

杨 旋， 宋佳星， 任国亭， 殷 勤.基于旅行商问题的无人机目标侦察航迹规划[J].解放军理工大学学报:自然科学版,DOI:10.12018/j.issn.1009-3443.20170227001/2017.06.02.

基于旅行商问题的无人机目标侦察航迹规划

杨 旋， 宋佳星， 任国亭， 殷 勤

(解放军理工大学 野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘 要:为了研究无人机在特定背景下的航迹规划关键问题,本文首先在分析特定背景的基础上将问题转化为时间总和最小和最短航迹遍历问题,其次建立基于旅行商问题的改进模型,利用改进的模拟退火算法及Python 软件编程对航迹进行宏观规划,最后对各目标群内单个目标的选取进行优化。通过合理的假设和计算,得到了可以使FY-1 型无人侦察机滞留敌方雷达有效探测范围时时间总和最小的任务规划方案;在对FY-2 型通信中继无人机飞行方向的分析时得到可以完成全程通信保障任务所需的最少FY-2 架次数。结果表明,通过对无人机目标侦察的航迹规划可以大大减少在雷达中的暴露时间,且对两种型号的无人机统筹策划可以提高无人机间的通信效率。

关键词:无人机航迹规划;模拟退火算法;通信保障

中图分类号:O221.6 **DOI:**10.12018/j.issn.1009-3443.20170227001

Analysis and research of UAV targets reconnaissance based on TSP

YANG Xuan, SONG Jiaxing, REN Guoting, YIN Qin

(College of Field Engineering, PLA Univ. of Sci. and Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract:In order to solve the key problem of UAV path planning under specific background, the TSP (Traveling Salesman Problem) improved model was established based on the multiple transformation that the flight time problem was converted into the traversal path problem. The path macro planning was calculated by simulated annealing algorithm of Python programming and the target points were optimized de-tailedly. Based on the reasonable assumption and calculation, the FY-1 UAV minimum total flight time of effective detection range of the radar is obtained. It can be obtained that the minimum FY-2 UAVs can ac-complish the task of communication support by the analysis of flight process of FY-1 UAV. The results in-dicate that based on the analysis and research of UAV targets reconnaissance, the time of exposure to the radar is greatly reduced and the efficiency of communication between UAVs is improved.

Key words: UAV path planning; simulated annealing algorithm; communication support

无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)是一种依靠程序自主操纵或受无线遥控的飞行器^[1],既具备有人驾驶飞机的功能,又不受座舱体积和飞行员状态条件的限制,可以最大程度地追求控制效率,载荷量和巡航时间^[2],因此,无人机技术在军事工程领域受到极大的关注,是新型军事技术和新型武器平台的杰出代表^[3]。此外,无人机在高空摄影、地质

勘探等领域也发挥了重要作用^[4]。

多无人机协同可以更加有效地发挥无人机的先天优势,完成多种复杂任务。其中,无人机的航迹规划,需要设计出一条使起点到目标点代价最小的飞行轨迹,且要求符合无人机机动性能约束^[5]。国内外专家对无人机航迹规划问题开展了较为深入的研究,并取得了显著的成果。文献[6]采用改进的蚁群

算法,引入“电势场”理论,区分出待选无人机航迹节点的优先级,得到整体航迹最优解。文献[7]提出了一种基于航迹预测的多无人机任务规划办法,实现了航迹规划和任务分配的整体架构。文献[8]利用混沌鱼群算法精确找到最优航迹,相比传统鱼群算法,过程更加稳定。文献[9]提出了一种基于无人机任务性能评价和任务区域划分的多无人机协同CPP(区域覆盖航迹规划)算法,能够规划出全局最优的多无人机协同覆盖航迹。文献[10]采用与无人机协同系统相匹配的改进粒子群优化算法,从而得到合理的任务分配和无人机的飞行航迹。

综合来看,目前的研究多是通过各种改进算法来进行无人机航迹规划,较为复杂。本文通过对实际中无人机侦察中航迹规划问题的本质分析和理解,将航迹规划问题转变为时间总和问题,进而转化为一个遍历问题,利用模拟退火算法巧妙地对无人机航迹进行优化处理,对不同型号的无人机飞行航迹进行模拟计算和设计,进而完成问题的求解,也为以后的研究提供了思路。

1 问题提出与求解思路

1.1 问题背景

无人机航迹规划问题,是基于战场的复杂环境的现实条件下,在有效完成所分配的侦察、通信等任务的前提下,尽可能地保证我方无人机安全,减少战场环境下的各类损伤为主的问题。目前,无人机多用于侦察和通信保障。侦察主要借助于各类传感器,常见的传感器有两类,分别是S-1型和S-2型。S-1为成像传感器,采用广域搜索模式,即目标落入传感器成像带宽中即可完成成像识别。S-2为光学传感器。同时,S-1型通常在固定于无人机的某一侧成像,于飞行中不再调整。

