荷的无人机速度相同,为便于比较,假设每个时间步长内无人机运动距离为 $\sqrt{S_{zone}}$,则无人机对整个任务区域的平均探测步数可以表示为:

$$M_{avg} \geqslant m_{avg} \cdot \frac{\sqrt{S_{zone}}}{\sqrt{2}H\tan(\beta_s/2)} \tag{13}$$

取 15 km × 15 km 任务区域为例,根据光电载荷视场范围与探测概率之间的对应关系,可得探测概率与任务区域平均探测步数的关系如图 6 所示。

可以看出,随着探测概率的增大,确认任务区域内目标存在所需的平均探测步数先减少后增加,存在一个最优的探测概率,且最优探测概率随着虚警概率的减小而减小;确认任务区域内目标不存在所需的平均探测步数随探测概率的增大而减小;降低光电载荷虚警概率有利于减少平均探测步数。

3.3　误判概率估计

当无人机探测结果与实际情况不相符时,容易形成误判。若网格内实际存在目标,经连续 k^- 次探测,每次结果均为未发现目标时,形成探测误判,概率为 $(1-P_d)^{k^-}$,式中 $k^- = ceil\left[\ln\frac{P_c(0)\cdot(1-P_{min})}{P_{min}(1-P_c(0))}/\ln\frac{1-P_f}{1-P_d}\right]$,$ceil$ 为向上取整算子。这里仅考虑第一次探测即为未发现目标的情况,第一次探测发现目标而形成探测误判的概率远小于前者;同理可得虚警误判的概率为 $P_f^{k^+}$,式中 $k^+ = ceil\left[\ln\frac{P_c(0)\cdot(1-P_{max})}{P_{max}(1-P_c(0))}/\ln\frac{P_f}{P_d}\right]$,探测概率与误判概率的对应关系如图 7 所示。

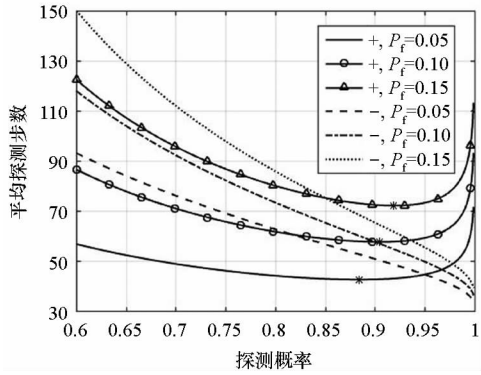

图 6　探测概率与任务区域平均探测步数关系图

Fig. 6　Relationship between detection probability and detection steps of search area

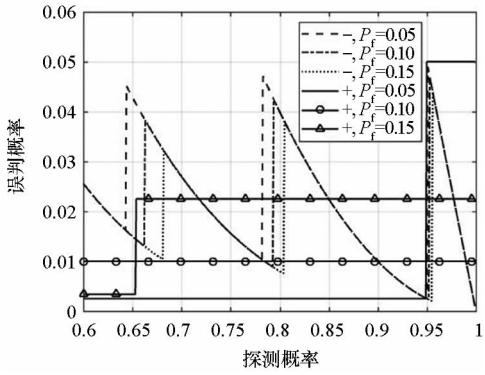

图 7　探测概率与误判概率关系图

Fig. 7　Relationship between detection probability and misjudgement probability

由图 7 可知,随着探测概率的增大,探测误判概率呈周期性递减,中间产生阶跃的原因是探测概率增大导致形成误判所需的探测次数减少,虚警概率的减小会增大探测误判概率的极值;判断网格内是否存在目标所需的探测次数相同时,虚警误判概率随虚警概率的增大而增大,探测概率过大时,所需探测步数减少,虚警误判概率反而会增加。

