

8-13-2020

Planning Model and Model Solve Method of Multi-base Multi-UAV Cooperative Reconnaissance

Li Yuan

1. *Navy Submarine Academy, Qingdao 266071;;*

Zhang Hui

1. *Navy Submarine Academy, Qingdao 266071;;*

Sijin Wu

2. *College of Information Engineering, Northwest A&F University, Xi'an, 712100;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Planning Model and Model Solve Method of Multi-base Multi-UAV Cooperative Reconnaissance

Abstract

Abstract: A UAV cooperative reconnaissance planning model with multi-base, multi-UAV, restrictions of target reconnaissance time windows and target reconnaissance equipment was set up, and the model solve method was proposed. The take-off bases of the UAVs, the type of reconnaissance equipment carried and the target sequences reconnoiced by the UAVs were optimized in company in order to find the reconnaissance plan that need minimum number of UAVs. The process of signal plan forming was divided into two steps, the formation of the initial plan and the formation of the specific plan. The plans were ranked by the primary and secondary key words. The optimization method based GA was proposed. According to the computational experiments, high-quality reconnaissance plan can be worked out.

Keywords

multi-base, multi-UAV, cooperative reconnaissance, time windows, Genetic Algorithm

Recommended Citation

Li Yuan, Zhang Hui, Wu Sijin. Planning Model and Model Solve Method of Multi-base Multi-UAV Cooperative Reconnaissance[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2540-2545.

多基地多无人机协同侦察规划模型和模型求解方法

李原¹, 张会¹, 吴思瑾²

(1. 海军潜艇学院, 青岛 266071; 2. 西北农林科技大学信息工程学院, 西安 712100)

摘要: 建立多目标、多基地、多无人机、目标有侦察时间窗口和侦察器材限制的无人机协同侦察规划模型, 并给出模型求解方法。对无人机起飞基地、所携带的侦察器材类型以及所侦察的目标序列同时进行优化, 寻找所需无人机数量最少的协同侦察方案。将单个方案的生成过程分为两步, 分别为初步方案生成和详细方案生成; 按照主次关键字对方案进行排序; 给出基于遗传算法的协同侦察方案优化方法。计算实验表明, 可以得到高品质的协同侦察方案。

关键词: 多基地; 多无人机; 协同侦察; 时间窗口; 遗传算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 10-2540-06

Planning Model and Model Solve Method of Multi-base Multi-UAV Cooperative Reconnaissance

Li Yuan¹, Zhang Hui¹, Wu Sijin²

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266071; 2. College of Information Engineering, Northwest A&F University, Xi'an, 712100)

Abstract: A UAV cooperative reconnaissance planning model with multi-base, multi-UAV, restrictions of target reconnaissance thime windows and target reconnaissance equipment was set up, and the model solve method was proposed. The take-off bases of the UAVs, the type of reconnaissance equipment carried and the target sequences reconnaianced by the UAVs were optimized in company in order to find the reconnaissance plan that need minimum number of UAVs. The process of signal plan forming was devided into two steps, the formation of the initial plan and the formation of the specific plan. The plans were ranked by the primary and secondary key words. The optimazation method based GA was proposed. According to the computaionl experiments, high-quality reconnaiance plan can be worked out.

Keywords: multi-base; multi-UAV; coopertive reconnaiance; time windows; Genetic Algorithm

引言

利用搭载成像传感器的无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)执行空基侦察任务是 UAV 的重要应用方向之一。而多无人机协同侦察规划, 就是协同多架从不同基地出发, 搭载不同传感器的 UAV 执行侦察任务。多无人机协同侦察规划已

经成为国内外相关研究领域研究的一个重点问题, Ryan^[1]将多 UVA 协同侦察任务规划表达为带时间窗口的多旅行商问题(Travel Salesman Problem, TSP), 利用禁忌搜索算法进行求解。Hutchison^[2]将侦察区域划分为规模大小的相同区域, 然后将一个区域中的所有指标指派给某架 UAV 进行侦察, 建立独立的 TSP 模型, 采用模拟退火算法, 优化单个 UAV 的侦察目标序列。Ousingsawat^[3]将多 UAV 协同侦察问题分为最优轨迹问题和任务分配问题, 利用 A*算法寻找两个目标之间的最优航线, 将任务分配问题表达为混合