1.2 问题提出

现有一定数量的FY-1和FY-2系列无人机(简称FY-1和FY-2),其中FY-1担任侦察任务,FY-2担任通信中继任务。在FY-1上可以装配S-1和S-2两种传感器来侦察目标。根据设定的情况,有以下问题需要解决:

问题一:现需为FY-1完成若干个目标群(若干子目标)的侦察任务拟制最佳的航迹和调度策略(包括每架无人机起飞基地、装配的传感器、起飞时间、航迹和侦察目标),以保证FY-1在完成侦察任务前提下,保证我方无人机尽可能的安全,且使得滞留敌

方雷达有效探测范围内的时间总和最小;

问题二:FY-1的侦察信息需通过FY-2传回地面控制中心,求在一定通信距离的限制下,为顺利完成侦察任务,所需FY-2的最少架次。

1.3 条件假设

在求解问题之前,提出以下基本的条件假设:

(1)假设两种传感器对FY-1的巡航时间和速度没有影响,且空中机动动作的额外燃料消耗忽略不计;

(2)假设FY-2与FY-1在边界条件处也能保证有效通信;

(3)假设目标群雷达识别不存在时间延迟,且不考虑低空飞行和雷达识别盲区;

(4)假设侦察无人机在对目标群进行侦察时,不存在被击落的情况;

(5)假设FY-1执行侦察任务时,只要起飞离开基地就需要FY-2对其通信中继保障,直至降落回原基地。

1.4 求解思路

针对问题一,基于完成侦察任务和安全的 yêu cầu,可以将航迹规划转化为滞留敌方雷达有效探测范围内的时间总和最小,进而转化为最短路径遍历问题,建立基于旅行商数学模型(Traveling Saleman Problem,简称TSP)的改进模型,利用改进的模拟退火算法及Python软件编程对路径进行宏观的规划。

在本类问题的分析求解过程中,采用模拟退火算法,出发点是基于物理中固体物质退火过程与组合优化问题之间的相似性;然而,传统模拟退火算法随机性太强,在求解过程中易丢失当前最优解,因此采用一种改进的模拟退火算法进行计算。

模拟退火算法首先采用随机的方式生成一个初始路径作为初始解,新解的生成分为两步,第一步是在该闭合的路径中随机选择3条边进行断裂,即生成3个路径段;第二步是将这3个路径段进行倒置操作,在满足路径原则的前提条件下,对以上路径段进行重新组合,并选择最优的一条作为新解。具体产生过程如图1(a)所示。

本文中采用改良的模拟退火算法,改良过程采用局部优化法,即在当前解中随机选取小段路径,并对该小段路径进行重新排列组合,最后选择最优局部路径来代替之前的路径段。具体过程如图1(b)所示。

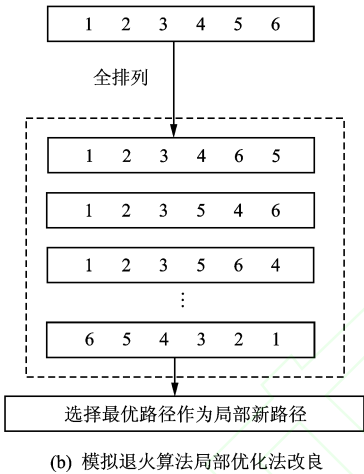
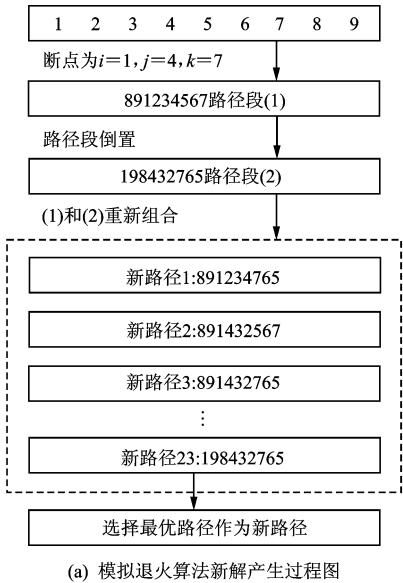


图 1 模拟退火算法示意图

Fig.1 Diagrams of improved simulated annealing algorithm

针对问题二,在问题一的无人机调度和路径规划基础上,考虑到 FY-2 可能与 FY-1 无人机性能存在不同,在详细分析所规划的路径基础上,分类讨论并计算了每一架次 FY-1 无人机完成侦察任务所需的 FY-2 无人机架次。

