

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.020

受限通信下多基地多无人机协同搜索多目标任务规划问题

曹 瑾¹, 刘晓芬², 李松杰¹, 褚文华³

(1. 武警研究院建设发展研究所军事工作研究室, 北京 100012;

2. 武警后勤学院基础部数理教研室, 天津 300309;

3. 武警研究院系统工程研究所标准规范研究室, 北京 100012)

摘要: 针对多无人机协同搜索多目标的多旅行商航路规划问题 (multiple traveling salesman problem, MTSP), 建立一种多目标、多基地、目标有通信限制的多无人机协同侦察任务规划模型。考虑完成任务所需时间、总搜索路径长度及任务均衡性, 利用量子遗传算法进行优化; 针对侦察目标受通信类型限制模拟仿真。结果表明, 该模型能得到完成侦察任务的最优航线。

关键词: 无人机; 协同; 量子; 遗传算法

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Multi-target Mission Planning for Multi-UAV Cooperative Search in Multi-base Systems with Limited Communication

Cao Jin¹, Liu Xiaofen², Li Songjie¹, Chu Wenhua³

(1. Military Work Research Room, Institute Construction and Development, Research Institute of PAP, Beijing 100012, China; 2. Teaching and Research Section of Mathematic, Department of Basic Courses, Logistics University of PAP, Tianjin 300309, China;

3. Standard Research Room, Institute of Systems Engineering, Research Institute of PAP, Beijing 100012, China)

Abstract: Aiming at the multiple traveling salesman problem (MTSP) of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) cooperative searching for multiple targets, a mission planning model of multiple UAVs cooperative reconnaissance with multiple targets, multiple bases and communication constraints is established. Considering the time required to complete the task, the length of the total search path and the balance of the task, the quantum genetic algorithm is used to optimize it. The simulation is carried out for the reconnaissance target limited by the communication type. The results show that the model can obtain the optimal route to complete the reconnaissance mission.

Keywords: UAV; cooperative; quantum; genetic algorithm

0 引言

随着无人机技术的快速发展, 多无人机协同作战作为现代战争的一种重要作战方式, 其在情报搜集、电子侦察、指控通信、战损评估等军事领域发挥着越来越重要的作用。多无人机协同任务规划问题是在特定条件的约束下, 将任务分解成一些子任务并分配给多无人机系统中的各无人机协同完成, 从而实现某个目标函数的最优或次优解。多无人机协同侦察规划问题中, 快速有效地协同搜索路径问题是一个 NP-hard 问题^[1-3]。国内外的众多学者已经对多无人机协同任务规划中的航路规划问题做了广泛的研究。文献[4]在无人机协同多任务分配的研究中, 提出了一种基于分工机制的蚁群算法, 得到了基于作战任务代价的状态转移规则和基于作战任务

能力评估的问题解构造策略, 大幅提升了算法性能。文献[5-9]针对战场环境的多目标、多任务以及无人机能力有限等特点, 设计了一种适应于多目标、多无人机、多任务种类的无人机群协同多任务分配模型。文献[10]通过添加虚拟城市的方式, 将多旅行商问题 (MTSP) 转化成旅行商问题 (traveling salesman problem, TSP), 求解最小旅行时间, 但是这种方法只适用于很小规模的 MTSP 问题。根据实际的作战场景, 超短波组网通信是有人机/无人机协同作战的重要通信手段, 对这些组网资源进行科学规划和有效运用, 具有十分重要的军事意义。笔者提出一种多基地、多目标、多无人机、有通信限制的无人机协同任务规划问题, 利用量子遗传算法种群多样性好、收敛速度快的特点, 探讨完成侦察任务航路规划最优方案, 提高了任务规划效率。

