

基于协同进化的多平台联合对地观测优化调度*

白国庆,邢立宁,贺仁杰,陈英武

(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073)

摘要:在分析了卫星与无人机在执行观测与资源调度上的特性差异基础上,建立了多平台联合对地观测调度问题的数学模型,提出了多平台协同进化调度算法(MPCCPSA)进行求解。MPCCPSA采用分层式协同进化架构解决了不同类型观测方案统一调度生成问题。根据不同类型平台使用特性以及观测目标集合特点,采用分治-合作策略将其分解分配到各平台,顶层的交叉、变异操作保证各种群的多样性,底层的分治、合作算子保证卫星与无人机之间保持观测能力动态互补,在确保可行解的前提下加快收敛速度。仿真实验表明该方法能够有效解决空-天基多类型平台联合观测优化调度问题。

关键词:成像卫星;无人侦察机;联合观测;协同进化;优化调度

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0182-07

Scheduling multi-platforms collaborative observation based on cooperative evolution

BAI Guoqing, XING Lining, HE Renjie, CHEN Yingwu

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the analysis of the features and differences between satellite and UAV in earth observation and scheduling, a mathematical model was presented to formulate the scheduling problem for the multi-platforms collaborative observation, and a multi-platforms cooperative evolutionary planning and scheduling algorithm (MPCCPSA) was proposed to solve this problem. MPCCPSA uses co-evolution framework for solving the different platforms' observing plans generated in a unified manner. Based on the divide-cooperation strategy and different characteristics of platforms, the observed targets were allocated to each platform. On the top-level, crossover and mutation operations ensured the diversity of the various groups, and the underlying divide-cooperation operators ensured the dynamic complementarity between different platforms. Simulation results show that this method can effectively solve the multi space-aeronautics collaborative observation tasks scheduling problem.

Key words: satellite; UAV; collaborative observation; cooperative evolution; schedule

针对灾害监测、反恐维稳、战场侦察等日益复杂和高时效性的突发观测需求,使用不同类型的卫星、飞艇和飞机协同观测,将更为准确有效、快速及时地获取多种成像模式下的不同空间分辨率和频谱分辨率的观测数据。将多类型、多分辨率的观测数据进行对比、融合以获得更准确和丰富的信息,成为未来对地观测应用的发展趋势^[1-4]。

高空无人机相比于固定轨道飞行的卫星更为灵活,在复杂气象条件下可成为成像卫星的重要补充观测资源。我国汶川、玉树地震发生后,各部门充分利用各种航空和卫星遥感技术,获取了大量灾区航空影像与卫星数据,在灾害应急监测和灾后评估中发挥了重大的作用^[5]。美国森林局与美国宇航局从2006年起开展了高空无人机、成像卫星协同对美国本土森林火灾监测的论证工

作^[6]。美军在2007年发布的联合打击目标指导原则中指出:由于战场环境瞬息多变,打击目标多数时间敏感性强,需要对打击目标进行动态式、协作式的多观测平台、多类型情报资源获取^[7]。随着美国“捕食者”“全球鹰”为代表的高空、长航时、高负载无人侦察机在现代战争以及灾害监测中的有效应用,高性能无人机与成像卫星联合执行对地观测任务成为各航天大国重要的发展方向。

目前由于专业分工以及管理体制等原因,各国不同类型的观测平台多数由不同部门进行管控。由于卫星与无人机在运行方式、使用约束、计划形式等方面的巨大差异,相关联合调度研究主要集中在单类型平台协同观测调度模型与算法^[8-10]。多个不同类型平台协同观测调度技术

* 收稿日期:2012-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71031007, 71101150, 71071156, 61203180, 71101013)

作者简介:白国庆(1984—),男,吉林舒兰人,博士研究生,E-mail:guoqingbai_0@126.com;

陈英武(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ychen@nudt.edu.cn

也仅停留在分布式、分层式组织模式研究上^[11-13]。随着多源遥感技术、数据融合技术的迅速发展,以及我国十二五“高分辨率对地观测系统重大专项”的深入推进,如何实现不同类型观测平台集中规划调度,协同完成应急观测任务成为一个亟待研究解决的问题。

1 问题分析

1.1 协同观测必要性与可行性分析

(1) 时空范围分析

一般应急突发事件发生时空范围相对较小,成像卫星多为太阳同步轨道,理论上对于一个范围较小的区域目标回访时间较长,无法满足事态迅速发展的灾害与战争对于图像数据的需求。本文研究的无人机是指飞行高度大于5500km,可连续执行侦查监视任务24h以上,可搭载900kg以上的成像载荷,如美国的全球鹰无人侦察机,基本可以作为成像卫星的有效补充。