收稿日期: 2016-05-26 修回日期: 2016-07-15;
作者简介: 李原(1964-), 男, 山东淄博, 硕士, 高工, 研究方向为鱼水雷武器与作战仿真; 张会(1971-), 女, 山东宁阳, 博士, 副教授, 研究方向为作战仿真与军事运筹; 吴思瑾(1996-), 女, 山东青岛, 本科, 研究方向为电子商务。

<http://www.china-simulation.com>

• 2540 •

整数规划问题, 利用 Matlab 优化工具箱进行求解。Tian^[4]建立了考虑目标侦察需要的 UAV 协同侦察优化模型, 但没有考虑对不同基地的 UAV 进行调度和任务规划。

多基地多无人机协同侦察规划决策变量多、约束条件复杂^[5-6], 基于智能优化算法的方案求解的研究得到重视, 这些工作从不同角度给出无人机协同侦察规划约束条件和模型求解方法^[7-9], 均有一定的理论和使用价值。例如, 田菁^[7]建立了基地无人机数量和所搭载侦察器材确定、有侦察时间窗口和侦察器材要求的多无人机协同侦察任务规划问题进行研究, 建立了以能侦察到的目标数量和无人机总的飞行距离为目标函数的多目标优化模型, 给出算法求解模型的 Pareto 解。

本文研究多目标、多无人机、多基地、有时间窗口和侦察器材限制的无人机协同任务规划问题, 目的是找出能完成侦察任务且所需无人机数量最少的方案。无人机的起飞基地和所搭载的侦察器材也是需要决策的内容。对已有的无人机协同任务规划建模优化文献进行分析, 目前还没有直接以所需无人机架数最少为目标, 同时进行无人机起飞基地、所搭载侦察器材种类和侦察目标序列进行优化的模型和模型求解算法。文中针对多目标、多无人机、多基地、有时间窗口和侦察器材限制的无人机协同任务规划问题, 建立无人机协同侦察规划模型, 对无人机起飞基地、所携带的侦察器材种类以及侦察目标序列同时进行优化, 寻找所需无人机数量最少的侦察方案。将单个方案的生成过程分为两步, 分别为初步方案生成和详细方案生成; 按照主次关键字对方案进行排序; 给出基于遗传算法的协同侦察方案优化方法。计算实验表明, 可以得到高品质的协同侦察方案。

1 多无人机协同侦察规划模型

1.1 模型假设

对问题进行如下假设:

(1) 假设每架无人机执行任务时只能携带一

种侦察器材;

(2) 假设各基地都具有足够多的无人机;

1.2 符号

记 $M = \{1, 2, \dots, n_m\}$ 为目标集合, $C = \{1, 2, \dots, n_c\}$ 为基地集合, $Q = \{1, 2, \dots, n_q\}$ 为侦察器材类型集合, 其中: n_m 为目标数目, n_c 为基地数目, n_q 为侦察器材类型数。

用 $Q^c = (Q_1^c, Q_2^c, \dots, Q_{n_c}^c)$ 表示各基地所具有的侦察器材的类型, 其中 $Q_j^c \subseteq Q$ 为第 j 个基地所具有的侦察器材类型集合 ($j = 1, 2, \dots, n_c$):

用 $Q^m = \{Q_1^m, Q_2^m, \dots, Q_{n_m}^m\}$ 表示各目标所允许使用的侦察器材的类型, 其中 $Q_i^m \subseteq Q$ 为侦察第 i 个目标可用的侦察器材类型的集合 ($i = 1, 2, \dots, n_m$)。

记 e_i 、 f_i 分别为开始侦察第 i 个目标所允许的最早和最晚时间 ($i = 1, 2, \dots, n_m$), 记 ω_i 为侦察第 i 个目标需要花费的时间。

