

文章编号: 1001-2486(2008)04-0047-06

带数据传输的光学卫星成像调度系统关键技术研究*

郭玉华, 李 军, 王 钧, 景 宁

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对光学小卫星成像调度系统设计需求, 考虑侧视、存储容量、能量和数据传输等复杂约束, 面向小规模问题应用, 设计了问题求解流程。建立了顶点和边都带权的成像约束图模型, 并提出了基于标记更新最短路算法的复杂约束成像卫星调度算法解决成像方案生成过程; 对数传方案生成过程, 给出背包模型并采用带回看策略的贪婪启发式方法进行问题求解。实验结果表明, 该方法是可行和适用的。

关键词: 对地观测卫星; 成像调度; 标记更新最短路; 启发式搜索

中图分类号: TP391 文献标识码: A

Key Technology Research of Imaging Scheduling System for Optical Satellite with Data Transmission

GUO Yu-hua, LI Jun, WANG Jun, JING Ning

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the imaging scheduling problem of an optical satellite, which is characterized by multiple complex constraints, including skip, memory, energy and the data transmission, an action sequence for the small number of participant tasks is designed. A graph model with both edge and node having weight and the algorithm based on the label-setting shortest path algorithm is proposed to generate the imaging tasks sequence. For the generation of data transmission sequence, the knapsack model and the greedy heuristic with looking back are proposed. The experiment results show that the approaches proposed are feasible and effective.

Key words: earth observing satellite; imaging scheduling; label-setting shortest path; heuristic search

对地观测卫星(EOS, Earth Observing Satellite)通过星载传感器从太空获取地面影像数据, 已经成为勘测和研究地球资源的重要手段。EOS 成像调度的主要工作就是确定对地观测卫星需要拍摄的成像目标及其拍摄的动作时刻, 以及相应成像数据下载到地面接收站的数据传输时刻。由于成像调度结果的优劣直接影响着整个卫星系统的应用效益, 因而已经成为一个重要的研究方向, 备受各国关注。

研究者提出了不少方案解决 EOS 成像调度问题, 如 Bensana^[1] 和 Harrison^[2] 采用了穷尽搜索的方法进行问题求解; Gabrel^[3] 和张帆^[4] 建立图模型, 并采用路径搜索的方法进行求解; Muraoka^[5] 和 Potter^[6] 则采用了贪婪思想进行问题求解; Weicheng Lin^[7] 利用拉格朗日松弛方法产生近似优化的可行调度方案等。但上述现有研究大都针对某种特定应用, 对问题进行了不同程度的简化, 大多只考虑了侧视约束。事实上, 在进行 EOS 成像调度时, 考虑的约束不同, 问题的特点也不同。如只考虑侧视约束时, 成像调度问题可以转化为最短路径问题^[3], 可以采用精确算法进行求解; 但如果考虑了存储容量约束, 则问题就转换为背包问题, 具有 NP-Hard 特性, 目前尚未有多项式时间精确解法。如果再考虑复杂的能量使用约束以及地面站数据接收因素, 则问题又具有非线性特点, 上述方法无法解决这类问题。

本文针对一类光学成像卫星, 考虑侧视、存储容量、能量(开机时间长度约束和侧视次数约束)以及数据传输等约束条件, 进行卫星成像调度系统的设计。在分析问题特点的基础上, 采用分解处理机制, 将问题分为成像方案和数传方案生成两个阶段, 并分别给出相应的数学模型和求解算法。

* 收稿日期: 2007-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60604035); 国家 863 高技术资助项目(2007AA701316, 2007AA12Z229); 国家科技支撑计划课题资助项目(2006BAG01A07)

作者简介: 郭玉华(1981-), 男, 博士生。

1 成像调度系统设计思路

卫星可行成像方案生成需要满足卫星的侧视约束、存储容量约束和能量约束(开机时间长度约束和侧视次数约束),生成可行成像方案;同时又要考虑与地面站之间的数据传输约束,以将所有成像数据下载到数据接收地面站,因而是一个约束复杂且高度耦合的组合优化问题。为提高系统的可靠性和扩展性,在进行系统设计时,需要对问题进行解耦,将复杂问题分解成松散耦合的多个子问题进行处理。

