

基于多目标遗传算法的卫星成像任务调度技术

李 军¹, 王 钧¹, 陈 健², 陈慧中¹, 郭玉华¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京遥感信息研究所, 北京 100085)

摘 要: 针对成像卫星的任务调度问题, 考虑多种约束条件, 提出了成像任务约束图模型。基于多目标优化和遗传算法思想, 提出了一种应用于卫星成像任务调度的多目标遗传算法, 详细分析了算法的各个关键步骤的设计思想, 能够求得基于成像约束图模型的满意解, 生成卫星的优化拍摄计划。卫星成像任务调度原型系统的实现和实验结果验证了该模型和算法的合理性和有效性。

关键词: 成像任务调度; 多目标遗传算法; 成像约束图

中图分类号: TP75

文献标志码: A

Scheduling techniques of satellite imaging tasks based on multi-objective genetic algorithm

LI Jun¹, WANG Jun¹, CHEN Jian², CHEN Hui-zhong¹, GUO Yu-hua¹

(1. School of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Beijing Inst. of Remote Sensor Information, Beijing 100085, China)

Abstract: A new imaging task constraint graph model is proposed for planning and scheduling of satellite imaging tasks with many constraints. Based on multi-objective optimization and genetic algorithm, a new multi-objective genetic algorithm is proposed for planning and scheduling of satellite imaging tasks, and the key steps of the algorithm are presented. The proposed algorithm can be computed for satisfaction solution of imaging task constraint graph, thus optimized imaging plans of are produced. On this basis, the prototype system for planning and scheduling of satellite imaging tasks is implemented, and many experiments are completed. According to its rationality and validity are proved.

Key words: schedule of imaging tasks; multi-objective genetic algorithm; imaging task constraint graph

0 引 言

卫星成像技术已经得到广泛应用, 在农业、矿产、气象、城市规划、军事等领域都起到极其重要的作用。成像卫星的任务是对地面目标进行有计划的拍摄, 这就需要根据卫星的能力制定卫星拍摄计划, 合理安排卫星对哪些地面目标成像, 并确定相机开关机时间以及侧摆时机等。由于卫星的飞行轨道具有特定的规律, 卫星拍摄受到多种复杂因素的影响, 难以保证对所有目标进行成像。例如, 卫星侧摆的时间、次数限制、存储器容量限制和拍摄时间的限制使得必须对冲突的成像任务进行取舍; 卫星速高比、气象条件和太阳高度角等影响了成像质量。

为了充分利用成像卫星的照相资源, 最大限度地获取有效数据, 发挥其最大综合效益, 需要进行卫星规划调度, 在考虑多种复杂约束条件的基础上, 制定成像卫星运行时

的拍摄计划, 尽量利用卫星能力, 拍摄尽可能多且效果好的地面目标。

评价卫星拍摄计划的优劣需要考虑拍摄尽可能多的目标、拍摄尽可能重要的目标、具有尽可能好的照相条件等多条目标准则。同时, 由于受卫星自身条件限制, 存在侧摆、开关机等多种约束条件^[1], 成像卫星对地面目标的拍摄是一个从多种拍摄组合中选优的问题, 使得成像卫星拍摄计划的规划调度成为一个 NP-hard 问题^[2-3]。

目前, 卫星成像任务调度技术是国内外卫星应用领域长期研究的热点, 并随着卫星的不断改进而逐步深入研究。大多数研究方法都是根据实际卫星需求建立问题分析模型。这些模型主要分为三个类别, 第一类是数学规划模型^[4-5]; 第二类是约束满足问题模型及其改进^[6]; 而第三类转化为一种通用问题模型^[7]。针对问题模型的求解算法主要分为两类, 即完全搜索算法和不完全搜索算法。由于成像任务调度问

收稿日期: 2006-07-18; 修回日期: 2007-01-05。

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60604035)

作者简介: 李军(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为空间信息系统与应用, 遥感与地理信息集成技术。E-mail: junli@nudt.edu.cn

题的复杂性,不完全搜索算法具有较大的优势,而完全搜索算法一般只见于成像目标数少、问题规模小、卫星机动能力较差的应用场合或是用于求解经分解后的子问题。

本文根据图论理论提出了基于多目标遗传算法的卫星成像任务调度机制,建立了一种任务拍摄约束图模型,将卫星成像调度问题映射到对约束图模型最优路径的求解。在任务拍摄约束图基础上,提出多目标遗传算法进行优化分析求取满意解,生成卫星的优化成像计划,从而实现对成像卫星的高效规划调度。

