

# 一种应急条件对地观测卫星成像调度方法

王 钧<sup>1</sup>,李 军<sup>1</sup>,陈慧中<sup>2</sup>,景 宁<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073;2. 西南电子电信技术研究所上海分处,上海 200434)

**摘 要:** 通过分析 CBERS 系列对地观测卫星(EOS, Earth Observation Satellites) 应急条件下的成像调度问题,本文提出了一种应急成像调度解决方法. 首先建立问题的多目标无圈有向图模型;然后引入延迟非支配路径的概念,提出基于标记更新的成像路径搜索算法,通过限制延迟受支配路径来提高搜索效率. 理论分析和实验结果表明该方法能在规定时间内有效的解决应急条件成像调度问题.

**关键词:** 成像调度; 无圈有向图模型; 延迟非支配; 路径搜索; 标记更新

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 09-1715-08

## A Multi-Objective Imaging Scheduling Approach of Earth Observation Satellite for Emergent Conditions

WANG Jun<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, CHEN Hui-zhong<sup>2</sup>, JING Ning<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Southwest Research Institute of Telecommunication Branch of Shanghai, Shanghai 200434, China)

**Abstract:** After analyzing the properties of the imaging scheduling problem of emergent condition of CBERS series EOSs (Earth Observing Satellites), we propose an approach of emergent imaging scheduling. We formulate the problem as path search of acyclic directed graph. On this basis, firstly we propose the conception of delay non-dominant path, then propose the multi-objective imaging scheduling algorithm basing on label correcting, which improve the efficiency of path search by forbidding the delay dominated path. And we also prove that the algorithm can find all the multi-objective optimization solutions. We also analyze the complexity of the algorithm simply. At last, the approach is tested on different emergent imaging scheduling problems of CBERS EOS series. Theoretical Analysis and experimental results shows that the proposed approach is successful in solving the emergent imaging scheduling problem of EOS.

**Key words:** multi-objective imaging scheduling; acyclic directed graph model; delay non-dominant; path search; label correcting

### 1 引言

对地观测卫星(EOS, Earth Observation 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.如今,不同部门的各种应用对EOS图像信息的要求越来越高;使有限的EOS资源显得异常宝贵;又由于EOS在轨道上高速运行,地面的各个成像需求具有严格的观测时间窗;不可能一次满足所有成像需求,因而需要对EOS进行成像调度.

本文针对具有横向侧视能力的CBERS(China Brazil Earth Resources Satellite)系列EOS,其成像需求的成像时刻和卫星侧视角度等信息可以根据卫星轨道和成像任务的地理位置在成像调度前的数据处理工作中完成,因而成像调度的主要工作是确定需要拍摄的成像任务.为了充分利用卫星资源,成像调度结果应该能够产生较好的成像效果,同时对卫星资源的消耗尽可能小;因而,需要对成像调度结果进行多目标评价.在实际应用中,某

些特定的成像需求具有很高的时效性(对于这些需求,滞后的影像数据可能会产生错误的信息),被称之为强时效性成像需求,其调度称为应急条件的成像调度.应急条件成像调度的基本目的和一般的成像调度相同,但是由于其针对强时效性成像需求,具有一些特殊的性质,需要研究有效的多目标成像调度算法.

本文通过分析应急条件下成像调度问题的特点,建立具有动态拓扑特性的无圈有向图成像调度模型,并在此基础上提出基于标记更新的多目标成像调度算法,计算应急成像调度问题的Pareto最优解,并对算法的性能进行理论分析,并针对实际CBERS卫星的成像调度问题验证算法的有效性,对实验结果进行了分析.

### 2 问题背景和相关工作

#### 2.1 应急条件成像调度问题

EOS以一定轨道在空间运行,在地面形成以星下点轨迹为轴线,两侧由正负最大侧视角确定的成像覆盖条

收稿日期:2007-07-17;修回日期:2008-06-16

基金项目:国家自然科学基金(No. 60604035);国家高技术研究发展计划(863计划)课题(No. 2002AA783030, No. 2006AA701316)

带(如图 1);条带内每个地面成像需求都有严格的观测时间窗口.成像调度就是在满足 EOS 有效载荷约束的条件下,确定某一时间段内成像覆盖条带内的成像序列,即确定需要完成的成像需求,以尽量少的资源消耗达到尽量好的卫星成像效果,获取最大的综合效益.如果成像需求中含有强时效性成像需求,则成像调度过程分成两个部分,首先针对具有强时效性的成像需求进行调度,然后,在满足 EOS 成像约束的条件下,将剩余的成像需求加入到成像调度结果中.应急条件成像调度是指成像调度过程的第一部分,即对具有强时效性的成像需求进行调度.

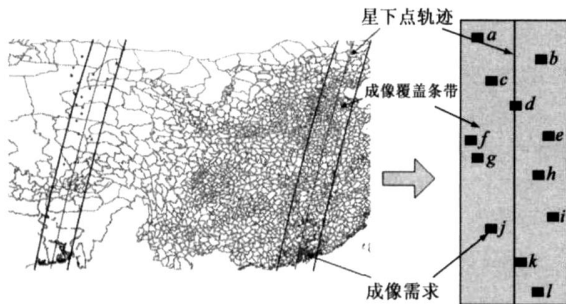


图 1 卫星成像示意图

所谓强时效性成像需求是指其具有较强的时效性,需要及时成像的成像需求.这里,具有强时效性的成像需求往往具有较高的成像重要性等级,一般具有突发性;要求成像调度结果尽可能优化,而且成像调度过程有严格的时间限制.

论文考虑在每次获得卫星精确轨道数据后的成像调度,其时间段设为 12 小时.成像调度中所有待处理成像需求在调度前已经确定,每个成像需求代表一个单元成像区域,EOS 任意时刻只能处理一个成像任务,且成像过程具有原子性,即成像过程一旦开始就必须完成.