4　仿真结果分析

取 15 km × 15 km 任务区域,在其中设置 3 个目标,采用蒙特卡洛方法分别验证采用最佳光电

载荷参数配置时的目标搜索能力和探测概率、虚警概率对搜索效率的影响。

4.1　目标搜索性能

取机载光电载荷虚警概率 $P_f = 0.1$，综合 3.2 节和 3.3 节分析结果，最优的探测概率 $P_d = 0.90$，此时对应的机载光电载荷视场范围半径为 308 m，按照 441 m × 441 m 规格将整个任务区域划分为 34 × 34 个正方形网格，在此条件下无人机运动一个网格步长转弯 45° 对应的转弯半径为 1100 m 左右，满足小型无人机飞行的最小转弯半径要求。采用基于粒子群算法的搜索方法对搜索路径进行优化，为便于后续对比，取每个时间步长内无人机运行 34 个网格，当任务区域平均不确定度小于 0.1 时结束搜索。

采用蒙特卡洛法的思想随机生成目标所在的网格位置，进行 100 次仿真，将任务区域平均不确定度降低到 0.1 所需的时间步数如图 8 所示，平均时间步数为 81；探测结果为存在目标的网格个数如图 9 所示，平均有 14.6 个网格探测结果为存在目标，扣除真实存在目标的网格，误判率为 1%；发现真实存在目标的网格个数如图 10 所示，平均能发现 2.6 个真实目标，继续降低结束搜索的不确定度约束，能进一步提升发现真实目标的个数。

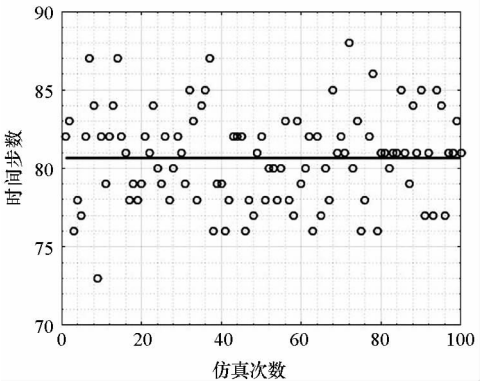

图 8　最优探测概率对应的时间步数

Fig. 8　Detection steps under optimal detection probability

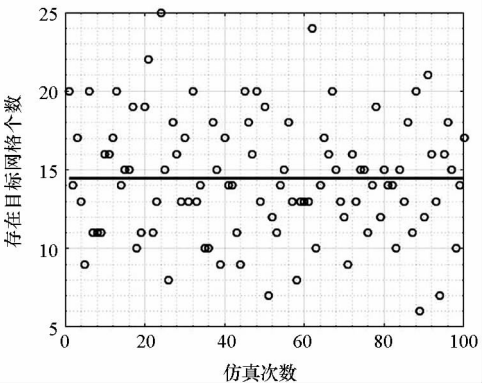

图 9　最优探测概率对应的存在目标网格个数

Fig. 9　Number of grids with detected target inside under optimal detection probability

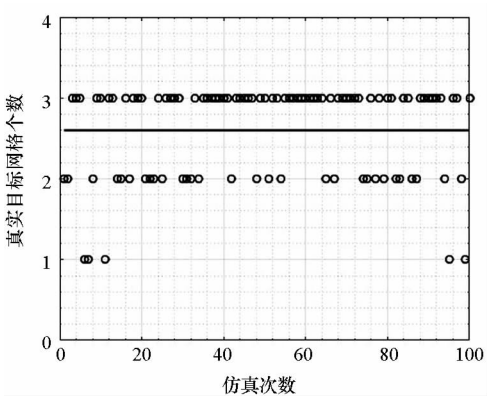

图 10　最优探测概率对应的真实目标网格个数

Fig. 10　Number of grids with real target inside under optimal detection probability

4.2　探测概率影响

作为对比，在相同虚警概率 $P_f = 0.1$ 条件下，分别取探测概率 $P_d = 0.788$、$P_d = 0.900$ 和 $P_d = 0.985$ 进行 100 次蒙特卡洛仿真，$P_d = 0.900$ 对应的任务区域网格个数和每个网格大小与 4.1 节描述相同；$P_d = 0.788$ 对应的任务区域网格个数为 28 × 28，每个网格大小为 536 m × 536 m；$P_d = 0.985$ 对应的任务区域网格个数为 50 × 50，每个网格大小为 300 m × 300 m。