1 任务拍摄约束图模型

由于成像卫星以一定轨道在空间运行,其成像过程处于高速运动状态,造成每个地面成像任务都有相应观测时间窗;而卫星有效载荷能力有限,不可能一次对所有任务请求进行成像。为实现对卫星资源的有效利用,需要对卫星实施优化成像调度,确定何时对哪些任务进行成像。此时需要综合考虑多种因素,优先安排重要、具有良好气象条件的任务,但在实际应用中这些因素往往相互冲突,很难同时满足成像任务数量最多、质量最好、重要程度最高这些条件。为了求取综合效益最高的成像方案,需要进行成像任务调度。调度问题的核心是确定在某个时间段内,选择哪些成像任务进行成像,以获取尽量多具有良好成像效果的重要任务,达到充分利用宝贵的卫星资源的目的。

成像任务调度的目标是获取尽可能多、尽可能好、尽可能重要的拍摄目标信息^[8]。为了便于采用优化分析算法获取优化的任务拍摄序列,本文根据卫星拍摄的约束条件,提出了一种根据拍摄任务节点结构构建的任务拍摄约束图模型。

首先,考虑到成像卫星的拍摄特性,为方便模型构建及算法实现,定义一个拍摄任务节点为一组可以同时进行成像的拍摄目标集合。一个拍摄任务节点内的目标具有相同侧摆角或近似相同的侧摆角(侧摆角差异在有效视场角范围内),并且相邻拍摄时间间隔在卫星最短拍摄时间之内、总拍摄时间长度小于卫星最长开机时间。其数据结构定义如下:

```
任务拍摄节点 {
    节点标号 NID;
    拍摄起始时间 NBT;
    拍摄结束时间 NET;
    节点侧视角度 NA;
    节点内总拍摄目标数 NTN;
    节点内重点保障目标数 NIN;
    节点内拍摄效果较好目标数 NGN;
    前续节点标号序列 NBID[];
    后继节点标号序列 NAID[];}
```

考虑卫星在不同任务节点之间进行侧视具有一定的时间约束(包括侧视速度限制和指令间隔时间限制),将任务节点根据时间顺序建立一个无圈有向的平面连通图,即任务拍摄约束图(如图1所示)。各个拍摄任务节点作为该图的节点。在图的构建过程中,首先考虑节点之间的侧视时

间,若无法在两个目标节点之间侧视,则这两个节点之间不存在连通路;其次考虑将一些冗余的路径排除,当两个节点之间存在多条路径时,尽量考虑能够经过多个节点的路径,以降低优化分析的复杂度。

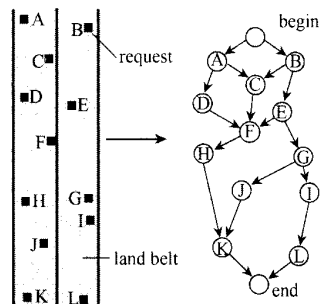


图1 任务拍摄约束图

任务拍摄约束图构建方法如下:

- (1) 横向将任务节点按侧视角度从小到大依次排序。
- (2) 纵向将任务节点按照时刻先后从前到后依次排列。

LOOP{

- (3) 考虑任务节点拍摄提前开机、推迟关机及单次最短开机时间,计算卫星侧视速度约束。

- (4) 由拍摄时间最早的任务节点开始,依次进行扫描:

IF 对于节点 N 以及所有后续节点 N' ,卫星能够从 N 成功侧视至 N' 。

THEN 节点 N 与 N' 间存在一条连通弧段,将 N 标号 NID 加入 N' 前续节点标号序列 $NBID[]$ 中,将 N' 标号 NID' 加入 N 后继节点标号序列 $NAID[]$ 中。

ELSE N 与 N' 间不存在连通关系。

END IF

- (5) 将已扫描任务节点 N 从序列中删除。

} END LOOP

- (6) 构建出任务拍摄有向连通图。

如果没有侧摆次数的限制,则该图还可以进一步简化,以减少图中弧段,降低复杂度。简化方法为:任意两节点间存在多种可能路径,对于任意两条路径,若路径 A 包含的节点集为 V_a ,路径 B 包含的节点集为 V_b ,若 $V_a \subset V_b$,则舍弃路径 A 。

2 多目标遗传算法的应用

基于任务拍摄约束图模型,采用路径搜索算法获取其最优的 K 条路径,则该路径就是卫星的最佳 K 个拍摄计划。但是,基于任务拍摄约束图的路径搜索复杂度非常高,可能的路径将形成组合爆炸,其求解方法是一个 NP 难问题,难以获取问题的最优解。针对这样的复杂问题,遗传算法是一种很好的解决途径,能够在有限时间内获取问题的满意解。