根据强时效性成像需求的特点,应急成像调度过程具有如下性质:

- (1) 只针对具有强时效性的成像需求,其这类成像需求重要性等级较高,数量较少,不需要考虑存储器容量限制和有效载荷的能量限制;
- (2) 强时效性成像需求要求下传到指定的地面站,因而成像调度过程不考虑地面站数据传输的规划调度;
- (3) 成像调度时间段一般不超过 12 个小时,不考虑成像需求的重访;
- (4) 在多目标条件下,应急成像调度结果要尽可能体现各个目标之间的均衡;
- (5) 成像调度需要在规定的时间内完成.

## 2.2 相关研究工作

应急条件成像调度是针对特殊成像需求的 EOS 成像调度,其基本原理和 EOS 成像调度相同.EOS 成像调度考虑卫星成像的多种约束,是一个复杂的多目标组合

优化问题.如今随着卫星技术的发展,EOS 成像调度问题得到了广泛的关注,并取得了一些研究成果.

Bensana 等基于值约束满足问题模型,针对 SPOT5 卫星比较了完全搜索算法(深度优先搜索、动态规划、Russian Doll Search)和不完全搜索算法(贪婪搜索、禁忌搜索),实验结果表明,完全搜索算法可用于求解小规模问题的最优解,而禁忌搜索可以在规定的时间内得到较大规模问题的一个满意解<sup>[1,2]</sup>;Pemberton 等采用一种迭代求解的方法,首先按照某种规则对所有的成像需求排序并分组,然后按分组顺序对每组中的成像目标都采用完全算法求得最优解,前面的结果将作为后面分组调度的约束条件<sup>[3]</sup>;Michel 及 Hao 将这一过程转化为背包问题,使用禁忌算法求解<sup>[4]</sup>;Lemaitre 使用约束规划方法和局部搜索算法实施成像调度<sup>[5]</sup>.Wei-Cheng Lin 建立 ROCSASII 卫星的问题的整数规划数学模型,利用拉格朗日松弛法产生近似优化的可行调度方案<sup>[6]</sup>;Muraoka 等在 ASTER 卫星调度系统中,采用贪婪算法求解对地观测卫星调度问题,每次都选取重要等级最高的成像目标,如果该目标不能进行安排,则选取下一个成像目标<sup>[7]</sup>;等等方法.这些工作只考虑单一目标函数,很难表现出多个目标之间的均衡信息.

Gabrel<sup>[8]</sup>,Zhang<sup>[9]</sup>采用多目标无圈有向图作为成像调度问题模型,但是成像调度算法没有考虑成像时间段的合并也没有考虑对延迟支配成像路径的保留(具体见第 2 部分),因而不能产生我们这里考虑的 EOS 成像调度问题的全部 Pareto 最优解.

由于应急条件下的成像调度仅针对强时效成像需求,为了便于描述,如果没有特殊说明,后文中的成像需求均指强时效成像需求,而成像调度即指应急条件成像调度.

## 3 应急条件成像调度问题模型

根据 EOS 的轨道和成像需求的地理位置,在成像调度过程之前,可以计算出成像需求的成像预报信息,即 EOS 对该成像需求进行拍摄时的成像时刻和侧视角度.根据成像预报信息和 EOS 成像约束条件,可以确定成像需求的成像时间序关系,构建成像调度的无圈有向图模型,将成像调度转化为成像路径的搜索问题.

### 3.1 无圈有向图模型

对在一个调度时间段内给定的  $n$  个成像需求,本文定义图  $G$  来表示成像需求及其相互关系.图中顶点表示成像需求,并增加两个虚拟顶点  $s$  及  $t$ ,分别对应成像调度的起始和结束,所有这些顶点构成顶点集合  $V(G)$ ,并依据成像时刻对顶点进行排序.根据卫星轨道和卫星性能特点,如果 EOS 对具有某一侧视角度的成像需求顶点  $a$  成像后,在满足各项约束的条件下,能够继续对另一成像需求顶点  $b$  成像,则  $a$  与  $b$  之间具有连

接关系,其间有一条边.显然在顶点有时间序的情况下,这样的边都是有向边.同时在我们的调度问题中成像需求有确定的访问时间且不考虑成像需求的重访,所以图  $G$  是无圈的.这样的图  $G$  是无圈有向图.

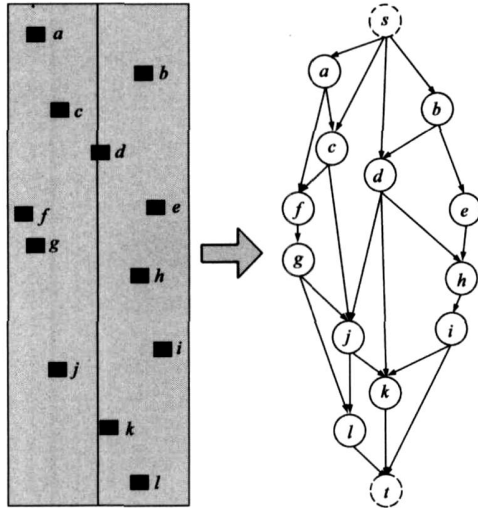


图 2 成像调度无圈有向图模型

这里虚拟初始顶点  $s$  和终止顶点  $t$  需要保证能够和其他顶点都有边相连,但是虚拟顶点  $s$  和  $t$  之间没有边相连.这样图  $G$  中从初始顶点  $s$  开始,到终止顶点  $t$  的所有通路代表了可行的成像需求序列.

根据前一节的论述,成像调度结果需要从完成的成像任务需求质量和所消耗的卫星有效载荷资源两个目标进行评价,我们在上述有向无环图的基础上,定义路径的目标函数如下.

