

基于时间序无圈有向图的多准则优化成像调度*

张帆,王钧,李军,景宁

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 :合理有效地利用遥感卫星资源获取更多高质量影像数据是卫星成像调度的重要工作。提出了一种新的成像调度解决方案。应用图论相关理论,建立卫星成像时间序无圈有向图模型,利用多项准则作为衡量标准对不同成像路径进行评价,提出时间序多准则最短路径算法求取优化成像路径。理论分析和实验表明,该解决方案可以在较短时间内获得多条 pareto 优化成像路径,具有良好的调度性能。

关键词 :多准则优化;成像调度;时间序无圈有向图

中图分类号 :TP391 文献标识码 :A

Multicriteria Optimal Imaging Scheduling Based on Time Ordered Acyclic Directed Graph

ZHANG Fan, WANG Jun, LI Jun, JING Ning

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

Abstract :It is a important task for imaging scheduling to acquire more image data of good quality by making rational and efficient use of the remote sensing satellite. To solve this problem a scheme is presented, which includes building satellite imaging time ordered acyclic directed graph, evaluating different imaging path according to multicriteria, and obtaining the optimal imaging path with time ordered multicriteria shortest path algorithm. Theoretical analysis and experimental results show that by using the scheme, multiple optimal pareto paths can be obtained within acceptable time, and better scheduling can be guaranteed.

Key words :multicriteria optimization; imaging scheduling; time ordered acyclic directed graph

遥感卫星已在城镇规划、矿产调查以及防灾减灾等众多关系国计民生的行业发挥着重要作用,不同部门的各种应用对于遥感卫星图像数据的数量及质量要求也是越来越高,然而,由于卫星在空间高速运行,地面的各个成像需求具有严格的观测时间窗,在一定时间内不可能全部对它们进行成像,且各个成像需求具有不同的重要程度及气象、光照条件,所以要最大限度地发挥卫星的价值必须综合考虑这些影响因素,合理安排卫星机动次数等有限资源,即确定一定条件下最优的卫星遥感计划,使尽可能多、尽可能重要且具有良好气象、光照条件的遥感需求获得成像。传统方法需要操作人员考虑用户需求及卫星的各种约束条件,进行长时间人工分析,获得一种可行但非最优的成像计划,而且,当地面成像需求较多时,人工分析已经难以进行有效综合权衡。这就要求对卫星进行成像优化调度,以便更有效地利用卫星有效载荷资源,合理安排其工作任务,实现对地观测数据的高效优质获取。

本文针对这一问题提出一种新的成像调度解决方案,应用图论理论建立了相应的时间序无圈有向图模型,同时对成像工作进行多准则衡量,在此基础上提出时间序多准则最短路径算法(time ordered multicriteria shortest path algorithm, TOMSPA)获取遥感卫星优化成像路径,解决了卫星成像优化调度的关键问题。

1 遥感卫星成像调度及相关工作

卫星以一定轨道在空间运行,由于其在成像过程中仍处于高速飞行状态,且姿态控制能力有限,使得在同一轨道圈次只有部分地面需求能够获得成像,这样就需要对在什么时间、使用何种姿态、对哪些

* 收稿日期 :2005 - 01 - 14
基金项目 :国家 863 高技术资助项目(2002AA783030)
作者简介 :张帆(1973—),男,博士生。

地面需求进行成像实施决策,即进行遥感卫星成像调度,以充分利用卫星资源,获取大量具有优良成像效果的图像信息。

一般的遥感卫星成像调度主要由计算和决策过程组成。在计算过程中需要对来自不同部门的成像需求按照用户级别、紧急程度等进行归类;根据卫星轨道及成像需求坐标进行访问时间、访问姿态角和光照条件计算。在上述数据条件的基础上,可以根据实际需求实施决策,此时需要综合考虑各种影响因素,优先安排重要、紧急和具有良好气象及光照条件的成像需求,且尽量控制能量消耗,但在实际应用中这些条件往往相互冲突,很难找到一种方式达到所有的要求,即一次成像过程很难同时满足成像需求数量多、质量好、重要程度高且能量消耗少这些条件,必须进行一定的均衡处理,求取综合效益最高的成像方式。其核心是在某个时间段内,对于最终对哪些地面需求实施成像进行决策。