基于上述原则,EOS 成像调度的求解思路是,将整个流程分成四个处理阶段。第一阶段为预处理阶段,负责进行优化调度需要的相关预计算与处理操作;第二阶段为成像方案生成阶段,考虑侧视、存储容量和能量约束,生成可行的成像目标序列;第三阶段为数传方案生成阶段,针对成像目标序列,根据卫星与地面站的数据传输能力和相应的数传调度准则,生成可行的卫星数据下传动作序列;最后是方案人机交互调整。问题求解流程如图 1 所示。

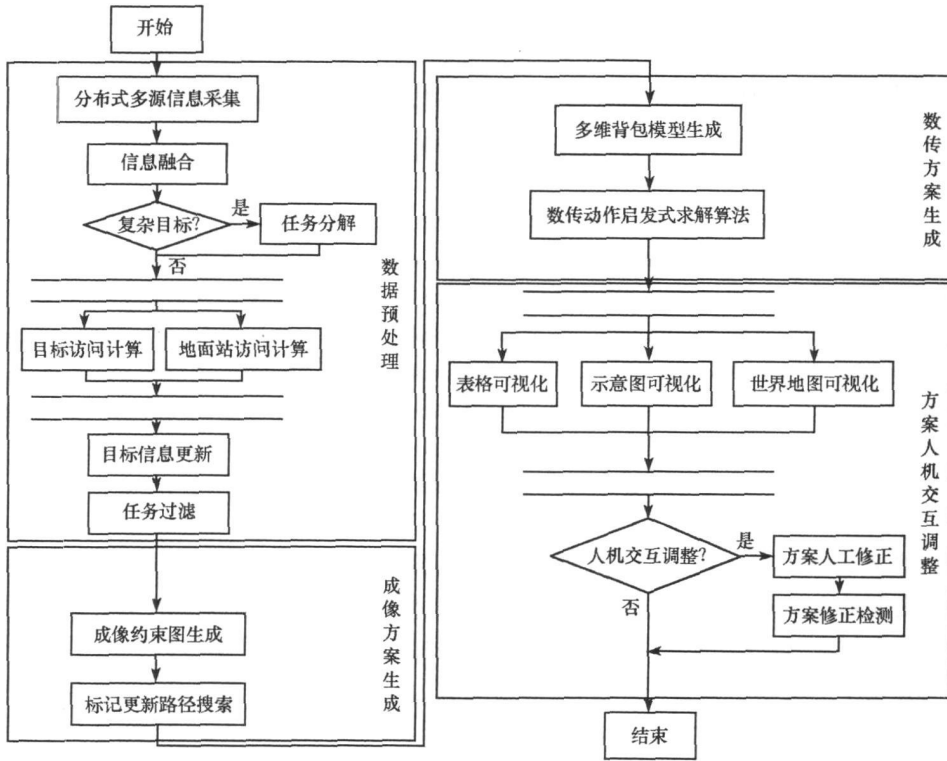


图 1 成像调度流程
Fig. 1 Flow chart of imaging scheduling

2 成像方案生成模型及算法

针对可见光卫星,对参与成像调度的 n 个成像目标,按照轨道圈次首先划分成相互独立的 t (一次规划时段内共有 t 个轨道圈次) 个小段。对任一个小段 $i(0 < i \leq t)$,将在其时间范围内每个具有一定经纬度坐标的地面成像目标看作图的顶点,在图中增加虚拟顶点 S_i 和 E_i ,分别对应图的起始顶点和终止顶点。定义满足侧视约束的顶点之间存在边连通关系。于是,轨道圈次 i 内的成像目标及其侧视约束关系可以用图 $G_i = (X_i, U_i)$