收稿日期: 2022-07-12; 修回日期: 2022-08-13

作者简介: 曹 瑾(1980—), 男, 山西人, 硕士, 副研究员, 从事军事建模与模拟仿真研究。E-mail: caojin3210@163.com。

1 多基地多无人机任务规划模型

1.1 多基地多无人机任务规划目标函数

将多基地多无人机协同搜索规划问题简化成 MTSP 模型, 假设任务区一共有 n 个侦察目标地点, 搜索路径记为 $R=\{P, T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{in}, P\}$, $P=\{P_1, P_2, \dots, P_q\}$ 无人机基地集合, 记 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 为任务中协同搜索的无人机集合, $T=\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 为任务中待搜索侦察目标点集合。从第 i 个基地派出第 j 架无人机侦察目标数目 K_{ij} 表示为:

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ijk} \quad (1)$$

式中

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & i \text{ 基地第 } j \text{ 架无人机侦察目标 } T_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

第 i 个基地派出第 j 架无人机 U_{ij} 的搜索路径长度 L_{ij} 为:

$$L_{ij} = \|PT_{j1}\| + \sum_{m=1}^{jK_{ij}} \|T_m T_{m+1}\| + \|PT_{jK_{ij}}\| \quad (2)$$

优化目标 1: 完成任务所需时间。假设无人机以恒定速度飞行, 任务中无人机协同搜索的时间为最后一架无人机返回基地的时间, 最快完成搜索任务的问题转化为最小化最长的无人机搜索路径长度问题, 即

$$\min L_1 = \max(L_{ij}) \quad (3)$$

优化目标 2: 总搜索路径长度。随着无人机在执行任务过程中滞空时间的增长, 能量损耗增多, 因此要求无人机总搜索路径长度要尽可能的短, 任务要求不同地面目标可选择通信手段不同, 搜索过程中可使用 D_1 、 D_2 和 D_3 3 种通信手段, 不同通信手段之间无法互通。

$$\min L_2 = \min_{p \in D_1}(L_{ijp}) + \min_{p \in D_2}(L_{ijp}) + \min_{p \in D_3}(L_{ijp}) \quad (4)$$

式中 L_{ijp} 表示从第 i 个基地派出第 j 架无人机使用第 p 种通信手段搜索路径长度。

优化目标 3: 考虑各无人机之间任务分配的合理性。

完成任务所需时间定义为:

$$t_{\max} = \max_{i \in I} \{t_{ij}\} \quad (5)$$

式中 t_{ij} 表示第 i 个基地派出第 j 架无人机完成任务所花费的时间。考虑各无人机任务分配均衡性, 在假设无人机飞行速度相同的条件下, 定义时间代价函数 L_3 , 即:

$$L_3 = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max}} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}} \quad (6)$$

式中: $L_{\max}=\max(L_{ij})$; $L_{\min}=\min(L_{ij})$; L_{ij} 表示第 i 个基地派出第 j 架无人机的搜索路径长度。

建立受限通信下多基地多无人机协同任务规划目标函数为:

$$L = \min(L_1, L_2, L_3) \quad (7)$$

1.2 多基地多无人机任务规划的条件约束

1) 协同约束。

任务集合中的每个任务只能被完成一次, 即所有无人机对任务中的目标只能进行一次搜索, 即:

$$\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m x_{ijk} = 1, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n x_{ijk} \leq n \quad (9)$$

2) 侦察目标通信约束。

多无人机进行任务分配时, 搜索过程中可使用 3 种通信手段, 表示为 $D=\{D_1, D_2, D_3\}$, 不同通信手段之间无法互通, 即:

$$\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m x_{ijk} \cdot z_{ijkp} = 1, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n, \quad \forall p \in D \quad (10)$$

式中:

$$z_{ijkp}(x) = \frac{(x-2)(x-3)}{2} + (x-1)(3-x) + \frac{(x-1)(x-2)}{2};$$

$$y_{ijkp} = \begin{cases} 1, & p \in D_1 \\ 2, & p \in D_2 \\ 3, & p \in D_3 \end{cases}$$