针对这样一个现实问题,已经有相关科研机构进行了一定的研究工作,Bensana^[1]使用精确的规划方法和禁忌搜索算法对 SPOT 卫星进行成像调度;Gabrel^[2]提出使用整数线性规划方法求解,Vasquez 及 Hao^[3]将这一过程转化为背包问题,使用禁忌搜索算法求解;Verfaillie^[4]和 Lemaitre^[5]建立了约束满足问题模型,在此基础上进行求解;Harrison^[6]使用穷尽搜索的思想解决规模较小的问题;Wei-Cheng Lin^[7]利用拉格朗日松弛及线性搜索技术产生近优可行调度方案。值得注意的是上述工作都只考虑了单一准则条件下的优化或是将多个准则聚合为一个准则求解,所得结果只在一定程度上满足调度任务需求。文献[8]提出针对特定卫星考虑三个优化准则求取优化成像调度方案,但没有建立相应问题的严格数学模型。

2 时间序多准则最短路径算法

2.1 时间序无圈有向图生成

考虑单颗遥感卫星,将每个具有一定经纬度坐标的成像需求看作图的顶点,为便于分析问题,增加两个虚拟顶点 S 及 T ,分别对应某一轨道圈次的初始顶点和终止顶点,所有这些顶点构成顶点集合 V ,并依据访问时间对顶点进行排序,这里称顶点具有时间序,实际上也就是对应了一种拓扑序;根据卫星轨道和卫星性能特点,如果对顶点 A 成像后满足各项约束条件,能够继续对顶点 B 成像,则在 A 与 B 之间具有连接关系,其间有一条边。由于卫星是严格按时间序运行的,所以这样的边都是有向边,初始顶点 S 和终止顶点 T 位置的选取只需保证它们与这一轨道圈次的其它成像需求具有连接关系即可,在某一时间段内,从前至后对每一个顶点判断其与后续其它顶点的连接关系,得到一个边集,设为 A ,其中虚拟顶点 S 和 T 之间没有边,这样就可以构造一个时间序有向图 $G=(V,A)$ 。可以看到,从初始顶点 S 开始,到时间段终止顶点 T 结束的所有路径即为遥感卫星的所有可能运行方式。

在一定时间段内,由于不同轨道圈次(1, ..., m)对应不同的地面成像需求,这样就可以针对每圈轨道构造相应的有向图(G_1, \dots, G_m),将这些不同圈次的图连接起来即可构成整个问题领域的图模型,如图 1 所示。其中, R_i ($i=1, \dots, m$)表示在第 i 个轨道圈次中地面成像需求所在区域。

2.2 主要概念

针对某个地面成像需求来说,其重要性可以从多方面进行衡量,包括重要程度、气象条件以及光照条件等。由于路径是由多个处于不同地理位置的成像需求组成,相应地,不同路径的成像质量也可以从多方面进行衡量,一般来说,各种重要因素之间存在着冲突,所以引入多准则优化的思想,通过建立多条优化准则,对不同路径的综合效果进行评价,寻求较为均衡的优化解决方案。在最大化情况时,准则向量 f 及 g 间关系一般定义如下^[9]:

$$f = g \text{ iff } \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}; f_i = g_i$$

$$f \geq g \text{ iff } \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}; f_i \geq g_i$$