(2) 观测条件分析

卫星对于气象条件、光照条件、地形条件要求较为苛刻,在气象条件多变、地形地貌复杂的背景下获得高清晰度的影像数据难度增加。无人机不限于特定轨道与路径的飞行方式,可以克服气象与地形条件的影响完成成像任务。同时无人机也面临着地面防空武器的武力威胁,无法代替成像卫星独立完成复杂条件下的观测任务。

1.2 研究范围与假设

(1) 观测平台观测模式差异

如图1所示,卫星与无人机在观测执行模式上是截然不同的。成像卫星一般运行于近地非静止轨道,星载传感器的观测活动只能在目标位于其观测范围内进行,该范围与星下点轨迹及平台姿态能力大小相关。对于那些不具有观测时间窗口的目标,卫星无法观测。无人机观测包括从引擎开机、起飞、爬升、开始巡航,依次到达多个观测目标区,开启相应的成像传感器进行成像观测,最后返航、降落的等一系列过程^[10]。在最大航程范围内,无人机可以对任意目标进行观测,但是超过其最大航程约束,无人机无法观测。

(2) 观测目标的地理位置差异

空天协同对地观测还需要考虑目标的地理位置差异。成像卫星具有覆盖区域广、持续时间长、不受空域国界限制等独特的优势。而无人机执行侦察任务时会受到续航时间、空域国界等因素限制,因此对于那些超过无人机最大航程,以及在无

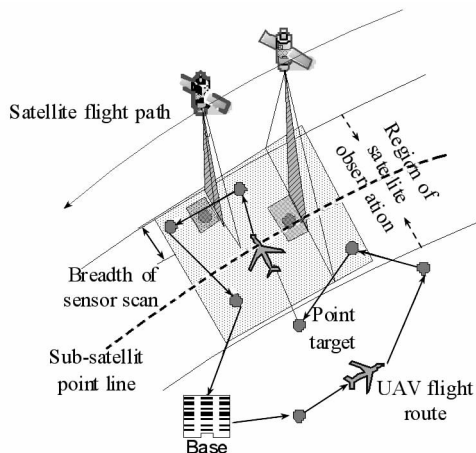


图1 卫星-无人机协同对地观测模式差异测示意图

Fig. 1 Illustration of observation mode difference between space-aeronautics platforms

人机飞行法定的空域国界之外的目标就只能由卫星资源完成。在两个极端情况下,即卫星对所有目标均无观测时间窗口,或者所有目标均超过无人机最大航程,空天协同对地观测调度问题就变成了单类平台调度问题。

(3) 观测方案形式差异

卫星观测调度问题的求解结果对于每颗卫星来说是一系列的被选择的观测时间窗口集合。无人机观测调度问题的求解结果是由多个目标按照先后顺序组成的路径序列,目标之间在时间与空间上均存在先后顺序。对于卫星与无人机协同观测调度问题求解来说,必须面对以上两类资源的调度方案的巨大差异。

因此,本文的研究基于以下假设:

(1) 被观测目标均为点目标,区域目标可以被离散划分成为多个点目标的组合,某个点目标在限定时间范围内可能需要被观测若干次。

(2) 无人机平台均隶属于单个基地,完成观测任务返回基地。目标之间的连线表示了无人机的观测顺序,并不代表实际飞行的航线,受到环境地形以及地面威胁的影响,无人机在两个目标之间的航线通常不是直线,可利用现有的路径规划算法得到,本文对此不展开深入研究。

(3) 卫星地面站接收资源可满足任何观测数据的传输要求,无人机存储器的容量满足任一次飞行所有存储要求,因此在本文中不再考虑数传因素对协同调度过程的影响。

2 问题描述与调度模型

2.1 问题描述

多平台协同观测调度可以描述为对于待观测

任务集合 T, N_s 颗成像卫星与 N_U 架无人机根据各类平台能力 (包括轨道、巡航能力、传感器类型、分辨率等) 及其约束条件以协作的方式调度观测目标。在协同调度过程中各平台之间反复交互阶段调度结果, 形成各自观测计划, 期望以确定的资源尽量多地完成重要目标的观测任务。

考虑到不同类型平台的约束条件, 我们建立多空天平台协同观测任务调度模型对问题进行描述, 首先给出如下定义。

2.2 输入条件

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{Num_{target}}\}$: 观测地面目标集合;

$(BLat_i, BLon_i)$: 无人机基地地理坐标;