(1) 未完成的成像需求质量函数:

$$\min f_1(P) = \sum_{i \in P} i$$

其中  $P$  表示  $G$  中的一条从起点到终点的路径,对应于成像调度序列.  $i$  表示成像需求,对应于  $G$  中的顶点,  $i$  表示成像需求重要性等级,(这里考虑三种重要性等级,等级值越高表示成像需求越重要);用  $f_1(P)$  表示成像路径  $P$  的质量评价函数.

(2) 有效载荷资源消耗函数:

$$\min f_2(P) = (\alpha L(P) + \beta N(P))$$

其中,  $L(P)$  表示成像路径所代表的成像序列的 EOS 侧视动作角度之和,  $N(P)$  表示成像路径代表的成像序列的相机开关机次数,我们认为这两者是造成有效载荷损耗的主要成因,用  $f_2(P)$  表示成像路径  $P$  的有效载荷资源消耗.  $\alpha, \beta$  表示用来统一量纲的权值参数(这里取  $\alpha = \beta = 0.5$ ).

于是,成像调度问题转化成求取从初始顶点  $s$  到终止顶点  $t$  的多目标优化成像路径搜索问题.

### 3.2 多目标成像路径

#### 3.2.1 成像时段的合并

实际应用中,一次成像过程是从开机到关机的一个成像时间段.必须满足提前开机时间,最小开机时间,延迟关机时间和 EOS 侧视速度等约束;其中最小开机时间约束规定,每次成像的时间长度必须大于最小开机时间,而提前开机约束要求在成像需求的成像时刻之前启动成像设备,因而,侧视角度相同且相距较近的成像需求的成像时间段可能会产生重叠,需要对于这些有重叠的成像时间段进行合并,将多个重叠的成像时间段合并成一个成像时间段(如图 3(a)所示).

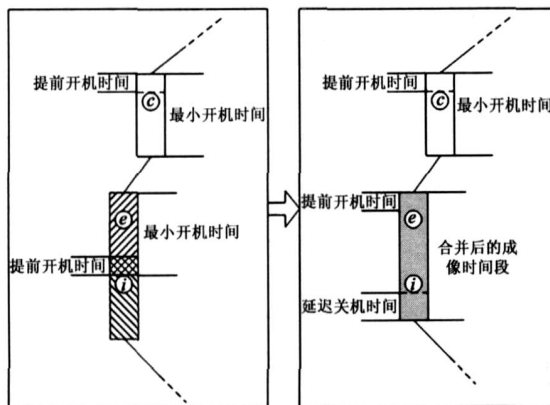
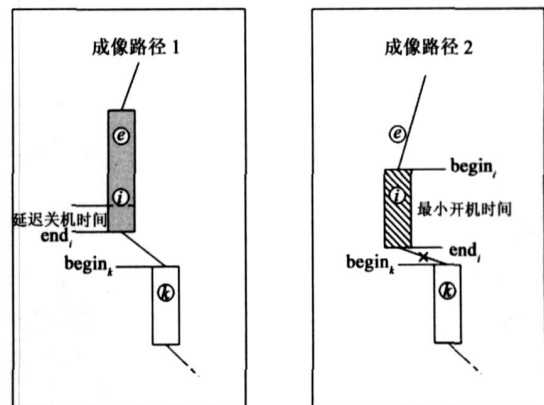


图 3 成像路径的成像时间段合并及其对有向图模型中拓扑关系的影响

从图 3(a) 中可以看出,如果一个成像时间段只包含一个成像需求,其成像的结束时间受到最小开机时间的约束.而对于合并了以后的成像时间段,其中包含了多个成像需求,其成像时间可能大于最小开机时间,这时,成像结束时间就受到延迟关机时间的约束(一般,最小开机时间大于提前开机时间和延迟关机时间



之和).因而对于不同的成像路径,同一个成像需求的成像结束时间可能不同,这样考虑到卫星的侧视速度限制,成像需求间的侧视关系连接关系(对应图  $G$  中顶点间拓扑关系)就会不同.

如图 3(b) 所示,成像路径 1 中成像需求  $e$  和成像需求  $i$  由于成像时间段出现了重叠,他们的成像时间段

被合并到一起,成像结束时间  $\text{end}_i$  受延迟关机时间的约束. 成像路径 2 中成像需求  $i$  是一个独立成像时间段,其成像结束时间  $\text{end}_i$  受最小开机时间的约束. 又由于最小开机时间大于提前开机时间和延迟关机时间之和,所以成像路径 2 中成像需求  $i$  的成像结束时间要比成像路径 1 中的晚. 这样成像路径 2 中  $i$  和  $k$  的成像时间间隔  $\text{begin}_k - \text{end}_i$  比成像路径 1 的小,于是出现了成像路径 2 中的  $i$  和  $k$  不满足 EOS 侧视速度约束而成像路径 1 满足的情况,即在成像路径 1 中  $i$  和  $k$  之间有边相连,而成像路径 2 没有. 也就是说成像路径中前面的顶点的分布会影响到当前顶点与后续其他顶点的连接关系. 因而,图  $G$  中的各个顶点之间的拓扑关系会因为成像路径的不同而动态变化. 但是,由于每个成像需求的提前开机时间是可以确定的,因而给定成像需求的成像序列只有一条成像路径与之对应.

### 3.2.2 成像路径延迟支配

多维目标空间中的矢量  $f$  和  $g$ ,在考虑最小化目标函数的情况下,其 Pareto 关系的一般定义如下<sup>[10]</sup>(这里  $n$  代表目标空间的维数):

$$\begin{aligned} f & \leq g, \text{ iff } \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i \leq g_i; \\ f & < g, \text{ iff } \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i < g_i; \\ f & \leq g, \text{ iff } f_i \leq g_i. \end{aligned}$$

图  $G$  中每条成像路径都对应着目标空间中的一个多维矢量,根据上述矢量关系的定义我们采用 Pareto 支配的概念对不同成像路径进行多目标评价.