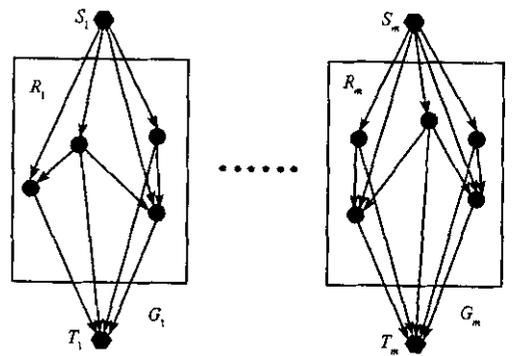


图 1 时间序无圈图模型

Fig.1 Time ordered acyclic directed graph model

$f > g$ iff $f \geq g \wedge f \neq g$

类似地,有准则矢量间的 $<$ 和 \leq 关系,其中, n 为准则矢量维数。

这里,我们在路径支配意义下对于路径的质量进行多准则评价,为此,引入下面一些关键概念:

设有向图 $G=(V,A)$,其中 V 是图中所有顶点的集合, A 是图中所有边的集合。若记 P_{Sj} 是起点 S 及顶点 $j(j \in V \setminus S)$ 之间所有路径的集合,则 P_{ST} 对应起点 S 及终点 T 之间所有路径。

定义 1 路径支配关系

设 $p_1, p_2 \in P_{Sj}$ 对应的准则矢量为 $f(p_1)$ 及 $f(p_2)$,则有 p_1 支配 p_2 ,记为 $p_1 > p_2$ iff $f(p_1) > f(p_2)$ 。

定义 2 非支配路径

设 $p \in P_{Sj}$ 称 p 为非支配路径 iff $\neg \exists q \in P_{Sj} : q > p$ 。

当多条成像路径互为非支配路径时,认为这些路径具有相同的质量。

定义 3 受支配路径

设 $p \in P_{Sj}$ 称 p 为受支配路径 iff $\exists q \in P_{Sj} : q > p$ 。

当某条成像路径受其它路径支配时,认为这条路径的质量较差。

定义 4 pareto 优化路径

在路径支配关系条件下,设 $p \in P_{ST}$,当 p 为一条非支配路径时称 p 是 pareto 优化路径。

当某条成像路径是 pareto 优化路径时,认为这条路径具有高质量。

2.3 时间序多准则最短路径算法

根据问题的优化目的,可以构造出以下准则:成像数量准则、成像效果准则、能量消耗准则。成像数量准则考虑路径中成像需求的数目;成像效果准则考虑路径中具有较好光照和气象条件的成像需求数目;能量消耗准则考虑执行成像路径消耗的机动能。优化成像调度的目的就是基于这三个准则求取若干条优化的成像路径,使得路径中包含尽量多具有良好光照、气象条件的成像需求,且执行该成像路径消耗的能量尽量小。三个优化准则往往相互冲突,难以同时满足,可以通过在构建的时间序无圈有向图中使用多准则最短路径算法思想进行分析和处理。

在图 G 中将顶点 v_i 与 v_j 的连接关系定义为 x_{ij} ;边 (v_i, v_j) 的多准则评价矢量定义为 $\omega_{ij} = (\omega_{ij}^1, \omega_{ij}^2, \omega_{ij}^3)$,则相应的多准则最短路径数学规划模型为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=S}^T \sum_{\substack{j=S \\ j \neq i}}^T \omega_{ij}^1 x_{ij} \\ & \max \sum_{i=S}^T \sum_{\substack{j=S \\ j \neq i}}^T \omega_{ij}^2 x_{ij} \\ & \max \sum_{i=S}^T \sum_{\substack{j=S \\ j \neq i}}^T \omega_{ij}^3 x_{ij} \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{\substack{j=S \\ j \neq i}}^T x_{ij} - \sum_{\substack{j=S \\ j \neq i}}^T x_{ji} = \begin{cases} 1, & i = S \\ 0, & i \neq S, T \\ -1, & i = T \end{cases} \\ & \text{and} \quad \sum_{\substack{j=S \\ j \neq i}}^T x_{ij} \begin{cases} \leq 1, & i \neq T \\ = 0, & i = T \end{cases} \\ & x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A \end{aligned}$$