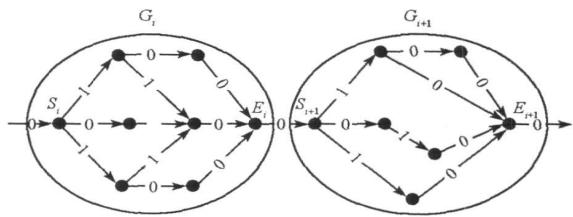


图 2 成像约束图模型
Fig. 2 Model of imaging constraints

来表示。其中, X_i 代表轨道圈次 i 内的所有顶点, 包括虚拟起始顶点 S_i 和结束顶点 E_i , 而 U_i 表示顶点间边连通关系的集合。并将成像目标对应的重要性评价值和存储器使用量属性加入到对应顶点的属性中作为顶点权值; 对 U_i 中的每条边, 定义从一个顶点到另一个顶点的侧摆次数增加则边权值为 1, 否则, 边权值为零。将这些不同圈次的子图连接起来即可构成整个问题领域的图模型, 称之为成像约束图 (如图 2 所示), $G = (X, U)$ 。

图 2 中从起始顶点到结束顶点的一条路径代表了满足侧视约束的成像目标序列。根据卫星的载荷特点, 路径搜索中主要考虑的约束包括任一圈次的卫星开机动作时间总和不能超过指定次、任一圈次的卫星侧视次数不能超过指定次、成像目标序列的存储容量使用不能超过指定长度等。因而, 成像调度问题可以转换为带约束的路径搜索问题。为表述问题方便, 首先定义以下符号和变量:

$P(P = n)$	所有成像目标的集合, 其中 n 为成像目标数目
$T_{Prepare}$	卫星相机成像准备时间
P'	规划生成的可行卫星成像方案
$T_{Trans}(j, k)$	卫星从成像目标 j 摆到成像目标 k 所需侧视时间, 该时间与 j 和 k 的角度差值成正比
x_j	决策变量, 取值范围 $\{0, 1\}$; 0 表示成像目标 i 未被选中可行序列, 1 表示 i 被选进可行序列
I_j	成像目标 j 的重要性评价值
$T_{Start, j}$	卫星对成像目标 j 的起始访问时间
$T_{End, j}$	卫星对成像目标 j 的结束访问时间, $T_{End, j} > T_{Start, j}$
$T_{Memory, j}$	成像目标 j 的存储器占用量, 用时间长度表示, 与卫星访问成像目标的时间长度相同
$f_{Angle, j}$	卫星访问成像目标 j 的侧视中心角
$T_{MaxStart}$	每个轨道圈次下卫星最大允许开机时间
$n_{MaxSkip}$	每个轨道圈次下卫星最大允许侧视次数
C_{Memory}	卫星存储容量大小
λ_{ij}	存在边连通关系的顶点 i 和 j 之间侧摆次数是否增加, 增加为 1, 否则为 0

考虑卫星成像调度的优化目标是最大化可行成像目标序列的重要性评价值, 针对卫星载荷约束条件, 在成像约束图模型的基础上, 给出了问题求解的目标函数及约束条件描述如下:

$$\max \left(\sum_{j \in P} x_j I_j \right) \quad (a)$$

s. t. :

$$\forall j \in P, \sum_{j \in P} x_j = 1, x_j \in P' \quad (b)$$

$$\forall j, k (0 < j, k < |P'|), j < k, \text{ iff } T_{Start, j} < T_{Start, k} \quad (c)$$

$$\forall j, k \in P', T_{End, j} + T_{Prepare} + T_{Trans}(j, k) < T_{Start, k} \quad (d)$$

$$\sum_{j \in P} x_j T_{Memory, j} \leq C_{Memory} \quad (e)$$

$$\forall i (i = 1, \dots, t), \sum_{j \in (P \cap G_i)} x_j T_{Memory, j} \leq T_{MaxStart} \quad (f)$$

$$\forall i (i = 1, \dots, t), P'' = P' \cap G_i, \sum_{k=1}^{|P''|-1} \lambda_{k, k+1} \leq n_{MaxSkip} \quad (g)$$