设有向图  $G = (V(G), E(G))$ ,其中  $V(G)$  是图中所有顶点的集合,  $E(G)$  是图中所有边的集合. 记  $\text{PATH}_{st}$  是起点  $s$  到顶点  $i (i \in V(G) \setminus s)$  之间所有路径的集合,  $\text{PATH}_{st}$  对应顶点  $s$  及  $t$  之间所有路径.  $f(P)$  表示成像路径  $P$  到目标空间的映射,在我们的问题中  $f(P) = (f_1(P), f_2(P))$ .  $e_P$  表示成像路径  $P$  的最后一次成像动作的成像结束时间,并规定以虚拟顶点  $t$  为终点的路径,其  $e_P$  相等.

由于成像时段的合并会影响图  $G$  的拓扑关系,因而对于成像路径  $P \in \text{PATH}_{st}, i \in t$ ,除了目标函数(1)和目标函数(2),还需要考虑成像路径中成像结束时间的影响. 为此,我们引入成像路径延迟支配的概念,具体定义如下.

#### 定义 1 路径支配关系

设  $P_1, P_2 \in \text{PATH}_{st}$ ,称  $P_1$  支配  $P_2$ ,记为  $P_1 < P_2$ , iff  $f(P_1) < f(P_2)$

#### 定义 2 路径延迟支配关系

设  $P_1, P_2 \in \text{PATH}_{st}, i \in t$ ,称  $P_1$  延迟支配  $P_2$ ,记为  $P_1 < \triangleleft P_2$ , iff  $f(P_1) < f(P_2) \wedge e_{P_1} \leq e_{P_2}$ ,其中  $e_{P_1} \leq e_{P_2}$  表示  $P_1$  最后一次成像动作(即对  $i$  的成像动作)的  $e_{P_1}$  早

于  $P_2$  的  $e_{P_2}$ .

#### 定义 3 非支配路径

设  $P \in \text{PATH}_{st}$ ,称  $P$  为非支配路径, iff  $\exists Q \in \text{PATH}_{st} : Q < P$ ; 否则,称  $P$  为受支配路径.

#### 定义 4 延迟非支配路径

设  $P \in \text{PATH}_{st}, i \in t$ ,称  $P$  为延迟非支配路径, iff  $\exists Q \in \text{PATH}_{st} : Q < \triangleleft P$ ; 否则,称  $P$  为延迟受支配路径.

#### 定义 5 Pareto 优化路径

设  $P \in \text{PATH}_{st}$ ,如果  $P$  是非支配路径,则称  $P$  为 Pareto 优化路径,否则,称  $P$  为非优化路径.

多目标成像调度希望能够得到所有的多目标优化解,根据上面的成像调度问题模型的定义,即是要得到图  $G$  中所有的 Pareto 优化路径.

## 4 多目标成像调度算法

多目标成像调度问题是一个复杂的组合优化问题,在我们的模型中将其转换成  $G$  中的多目标的路径搜索问题. 从复杂性的角度,一个拓扑结构保持不变的,具有两个的目标的图  $G$ ,其多目标优化路径的数量随着顶点的增加成指数的增加<sup>[11]</sup>. 在我们的成像调度问题中,由于目标函数是未完成的成像需求质量和卫星资源消耗,目标空间相对较小,且我们仅考虑具有强时效性的成像需求,其数量相对较少,使得在一般情况下,可以得到问题的所有多目标优化解.

目前,多数求解图中给定两点间的多目标优化路径算法只考虑静态拓扑结构的情况,不能解决成像调度问题中拓扑结构动态变化的情况. 于是,在应急成像调度问题有向图模型的基础上,我们提出一种基于标记更新的成像路径算法求取从顶点  $s$  到  $t$  的 Pareto 优化路径,并证明了算法可以得到有向图模型中所有的多目标优化路径.

对于拓扑结构保持不变的无圈有向图  $G$ ,根据对 Bellman 最短路径的优化原理<sup>[12]</sup>的简单扩展可以知道,在其 Pareto 优化路径中,从顶点  $s$  到任何中间顶点  $i$  的子路径都是非支配路径<sup>[13]</sup>. 但是,由于成像调度问题中需要考虑成像时间段的合并,它将影响图  $G$  的拓扑结构,所以在成像调度有向图模型中, Pareto 优化路径的子路径不一定是非支配路径;如图 4 所示,假设顶点  $d$  和顶点  $k$  所对应的成像需求重要性等级为 3,顶点  $e$  的重要性等级为 2,则 Pareto 优化路径中从  $s$  到  $i$  的子路径  $P_1$  被另一条非优化路径中的从  $s$  到  $i$  的子路径  $P_2$  支配,即  $P_2 < P_1$ . 考虑从  $s$  到  $t$  的成像路径,由于子路径  $P_2$  的后续路径不能包含成像需求  $k$  (不满足侧视速度约束),显然,右图中的非优化成像路径被左图的 Pareto 优化路径支配.

然而, Pareto 优化路径的子路径却一定是延迟非支配路径.

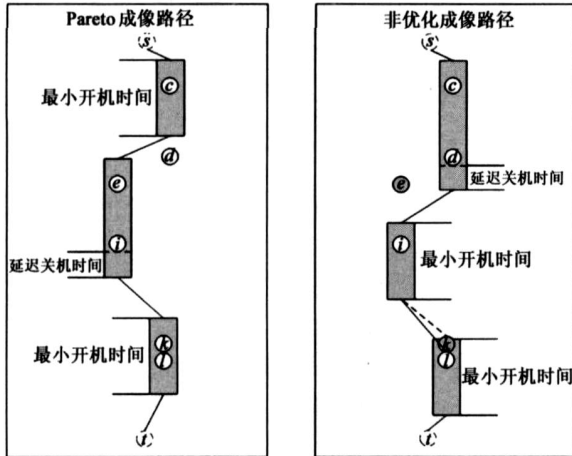


图 4 Pareto 优化路径的子路径不一定是非支配路径

引理 1 成像调度模型中, 延迟非支配路径中以顶点  $s$  为源点的子路径一定是延迟非支配路径.