$p_{(n,m)}$: 目标 t_m 与 t_n 空间距离;

(ts_i, te_i) : 目标 t_i 的需求观测时间范围;

$Pr_i \in (0, 1)$: 目标 t_i 的优先级;

$Rt_i = \{rt_1^i, rt_2^i, rt_3^i, rt_4^i\}$: rt_j^i 表示目标 t_i 需要第 j 种观测数据类型以及最小分辨率, 其中, $j=1$ 表示光学, 2 表示红外, 3 表示多光谱, 4 表示 SAR, 若 $rt_j^i=0$, 表示不需要类型 j 的观测数据。

$P = \{S, U\}$: 观测平台集合, 其中, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_s}\}$: 卫星资源集合; $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{N_U}\}$: 无人机资源集合;

$Rs_\alpha = \{rs_1^\alpha, rs_2^\alpha, rs_3^\alpha, rs_4^\alpha\}$: 表示平台携带的遥感器类型以及提供的最小分辨率;

ME_α : 卫星 s_α 调度周期 J 内最大放电深度;

$W_{ai} = \bigcup_{k=1}^{N_{ij}} win_{ai}^k$: 卫星 s_α 对目标 t_i 的时间窗口集合, 其中 $win_{ai}^k = [ws_{ai}^k, we_{ai}^k]$, 分别对应窗口的开始与结束时间;

sl_{ai}^k : 时间窗口 win_{ai}^k 对应的侧摆角度;

st_α : 卫星 s_α 两次侧摆最大间隔时间;

se_α : 卫星 s_α 侧摆单位角度所消耗电量;

mt_α : 无人机 u_α 的最大续航时间;

ms_α : 无人机 u_α 的平均巡航速度;

ml_α : 无人机 u_α 的最大巡航距离。

2.3 输出条件

卫星 s_α 的计划观测时间窗口集合:

$SW_\alpha = \{w_{\alpha k}, \dots, w_{\alpha jk}, w_{\alpha nk}\}, t_j \in T$;

无人机 u_i 观测目标路径序列:

$UT_i = (Base_\alpha, \dots, t_j, \dots, Base_\alpha), t_j \in T$ 。

2.4 优化目标与约束条件

多平台协同对地观测调度问题的优化目标为

$$\max f = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{\alpha=1}^{NP} Prfit(x_i^\alpha * Pr_i)$$

约束条件为:

$$x_i^\alpha \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in T, \alpha \in S \quad (1)$$

$$\prod_{j=1}^4 x_i^\alpha \cdot (rt_j^i - rt_j^\alpha) \geq 0, \quad \forall i \in T, \alpha \in P \quad (2)$$

$$ts_i \leq ws_{ai}^k \leq we_{ai}^k \leq te_i, \quad \forall i \in T, \alpha \in S \quad (3)$$

$$ts_i \leq JS + \sum_{i \in UT_\alpha} p_{(i,i+1)} / ms_\alpha \leq te_i, \quad \forall i \in T, \alpha \in U \quad (4)$$

$$ws_{ai}^k - we_{aj}^k \geq st_\alpha, \quad i, j \in T, \forall \alpha \in S \quad (5)$$

$$\sum_{k \in W_{ai}^k} sl_{ai}^k \leq ME_\alpha, \quad \forall i \in T, \alpha \in S \quad (6)$$

$$\sum_{i \in UT_\alpha} p_{(i,i+1)} \leq ml_\alpha, \quad \forall i \in T, \alpha \in U \quad (7)$$

其中 ws_{ai}^k, we_{ai}^k 为卫星 S_α 对观测序列内相邻两个目标 t_m 的观测开始时间与 t_n 的观测结束时间。

优化目标保证了已被安排观测的目标优先级收益最大; 约束条件中(1) 为决策变量, 表示目标 t_i 被安排至平台 α 进行观测, (2) 表示平台携带载荷能提供的最小分辨率应该小于所分配的任务相应观测数据类型的分辨率, (3) 与(4) 共同保证了平台对目标观测时间满足目标本身观测时间窗口要求; (5) 保证了卫星 S_α 连续两个观测目标时间窗口间隔大于其侧摆的最大转换时间; (6) 保证了卫星 S_α 侧摆累积使用电量不超过其最大放电深度, (7) 保证无人机 U_i 观测序列满足最大航程约束。

2.5 模型复杂性分析

定理 1 多平台联合调度模型的可行解数上界:

$$N_f = \sum_{N=0}^{N_T} N! C_{N_T}^N \frac{C_{N+N_S+N_U-1}^{N_S+N_U-1}}{\prod_{k=1}^{N_U} N_k!} = \sum_{N=0}^{N_T} P_{N_T}^N \frac{C_{N+N_S+N_U-1}^{N_S+N_U-1}}{\prod_{k=1}^{N_U} N_k!}$$