3) 航程约束。

无人机受机载能源的限制, 航程不能超过自身最大航程。假设无人机的飞行速度为 v , 单次飞行时间上限为 \bar{t} :

$$\frac{L_{ij}}{v} \leq \bar{t} \quad (11)$$

2 量子遗传算法求解

K.H.Han 等提出一种将量子计算和遗传算法相结合的智能优化算法, 其将量子态、量子门、量子状态特性、概率幅等量子概念引入到遗传算法中。量子遗传算法是一种概率搜索算法, 其基因采用量子位来表示。在量子遗传算法中, 由于量子信息叠加性使量子位表达的基因包含所有可能的信息, 比传统的遗传算法更具有并行性, 利用更新量子旋转门生成新的种群来完成进化搜索, 加速算法收敛,

引入量子交叉、变异和灾变可克服收敛速度慢、陷入局部最优解等现象。

2.1 解的编码

多旅行商问题编码采用一个由所有目标的排列、各无人机基地和各无人机所使用通信手段、各无人机侦察目标的个数、所需无人机数目 4 部分组成的结构表示协同侦察方案，具体如下：

n	m_1	m_2	...	m_n	V_{11}	V_{12}	...	V_{1m_1}	...	V_{n1}	V_{n2}	...	V_{nmn}
					U_{11}	U_{12}	...	U_{1m}	...	U_{nm1}	U_{nm2}	...	U_{nmn}

其中： n 为派出无人机个数； m_i 为无人机 i 侦察数目个数 ($i=1, 2, \dots, n$)； $V_{n1}, V_{n2}, \dots, V_{nmn}$ 为第 n 个无人机经过的侦察目标； U_{nm1}, \dots, U_{nmn} 为第 n 个无人机所使用通信手段，其值为 1, 2, 3，取值均相同。

2.2 初始解生成

随机生成侦察目标、无人机基地和各无人机所使用通信手段、所需无人机数目的以量子比特为编码的染色体，形成一个初始解。

2.3 适应度函数

D_{k_i, k_j} 为目标 k_i 到目标 k_j 的距离，则该个体的适应度为：

$$\text{fitness} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} D_{k_i, k_j} + D_{k_n, k_1} + \delta_{k_i, k_j, p}} \quad (12)$$

搜索过程中可使用 $D=\{D_1, D_2, D_3\}$ 3 种通信手段，且不同通信手段之间无法互通，使用原则 $D_1 \geq D_2 \geq D_3$ ，故构造无人机从目标 k_i 到目标 k_j 罚函数 $\delta_{k_i, k_j, p}$ ：

$$\delta_{k_i, k_j, p} = \begin{cases} 0, & p \in D_1 \\ 100, & p \in D_2 \\ 200, & p \in D_3 \end{cases} \quad (13)$$