2 案例分析与求解

如图 2 所示,P01~P07 分别为 7 个无人机军事基地,列装有一定数量的 FY-1 和 FY-2 系列无人机;A01~A10 分别为敌目标群,每个敌目标群均配属一个相同型号的雷达站,针对该 FY 系列无人机的有效探测距离为 70 km。

FY-1 的巡航速度为 200 km/h,最大里程为 2 000 km,巡航高度为 1 500 m;FY-2 的巡航速度为 300 km/h,最大里程为 2 400 km,巡航高度为 5 000

m。受技术条件的限制,FY-1 在单独执行侦察任务时,必须安排 FY-2 进行通信保障,通信距离要求在 50 km 范围内。此外,编队飞行时要求两架无人机相距 200 m 以上,同一基地无人机起飞和降落时间间隔要在 3 min 以上,完成任务后要返回原基地。

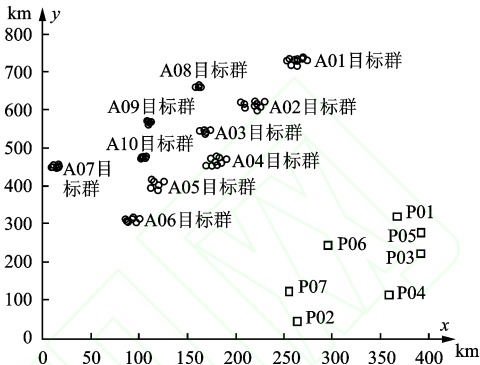


图 2 军事基地以及目标群的位置图

Fig.2 Location map of military base and target group

S-1 成像带宽为 2 km;S-2 拍摄距离不超过 7.5 km。对于任一目标,两种传感器均要在 4 h 内侦察一次。其中,S-1 在目标落入成像带宽后即可完成成像识别。成像带宽为 2 km,如图 3(a)所示,即 AB 的距离为 2 km。同时,S-1 通常固定在无人机的某一侧成像,飞行中不再调整。在飞机匀速直线运动时,S-1 拍摄角度可以调整,OA 和 OB 的范围可表示为一个区间,即 $2 < OA < 6$ 且 $4 < OB < 8$,实际可成像位置在图 3(b)中两直线之间的范围内。在某种程度上,可认为成像带宽为 6 km,即根据目标距离 FY-1 无人机的远近,实时调整成像传感器成像带宽的位置,范围在 2—8 km 内即可。

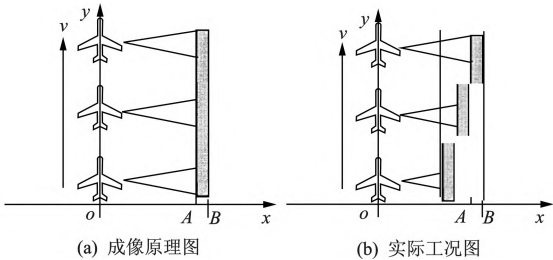


图 3 S-1 的成像原理图

Fig.3 Schematic diagrams of S-1 UAV

2.1 问题一的分析与求解

本题中,一旦有侦察无人机进入敌方某一目标群配属雷达探测范围,敌方所有雷达均开机,探测范围是以雷达站点为圆心,半径 70 km 的圆,当无人机进入到该圆中便开始计时。问题一只需要考虑 FY-1 型无人机,仅在 P01、P03、P05 和 P07 基地有

列装,在有效完成侦察任务的前提下,保证 FY-1 滞留敌方雷达有效探测范围内的时间总和最小,即每架次进入雷达有效探测范围内的时间累加最小。由于 FY-1 的巡航速度为 200 km/h,那么该问题可以转化为最短航迹规划问题。以 A01、A02 和 A08 三个目标群为例,作无人机的行驶航迹图,研究无人机数量的选取,如图 4 所示。

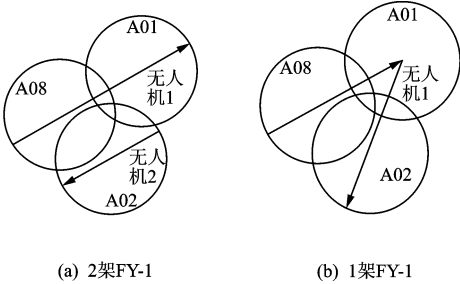


图 4 目标群雷达探测范围及无人机航迹示意图
Fig.4 Radar detection-range and path diagrams of UAVs

图 4(a)选用 2 架 FY-1 型侦察无人机,图 4(b)只选用 1 架执行侦察任务。考虑到每个目标群内子目标分布相对集中且在雷达探测范围的圆心附近,姑且暂时忽略各子目标的具体位置,主要考虑航迹,图上箭头表示无人机的飞行航迹。由各点的位置坐标可得图 4(a)和图 4(b)航迹总长度分别为 396km 和 372km,即在满足巡航时间的条件下,尽量选择一架无人机执行侦察任务。因此,先假设用 1 架无人机去执行所有的侦察任务,计算其能否完成飞行条件。考虑到对每一目标均需用 S-1 和 S-2 各侦察一次,因此,分两步对这一问题进行讨论。