1.3 决策变量

取 K 为所需无人机架数的一个上界, 协同侦察规划模型的决策变量为 $c_i \in \{1, 2, \dots, n_c\}$ 、 $q_i \in \{1, 2, \dots, n_q\}$ 、 $n_i \in \{1, 2, \dots, n_m\}$ ($i = 1, 2, \dots, K$) 和 $m_i^j \in \{1, 2, \dots, n_m\}$ ($i = 1, 2, \dots, K$, $j = 1, 2, \dots, m_i$)。其中, c_i 为第 i 架无人机所属的基地, q_i 为第 i 架无人机所携带的侦察器材的类型, m_i 为第 i 架无人机所侦察的目标数量(可以为零), m_i^j 为第 i 架无人机所侦察的第 j 个目标。

1.4 目标函数

综合考虑所需无人机数量和侦察花销, 将无人机数量作为第一关键字, 所有无人机飞行时间总和作为第二关键字, 对方案按主次关键字进行排序。

记 t_k 为无人机开始对目标 k 进行侦察的时间, 则

$$t_k = \begin{cases} \max\{e_k, d_c(i, k) / V\} & \text{存在 } m_i^j = k \text{ 且 } j=1 \\ \max\{e_k, t_l + \omega_l + & \text{存在 } m_i^j = k, j > 1 \text{ 且} \\ d(l, k) / V\} & m_i^{j-1} = l \end{cases}$$

其中: V 为无人机飞行时间, $d(l,k)$ 表示目标 l 到目标 k 的距离, $d_c(i,k)$ 表示基地 i 到目标 k 的距离。

记 T_i 为第 i 架无人机的飞行时间, 则

$$T_i = \begin{cases} 0 & \text{若 } n_i = 0 \\ t_k + \omega_k + d_c(c_i, k) / V & \text{若 } n_i > 0, x_i^j = k \text{ 且 } j = n_i \end{cases}$$

记 N 为所需无人机数, 即

$$N = \text{num}(\{i | m_i > 0\})$$

其中, $\text{num}(A)$ 表示集合 A 中元素的个数。

记 T 为所有无人机飞行时间的总和, 即

$$T = \sum_{i=1}^K T_i$$

无人机协同任务规划模型的优化目标为

$$\min J = (N, T)$$

其中: N 为主关键字, T 为次关键字, 对方案按照主次关键字从小到大进行排序, 即所需无人机数量越少越好, 在无人机数量相同的条件下, 总飞机时间越少越好。

1.5 约束条件

(1) 完成侦察任务约束

对任意目标 $k \in M$ 进行且只进行 1 次侦察, 即

$$\text{num}(\{(i, j) | x_i^j = k, i = 1, 2, \dots, K, j = 1, \dots, m_i\}) = 1 \\ (i = 1, 2, \dots, K)$$

(2) 基地所具有的侦察器材类型约束

若 $c_i = l$, 则 $q_i \in Q_l^c$ ($i = 1, 2, \dots, K$)

(3) 侦察目标所能使用的侦察器材约束

若存在 i, j 使得 $x_i^j = k$, 则 $q_i \in Q_k^m$

(4) 对目标开始侦察时间窗口约束

$$t_k \leq f_k \quad (k = 1, 2, \dots, n_m)$$

(5) 单架无人机飞行时间约束

$$T_i \leq T_d \quad (i = 1, 2, \dots, K)$$

其中: T_d 为单架无人机单次飞行时间的上限。

2 基于遗传算法的协同侦察方案优化

2.1 解的编码

采用一个由所有目标的排列、各无人机起飞基地、各无人机所携带侦察设备、各无人机侦察目标

的个数、所需无人机数目、所有无人机飞行时间总和等五部分组成的结构表示协同侦察方案, 也就是模型的解, 并称其为解染色体。例如, 可取所需无人机数目的一个上界为目标数目 n_m , 则解染色体的详细内容如下:

解染色体为一个 $4n_m+2$ 位的数据结构, 其中的 1 至 n_m 位为 n_m 个目标的一个全排列, n_m+1 至 $2n_m$ 位存储的是基地号码(表示各无人机起飞的基地, 可以相同), $2n_m+1$ 至 $3n_m$ 位存储的是无人机携带的侦察器材的类型(必需为对应无人机起飞基地所具有的类型), $3n_m+1$ 至 $4n_m$ 位的是各无人机侦察的目标数(可以为零, 为零时表示对应的无人机实际上没有真正去执行任务), $4n_m+1$ 位为所需无人机架数, 等于 $3n_m+1$ 至 $4n_m$ 位中数字不为零的位数, $4n_m+2$ 位存储所有无人机飞行时间的总和。