另外,成像卫星工作时,某条路径是否优化是根据该成像路径上的成像目标情况进行衡量,期望目标数目最多、目

标成像效果最好、目标最重要,这些要求难以同时满足,这就需要采用多目标准则进行衡量。

因此,我们运用遗传算法解决多目标优化问题,提出一种多目标遗传算法(multi-objective evolutionary algorithms, MOEA)求取满意解,再进一步根据其它约束生成卫星成像任务调度计划。多目标遗传算法主要步骤包括参数编码、设定初始种群、设定适应值函数、复制、选择、交叉、变异操作、问题解码,具有全局优化、鲁棒性好、搜索效率高、本质并行性等特点^[9-12]。算法的总体流程如图 2 所示。

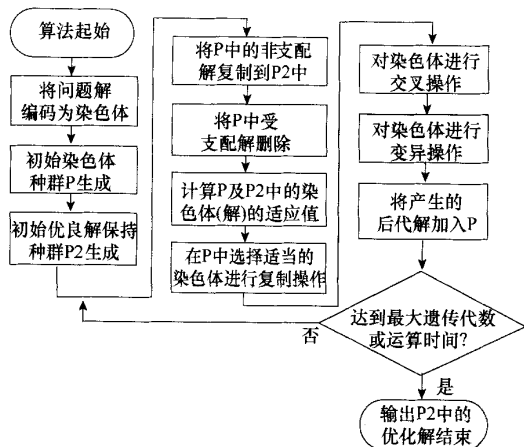


图 2 多目标遗传算法流程

经过多目标遗传算法,能够获取最佳的 K 条路径,代表了各种目标准则下的具有不同特点的优化方案。算法的关键步骤设计如下。

2.1 目标函数与约束条件

制定卫星拍摄方案的目标准则主要包括以下三条;

- (1) 拍摄目标数量 STN 尽可能多;
- (2) 拍摄的重点目标数量 SIN 尽可能多;
- (3) 拍摄效果好的目标数量 SGN 尽可能多。

同时,由于卫星本身的条件限制,还要考虑多种约束条件,主要包括侧摆时间限制和侧摆次数限制等。

问题描述如下。

(1) 优化目标

$$\text{Maximize } STN_k = \sum_{i=1}^{nk} NTN_{ik}$$

$$\text{Maximize } SIN_k = \sum_{i=1}^{nk} NTN_{ik}$$

$$\text{Maximize } SGN_k = \sum_{i=1}^{nk} NTN_{ik}$$

(2) 约束条件

$$T_{ik} \geq NA_i / S_{MAX}$$

$$NS_k \leq NS_{MAX}$$

式中, k 为第 k 个方案, nk 为方案 k 包含的拍摄节点的个数, T_{ik} 为方案 k 第 i 次侧摆所需的侧摆时间, S_{MAX} 为卫星的最大侧摆速度, NS_k 为方案 k 总侧摆次数, NS_{MAX} 为卫星

规划时段内的最大侧摆次数。

2.2 编码方式

结合实际情况,算法采取实值变长编码的方式。每条染色体包含的基因数目不一定,由卫星的拍摄能力决定。一条染色体为一个卫星拍摄方案对应于任务拍摄约束图一条路径,基因为一个拍摄任务节点。每条染色体采用顺序链表的形式组织基因,以各节点的拍摄时间先后决定基因在染色体中的顺序。如图 3 所示。

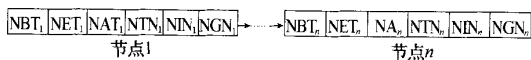


图 3 单个染色体编码示意图

2.3 初始种群生成及适应值分配

初始种群由随机生成的指定数目个满足约束条件的初始个体组成。随机生成初始个体的方法为:

步骤 1 搜索任务拍摄有向约束图,随机从中选取一个入度(即前续节点标号序列 $NBID[]$ 长度)为零的节点作为起始基因;

步骤 2 若当前最末基因节点出度(即后继节点标号序列 $NAID[]$ 长度)为 0,成功获取一个初始个体,输出基因序列,退出;