其中, (a) 式表示目标决策函数, 目的是使卫星可行成像目标序列的目标重要性评价值为最高; (b) 式表明 P' 是可行成像目标序列集合; (c) 表示集合 P' 中的元素都是按时间访问顺序排序; (d) 式表示卫星可行成像目标序列里任两个成像目标之间都满足侧视约束; (e) 式表示总的存储容量不超过指定值 C_{Memory} ; (f) 式表示每个圈次内的最大开机时间长度不超过指定长度 $T_{MaxStart}$; (g) 式表明每个轨道圈次内

的侧视增加次数不超过指定值 $n_{MaxSkip}$ 。

针对上述模型,基于标记更新最短路径算法^[3],提出一种复杂约束卫星成像调度算法,进行多准则完全路径搜索。算法采用分治思想,对具有传递性的子图依次进行路径搜索。对每一个子图,将上述约束条件转化为准则,与成像目标重要性评价准则一起,作为路径保留的评价准则;这些约束准则值越小,代表路径在该准则上的评价价值越高,并采用标记更新最短路径算法进行搜索。算法实现过程中通过限制每个顶点标记数组元素个数为常数 K 来降低问题复杂度。同时为了减少因限制标记顶点个数对算法性能的影响,采用小生境策略对顶点标记数组进行保留。算法流程如下所示:

算法:复杂约束成像卫星调度算法

输入:成像约束图

输出:最优成像任务序列

Step 1: 初始化每个虚拟顶点的标记值;

Step 2: 依次选择每个子图,顺序执行以下步骤:

Step 3: 对选中子图,依次选择每个顶点作为当前顶点;

Step 4: 对当前顶点,更新该顶点后所有顶点的标记值;

Step 5: 对被更新顶点,删除被支配的标记值;

Step 6: 判断被更新顶点的标记值个数是否大于指定值,如是,采用小生境策略删除标记值;

Step 7: 判断当前顶点是否虚拟结束点,如是,更新下一个子图的虚拟起始点,转 Step 2; 否则,转 Step 3;

Step 8: 返回最后一个子图虚拟结束,评价最高的标记值对应的任务序列。

3 数传方案生成模型和算法

针对可行的卫星成像方案,需要确定对应的数据传输方案,以完成相应成像数据的下传。数据传输主要考虑的约束和使用的准则包括:(1)卫星与地面站之间存在有限的下传时间窗口,数据下传速率有限;(2)卫星一个成像目标的数据必须在一次卫星进站时段内下传完毕;(3)卫星拍摄成像目标的时间应在下传该成像目标的数据之前;(4)一次计划的星上数据必须完全下传至数据接收地面站;(5)可以随机选择哪些成像数据先下传。为有效描述问题,首先定义以下符号及变量:

P 成像方案的成像目标集合, $|P| = n$

TP_i 第 i 个成像目标的数据容量

I_i 第 i 个成像目标的重要性评价价值

tp_i 第 i 个成像目标的开始访问时间

D 所有的地面站跟踪接收时段集合, $|D| = m$

TD_j 第 j 个地面站跟踪接收时段的最大接收容量

td_j 第 j 个地面站跟踪接收时段的起始访问时间

定义以下决策变量:

x_i 第 i 个成像目标数据是否安排下传, 1 表示安排下传, 0 表示不安排下传

D_j 第 j 个地面站跟踪接收时段接收的成像目标数据集合

L_j 第 j 个地面站跟踪接收时段接收的数据长度

基于上述符号和变量定义,给出数传方案生成的数学模型如下:

$$\max: \sum_{i \in P} x_i I_i \quad (1)$$

s. t. :