2.2 初始解生成

使用如下方法生成初始解染色体集合:

(1) 随机生成目标的一个全排列;

(2) 随机生成起飞基地序列;

(3) 根据无人机起飞基地序列中各无人机起飞基地的侦察器材类型集合, 随机生成相应的无人机所搭载的侦察器材类型, 产生无人机所搭载侦察器材类型序列;

(4) 生成一个所有位都是 0 的解染色体结构, 将所生成的目标全排列、无人机起飞基地序列、无人机所搭载侦察器材类型序列写入相应位置, 形成一个初步解。然后按图 1 给定的流程计算每架无人机所侦察目标的数目, 以及所需的无人机数目和无人机的总飞行时间, 此过程称为详细方案生成过程, 若能成功生成一个详细方案, 则将其加入到初始解集中。

图 1 中, x 为输入的初步方案, y 为输出的详细方案; flag 为详细方案生成是否成功标记, $\text{flag}=1$ 表示生成成功, $\text{flag}=0$ 表示生成不成功。

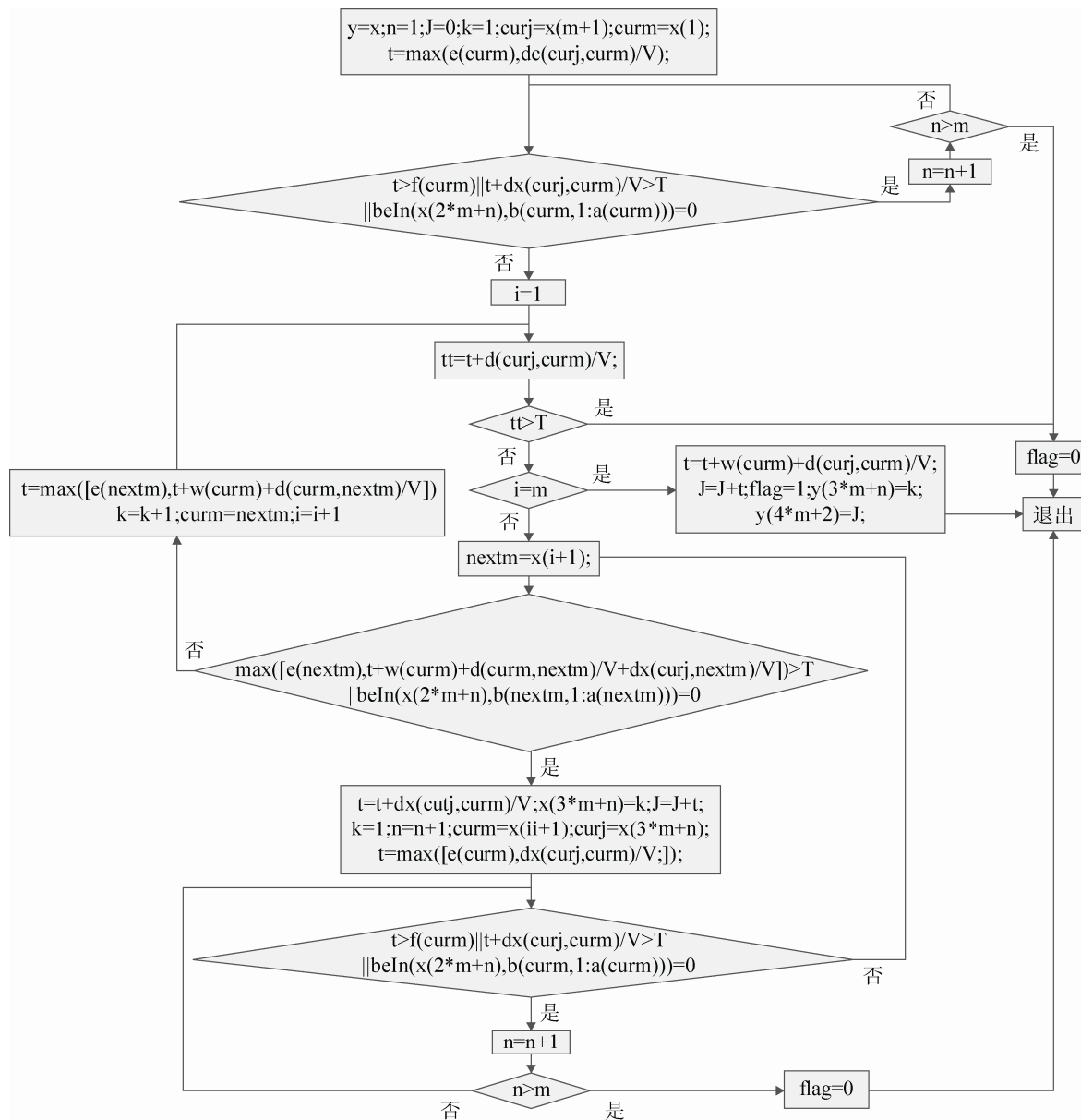


图 1 详细方案生成流程图

2.3 种群进化策略

设计包括针对目标全排列的对换、逆序和前插操作, 以及针对基地和侦察设备的类型变换操作以及相应的种群进化策略如下。

(1) 针对无人机起飞基地和无人机所携带侦察器材类型的操作

从种群中取出部分染色体。针对所取出的每个解染色体 x , 首先生成一个所有位全为 0 的染色体结构 y , 将 x 的前 $3n_m$ 位复制到 y 中的相应位置。然后, 任取若干架无人机, 将 x 中这些无人

机的起飞基地分别变成另外任选的相同数目的基地, 写入 y 中的相应位置, 并根据所选定的基地, 任选基地所具有的侦察器材类型, 写入到 y 中相应的位置。最后, 针对 y 所表示的初步方案进行详细方案生成, 所生成的方案仍记为 y 。如果详细方案 y 生成成功且优于 x , 则用新生成的方案 y 代替种群中的原方案 x 。

(2) 针对目标全排列的进化

将种群中的解染色体随机分为规模为 4 的若干个种群, 按照以下规则产生新种群:

1) 新种群中的第一个解染色体 y_1 与原子群中