步骤 3 若当前最末节点出度不为 0,从最末基因的后继节点中随机选择一个节点作为当前最末基因,重复步骤 2。

适应值用于评价个体的优劣性,是算法进行交叉变异、生成第二种群 $P2$ 及第二种群 $P2$ 截短等操作时选择个体的依据。由于涉及到多目标,算法采用 Pareto 排序和适应值共享的方法对个体进行适应值分配,从而维持种群的多样性,避免算法的早熟收敛。

Pareto 排序方法:首先找出待排序种群(当前种群 P 或第二种群 $P2$)中的 Pareto 非支配解,标记为顺序 1,然后考虑未经标记的个体组成的群体,找出其中的非支配解,标记为顺序 2,对于剩下的个体持续上步的操作,顺序号递增,直至所有的个体均被排序。

适应值共享方法如下。

步骤 1 对于种群(当前种群 P 或第二种群 $P2$)中的任意两个个体 i 和 j ,使用欧式距离定义其度量函数为

$$d_{ij} = d(i, j) =$$

$$\sqrt{(STN_i - STN_j)^2 + (SIN_i - SIN_j)^2 + (SGN_i - SGN_j)^2}$$

步骤 2 给定一个阈值 σ_{share} 即小生境半径,由用户根据实际情况指定。这里采用小生境是为了使得结果具有更好的散布性,达到优化的目的。

步骤 3 定义共享函数为

$$sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - (d_{ij} / \sigma_{share}), & d_{ij} < \sigma_{share} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

步骤 4 定义个体 i 的小生境数

$$m_i = \sum_{j=1}^{pop_size} Sh(d_{ij})$$

步骤 5 计算个体 i 共享后的适应值 $f'_i: f'_i = f_i / m_i, f'_i$

为个体原适应值。

2.4 带约束检查的交叉和变异

交叉操作用于组合产生新的个体,用于涉及到多种复杂约束,在交叉过程中需要进行约束的检查,否则可能产生非法的解。实现过程如下(如图 4 所示)。

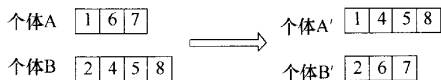


图 4 单点交叉操作示意图

步骤 1 依据适应值从种群中随机选择二个个体进行交叉操作;

步骤 2 搜索任务拍摄有向约束图,找出所有满足约束可以进行交叉操作的节点集合;

步骤 3 若集合不为空,随机选取一个节点进行单点交叉,即互换匹配点后的基因序列,交叉后个体长度可能发生变化,如图所示。

步骤 4 若集合为空,则当前交叉个体无可匹配点,在剩余个体及当前交叉个体中各随机选取一个个体作为交叉个体,回步骤 2。

变异操作用于将新的有效基因引入种群,有利于增加种群的多样性,避免算法的早熟收敛,实际应用中,同样涉及到多种复杂约束,在变异过程中需要进行约束判断。实现过程如下(如图 5 所示)。

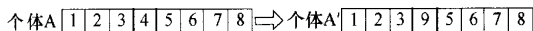


图 5 变异操作示意图

步骤 1 从交叉个体中随机选择一个个体进行变异操作;

步骤 2 在个体中随机选择一个基因作为变异点;

步骤 3 搜索任务拍摄有向约束图,寻找一满足约束的可替换变异节点的其他目标节点或目标节点序列,若有多个,则随机选择其中一个;

步骤 4 若替换节点寻找成功,则替换掉变异节点。

步骤 5 若替换节点寻找失败,则回到步骤 2。

2.5 有界精英保留

由于遗传算法的随机性往往导致在优化过程中产生的精英解丢失,为了解决这个问题,我们采用了有界精英保留的方法对算法进行优化,即引入了一个第二种群 P2 用于保留当前种群的非支配解。在遗传过程的每一代,通过对当前种群进行 Pareto 排序得到新产生的非支配解加入 P2,同时检查新的第二种群,通过 Pareto 排序找出所有被支配解并从中删除从而进行更新。为便于决策分析,算法限制一定数量的优化解,即设置了一个第二种群数上界 N_2 ,当 P2 内非支配解数目大于 N_2 时,对 P2 的个体进行适应值共享操作,从中选择更新后个体适应值最大的 N_2 个解组成 P2。

3 实验结果

我们设计和实现了一个基于多目标遗传算法的卫星成像任务调度原型系统。

为验证成像调度模型和算法的有效性 & 效率,我们针对实际的不同成像任务数据进行仿真实验。我们依据实际需求对成像卫星进行成像调度,卫星轨道数据依据 AGI 公司在 2005 年 6 月发布的卫星轨道数据库,卫星参数根据实际卫星特性设定,卫星成像任务来自实际的用户请求。根据不同的请求,任务数量为 200,实验成像规划时间段设为某天 8 时 0 分 0 秒到 20 时 0 分 0 秒。实验中我们使用随机生成的云量等级。