证明 由于本观测调度为过多订购问题, 模型中不要求完成所有的任务, 可能有 $0 \leq N \leq N_T$ 个目标被观测的情况为 $C_{N_T}^N$, 对应不同排列顺序, 对应不同的解, N 个目标的排列数为 $N!$, 将 N 个目标的某个排列分配给 N_S 颗不同卫星以及 N_U 架不同 UAV 观测的方案数目为:

$$C(N, N_S + N_U) = C_{N+N_S+N_U-1}^{N_S+N_U-1}$$

假设存在 N_k 架性能相同的 UAV, 则由于各 UAV 均从单基地出发, 则这 N_k 架 UAV 的观测目标序列之间是可以互换的。而卫星由于不存在轨道参数完全相同的情况, 则卫星的观测目标序列不能互换。对于性能相同的 UAV 重复的数量为 $N_k!$, 从而将 N 个目标的某个排列分配给 N_S 颗不同卫星以及 N_U 架不同 UAV 观测的方案数目为:

$$C(N, N_S + N_U) = \frac{C_{N+N_S+N_U-1}^{N_S+N_U-1}}{\prod_{k=1}^{N_U} N_k!}$$

所有可行解的数目的上界 N_f 为:

$$N_f = \sum_{N=0}^{N_T} N! C_{N_T}^N \frac{C_{N+N_S+N_U-1}^{N_S+N_U-1}}{N_U} \prod_{k=1}^N N_k!$$

$$= \sum_{N=0}^{N_T} P_{N_T}^N \frac{C_{N+N_S+N_U-1}^{N_S+N_U-1}}{N_U} \prod_{k=1}^N N_k!$$

综上,随着平台数量及目标数量的增加,解空间也迅速增加,本问题的复杂程度随着问题规模的增大而迅速增加,呈现出指数爆炸的趋势。

单一类型的平台如卫星观测调度、无人机侦察调度为一类约束优化问题,具有典型的组合特征,被证明为 NP-Hard 问题^[10, 14],不能在多项式时间内得到精确解,多采用启发式算法、邻域搜索和遗传算法等智能优化算法进行求解。而本文研究问题由于综合了成像卫星、无人机这两类资源性能、使用约束等方面具有巨大差异的观测平台,使得组合特征更为复杂。同时,由于观测方案的截然不同,使得传统的基于邻域搜索的智能优化方法难以实现两种形式解在同一架构下寻优。如采用遗传算法,在解决解的编码问题时,若以按照任务数目等长的二进制编码,无法解决卫星对一个目标多个时间窗口选择问题。若以观测机会作为编码依据时,又无法解决无人机对目标的观测机会随着路径改变而变化的问题。其他传统智能优化算法在求解时同样面临上述问题。

3 多平台协同进化调度算法

针对统一算法架构下不同类型方案寻优问题,本文基于协同进化的思想^[15]提出了多平台协同进化调度算法(Multi-Platforms Cooperative Evolutionary Planning and Scheduling Algorithm, MPCCPSA)。采用分层式进化算法框架,如图2所示。采用等长扩展十进制进行个体编码,便于顶层的交叉、变异操作,以保证各种群的多样性。同时经过约束检查的解码器来判断可行解,并生成不同资源的观测方案。

针对两种不同资源能力互补问题,经过前期大量实验,我们发现卫星观测能力发挥受限于重要目标观测时间窗口的取舍,而无人机则受限于在航程内既满足所选目标要求的时间范围要求,同时实现路径内观测收益最大化,在某一观测路径内,影响其整体性能发挥的往往就是某一个或几个目标的选择。最终本文采用了分治-合作算子,加入了对限制资源能力发挥因素的量化描述,保证卫星与无人机之间保持观测能力动态互补,