最优的解染色体 x 同。

2) 任取 $I, J \in \{1, 2, \dots, m\}$ 且 $I < J$, 对 x 的目标全排列分别进行对换、逆序和前插操作, 作为新子群的第2至第4个染色体 y_2 、 y_3 和 y_4 的目标全排列, 然后将 x 中的起飞基地序列和所搭载侦察器材类型序列也复制到 y_2 、 y_3 和 y_4 中, 形成三个初步方案, 即 y_2 、 y_3 和 y_4 分别为

$$[x(1), \dots, x(I-1), x(J), x(I+1), \dots, x(J-1), x(I), x(J+1), \dots, 0, \dots, 0]$$

$$[x(1), \dots, x(I-1), x(J), x(J-1), \dots, x(I+1), x(I), x(J+1), \dots, 0, 0, \dots, 0] \text{ 和}$$

$$[x(1), \dots, x(I-1), x(J), x(I+1), \dots, x(J-1), x(J), x(J+1), \dots, 0, 0, \dots, 0]$$

使用前一部分给出的详细方案生成方法, 求 y_2 、 y_3 和 y_4 的对应的详细方案, 并仍分别记为 y_2 、 y_3 和 y_4 , 如果三个具体方案都能成功生成, 则用新子群代替种群中的原子群。

3 计算实验

假设无人机的飞行速度为 100 km/h, 单次飞行时间上限为 8 h, 有 3 个无人机基地, 5 种侦察器材, 取 $Q_1^c = \{1, 2, 5\}$, $Q_2^c = \{2, 3, 4\}$, $Q_3^c = \{3, 5\}$ 。在长、宽各 100 km 的范围内随机生成 80 个目标, 假设每个目标可用四种不同类型的器材进行侦察, 随机生成侦察各目标可用的侦察器材类型集合。对 $k = 1, 2, \dots, 80$, 取 $\omega_k = 0$, e_k 在 $[0, 4]$ 区间内任意取值, f_k 在 e_k 的基础上加 $[0, 3]$ 上的一个随机数。设置种群规模为 100, 进化代数数为 600。