2.1.1 S-1 成像传感器对目标群的侦察

要研究加载 S-1 的无人机航迹,先转化为研究一个 6 km 带宽扫描的航迹。考虑到各目标群内子目标分布集中,首先从宏观的角度研究航迹,再具体研究经过子目标的扫描航迹。

宏观航迹规划就是以十个目标群中的雷达站为点,求解一条最短遍历路径,问题可以转化成为求最短航迹的遍历问题,经典的 TSP 数学规划模型^[11-14]为:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}$$
$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, & i \in V \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, & j \in V \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, & \forall S \subset V, 2 \leq |S| \leq n - 1 \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases}$$

式中, V 为各个点的集合, d_{ij} 表示从第 i 个点到第 j 个点的距离; x_{ij} 在 d_{ij} 为最佳航迹时时等于 1,否则等于 0; S 为 V 的全部非空子集, $|S|$ 为集合 S 中包含全部顶点的个数。

本题设的要求是起点和终点不能是同一个点,在雷达探测范围内航迹不闭合。在此基础上,对 TSP 数学规划模型进行改进,利用前文所提到的改进模拟退火算法进行计算,先找出全局最优解,再通过小段路径的重新排列,得到局部最优解,从而对全局解进一步优化。其算法流程如图 5 所示。

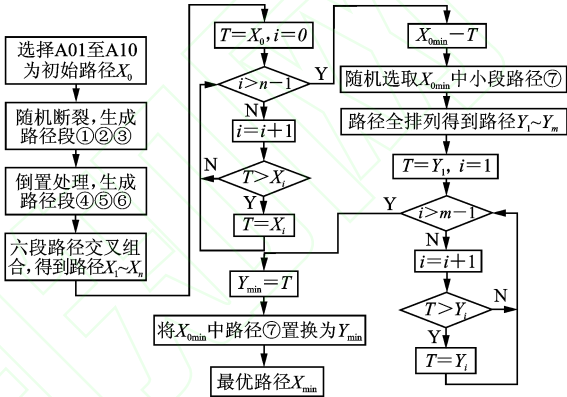


图 5 最短航迹求解的算法流程图
Fig.5 Algorithm flow chart of the shortest path

用 Python 软件对该算法流程进行编程,计算结果即无人机最短航迹如图 6(a)所示,通过各个目标的位置坐标得到宏观简化后的最短航迹总里程数 $S_{j1} = 891.828$ km。具体航迹规划是在宏观规划的基础上,对目标群内的子目标进行遍历后,再转向下一个目标群,如图 6(b)所示,起点为 L,终点为 M。在宏观总里程数 S_{j1} 计算结果的基础上,由目标群中各个子目标的位置坐标,对所有里程进行相加计算,可得到雷达探测范围内的总里程数 $S_{G1} = 1345.13$ km,即从 P01 基地出发飞行距离最短,无人机总的飞行里程为 $S_{S1} = 2114.81\text{km} > 2000\text{km}$ 。因此,一架飞机无法完成任务,考虑使用两架无人机。

两架 FY-1 分别从 P01 和 P07 基地起飞,且综合宏观航迹与图 6(a)中一致,具体航迹如图 7 所示。第一架从 P07 基地起飞飞至 E 点,进入 A06 目标群的雷达探测区域,依次探测 A06、A05、A07、A10、A04、A03 和 A09 这 7 个目标群后,从 A09 雷达探测圈的 F 点飞出后,沿切线 FG、GH 和 HL 飞行,最后飞回至原基地;第二架在第一架无人机还在雷达探测区内就提前起飞,从 P01 出发飞至 J 点后,沿切线 JK、KO 和 OP 飞入 A08 雷达探测区,依次侦察剩余的三个目标群 A08、A02 和 A01,最后从