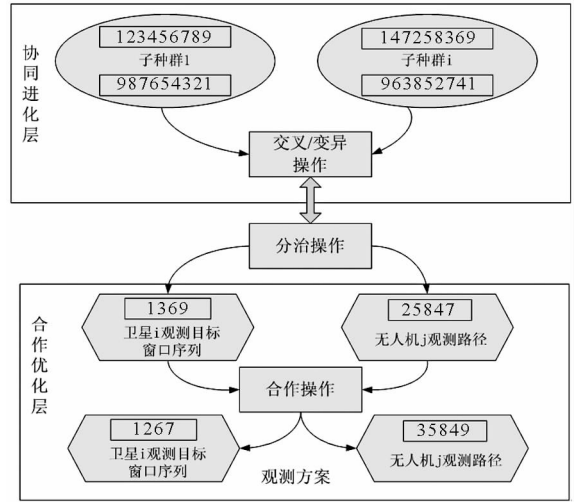


图2 分层式协同进化算法流程

Fig.2 The hierarchical co-evolutionary algorithm

在确保可行解的前提下加快收敛速度。

3.1 分治操作

对于协同进化层产生的个体,采用基于权重优先的卫星观测窗口分配策略、基于后移空余时间的无人机观测目标分配策略进行分治操作。

算法名称: 基于规则的目标集分解算法;
 输入: $individual_i$: 个体代表的目标集合; $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_s}\}$; $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{N_u}\}$;
 输出: SW_{α} ; UT_i ; Ω : 剩余观测目标集合;
 (1) **input** $individual_i = \{2, 4, \dots, t \dots, n\}, n = Num_i; S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_s}\}; U = \{U_1, U_2, \dots, U_{N_u}\}$;
 (2) **while** $individual_i \neq \phi$ (5) **do** 按顺序从 $individual_i$ 中选择一个目标 t_i
 (6) **for** $s_i \in S$
 (7) **do** 按目标权重优先窗口插入规则尝试将 win_{α}^k 插入 SW_{α} , get δ
 (8) **if** δ is unfeasible
 (9) **then for** $u_i \in U$
 (10) **do** 按基于后移空余时间目标插入规则尝试将 t_i 插入 UT_i , get δ
 (11) **if** δ is unfeasible
 (12) $\Omega = \Omega + t_i$
 (13) **else** 计算 u_i 剩余巡航能力及路径内各目标的后移空余时间, 更新 UT_i
 (14) **do** 按顺序从 $individual_i$ 中删除目标 t_i
 (15) **return** $SW_{\alpha}; UT_i; \Omega$

(1) 基于权重优先的卫星观测目标分配规则: 由于卫星同一时刻只能采用一种姿态进行成像, 因此, 不同任务对卫星在时间窗口上存在竞争。下面给出具体规则说明:

新的目标加入卫星 s_i 原有观测序列中 $SW_\alpha = \{w_{\alpha 1k}, \dots, w_{\alpha jk}, w_{\alpha nk}\}$, $t_j \in T$ 时, 先将已有的观测目标按照观测窗口的开始时间进行排序, 新的目标的观测窗口按照开始时间插入已排序的观测序列中。若新的观测窗口 t_{new} 与插入位置左侧窗口 t_i 冲突, 则比较两个窗口对应目标点优先级, 保留较大的一个, 另外一个删除, 若与两侧均冲突, 则插入失败, 如图 3 所示。

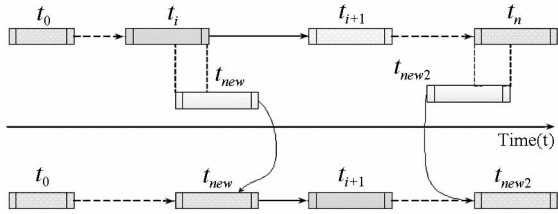


图 3 卫星观测序列局部优化示意图

Fig. 3 Local optimize of satellites' observing sequence

(2) 基于后移空余时间的无人机观测路径局插入规则: 后移空余时间最早是由塞韦伯格 (M. W. P. Savelsbergh) 在 VRPTW 问题的研究中提出^[16], 斯维特 (R. Siwate) 将后移空余时间概念引入到了多级调度问题^[17], 并考虑了工件和机器之间最多有两个时间窗口的情况。在 Siwate 的研究基础上, 我们将后移空余时间引入到空天协同对地观测调度问题中, 并将其进行了扩展, 无人机 u_i 的当前的观测路径 UT_i 中目标 t_i 的后移空余时间 B_i 定义为不导致观测路径中任何活动违反时间窗口冲突条件下的目标 t_i 的最大向后平移时间。图 6 表示新的目标 t_k 加入前观测路径序列内目标 t_i 与 t_j 之间, 对 t_k 后所有目标的后移空余时间进行更新, 若后移空余时间均大于零, 则目标 t_k 插入成功, 如图 4 所示。