计算得到的各代种群中最优方案所需的无人机数量和无人机总飞行时间变化曲线如图 2 所示。在图 2 中, 下部的实线为所需无人机数目, 上部的虚线为无人机的总飞行时间。初始解集中的最优方案需要 12 架无人机, 经过进化得到一个只需 4 架无人机的方案, 达到了方案优化的目的。

根据最终方案计算得到的各目标开始侦察时间与各目标允许开始侦察时间窗口关系如图 3 所示。在图 3 中, 横坐标表示是按编号顺序排列的所有目标, 针对目标 k , 上部的曲线表示的是 $f_k - t_k$ 的

值, 下部的曲线表示的是 $e_k - t_k$, 从图中可以看出, 所有目标开始侦察时间按均满足开始目标侦察开始时间窗口要求。

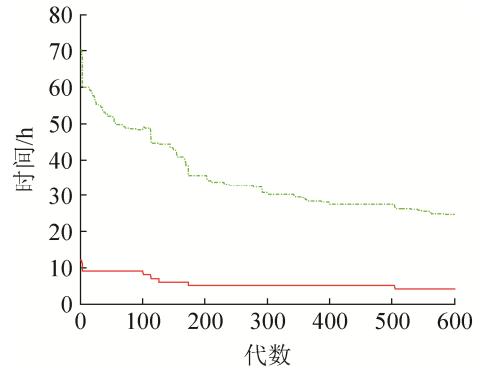


图 2 进化过程中各代种群中最优方案目标函数值变化图

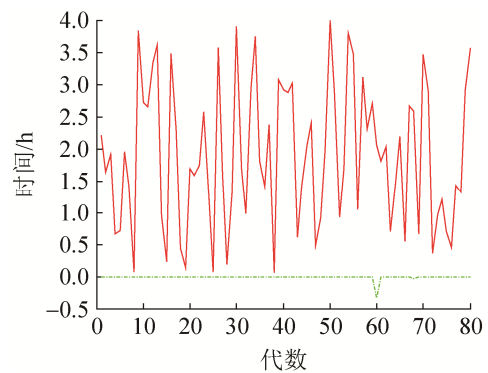


图 3 对各目标开始侦察时间与各目标允许开始侦察时间窗口关系图

图 4 绘制了最终方案中的所有无人机的飞行路径, 不同无人机的飞行路线用不同线形的折线绘制。图 5 则在各子图中分别绘制了最终方案中各无人机的侦察路径。图 4 和图 5 中, “*” 标注的各目标的位置, “o” 标注的是各基地的位置。

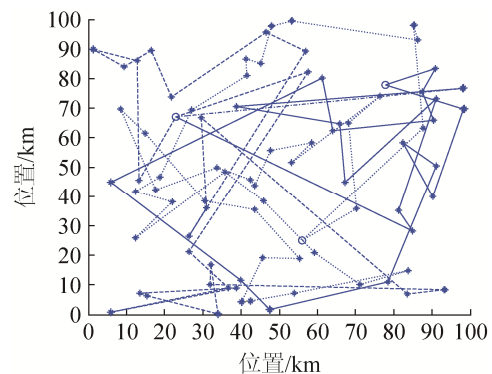
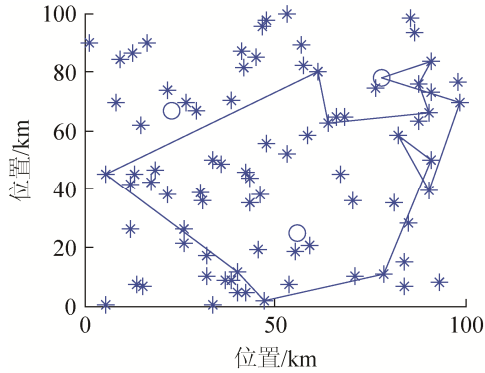
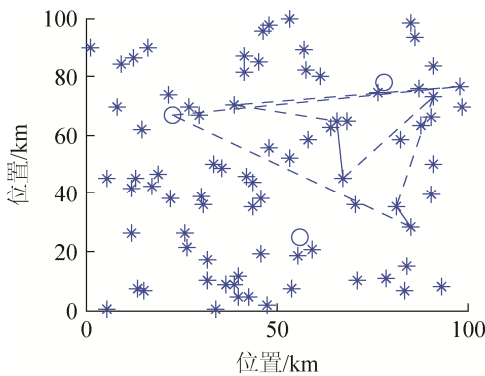