$$\forall j (j = 1, \dots, m), \sum_{i \in D_j} TP_i = L_j \quad (2)$$

$$\forall j (j = 1, \dots, m), L_j \leq TD_j \quad (3)$$

$$\sum_{i \in P} x_i TP_i = \sum_{j \in D} L_j \quad (4)$$

$$\forall j (j = 1, \dots, m), \forall i \in D_j, t_i < t_d \quad (5)$$

上述各式中, 目标函数(1)表示最后安排下传的成像目标的评价值最高; 约束(2)表示每个地面站接收时段接收的数据量等于在该段传输的成像目标数据的总存储容量, 同时也表示每个成像目标的成像数据在一个地面站接收时段内传输完毕; 约束(3)表示卫星在每个地面站接收时段接收的数据量不大于它的最大接收容量; 约束(4)表示卫星所有的成像数据必须下传; 约束(5)表示传输成像目标数据的动作在其拍摄动作之后。如果将每个数据接收地面站当作一个装物品的背包, 把星载成像目标数据看作物品, 卫星数据下传方案生成可以看作一个带时间约束的多背包问题。背包问题是一个复杂的组合优化问题, 具有 NP- 完全特性, 没有可行的多项式时间求解算法, 本文采用带“回看”策略的贪婪启发式方法进行问题求解。带“回看”策略的贪婪启发式方法的算法流程如下所示:

算法: “回看”贪婪搜索算法

输入: 成像任务序列

输出: 满足数据传输约束的成像任务序列; 数据传输动作序列

Step 1: 对所有任务按成像时间排序;

Step 2: 按照先照先传的准则, 依次安排每个任务的数据传输地面站;

Step 3: 如果有任务数据无法传输, 则将序列最差任务存储过滤数组, 转至 Step 2; 否则, 转 Step 3;

Step 4: 对过滤数组中的任务, 依次重新插入到任务序列里;

Step 5: 检查约束: 任务插入序列后满足约束, 则添加该任务到方案; 否则, 删除该任务;

Step 6: 如果所有任务都被遍历, 转 Step 7, 否则, 转 Step 4;

Step 7: 返回成像序列和数据传输动作序列。

4 实验结果及分析

为验证本文方法的有效性, 基于卫星实际在轨运行的数据, 在同一台机器上进行了实验比较。

首先针对相同问题规模、不同标记数组大小下的数据进行了大量实验。实验中, 参与成像调度的成像目标设为 180 个, 分别验证了标记数组大小为 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 条件下的系统运行时间和评价结果, 图 3(a) 显示了实验的统计结果。其中横轴表示标记数组大小, 上图纵轴表示结果评价价值, 下图纵轴表示算法运行时间。从图中可以看出, 随着标记数组个数的增加, 算法的运行时间增加较快, 而结果评价价值则呈平稳微升趋势, 当标记个数达到 30 个以上时, 结果评价价值基本保持不变, 而由于标记数组个数变大, 使得问题搜索规模变大, 算法的运行时间急剧上升。因此, 本文方法在进行标记数组限制时, 标记数组元素个数不应设置太大, 一般设置标记个数为 30~50 较为合适。

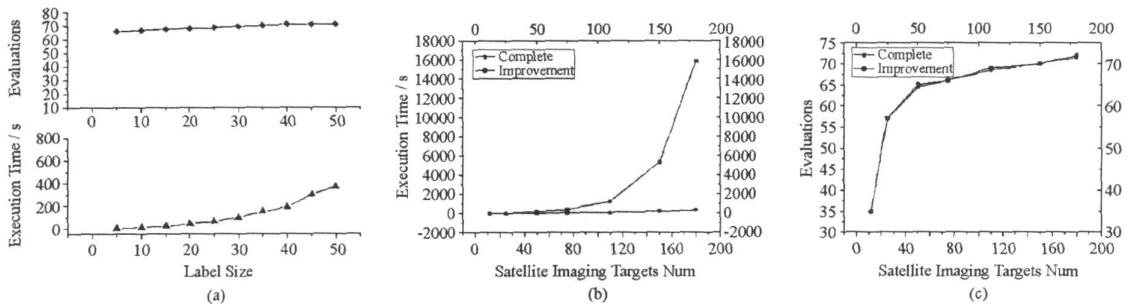


图3 算法结果比较

Fig. 3 Comparison of different algorithms

为验证本文采用方法的有效性, 对不同目标分布的问题集, 采用本系统方法与完全算法(针对小规模问题, 采用完全搜索方法进行相同问题求解的方法, 本文不赘述)分别进行运算, 比较其运行结果。图 3(b)、(c) 表示了各实验结果平均值的比较, 其中图 3(b) 为两种方法运行时间的比较, 横轴为目标数目, 纵轴为运行时间; 图 3(c) 为结果评价价值的比较, 横轴为成像目标数目, 纵轴为最优解的评价值, 实验中