2.4 量子旋转门

利用量子旋转门对个体实施调整，得到新的种群，个体适应度值越大，被选择的概率越高。

2.5 量子遗传算法流程

量子遗传算法基本步骤：

- 1) 种群初始化，随机生成以量子比特为编码的 n 个父代染色体；
- 2) 对每个染色体基因位进行测量，得到一个状态，即二进制编码，对每个状态计算其适应度；

3) 记录最佳个体及适应度，判断是否满足结束条件，若满足则退出，否则继续；

4) 判断种群是否需要灾变，若需要则跳转至 7)；

5) 利用量子旋转门对个体进行更新，产生新的种群；

6) 进行量子交叉和变异操作；

7) $t=t+1$ ，返回 2)。

具体的算法流程如图 1 所示。

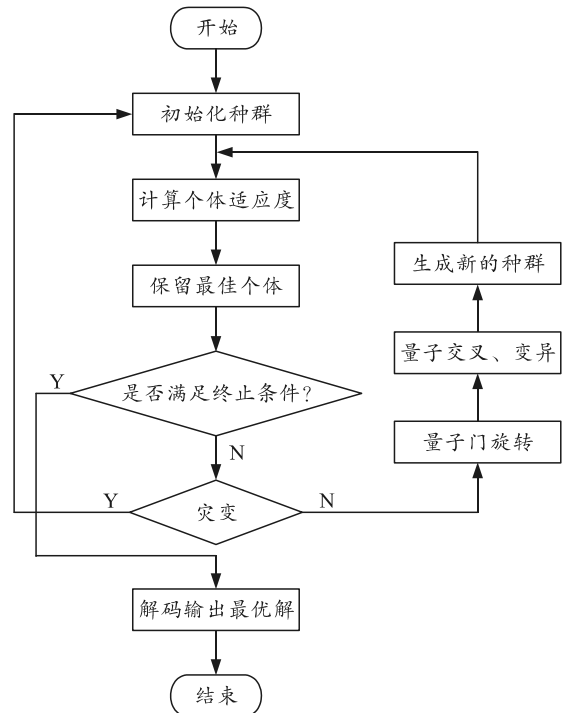


图 1 量子遗传算法流程

3 仿真模拟

以多基地多无人机协同搜索侦察为背景，假设战场环境已知，为方便计算，均消除量纲，我方无人机基地数目为 3，分别为 T1、T2 和 T3。如表 1 所示，各基地配备一定数量的无人机。各无人机从基地出发，协同搜索侦察固定的地面目标。如表 2 所示，不同目标点可采用通信手段不同，假设不同基地各无人机飞行速度相同 $v=60 \text{ m/s}$ ，单次飞行时间上限为 8，按照最后一架无人机返回基地的时间最短、通信手段 D1、D2 和 D3 优先原则计算最优航线，依次经过所有目标点，完成侦察任务之后返回基地。

表 1 无人机基地相关信息

基地名称	坐标	配备数量
T1	(51, 4)	3
T2	(65, 12)	2
T3	(70, 26)	2

表 2 侦察目标的相关信息

序号	X 坐标	Y 坐标	数据通信手段
1	4.0	5.0	D1/D2/D3
2	16.0	25.0	D2/D3
3	10.0	45.0	D1/D2
4	20.0	55.0	D1/D3
5	30.0	65.0	D2/D3
6	35.0	55.0	D1/D3
7	29.0	31.0	D2/D3
8	37.0	26.0	D2/D3
9	47.0	27.0	D3
10	32.0	33.3	D2/D3
11	31.0	17.0	D2/D3
12	14.0	7.0	D1/D2
13	35.6	13.8	D2/D3
14	26.7	22.5	D2/D3
15	21.0	39.0	D2/D3
16	38.0	42.0	D1/D2/D3
17	5.0	26.0	D1/D3
18	28.0	53.0	D2/D3
19	20.0	13.0	D1/D3
20	10.0	60.0	D1/D3
21	26.0	35.5	D2/D3
22	54.0	38.0	D3
23	7.0	58.0	D1/D3
24	12.0	36.0	D1/D3
25	30.0	2.0	D1/D2

无人机基地和侦察目标如图 2 所示，具体参数设置如下：各架无人机速度假定 60 m/s，量子遗传算法种群大小设置为 80，交叉概率为 0.90，变异概率为 0.05，最大迭代次数设置为 1 000。