仿真结果如图 11 所示。可以看出，$P_d = 0.900$ 所对应的平均时间步数最少，即相同无人机平台条件下机载光电载荷视场范围半径为 308 m时搜索效率最高，平均时间步数随探测概率增大而先减小后增大的趋势符合 3.2 节任务区域平均探测次数估计；平均存在目标网格个数随

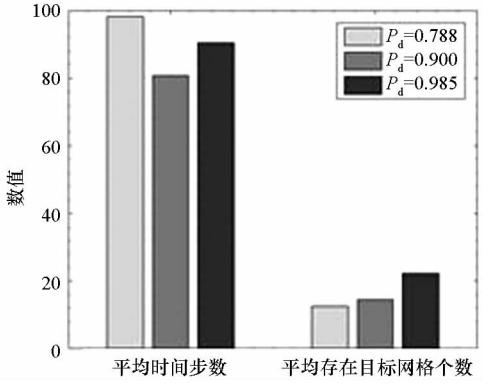

图 11　不同探测概率搜索性能对比

Fig. 11　Effect of different detection probability on search efficiency

探测概率的增大而增加,但同时任务区域的网格总数也在增加,虚警误判概率在 1% 附近波动,且随探测概率的增大而减小。

4.3　虚警概率影响

为验证虚警概率对搜索效率的影响,在相同探测概率 $P_d = 0.900$ 的条件下,分别取虚警概率 $P_f = 0.05$、$P_f = 0.10$ 和 $P_f = 0.15$ 进行 100 次蒙特卡洛仿真,任务区域网格个数为 34 × 34,每个网格大小为 441 m × 441 m。

仿真结果如图 12 所示。可以看出,平均时间步数和平均存在目标网格个数都随虚警概率的增大而增加,即在 $P_d = 0.900$ 条件下,搜索效率随虚警概率的增加而降低,虚警误判概率随虚警概率的增加而增大,与 3.2 节和 3.3 节中的估计相符。

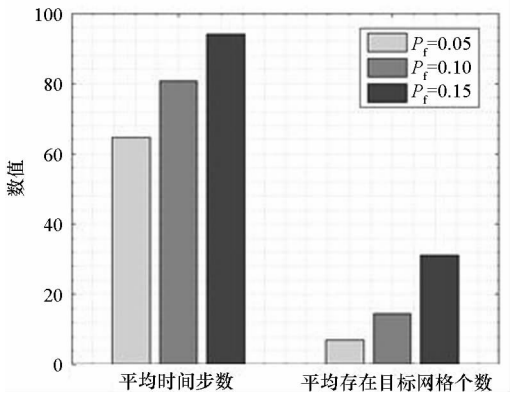

图 12　不同虚警概率搜索性能对比

Fig. 12　Effect of different false alarm probability on search efficiency

5　结论

本文采用基于概率地图的无人机区域搜索模型和基于粒子群算法的搜索路径滚动优化方法,解决了无人机不确定环境下实时探测更新的区域搜索问题;通过对任务区域平均探测时间步数和误判概率的估计分析和仿真验证,得到了机载光电载荷参数优化配置策略,形成了如下结论:

1)无人机搜索效率随虚警概率的减小而增加,但随探测概率的增大而先降低后增加,存在最优探测概率及其对应的光电载荷视场范围;

2)无人机搜索误判概率在一定范围内随虚警概率的减小而减小,但随着探测概率的增大会因所需的探测次数减少而产生向上跃升;

3)无人机机载光电载荷参数的合理配置能有效提高搜索效率和降低搜索误判概率,经蒙特卡洛方法仿真验证,所述策略能有效优化参数配置。

参考文献(References)

[1]　郑宏捷. 无人机区域侦察航路规划研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
ZHENG Hongjie. Investigation on the UAV path planning problem of area reconnaissance [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[2]　Office of the Secretary of Defense. Unmanned systems roadmap 2007—2032 [R]. Department of Defense, Washington DC, 2007.