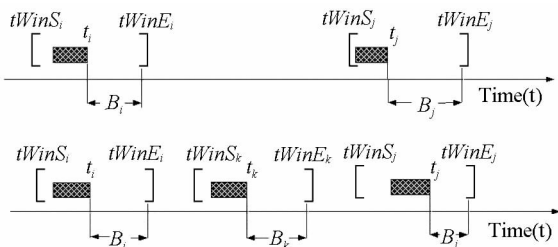


图 4 无人机观测路径局部优化示意图

Fig. 4 Local optimize of UAV's observing sequence

若对 t_k 后所有目标的后移空余时间进行更新后, 有任一目标的后移空余时间小于零, 则目标 t_k 插入该位置失败, 继续向前一个位置尝试插入。若全部位置均插入失败, 则尝试向当前观测序列的尾部插入, 若失败则放弃插入。

3.2 合作操作

合作算子的核心思路是将限制各平台观测能力发挥的任务进行充分交换, 具体算法流程如下:

```

算法名称: 卫星与无人机合作算法;
输入:  $SW_\alpha; UT_i; \Omega; \Omega_0 = \phi$ : 合作目标集合。
输出:  $f$ : 合作后观测目标收益。
(1) input  $SW_\alpha; UT_i; \Omega;$ 
(2) for  $U_j \in U$ 
(3) do 删除  $SW_\alpha$  中后移时间较小、且权重较大的若干目标, 加入合作目标集合  $\Omega_0$ 
(4) for  $t_j \in \Omega_0$ 
(5) do 按目标权重优先窗口插入规则尝试将  $win_{\alpha i}^k$  插入  $SW_\alpha$ , get  $\delta$ 
(6) if  $\delta$  is infeasible
(7) then do 按目标权重优先替换规则尝试将  $win_{\alpha i}^k$  插入  $SW_\alpha$ , get  $\delta$ 
    if  $\delta$  is infeasible
    then do 替换出优先级较低的目标  $t_j^k$ ;
(8)  $\Omega = \Omega - t_j + t_j^k$ 
(9) for  $t_m \in \Omega$ 
(10) do 按基于后移空余时间规则将  $t_m$  插入  $SW_\alpha$ ;
(11) return  $f$ 
    
```

图 5 给出了合作算子执行过程示意, 经过分治操作, 从某 UAV 观测路径中选出目标 t_j 成功加入某卫星的观测窗口序列, 并替换出目标 t_{i+1} 进入到未观测序列中。同时由于 t_j 的剔出, 该 UAV 的剩余能力增加, 未观测序列中的目标 t_{p+j} 与 t_{p+k} 加入到该 UAV 的观测路径中, 最终提高整体观测收益。

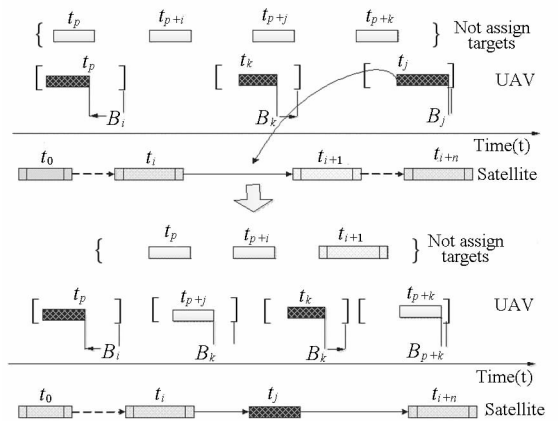


图 5 合作算子示意图

Fig. 5 Illustration of cooperation algorithm

4 仿真实例与结果分析

目前, 卫星多平台协同规划调度领域尚没有

公认的 Benchmark 测试问题集或公开可比较的算法运行结果。为了验证本文算法的适用性和可行性,本文在东经 $95^{\circ} \sim 105^{\circ}$, 北纬 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的矩形地理范围内随机生成了不同数量规模的点目标,每个目标设置 1 - 10 之间的随机权重,调度周期选定(24 Oct 2011 6:00 ~ 24 Oct 2011 18:00),在该 12h 的调度周期内,每个目标随机设置 6h 的观测要求时间范围,该仿真背景由实际反恐维稳问题提出。采用了 3 颗同一轨道高度的不同轨道倾角的圆轨道卫星,3 架单基地无人机,基地坐标为 $(30^{\circ}, 105^{\circ})$,巡航性能参数见表 1。

表 1 无人机巡航性能参数
Tab.1 Parameters of UAV's flight

无人机	基地坐标	平均航速	最大航程
UAV1	(30,105)	400	4800
UAV2	(30,105)	500	6000
UAV3	(30,105)	600	7200