证明: 设  $P_{si}$  是图  $G$  的任意一条延迟非支配路径,  $P_{si}$  是  $P_{si}$  中从顶点  $s$  到顶点  $i$  的子路径, 其中  $i$  是  $s$  和  $i$  之间的顶点; 则路径  $P_{si}$  可以分解为  $P_{si}$  和剩余的部分  $\bar{P}_{si}$ . 假设存在另一条从  $s$  到  $i$  的路径  $P_{si}$ , 且  $P_{si} < \triangleleft P_{si}$ , 考虑  $P_{si}$  和  $\bar{P}_{si}$  组成的从  $s$  到  $i$  的路径  $P_{si}$ , 则有  $P_{si} < \triangleleft P_{si}$ , 这与  $P_{si}$  是一条延迟非支配路径相矛盾. 故延迟非支配路径中以顶点  $s$  为源点的子路径一定是延迟非支配路径.

由于 EOS 侧视速度的影响, 上面的证明中,  $P_{si} < \triangleleft P_{si}$  保证了路径  $P_{si}$  和  $\bar{P}_{si}$  能够组成从  $s$  到  $t$  的路径, 而这种保证在仅有  $P_{si} < P_{si}$  的情况下不一定成立 (如图 4 所示).

引理 2 成像调度模型中, Pareto 优化路径以顶点  $s$  为源点的子路径一定是延迟非支配路径.

证明: 设  $P_{si}$  是图  $G$  的一条 Pareto 优化路径, 则  $P_{si}$  是延迟非支配路径, 根据引理 1, 其以顶点  $s$  为源点的子路径是延迟非支配路径, 故 Pareto 优化路径以顶点  $s$  为源点的子路径一定是延迟非支配路径.

根据引理 2, 我们设计基于标记更新的多目标成像调度算法, 通过不断寻找从顶点  $s$  出发的所有延迟非支配路径来获得 Pareto 优化路径, 并将  $s$  到某顶点的延迟受支配路径在标记更新过程中消去, 从而减少搜索路径的数量. 算法思想如下:

设顶点以成像时间为依据进行排列得到成像需求序列, 记为  $\{s, 1, 2, \dots, i \dots, t\}$ , 对每个顶点保持一个标记集合, 用以记录从顶点  $s$  到该顶点的路径信息, 按时间顺序依次选择更新每个顶点的标记集合, 并更新该顶点所有后继顶点的标记值; 当某个顶点被选中时, 根据

图  $G$  的有向性, 不再考虑其前趋顶点, 其对应的标记不再被更新, 所以可以提高成像路径搜索效率.

下面对算法过程进行描述, 首先作如下定义:

$M(i)$ : 从  $s$  到  $i$  的标记路径的集合 ( $i \in V(G) \setminus s$ );

init- $P_{i0}$ : 初始条件下的直接连接顶点  $s$  和顶点  $i$  构成的路径;

$\text{pred}_P(i)$ : 路径  $P$  中顶点  $i$  的前趋顶点, 顶点  $s$  没有前趋顶点;

$\text{succ}(P)$ : 图  $G$  中, 路径  $P$  的最后一个顶点的所有后继顶点集合 (根据图  $G$  的动态拓扑特性, 对于不同的路径, 即使他们最后一个顶点相同, 其后继顶点集合也可能不同), 如果路径  $P$  的最后一个顶点是  $t$ , 则  $\text{succ}(P) = \emptyset$ ; 于是有  $P = (s, \dots, \text{pred}_P(i), i)$  是从  $s$  到  $i$  的一条路径, 即  $P \in \text{PATH}_{si}$ ;

$l_P = (f(P), \text{pred}_P(i), \text{point}_P)$ : 从  $s$  到  $i$  的路径  $P$  的标记;

$\text{point}_P$ : 指向  $M(\text{pred}_P(i))$  中的某条路径  $P = (s, \dots, \text{pred}_P(i))$  的指针;

$\text{merge}(P, j), j \in \text{succ}(P)$ : 表示将  $j$  加入路径  $P$ , 经过成像时段合并后生成的新路径, 同时确定新路径的成像结束时间;

$f(P)$ : 与路径  $P$  对应的多目标矢量.

```

基于标记更新的多目标成像调度算法:
BEGIN
输入: 无圈有向图  $G$  和 EOS 侧视约束信息
输出: 从顶点  $s$  至顶点  $t$  之间的 Pareto 优化路径
 $M(s) \leftarrow \{(\mathbf{0}, s, \text{NULL})\}$ 
 $M(t) \leftarrow \{(\dots, s, \text{NULL})\}$ 
 $M(i) \leftarrow \{f(\text{init-}P_{i0}), s, \text{NULL}\}$ , for all  $i \in V(G) \setminus \{s, t\}$ 
 $P \leftarrow \text{NULL}$ 
for  $i = \{1, 2, \dots, t\}$ 
  for all  $l_P \in M(i)$ 
    for all  $j \in \text{succ}(P)$ 
       $P \leftarrow \text{merge}(P, j)$ 
    for all  $l_P \in M(j)$ 
      if  $j = t$  then
        (11) if  $P < \triangleleft l_P$  then
        (12)    $M(j) \leftarrow M(j) \setminus \{l_P\}$ 
        (13)    $M(j) \leftarrow M(j) \cup \{(f(P), i, \text{point}_P)\}$ 
        (14) else if  $P < l_P$  then
        (15)   break
        (16) else
        (17)    $M(j) \leftarrow M(j) \cup \{(f(P), i, \text{point}_P)\}$ 
        (18) else
        (19) if  $P < P$  then
        (20)    $M(j) \leftarrow M(j) \setminus \{l_P\}$ 
        (21)    $M(j) \leftarrow M(j) \cup \{(f(P), i, \text{point}_P)\}$ 
        (22) else if  $P < P$  then
        (23)   break
        (24) else
        (25)    $M(j) \leftarrow M(j) \cup \{(f(P), i, \text{point}_P)\}$ 
        (26) end for
        (27) end for
        (28) end for
        (29) end for
END

```

图 5 多目标成像路径搜索算法

具体算法流程如图 5 所示.