[3]　Li B, Li J, He G L, et al. Research on cooperative combat for integrated reconnaissance-attack-BDA of group LAVs[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 11(1): 265 - 272.

[4]　田菁, 陈岩, 沈林成. 不确定环境中多无人机协同搜索算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2325 - 2328.
TIAN Jing, CHEN Yan, SHEN Lincheng. Cooperative search algorithm for multi-UAVs in uncertainty environment [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(10): 2325 - 2328. (in Chinese)

[5]　符小卫, 魏广伟, 高晓光. 不确定环境下多无人机协同区域搜索算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4): 821 - 827.
FU Xiaowei, WEI Guangwei, GAO Xiaoguang. Cooperative area search algorithm for multi-UAVs in uncertainty environment [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(4): 821 - 827. (in Chinese)

[6]　彭辉, 沈林成, 朱华勇. 基于分布式模型预测控制的多 UAV 协同区域搜索[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 593 - 601.
PENG Hui, SHEN Lincheng, ZHU Huayong. Multiple UAV cooperative area search based on distributed model predictive control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 593 - 601. (in Chinese)

[7]　张莹莹, 周德云, 夏欢. 不确定环境下多无人机协同搜索算法研究[J]. 电光与控制, 2012, 19(2): 5 - 8.
ZHANG Yingying, ZHOU Deyun, XIA Huan. Cooperative search algorithm for multi-UAV in uncertain environment[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(2): 5 - 8. (in Chinese)

[8]　Delima P, Pack D. Maximizing search coverage using future path projection for cooperative multiple UAVs with limited communication ranges [J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2009, 381: 103 - 117.

[9]　黄其旺. 基于改进概率图的多无人机协同搜索策略研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.
HUANG Qiwang. Cooperative searching strategy for multiple unmanned aerial vehicles based on modified probability map[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)

[10]　刘重, 高晓光, 符小卫. 带信息素回访机制的多无人机分布式协同目标搜索[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1998 - 2011.
LIU Zhong, GAO Xiaoguang, FU Xiaowei. Multi-UAVs distributed cooperative target search algorithm with controllable revisit mechanism based on digital pheromone [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(9): 1998 - 2011. (in Chinese)

[11]　Asif K, Evsen Y, Bernhard R. Information exchange and decision making in micro aerial vehicle networks for

cooperative search [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2015, 2(4): 335 – 347.

[12] 彭辉, 王林, 沈林成. 区域目标搜索中基于改进 RRT 的 UAV 实时航迹规划[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 86 – 91.
PENG Hui, WANG Lin, SHEN Lincheng. The modified RRT-based real-time route planning for UAV area target searching[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(5): 86 – 91. (in Chinese)

[13] 谭安胜. 舰载无人机光电载荷对海上目标搜索决策分析[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(4): 21 – 27.
TAN Ansheng. Decision analysis of searching for offshore target for O-E payload loaded in the ship-board UAV[J]. Command Control & Simulation, 2010, 32(4): 21 – 27. (in Chinese)

[14] 王领, 于雷, 寇添, 等. 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 192 – 198.
WANG Ling, YU Lei, KOU Tian, et al. Evaluation and calibration of operational capability to airborne IRST system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 192 – 198. (in Chinese)

[15] Bertuccelli L F, How J P. Robust UAV search for environments with imprecise probability maps [C]// Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005: 5680 – 5685.

[16] Leachtenauer J C, Dirggers R G. 监视与侦察成像系统: 模型与性能预测[M]. 陈世平, 马文坡, 周峰, 等译. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
Leachtenauer J C, Dirggers R G. Surveillance and reconnaissance imaging systems: modeling and performance prediction[M]. Translated by CHEN Shiping, MA Wenpo, ZHOU Feng, et al. Beijing: Science and Technology of China Press, 2007. (in Chinese)