设定多目标遗传算法参数为:交叉概率 0.6、变异概率 0.01、最大世代数 2 000 代、小生境半径 $\sigma_{share} = \sqrt{3}$ 、第二种群数上界 $N_2 = 10$ 。经过优化分析后,得到的最佳 10 个卫星优化拍摄方案。结果界面如图 6 所示,右下表格为最佳的 10 个方案及相应统计信息(各方案的重点保障目标数、拍摄效果较好目标数和总拍摄目标数),右上表格为方案一的拍摄计划信息(包括记录、侧视、传输的时间和长度等)。

图 7 为 10 个方案的统计信息的三维示意。由图可见,经多目标遗传算法优化后的各方案之间的关系均为非支配,较好地分布在一个三维凸曲面上。说明给出的多种方案很好的体现了在多个目标准则间的均衡考虑,优化解的分布性很好,不同的方案体现了各种目标准则下的优化结果和综合优化结果,有利于决策人员选择最终的卫星成像计划。



图 6 成像任务调度结果界面

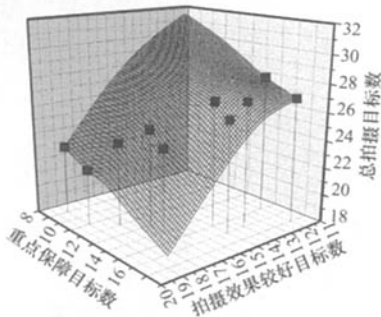


图 7 拍摄方案统计信息

4 结束语

本文提出了一种复杂约束条件下成像卫星的调度机制,提出了一种任务拍摄约束图模型,在此基础上提出了一种带约束的多目标遗传算法,并将其应用于卫星优化拍摄计划的制定。其所得结果满足卫星成像任务的多目标规划需求,能使卫星成像资源得到充分利用,很好地解决了卫星规划调度计划的优化生成问题。

参考文献

- [1] 代树武,孙辉先. 卫星的智能规划与调度[J]. 控制与决策, 18(2): 203-206.
- [2] Michel V, Hao J K. Upper bounds for the SPOT 5 daily photograph scheduling problem[J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2003, 7: 87-103.
- [3] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [4] Pemberton J. Towards scheduling over-constrained remote sensing satellites[C]// *Proc. of the 2nd International Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 2000.
- [5] Wolfe W J, Sorensen S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain[J]. *Management Science*, 2000, 46: 148-168.
- [6] Lemaitre M, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites[J]. *Aerospace Sciences and Technology*, 2002, 6: 367-381.
- [7] Vasquez M, Hao J K. A logic-constrained knapsack formulation and a tabu algorithm for the daily photograph scheduling of an earth observation satellite[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2001, 20(2): 137-157.
- [8] 张帆,李军,王钧,等. 基于有效准则向量生成的成像调度方法[J]. 航天控制, 2005, 23(6): 81-84.
- [9] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[C]// *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VI, Berlin: Springer*, 2000.
- [10] Eckart Zitzler. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: methods and applications[D]. *ETH, Zurich, Switzerland*, 1999.
- [11] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257-271.
- [12] 王小平,曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

电子“冲浪”机问世有望革新计算机系统

英国科学家发明了一种让电子学会“冲浪”的机器,它可以使电子像冲浪者一样处于静电振荡波的能量波峰上。科学家说,希望这能为研制新型计算系统并提高数字通信的安全提供新思路。

据英国国家物理实验室网站介绍,国家物理实验室和剑桥大学卡文迪什实验所的科学家共同发明了电子冲浪机。这种电子冲浪机如同工厂里的传输带一样,能一个一个、稳定可靠地每秒传输 10 亿多个电子,而且这些电子都具有相同的运动方向。这是科学家首次以如此高效且可控方式传输电子。

电子冲浪机的重要工作是制造静电振荡波,静电振荡波的作用就如同海浪。电子冲浪机的工作方式是,单个电子被置于静电振荡波波峰,然后使静电振荡波向一个特定方向运动,这样电子冲浪机输出的电子就都具有了相同的运动方向。

目前所有计算机工作都依赖于微处理器,但微处理器中的电子运动是无序的,这导致机器发热并影响工作效率。精确控制电子在微处理器中的运动方向,无疑将大幅提高计算机的性能。在数字通信上,精确控制电子运动还能使预防失密更加容易。