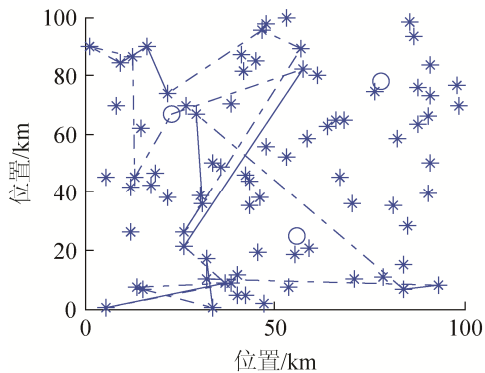
图 4 最终方案中的所有无人机的侦察路径总图



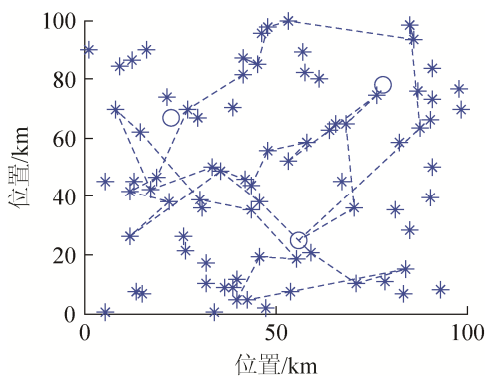
(a) 第 1 架无人机的侦察路径图



(b) 第 2 架无人机的侦察路径图



(c) 第 3 架无人机的侦察路径图



(d) 第 4 架无人机的侦察路径图

图 5 最终方案中各无人机的侦察路径图

4 结论

所给出的多基地多无人机协同侦察规划模型, 实现了对无人机出发基地、所搭载侦察器材类型和侦察目标序列的整体优化目标的描述。采用双关键字对方案进行排序, 保证所需无人机数目最小的同时, 使得方案的排序具有一定的连续性, 有利于通过遗传变异进行方案的逐步优化。计算实验结果显示, 所给出的种群进化策略也是非常有效的, 通过进化可以得到具有较高品质的协同侦察方案。

参考文献:

- [1] Ryan J L, Bailey T G, Moore J T, et al. Reactive tabu search in unmanned aerial reconnaissance simulation [C]// Proceedings of Winter Simulation Conference. USA: WSC, 1998: 873-879.
- [2] Hutchison M G. A method for estimating range requirements of tactical reconnaissance UAVs [C]// Proceedings of AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles. Virginia, USA: AIAA, 2002:1-12.
- [3] Ousingsawat J, Mark E C. Establishing trajectories for multi-Vehicle reconnaissance [C]// Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Rhode Island, USA: AIAA, 2004:1-12.
- [4] Tian J, Shen L C, Zheng Y X. Formulation and a MOGA based approach for multi-UAV cooperative reconnaissance Design [J]. Visualization, and Engineering, International Conference on Cooperative Design (S0302-9743), 2006, 4101:99-106.
- [5] 袁利平, 夏洁, 陈宗基. 多无人机协同路径规划研究综述 [J]. 飞行力学, 2009, 27(5): 1-5.
- [6] 吴文超, 黄长强, 宋磊, 等. 不确定环境下的多无人机协同搜索航路规划 [J]. 兵工学报, 2011, 32(11): 1337-1342.
- [7] 田菁, 沈林成. 多基地多无人机协同侦察问题研究 [J]. 航空学报, 2007, 28(4): 913-914.
- [8] 孙健, 刘慧霞, 席庆彪. 基于改进粒子群算法的多UAV协同侦察任务规划 [J]. 现代电子技术 2012, 35(7): 12-15.
- [9] 叶媛媛, 闵春平. 多无人机协同航路规划的共同进化方法 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(5): 37-39.