算法采用 Visual Studio. NET 实现,在 Intel Core 2. 2GHz,2G 内存的微机上进行,分别对采用合作规则以及未采用合作规则的两种方法进行多次计算,交叉概率为 0. 85,变异概率为 0. 25,当达到最大进化代数或者收敛至全局最优时,算法停止,表 2 提供了对不同规模算例的计算结果。

表 2 算例的计算结果
Tab.2 Computation results of cases

NC	NT	Pr	NE	NS	MPCCPSA without			MPCCPSA with			IMP/%
					Cooperative Operator			Cooperative Operator			
					\bar{Pr}	\bar{NT}	$\bar{T/S}$	\bar{Pr}	\bar{NT}	$\bar{T/S}$	
1	50	243	100	50	229	44	105	243	50	2. 13	6. 1%
2		255	100	70	250	46	145	255	50	3. 65	2. 0%
3		237	100	100	235	49	205	237	50	4. 77	0. 8%
4	100	521	300	100	482	91	1380	521	100	790	11. 9%
5		546	300	150	509	94	2156	546	100	901	7. 3%
6		553	500	200	532	96	7212	553	100	1033	3. 9%
7	200	947	500	200	744	140	10770	840	166	11500	12. 9%
8		996	500	300	795	155	—	896	170	—	12. 7%
9		1012	500	400	830	168	—	922	172	—	11. 2%

图 6、7 分别给出了算例 6 的进化收敛过程,从图 6 中可以看出未采用合作算子仅有一次在 375 代时收敛到全局最优,其他均在达到迭代最大次数时停止进化。而从图 7 中可以看出每次进化均在 100 代以内收敛到全局最优,且初始解的质量均较大程度地超过了未采用合作策略的 MPCCPSA。

由仿真结果可以得出,MPCCPSA 为两类不同

表 2 中:NC 表示算例编号;NT 表示目标数目;Pr 表示 NT 个目标的总收益;NE 表示最大进化代数;NS 表示种群规模; \bar{Pr} 表示算例结果平均收益值; \bar{NT} 表示算例实际完成目标数目; $\bar{T/S}$ 表示算例实际计算时间;IMP 表示加入合作算子的算例比较未加入合作算子获得收益的提高率。

由表 2 可以看出,加入合作算子的 MPCCPSA 优于未加入合作算子的 MPCCPSA,尤其在资源相对紧张(目标数量规模增加)时加入合作算子使得算法优势更加明显提高,在算例 7、8 和 9 下收益均提高了 11% 以上。

运算时间上,对于目标数目为 50 的算例,加入合作算子的 MPCCPSA 一般仅在进化 1 ~ 3 代之内完成所有目标的观测,获得全局最优解,而未加入合作算子则需要完成限定的 100 代进化也只有部分求得全局最优解。对于目标数目为 100 的算例,加入合作算子的 MPCCPSA 一般在 100 ~ 150 代左右收敛到全局最优解,未加入合作算子则在限定的 300 代内仅有极少数收敛到全局最优解。对于上述规模的算例加入合作算子使得 MPCCPSA 时间效率明显优于卫星与 UAV 独立进化算法。对于目标数目在 200 以上,限于平台最大观测能力,无法全部完成,则二者均需执行完限定的进化代数,无法在计算时间效率上比较。

资源协同观测调度问题提供了有效的求解框架,多种防止算法早熟、提高局部搜索能力的方法的应用可以提高协同调度求解效率。在未采用合作算子时,该算法的本质还是两个资源在同一框架内独立进化寻优的过程,协同仅在进化层通过交叉、变异操作实现。随着迭代次数的增加,虽然有可能收敛到满意解,但由于无人机与卫星未能实现真正意义上的能力互补,算法的收敛性与效率

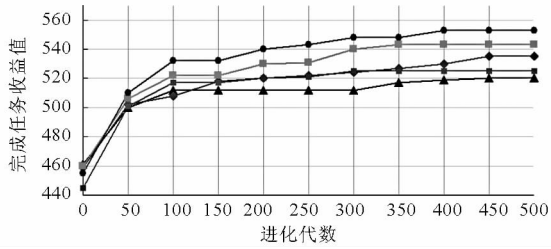


图 6 未采用合作算子进化收敛过程

Fig. 6 Convergence of the objective function without cooperation operator

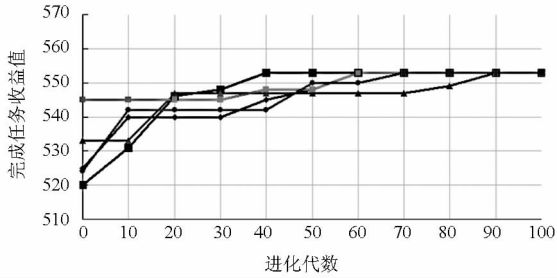


图 7 未采用合作算子进化收敛过程

Fig. 7 Convergence of the objective function without cooperation operator

无法保证。用合作算子算子的使用,随着协同进化不断迭代,UAV 观测路径不断优化,卫星的观测目标优先级不断提高,从而最大程度地发挥两类资源的能力,有效地提高了两类资源协同完成观测任务的效率。