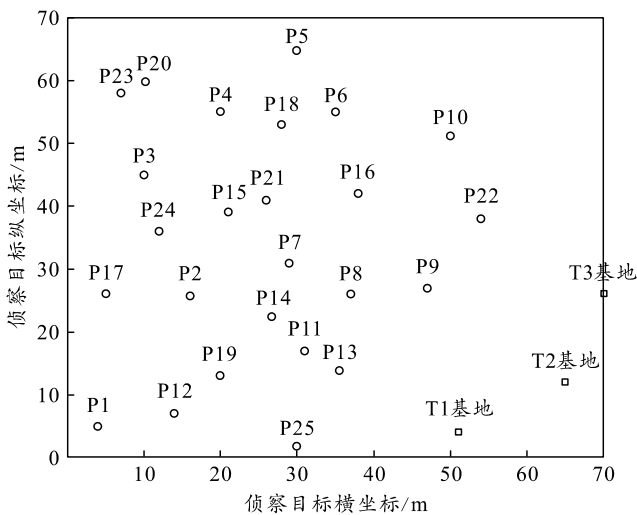


图 2 无人机基地和侦察目标

采用 Matlab 软件模拟仿真，结果表明：在相同条件下，与遗传算法(GA)相比，量子遗传算法(QGA)获得的路径更短，收敛速度更快(如图 3)。航路规划最优方案如图 4—5 所示，各基地均派出一架无人机完成各自协同搜索任务并顺利返回，没有出现搜索目标冲突或者目标地点遗漏的情况，其中基地 T1 派出一架无人机采用通信手段 D1 侦察，其

飞行路径长度为 194.01 m；基地 T2 派出一架无人机采用通信手段 D3 侦察，其飞行路径长度为 177.34 m；基地 T3 派出一架无人机采用通信手段 D2 侦察，其飞行路径长度为 146.61 m。最后返回无人机为基地 1 派出无人机，其飞行时长为 3.23，未超过飞行上限。

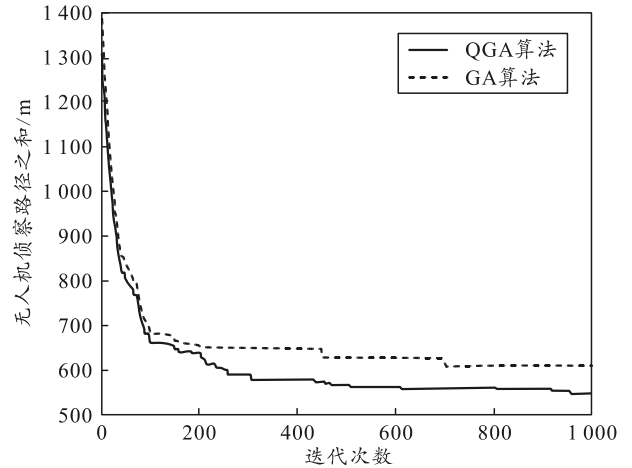


图 3 无人机侦察任务航线路径之和迭代曲线

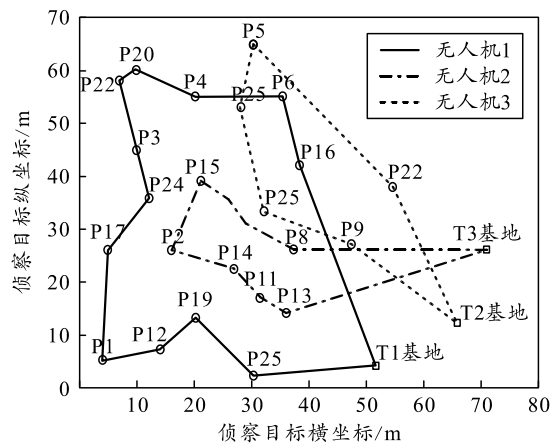


图 4 无人机侦察任务航线最优路径

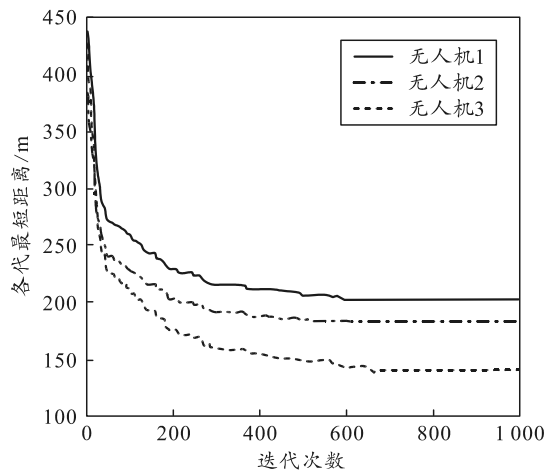


图 5 各无人机航线路径迭代收敛曲线