A01 雷达探测圈的切点 Q 飞出后,原路返回原基地 P01。

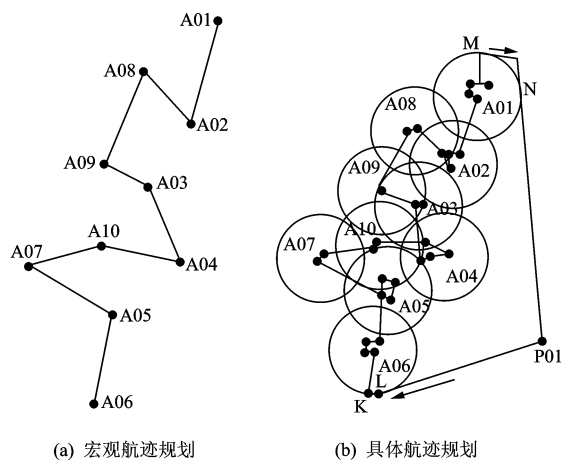


图 6 一架无人机 S-1 航迹规划示意图
Fig.6 Path diagrams of one S-1 UAV

为拍摄距离不超过 7.5 km,而 FY-1 的飞行高度为 1.5 km,即拍摄的水平距离不超过 7.348 km。同时,考虑到每个目标群内的子目标相对集中,若存在公共交叉区域,那么装载 S-2 的无人机只需飞至公共交叉区域,就可以同时完成对多个子目标的拍摄任务。

如图 8 所示,选取 A06、A01 和 A07 目标群进行分析,即以各个子目标坐标点为圆心,以 7.348 km 为半径画圆,灰色区域表示两个或多个圆相交的并集。A06 中灰色区域包含目标群中所有子目标,无人机只需要飞至灰色区域便能够瞬时完成对 A06 目标群内所有 6 个子目标的拍摄任务;A01 中子目标点数目较多且相对分散,FY-1 需要飞至三个区域才能够完成拍摄任务,即在这三个区域内部进行选点,以保证航迹尽可能的短,也就是在这三个灰色区域内选的点在二维空间平面上要尽可能集中;A07 中,公共区域较大,所选点应尽可能集中。

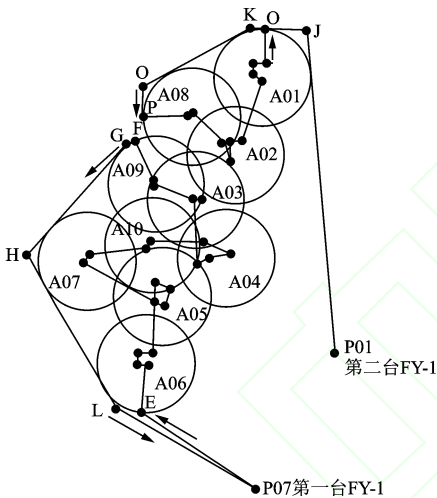


图 7 两架无人机 S-1 侦察航迹规划示意图
Fig.7 Path diagram of two S-1 UAVs

通过对图 7 航迹规划线路的分析以及各目标点的位置坐标可计算得到,第一架无人机 FY-1 在雷达区域内的总路程为 921.842 km,在雷达区域内的滞留时间 $T_{S-11} = 921.842 \div 200 = 4.61h$,雷达探测区外的路程为 923.74 km,即第一架无人机 FY-1 飞行总里程 $S_{S-11} = 1845.582km < 2000km$;同理,第二架无人机 FY-1 在雷达区域内的总路程为 415.549 km,在雷达区域内的滞留时间 $T_{S-12} = 415.549 \div 200 = 2.08h$,雷达探测区外的路程为 1289.20 km,即第二架无人机 FY-1 飞行总里程 $S_{S-12} = 1704.749km < 2000km$,符合题设。该方案的无人机滞留在雷达区域内的时间总和 $T_{S-1} = T_{S-11} + T_{S-12} = 6.69h$ 。

2.1.2 S-2 成像传感器对目标群的侦察

S-2 光学传感器的性能较好,唯一的限定条件

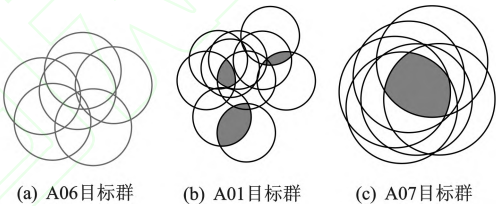


图 8 A06、A01 和 A07 目标群公共交叉区域示意图
Fig.8 Diagrams of cross area of A06, A01 and A07

基于以上分析,我们列出了所选的 18 个 S-2 拍摄侦察点的信息,如表 1 所示。

表 1 所选的 18 个 S-2 拍摄侦察点

Tab.1 18 points of S-2 reconnaissance

拍摄点代号	坐标/km	拍摄点代号	坐标/km
B01	(264.5,722.5)	B02	(267.6,731.8)
B03	(258,726)	B04	(210,612.5)
B05	(224,616)	B06	(219.2,609.5)
B07	(170,544)	B08	(181,469)
B09	(187,465)	B10	(203,457)
B11	(175,456)	B12	(117.5,410.5)
B13	(117.4,394.,7)	B14	(93.2,309.8)
B15	(16.6,448)	B16	(112.6,560.5)
B17	(164.5,655)	B18	(104,474)