设置标记数组大小为 50。从图中可以看出,在各种目标分布下,本系统采用的方法在运行时间上比完全算法改进了很多,而在解的性能上与完全算法的结果差别非常微小,证明本文方法是有效可行的。

5 结束语

面向可见光光学成像小卫星的成像调度需求,设计并实现了一个光学卫星成像调度系统。介绍了系统组成结构及工作流程,重点介绍了系统设计中的关键技术,主要包括成像方案生成过程中的成像约束图模型和基于标记更新思想的路径搜索算法,以及针对成像方案安排数据下传计划时的背包模型和启发式求解算法,最后给出了问题的应用实例和实验结果,实验结果证明了系统的适用性和可行性。需要特别指出的是,本文设计的系统适用于中小规模问题;当面向大规模应用时,可能无法在有限时间内获得可行解。因此,我们下一步的目标是针对大规模应用,采用近似算法进行问题求解。

参考文献:

- [1] Bensana E, Verfaillie G, Agnese J C, et al. Exact and Approximate Methods for the Daily Management of an Earth Observation Satellite[C]// Proceedings of SpaceOps- 96, Munich, Germany, 1996.
- [2] Harrison S A, Price M E. Task Scheduling for Satellite Based Imagery[C]//Proceedings of the Eighteenth Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group, University of Sanford, UK,1999.
- [3] Gabrel V, Vanderpooten D. Enumeration and Interactive Selection of Efficient Paths in a Multiple Criteria Graph for Scheduling an Earth Observing Satellite[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 139: 533- 542.
- [4] 张帆. 成像卫星计划编制中的约束建模及优化求解技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2005.
- [5] Muraoka H, Cohen R H, Ohno T, et al. Aster Observing Scheduling Algorithm[C]// Proceedings of SpaceOps- 98, Tokyo, Japan, 1998.
- [6] Potter W, Gasch J. A Photo Album of Earth: Scheduling Daily LandSat 7 Activities[C]// Proceedings of SpaceOps- 98, Tokyo, Japan, 1998.
- [7] Lin W C, Liao D Y, Liu C Y, et al. Daily Imaging Scheduling of An Earth Observation Satellite[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: System and Humans, 2005, 35(2): 213- 223.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] Rasmussen M L. Waverider Configurations Derived from Inclined Circular and Elliptic Cones [J]. Journal of Spacecraft and Rockets 1980, 17 (6): 537- 545.
- [2] Corda S. Viscous Optimized Hypersonic Waveriders Designed from Flows over Cones and Mini-mum Drag Bodies [D]. University of Maryland College, Park, 1988.
- [3] Bowcutt K G. Optimization of Hypersonic Waveriders Derived from Cone Flows-including Viscous Effects [D]. University of Maryland College, Park, 1986.
- [4] Lobbia M, Suzuki K. Design and Analysis of Payload-optimized Waveriders [R]. AIAA2001- 1849, 2001.
- [5] Eckert E R G. Engineering Relations for Heat Transferred Friction in High Velocity Laminar and Turbulent Boundary Layer Flow over Surface with Constant Pressure and Temperature[J]. Transaction of the ASME, 1970, 78 (5): 855.
- [6] Bowcutt K G, Anderson J D. Viscous Optimized Waverider Designed From Ax symmetric Flow Fields [R]. AIAA 88- 20369, 1988.
- [7] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA- II [R]. KanGAL Report No. 200001, 2000.
- [8] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of Multi-objective Evolutionary Algorithms: Empirical Results [J]. Evolutionary Computation, 2002, 8(2): 173- 195.
- [9] 许少华, 侯中喜, 等. 自适应遗传算法变异算子改进研究[J]. 推进技术, 2008(4).
- [10] 陈小庆, 侯中喜, 等. 乘波构型设计、分析与优化[C]// 第一届近代空气动力学与气动热力学会议论文集, 绵阳, 2006.