经典的最短路径问题常考虑获取最小的旅行时间或距离,具有多项式时间复杂度,加入多准则性质后,由于一般不存在单一的最优解,这里优化的概念扩展为 pareto 优化,最后的结果不是单一的解,而是一个 pareto 优化解集。

文献 [10] 证明了多准则最短路径问题是 NP-hard 问题,当图中顶点数增加时,pareto 优化路径数量

急剧增大,相应计算复杂性也会增大。

虽然多准则最短路径问题具有 NP-hard 特性,但根据图 G 拓扑结构的特点,在一定条件下可以大大降低计算复杂度。文献 [11] 的研究结果显示,在一定的拓扑结构下,由于从顶点 S 到某中间顶点的非支配路径数目相对不大,问题的求解比理论分析的最坏情况要好。特别是在标记校正方法中,使用适当的顶点或标记选择策略可以获得较好的算法性能。

由图的生成过程可以看到, G 是一个具有时间序的无圈有向图,而在无圈图中可以根据拓扑序(此处对应了时间序)对顶点进行排序,从顶点 S 到 T 的 pareto 优化路径由中间顶点对应的非支配路径组成。可以通过不断寻找非支配子路径获得从顶点 S 到 T 的 pareto 优化路径,对应的 S 到某顶点的受支配路径会在更新过程中消去,不会在后续顶点传播。

基于上述分析,我们提出一种时间序多准则最短路径算法 TOMSPA 求取从顶点 S 到 T 的所有 pareto 优化路径及相应的准则矢量。算法思想如下:设顶点已经以时间序为依据进行排列,每一个顶点具有一个标记集合,用以表明从顶点 S 到该顶点的路径信息,使用与文献 [8] 不同的顶点标记更新策略,按时间顺序依次选择每一个顶点,即候选顶点根据时间顺序来确定,更新该顶点所有后继顶点的标记值,当某个顶点被选中时,由于它已经不再有前趋,其对应的标记不再会被更新了,所以使用时间序多准则最短路径算法可以大大提高运行效率。

下面对算法过程进行描述,首先作如下定义:

$M(j)$:从 S 到 $j(j \in V \setminus S)$ 的路径标记集合;

$pred(j)$:路径 p 中顶点 j 的前趋顶点;

$succ(j)$:顶点 j 的所有后继顶点集合;

$p = (S, \dots, pred(j), j)$:从 S 到 j 的一条路径,即 $p \in P_{Sj}$;

$l_p = (g(p), pred(j), point_p)$,从 S 到 j 的路径 p 的标记;

p_0 :初始条件下的一条虚拟路径;

$point_p$:指向 $M(pred(j))$ 对应的某条路径 $p' = (S, \dots, pred(j))$ 的指针;

$\iota(j)$:与边 $(pred(j), j)$ 对应的多准则矢量;

$g(p)$:与路径 p 对应的多准则矢量;

相应的时间序多准则最短路径算法如图 2 所示。

```

算法 TOMSPA
BEGIN
输入:时间序无圈有向图  $G$ 
输出:从顶点  $S$  至顶点  $T$  之间的 pareto 优化路径
①  $M(1) \leftarrow (\iota(1), \emptyset, \text{NULL})$ 
②  $M(i) \leftarrow l_{p_0} = (0, \emptyset, \text{NULL})$  for  $i = 2, \dots, |V|$ 
③ for  $i = 1, \dots, |V|$ 
④   for all  $j \in succ(i)$ 
⑤     for all  $l_p \in M(i)$ 
⑥       for all  $l_{p'} \in M(j)$ 
⑦         if  $g(l_{p'}) + \iota(j) > g(l_p)$  then
⑧            $M(j) \leftarrow M(j) \setminus \{l_{p'}\}$ 
⑨            $M(j) \leftarrow M(j) \cup \{g(l_{p'}) + \iota(j), i, point_{p'}\}$ 
⑩         else if  $g(l_{p'}) + \iota(j) < g(l_p)$  then
⑪           break
⑫         else
⑬            $M(j) \leftarrow M(j) \cup \{g(l_{p'}) + \iota(j), i, point_{p'}\}$ 
⑭       end for
⑮     end for
⑯   end for
⑰ end for
END