下面证明算法能够输出图  $G$  中所有的 Pareto 优化路径.

**引理 3** 根据多目标成像调度算法,对于任意顶点  $i \in V(G) \setminus \{s, t\}$ , 设  $P \in \text{PATH}_{si}$  是一条延迟非支配路径;则一旦路径  $P$  出现在标记集合  $M(i)$  中,它将一直保留在  $M(i)$  中.

**证明:**假设路径  $P$  出现在标记集合  $M(i)$  中,根据算法中的第 ⑪ ~ ⑰行,要删除  $M(i)$  路径中  $P$  的标记值,则一定有另一条路径  $P'$ ,使得  $P' < P$ ;这与  $P$  是延迟非支配路径相矛盾.

**引理 4** 根据多目标成像调度算法,设  $P \in \text{PATH}_{st}$  是一条 Pareto 优化路径;则一旦路径  $P$  出现在标记集合  $M(t)$  中,它将一直保留在  $M(t)$  中.

**证明:**类似引理 3 的证明,假设路径  $P$  出现在标记集合  $M(t)$  中,根据算法中的第 ⑲ - ⑳行,要删除  $M(t)$  中路径  $P$  的标记值,则一定有另一条路径  $P'$ ,且  $P' < P$ ;这与路径  $P$  是 Pareto 优化路径相矛盾.

**引理 5** 如果  $i \neq t$ ,多目标成像调度算法中第  $i$  行的  $M(i)$  包含了  $\text{PATH}_{si}$  中所有延迟非支配路径的标记,且只包含了这些延迟非支配路径的标记.

**证明:**首先考虑初始情况;显然,  $M(s)$  在初始化以后不会被更新,这样对于成像时刻最早的顶点,不妨设为  $i_0$ ,只有顶点  $s$  与其相连,  $\text{PATH}_{si_0}$  中仅有一条路径,显然它是一条延迟非支配路径.由于  $i_0$  是成像时刻最早的顶点,根据成像的时间序列关系,  $M(i_0)$  在初始化以后不再被更新.于是,  $M(i_0)$  包含了这条仅有的延迟非支配路径.

现在假设  $k(k \neq i_0)$  是  $s$  和  $t$  之间的一个顶点,且成像需求序列中  $k$  之前的任意顶点  $j$ ,其路径标记集合  $M(j)$  均包含了  $\text{PATH}_{sj}$  中所有延迟非支配路径.

如果此时算法第  $i$  行的循环变量  $i = k$ ,则表示在成像需求顶点序列中  $k$  之前所有顶点已经执行了第  $i$  ~ ⑰行.又假设这时存在一条的延迟非支配路径  $P \in \text{PATH}_{sk}$ ,使得  $l_p \notin M(k)$ ,考虑路径上  $P$  与  $k$  相邻的顶点  $j$ ;根据引理 1,路径  $P$  中从顶点  $s$  到顶点  $j$  的子路径  $P_j$  是延迟非支配路径,由于顶点的时间序关系,顶点  $j$  一定是  $s$  和  $k$  之间的顶点,则  $l_{P_j} \in M(j)$ ,且  $k \in \text{succ}(P_j)$ ,则根据第  $i$  和 ⑰行的循环条件,路径  $P$  会在算法搜索过程中出现,则根据引理 3,  $l_p \in M(k)$ ;这与  $l_p \notin M(k)$  的假设矛盾,故  $M(k)$  包含了  $\text{PATH}_{sk}$  中的所有延迟非支配路径.因而,第  $i$  行的  $M(i)$  总是包含了  $\text{PATH}_{si}(i \neq t)$  中的所有延迟非支配路径.

假设  $M(i)$  中还包含了的延迟受支配路径  $P'$ ,且  $P' < P$ ,  $P' \in \text{PATH}_{si}$ ,根据上面的证明,  $l_{P'} \in M(i)$ ,

显然  $l_p \in M(i)$  和  $l_{P'} \in M(i)$  和算法对路径标记更新的过程 ⑪ ~ ⑰矛盾,因而  $l_p \notin M(i)$ ,与假设矛盾.

综上所述,如果  $i \neq t$ ,多目标成像调度算法中第  $i$  行的  $M(i)$  包含了从顶点  $s$  到顶点  $i$  的所有延迟非支配路径,且只包含了这些延迟非支配路径.

于是,根据上面的引理可以得到下面的结论.

**定理 1** 多目标成像调度算法结束时,顶点  $t$  的标记集合包含了图  $G$  的所有 Pareto 优化路径的标记,且只包含了这些 Pareto 优化路径的标记.

**证明:**对于图  $G$  的任意 Pareto 优化路径  $P$ ,考虑路径  $P$  中与顶点  $t$  相连接的顶点  $i$ ,根据引理 2,  $P$  的子路径  $P_i$  是延迟非支配路径.又根据引理 5,有  $l_{P_i} \in M(i)$ ,  $t \in \text{succ}(P_i)$ ,根据算法的第  $i$  和 ⑰行的循环条件及第 ⑲ ~ ⑳行的判断条件,则  $l_p \in M(t)$ .又根据引理 4,路径  $P$  的标记在算法结束时保留在  $M(t)$  中.下面证明  $M(t)$  中只包含 Pareto 优化路径的标记.