将问题转化成 18 个点的最短航迹遍历问题,事实上,该问题属于最短哈密尔顿通路问题,规则虽简单,但在点数增多后其计算量呈指数倍增长,18 个点的计算量约是 10 个点的 17 亿倍。然而考虑到在 18 个点中,B01、B02 和 B03 点均取自 A01 目标群,B04、B05 和 B06 均取自 A02 目标群,B08、B09、B10 和 B11 均取自 A04 目标群,B12 和 B13 均取自 A05 目标群,可以通过确立中心点而简化计算量,并在具

体航迹规划中还原即可。

确定 A01 中心点 TB01(263.6,726.8),A02 中心点 TB02(217.7,612.7),A04 中心点 TB04(186.6,461.75)以及 A05 中心点 TB05(117.5,402.6),将新生成的 10 个点代入图 5 所示的算法流程,并通过 Python 软件编程,可得简化后的宏观最短航迹如下图所示 9(a)所示,且此时的总里程数 $S_{J2}=823.828\text{km}$ 。

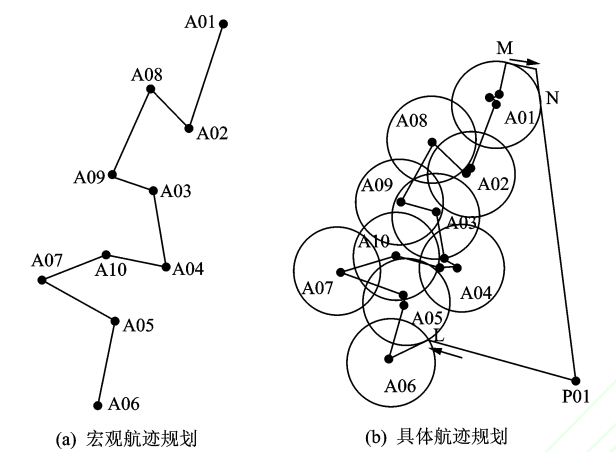


图 9 无人机 S-2 航迹规划示意图
Fig.9 Path diagrams of S-2 UAV

经计算可得从 P01 基地出发路程最短,在宏观航迹规划基础上,将 A01、A02、A04 和 A05 还原为实际应有的拍摄侦察点数,并在内部进行小范围的航迹规划,起点和终点选择航迹为暴露在雷达探测范围内最短的航迹,具体航迹规划如图 9(b)所示,携带 S-2 的无人机 FY-1 的最短航迹 $S_{G2}=1007.403\text{km}$ 。则携带 S-2 的无人机的暴露时间 $T_{S2}=1007.403\div200=5.04\text{h}$ 。且此时无人机在雷达探测区外的路程为 675.193km,总路程为 $1682.596\text{km}<2000\text{km}$,因此,一架次就能完成 S-2 的侦察任务。

2.1.3 求解结果

综上所述,采用上述方案时,能够保证完成侦察任务同时,滞留敌方雷达有效探测范围内的时间总和最小,完成侦察任务的最小时间总和为 $T_s=T_{S1}+T_{S2}=6.69+5.04=11.73\text{h}$,携带 S-1 和 S-2 传感器的最佳规划航迹分别如图 7 和图 9(b)所示。

无人机调度策略如表 2 所示,设定第一架飞机的起飞时间为 00:00,经验证,该调度方案既能够保证每一个目标均被 S-1 和 S-2 侦察一次,又能够保证两种不同传感器对同一目标的侦察时间间隔不超过 4 小时,符合题设。

表 2 无人机调度策略表

Tab.2 Scheduling policy table of UAVs				
飞机类型	传感器	起飞基地	起飞时间/h	侦察目标
FY-1	S-1	P07	00:00:00	A06、A05、A07、A10、A04、A03、A09
FY-1	S-1	P01	00:40:12	A01、A02、A08
FY-1	S-2	P01	00:00:00	所有目标群