```

图 2 时间序多准则最短路径算法

Fig. 2 Time ordered multicriteria shortest path algorithm

算法结束后,根据顶点 T 的标记值就可以获得从 S 到 T 的所有 pareto 优化路径,相应也就得到计划时间段内的多种优化成像方式,可供操作人员在后续进行交互选择,最终形成成像实施计划。

3 实验结果及讨论

3.1 实验设计

为测试算法的有效性,我们设计了一个观测想定实验,首先在地面陆地范围根据不同经纬度随机选取地面成像需求,在已有遥感卫星中选择 SPOT-5,基于 AGI 公司在 2003 年 6 月发布的全球卫星轨道数据库^[12],使用 STK 进行轨道计算及每个成像需求的访问时间、侧视角度和光照条件预报,对于各成像需求分别赋予不同的气象条件,然后根据卫星特性构建一个时间序无圈有向图 $G=(V,A)$,其由 5 个轨道圈次子图 $G_i=(V_i,A_i) (i=1, \dots, 5)$ 构成。为了便于比较,实验中,在各轨道圈次取相同的成像需求数目构成相应的图 G ,实验方法是在不同的成像需求数目条件下,使用 TOMSPA 算法求取图 G 中的 pareto 优化路径及对应的优化准则矢量。实验环境为:CPU 为 Pentium IV,512MB 内存,Windows 2000 操作系统,程序使用 C++ 编写。

各轨道圈次成像需求即顶点数具体取值分别为 $|V_i|=50, 100, 200, 500 (i=1, \dots, 5)$,即分别构造了顶点规模 $|V|=250, 500, 1000, 2500$ 的四种规模的图,对于 $|V|$ 的每个取值都随机生成 5 组不同的成像需求,算法 CPU 时间取平均值。

3.2 性能分析

针对设计的观测想定实验,应用算法 TOMSPA 获得优化成像路径绘制出图 3 所示性能趋势图,根据不同的顶点取值,分析算法性能如下:

(1)随着 $|V_i|$ 和 $|V|$ 的增加,算法平均 CPU 时间增长较快

由于引入了多准则特性,所以随着 $|V_i|$ 和 $|V|$ 的增加,从 S 到 T 的可能路径数目必将极大增加,对每个中间顶点 j 来说,从 S 到 j 的 pareto 优化路径数,即相应的标记数将会增加,同时,需要更新的 j 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大,导致 CPU 时间的较快增长。

(2)随着 $|V_i|$ 和 $|V|$ 的增加,图 G 中的 pareto 优化路径数目迅速增加

与情形(1)类似,由于非支配路径是可以传播的, $|V_i|$ 和 $|V|$ 增加使得顶点 T 对应的标记数,即 pareto 优化路径数目将急剧增加。

(3)随着 $|V_i|$ 和 $|V|$ 的增加,图 G 中 pareto 优化路径对应的多准则矢量数目只有较小的增长

可以看到, $|V_i|$ 和 $|V|$ 的增加后,与 pareto 优化路径数相比,多准则矢量数只是有较小增长。这主要是由于模型中需要考虑的三个准则的值域范围有限,所以可能出现相同的准则矢量对应多条不同 pareto 优化路径的情况,即多个决策空间中的决策矢量在准则空间中对应了同一个像。