5 结论

建立了多空天平台协同观测任务调度数学模型,该模型考虑了观测目标成像质量与时间要求、卫星成像动作间隔与侧摆能量使用约束,以及无人机最大航程等约束,以完成任务权重最大化为优化目标。基于“分治-合作”策略提出了一种多平台协同进化调度算法。利用进化算法的交叉、变异等操作以及设计的基于权重优先的卫星观测目标插入算子、基于后移空余时间的无人机观测路径插入算子实现不同类型平台在统一求解框架内完成寻优过程,通过卫星与无人机合作算子实现了两类平台观测能力的相互补充,并通过多次不同规模的算例仿真证明,该算法能够比较有效地求解空-天基多类型平台的协同观测调度问题。

参考文献 (References)

[1] 林宗坚,李德仁,胥燕婴. 对地观测技术最新进展评述[J]. 测绘科学, 2011, 36 (4): 5-8.
LIN Zongjian, LI Deren, XU Yanying. General review on the new progress of earth observations[J]. Science of Surveying & Mapping, 2011, 36 (4): 5-8. (in Chinese)

[2] 李德仁,邵振峰. 中国对地观测卫星及其应用[J]. 科学, 2007, 59 (6): 4-8.
LI Deren, SHAO Zhenfeng. Earth observation satellites and its applications in China[J]. China Science, 2007, 59 (6): 4-8. (in Chinese)

[3] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
YANG Wanhai. Multi-sensor data fusion and its application [M]. Xian: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)

[4] David O A, Lary J, Rickert A. An objectively optimized earth observing system[C]. IEEE Aerospace Conference, 2007.

[5] 郭华东,刘良云,范湘涛,等. 对地观测技术用于汶川和玉树地震灾害的研究[J]. 高校地质学报, 2011, 17 (1): 01-12.
GUO Huadong, LIU Liangyun, FAN Xiangtao, et al. Study of earth observation for disaster reduction in Wenchuan and Yushu Earthquakes [J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17 (1): 01-12. (in Chinese)

[6] Wegener S, Sullivan D, Ambrosia V. New remote sensing technologies for resource managers[R]. Salt Lake City, 2006.

[7] United States Departments of Defense. Joint Publication 3-60: Joint Targeting[Z]. 2007.

[8] 陈盈果,刘晓路,陈英武,等. 优化多星协同观测的改进广义模式搜索算法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34 (1): 88-93.
CHEN Yingguo, LIU Xiaolu, CHEN Yingwu, et al. Using improvement generalized pattern search to optimize design multi-satellites' cooperated observation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34 (1): 88-93. (in Chinese)

[9] 王冲,景宁,李军,等. 一种基于多 Agent 强化学习的多星协同任务规划算法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33 (1): 53-58.
WANG Chong, JING Ning, LI Jun, et al. An algorithm of cooperative multiple satellites mission planning based on multi-agent reinforcement learning[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33 (1): 53-58. (in Chinese)

[10] 田菁. 多无人机协同侦察任务规划问题建模与优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
TIAN Jing. Modeling and optimization methods for multi-UAV cooperative reconnaissance mission planning problem [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)

[11] Thomas M H. Asynchronous, distributed optimization for the coordinated planning of air and space assets [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2010.

[12] Jackson S E. Planning coverage of points of interest via multiple imaging surveillance asset: a multi-modal proach [D]. Air University, 2003.

[13] Morris R A, Dungan J L, Bresina J L. Space mission challenges for information technology[C]. SMC-IT. Second IEEE International Conference, 2006: 101-108.

[14] Verfaillie G, Bensana E, Bataillie N. Exact & Inexact methods for daily management of earth observation satellite [C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems, Germany, European Space Agency, 1996.

[15] Potter M A, De K A Jong. Cooperative coevolution: An architecture for evolving coadapted subcomponents [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8 (1): 1-29.

[16] Martin W, Savelsbergh P. The vehicle routing problem with time windows: minimizing route duration [J]. INFORMS Journal on Computing, 1992, 4(2): 146-154.

[17] Siwate R. Parallel machine scheduling with time windows [D]. University of Texas, 2003.