2.2 问题二的分析与求解

基于问题一 FY-1 的航迹规划,要求 FY-1 与 FY-2 有 50 km 的通信距离限制确保 FY-1 时刻保持通信通畅,即自 FY-1 起飞时刻开始就有 FY-2 与 FY-1 保持通信。应当注意到的是,FY-1 与 FY-2 飞机的性能有较大差异。FY-1 巡航飞行速度 200 km/h,而 FY-2 的巡航飞行速度 300 km/h,如果 FY-1 与 FY-2 平行飞行时,很快 FY-2 与 FY-1 的距离就要超过 50 km;此外,FY-1 巡航飞行时间为 10 h,而 FY-2 巡航飞行时间仅为 8 h。在问题一中,任一架次的无人机空中飞行总时间均超过了 8 h,因此必须中途派出新的 FY-2 来替换之前的那架 FY-2 继续通信中继保障任务。

虽然 FY-1 与 FY-2 的巡航速度有所差异,但可以通过改变两种无人机的相对飞行方向,进而保证两者在某一方向上的速度相同。如图 10 所示,FY-2 采用相对于 FY-1 飞行方向的折线形飞行,并使 FY-2 沿 y 轴的飞行分速度与 FY-1 的巡航速度保持一致,即 200km/h,并调整两者之间的最大距离小于 50km,保证通信的实时传递。

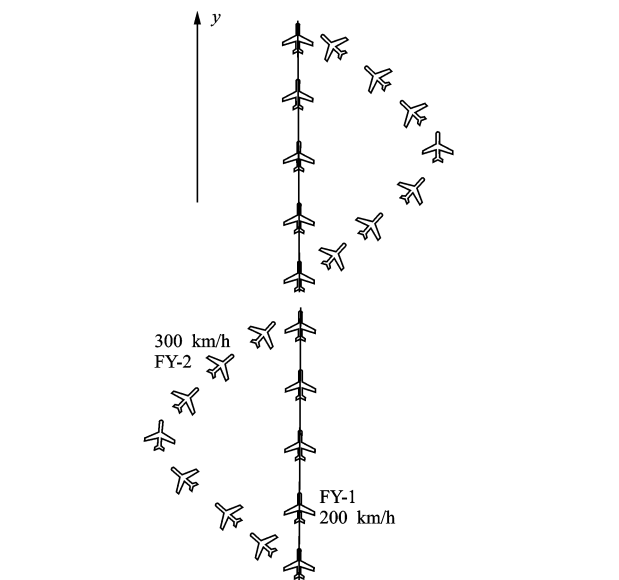


图 10 FY-1 与 FY-2 的飞行轨迹示意图
Fig.10 Schematic diagram of flightpath of FY-1 UAV and FY-2 UAV

在起飞的时刻就需要 FY-2 进行通信保障, FY-2 在各个基地均有列装, 且均只有 1 架。而在问题一中, FY-1 无人机的调度策略是零时刻在 P07 和 P01 基地同时出动 FY-1/S-1 和 FY-1/S-2 去执行侦察任务, P01 和 P07 基地之间的距离约为 228km, 远大于 FY-2 型飞机能够完成的通信距离。通过图 7 和图 9(b) 的航迹规划示意图可以看出, FY-1/S-1 第一架无人机和 FY-1/S-2 的最初飞行目标点也不一致, 且距离明显大于 50km。因此, 必须有两架 FY-2 无人机对 FY-1/S-1 和 FY-1/S-2 分别执行保障任务。

通过以上分析, 按照 FY-1/S-1(第一架)、FY-1/S-1(第二架)和 FY-1/S-2 的顺序求解。

第一架 FY-1/S-1 无人机: 全程需要两架 FY-2 无人机保障, 并且由于航迹方向和各路段长度不一致, 无法与 FY-1/S-2 实现共用, 因此, 需要单独安排两架次飞机完成对第一架 FY-1/S-1 无人机侦察任务的通信保障, 在侦察 A04 目标群的时候, 迎来接替的 FY-2;

第二架 FY-1/S-1 无人机: 全程需要两架 FY-2 无人机保障, 在 A02 目标群附近迎来接替的 FY-2;

FY-1/S-2 无人机: 与第一架 FY-1/S-1 无人机的飞行情况类似, 在开始阶段需要一架 FY-2 对其单独保障, 但在 A02 目标群附近才需要考虑替换新的 FY-2。在第一问的无人机调度策略设计中, 第二架 FY-1/S-1 无人机晚起飞 40 分钟 12 秒, 即此时第二架 FY-1/S-1 无人机将会与 FY-1/S-2 无人机在 A08 附近处相接近, 且返程航迹相仿, 距离小于 50km, 即可以共用一架 FY-2 无人机对两者共同通信保障, 因此, FY-1/S-2 只需要 1 架次 FY-2。