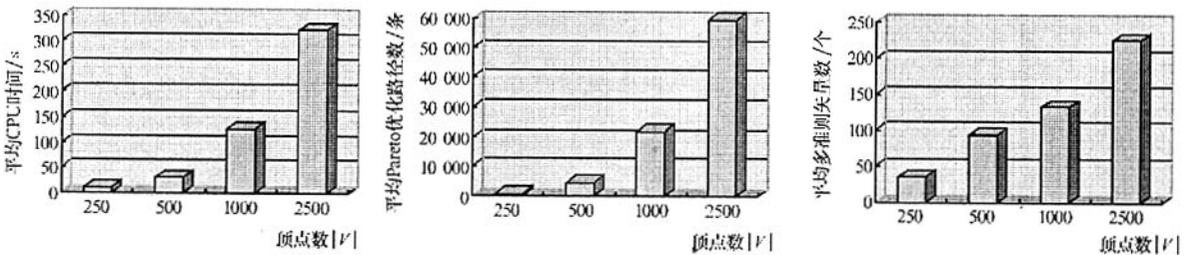


图3 算法性能趋势

Fig.3 Algorithm performance trend

4 结束语

本文针对遥感卫星成像调度提出一种新的成像调度解决方案,建立了对应的时

型,使用成像数量准则、成像效果准则及能量消耗准则作为衡量标准对不同成像路径进行评价,提出时间序多准则最短路径算法获取优化遥感成像路径。通过理论分析和观测想定实验可以看到,由于考虑到多准则特性,可获得多个 pareto 优化路径,对成像数量尽量多、成像质量尽量好、能量消耗尽量低这些有冲突条件做了很好的均衡。由于构建的无圈有向图具有时间序,可以采用时间序顶点选择策略,受支配路径不再传播,能够在较短的时间内求得所有 pareto 优化路径及相应的多准则矢量。因为准则矢量值域范围较小,获得的准则矢量数并不大,有利于融入决策者意图从中得到最后的实施成像路径,大大提高了传统调度方法的效率和调度效果,使卫星资源得到有效发挥。

文中提出的模型及相应算法具有较强的可扩展性,对于不同类型和轨道特性的卫星来说只需根据具体的特性参数构造不同的时间序无圈有向图,采用适当的评价准则即可由时间序多准则最短路径算法求出所有的 pareto 优化路径,最终完成遥感成像优化调度任务。

参考文献:

- [1] Bensaï E, et al. Exact and Approximate Methods for the Daily Management of an Earth Observation Satellite[A]. Proceedings of SpaceOps - 96 [C], Germany, 1996.
- [2] Gabrel V. Improved Linear Programming Bounds via Column Generation for Daily Scheduling of Earth Observation Satellite[R]. Technical Report LIPN99 - 01, 1999.
- [3] 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.
- [4] Verfaillie, et al. Russian Doll Search for Solving Constraint Optimization Problems[A]. In Proceedings of AAAI - 96[C], Portland, Oregon, 1996: 181 - 187.
- [5] Lemaitre M, et al. Selecting and Scheduling Observations of Agile Satellites[J]. Aerospace Sciences and Technology, 2002, 6: 367 - 381.
- [6] Harrison S A, Price M E. Task Scheduling for Satellite Based Imagery[A]. Proceedings of the Eighteenth Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group[C], University of Salford, UK, 1999: 64 - 78.
- [7] Lin W C, et al. Daily Imaging Scheduling of an Earth Observation Satellite[A]. Proceedings of IEEE International Conf. on Systems, Man, and Cybernetics 2003[C], Washington DC, USA, 2003: 1886 - 1891.
- [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: 533 - 542.
- [9] Zitzler E. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications[D]. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 1999.
- [10] Garey M, Johnson D. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness[M]. Sanfransisco, CA: Freeman, 1979.
- [11] Mote J, et al. An Empirical Investigation of the Number of Pareto-optimal Paths Obtained for Bicriteria Shortest-paths Problems[R]. Louisiana State University, 1987.
- [12] Analytical Graphics Inc.[EB]. www.agi.com.