和引理 5 的证明类似,假设  $M(t)$  中还包含了的延迟受支配路径  $P'$ ,且  $P' < P$ ,  $P' \in \text{PATH}_{st}$ ,又  $l_{P'} \in M(t)$ ,则如果  $l_p \in M(t)$  和  $l_{P'} \in M(t)$ ,其与算法对路径标记更新的过程 ⑲ ~ ⑳矛盾,因而  $l_p \notin M(t)$ ,矛盾.

因而,算法结束时,根据  $M(t)$  可以得到图  $G$  的所有 Pareto 优化路径.

由于每一条路径的标记值中均保留了前趋顶点路径的指针,根据其进行路径的回溯,就可以得到从顶点  $s$  开始的完整路径.也就得到了相应的成像需求序列.定理 1 说明算法总是能够得到成像调度问题的所有多目标优化解.

由于算法的复杂度受问题模型拓扑关系的影响,下面对其进行简单的分析.

考虑到成像需求依照成像时间排序,算法中的合并成像路径的操作只针对路径中的最后一次成像动作的成像需求;则由算法的循环过程容易看出,对于成像需求数量为  $n$  的问题,最坏情况下,算法复杂度为  $O(n^2 M^2)$ ,其中  $M = \max(|M(i)|)$ ,  $i \in V(G) \setminus s$  和具体问题对应的无圈有向图的拓扑关系相关.这里,由于  $M(i)$  是多目标条件下的延迟非支配路径的标记集合,理论上会远大于  $n$ ,但是根据文献[14]的研究,实际中在一定的拓扑结构下,从顶点  $s$  到某中间顶点的非支配路径数目相对不大.对于组合优化问题,其大小还受到目标空间大小的限制.因而,尽管图  $G$  的动态拓扑特性会增加延迟非支配路径的数量,在实际问题规模不大的情况下,我们的算法可以有效的解决成像调度问题,下一部分的实验结果也说明了这个结论.

## 5 实验结果与讨论

实验考虑的 CBERS 系列 EOS 有效载荷约束,根据

来自卫星指挥控制单位的成像需求数据进行成像调度实验,并对结果进行分析.其中成像需求预报和其他相关信息由卫星测控软件计算所得.实际中,在进行卫星调度之前还需要根据卫星成像视场角度对成像需求的侧视角度进行调整和成像需求过滤;在我们的实验中,假设这些工作都已经由其他处理系统完成.

实验选择 6 个具有典型分布特性的强时效成像需求数据集.首先构建成像调度有向无圈图模型,然后使用多目标成像调度算法求取 Pareto 优化路径及相应的目标值.实验环境为 CPU AMD3200 + 1.7G,1G DDRII 内存,Windows XP 操作系统,采用 Visual C++ 编译器.考虑目标函数:(1)未完成成像需求质量和(2)有效载荷资源消耗(见第二小节).应急成像调度的时间要求较严格,这里计算时间限制为 1000 秒.

表 1 是六次成像调度的实验数据,其中 PH 表示成像需求数据集的标识,第二列表示成像需求数目.从第三列开始是成像调度结果的实验数据,其中,  $M$  表示路径的所有成像需求标记集合中延迟非支配路径数的最大值;Num of Comp Path 列表示在成像调度过程中比较  $M$

$= \max(|M(i)|), i \in V(G) \setminus s$  的路径数量,Num of Pareto Path 列表示成像调度生成的 Pareto 优化路径数量,对应于成像调度的多目标优化结果,注意到根据 Pareto 优化路径的定义,从问题的解空间到目标空间是多对一的映射关系,这里的 Pareto 优化路径数量可能大于图 6 中各个问题对应的目标空间矢量的个数.最后一列是多目标成像调度算法的 CPU 时间消耗(单位是秒).

表 1 应急成像调度问题及实验结果

PH	Num of Requests	$M$	Num of Comp Path	Num of Pareto Path	Time Cost
P117	143	908	587709	206	376
P186	91	240	45394	118	11
P198	398	402	1606136	142	994
P205	70	50	12746	30	3
P221	46	69	5125	56	0.8
P226	80	68	33389	55	9

图 6 是这 6 个问题的 Pareto 优化路径所对应的目标矢量,其中 (a), (b), (c), (d), (e), (f) 子图分别对应问题 P117, P186, P198, P205, P221, P226.

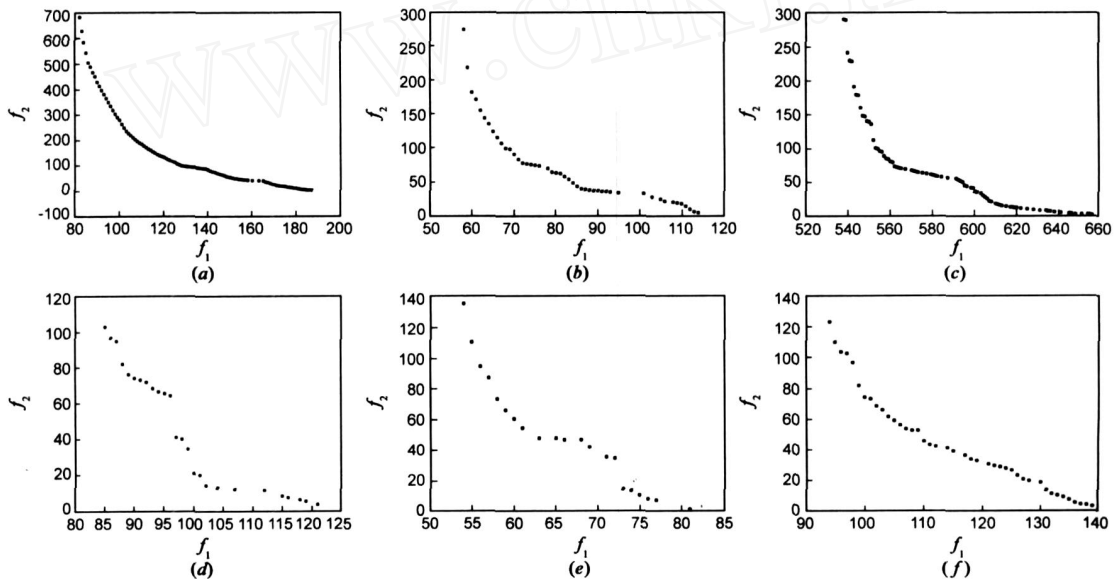


图 6 六个问题成像调度问题的多目标优化解在目标空间的分布

实验中在不同的问题规模下,我们的算法都在规定的时间里得到了问题的多目标优化解集.尽管在 EOS 有效载荷成像约束一定的条件下算法执行效果和成像需求的分布有关,我们还是可以对实验结果进行一些有意义的分析:

随着成像需求数量的增加,算法执行时间增长较快.在多目标条件下,从  $s$  到中间顶点的延迟非支配路径数量会大大增加,即相应的标记数将会增加,同时,需要更新的后继顶点数也增加了,这样,算法需要的比较次数相应就会快速增长,导致 CPU 时间的较快增长.

这说明我们的算法并不适合问题规模很大的情况,幸运的是,就应急条件成像调度而言,问题的规模都相对较小.

成像需求数量的增加会大大增加算法处理的路径数量,但是最终的 Pareto 优化路径数量增加较小,说明实际中像 P198 这样规模很大的应急条件成像调度问题,其延迟非支配路径的数量也远小于理论分析的情况.另外,从实验的结果可以看出,Pareto 优化路径在目标空间对应的 Pareto 边界具有较强的非凸性.也就是说,Pareto 优化路径中成像需求质量的增加对卫星资源

消耗的影响是不规律变化的. 因而, 算法得到的 Pareto 优化解集将更有助于确定最终应急成像任务方案.

## 6 结论

多目标成像调度是随着 EOS 技术的发展出现的新的复杂的问题. 本文通过分析应急条件成像调度的特点, 提出一种新的成像调度解决方案, 采用无圈有向图作为成像调度模型, 引入延迟非支配的概念, 使用成像需求质量和资源消耗两个目标对成像路径进行多目标评价, 在此基础上提出一种新的多目标成像调度算法求解 Pareto 优化路径. 由于算法中无圈有向图采用时间序顶点选择, 延迟受支配路径不会在路径搜索的过程中传播, 因而能够大大减少搜索的路径数量, 在较短的时间内求得所有的 Pareto 优化路径及对应的成像需求序列. 通过对实际问题的实验, 表明本文的方法能够在规定的时间内得到成像调度问题的多目标优化解集.

实际中, 成像需求质量过低和有效载荷资源消耗过大的成像调度结果都是不希望出现的, 在得到成像需求优化序列后决策人员还要从中选择出最终实施的成像调度方案. 文中多目标成像调度算法能得到问题的所有多目标优化解, 使得决策人员的选择范围更加完备, 从而更有效的发挥 EOS 的综合效益. 从这个角度来看, 本文的方法有效的解决了 EOS 应急成像调度问题, 从而达到充分利用卫星资源的目的.

## 参考文献:

- [1] BENSANA E, VERFAILLIE G, BATAILLIE N, BLUESTEIN D. Exact and inexact methods for the daily management of an earth observing satellite[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Space Operations [C]. Munich: European Space Agency, 1996. 507 - 514.
- [2] BENSANA E, VERFAILLIE G, LEMAITRE M. Earth observing satellite management[J]. Constraints, 1999, 4(3): 293 - 299.
- [3] PEMBERTON J. Towards scheduling over-constrained remote sensing satellites[A]. Proceeding of the 2nd NASA International Workshop on Planning and Scheduling for Space [C]. San Francisco: NASA, 2000. 84 - 89.
- [4] 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.
- [5] LEMAITRE M, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites[J]. Aerospace Sciences and Technology, 2002, 6(5): 367 - 381.
- [6] LIN W C, et al. Daily imaging scheduling of an earth observation satellite[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cy-

- bernetics Part A :system and humans, 2005, 35(2): 213 - 223.
- [7] MURAOKA H, et al. Aster observing scheduling algorithm [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Space Operations [C]. Tokyo: JAXA, 1998. 2b004.
- [8] 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(3): 533 - 542.
- [9] 张帆, 王钧, 李军, 景宁. 基于时间序无圈有向图的多准则优化成像调度[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6): 61 - 66. ZHANG Fan, WANG Jun, LI Jun, JING Ning. Multi-criteria optimal imaging scheduling based on time ordered acyclic directed graph [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(6): 61 - 66. (in Chinese)
- [10] ZITZLER E. Evolutionary Algorithms for Multi-Objective Optimization: Methods and Applications [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1999.
- [11] HANSEN P. Bi-criterion path problem [A]. Multiple Criteria Decision Making: Theory and Applications [C]. Heidelberg: Springer, 1980. 109 - 127.
- [12] BELLMAN R E. On a routing problem [J]. Quarterly Applied Mathematics, 1958, 16: 87 - 90.
- [13] MARTINS EQV, SANTOS JLE. The labeling algorithm for the multi-objective shortest path problem [R]. Coimbra, Portugal: University of Coimbra, 1999. CISUC TR99/005
- [14] MATTHIAS M H, KARSTEN W. Pareto shortest path is often feasible in practice [A]. Proceeding of Algorithm Engineering: 5th International workshop WAE2001 [C]. Aarhus: Springer, 2001. 185 - 198.

## 作者简介:



王 钧 男, 1978 年 7 月出生于湖北省黄石市. 博士. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所讲师. 主要研究方向为智能控制技术、卫星规划调度技术.  
Email: wangjun @nudt.edu.cn



李 军 男, 1973 年 5 月出生于湖南省益阳市. 博士. 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所副教授. 主要研究方向为卫星任务规划、空间信息系统、遥感与地理信息集成技术.  
Email: lijun @nudt.edu.cn