综上所述, 为完成问题一的侦察任务, 即至少安排 5 架次 FY-2 型通信中继无人机来完成通信保障任务。

3 结语

本文所用方法的主要特点是进行了多次有效的问题转化, 抓住问题的主要矛盾, 结合现有算法和模型有效解决现实中复杂棘手的问题, 主要优势是可以应用于多种复杂的航迹规划现实问题, 具有一定的代表性。本文主要思路是先利用改进的模拟退火算法进行宏观的航迹规划, 从而进行具体航迹的规划和选择; 此外, 在 S-2 航迹规划问题中, 由于拍摄点过多, 导致遍历算法运算量过大, 目前还没有最短哈密尔顿通路有效的算法, 因此, 根据选点的特点在

算法中适当减少拍摄点, 从而巧妙地解决了案例中的问题一, 得到 FY-1 滞留敌方雷达有效探测范围内的最小时间总和以及最优的航迹。在求解问题二的过程中, 首先通过调整飞行方向, 使两种无人机在某一方向上的速度相同, 再通过追踪 FY-1 的飞行过程, 分析得出所需要 FY-2 无人机的架次。结果均表明, 通过无人机目标侦察的航迹分析和规划, 使暴露在雷达中的时间大大减少, 且有效提高了无人机间通信运输的效率, 为以后的研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] 江更详. 浅谈无人机[J]. 制造业自动化, 2011, 33(15):110-112.
JIANG Gengxiang. Brief introduction about the unmanned [J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(15):110-112.(in Chinese).
- [2] FILIPPIS L D, GUGLIERI G, QUAGLIOTTI F B. A novel approach for trajectory tracking of UAVs[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(3):198-206.
- [3] WU Jiang, ZHANG Donghao, PEI Denghong. Autonomous route planning for UAV when threats are uncertain[C]//Guidance, Navigation and Control Conference. Yantai:IEEE, 2014:19-22.
- [4] 陈冬. 基于粒子群优化算法的无人机航迹规划[D]. 西安:西北工业大学, 2007:13-15.
- [5] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [6] 张帅, 李学仁, 张鹏, 等. 侦察无人机航迹规划设计研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4):111-115.
ZHANG Shuai, LI Xueren, ZHANG Peng, et al. Reconnaissance UAV route planning design and research [J]. Computer Simulation, 2016, 33(4):111-115.(in Chinese).
- [7] 齐乃明, 孙小雷, 董程, 等. 航迹预测的多无人机任务规划方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(4):32-36.
QI Naiming, SUN Xiaolei, DONG Cheng, et al. Mission planning based on path prediction for multiple UAVs [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(4):32-36.(in Chinese).
- [8] 沈华, 陈金良, 周志靖, 等. 无人机作战对目标点的航迹规划方法研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9):73-76.
SHEN Hua, CHEN Jinliang, ZHOU Zhijing, et al. The method research for target point path planning for target point of UAV [J]. Computer Simulation, 2016, 33(9):73-76.(in Chinese).

[9] 陈海, 何开锋, 钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016, 37(3):928-935.
CHEN Hai, HE Kaifeng, QIAN Weiqi. Cooperative coverage path planning for multiple UAVs [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 928-935.(in Chinese).

[10] 孙小雷, 齐乃明, 董程, 等. 无人机任务分配与航迹规划协同控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(12):2772-2776.
SUN Xiaolei, QI Naiming, DONG Cheng, et al. Co-operative control algorithm of task assignment and path planning for multiple UAVs [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(12):2772-2776.(in Chinese).

[11] 石利平. 改进型遗传算法求解 TSP 问题[J]. 实验技术与管理, 2014,31(7): 61-64.
SHI Liping. An improved genetic algorithm to solve TSP problem [J]. Experimental Technology and Management, 2014,31(7): 61-64.(in Chinese).

[12] 姚明海, 王娜, 赵连朋. 改进的模拟退火和遗传算法求解 TSP 问题[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(14):60-65.
YAO Minghai, WANG Na, ZHAO Lianpeng. Improved simulated annealing algorithm and genetic algorithm for TSP [J]. Computer Engineering and Applications, 2013,49(14):60-65.(in Chinese).

[13] 于莹莹, 陈燕, 李桃迎. 改进的遗传算法求解旅行商问题[J]. 控制与决策, 2014,29(8): 1483-1488.
YU Yingying, CHEN Yan, LI Taoying. Improved genetic algorithm for solving TSP [J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1483-1488.(in Chinese).

[14] 孙文彬, 王江. 一种基于遗传算法的 TSP 问题多策略优化求解方法[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(4):1-5.
SUN Wenbin, WANG Jiang. An algorithm for TSP problem based on genetic algorithm and multi-optimization operation [J]. Geography and Geo-Information Science, 2016,32(4):1-5.(in Chinese).

(责任编辑:孙 威)