

文章编号: 1001-2486(2007)06-0121-05

卫星数传调度模型研究*

李云峰, 陈祥国, 武小悦

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 卫星数传调度问题是一个具有多时间窗口、多资源约束的优化问题。针对该问题, 建立了卫星数传需求模型、任务模型和调度模型。在建模过程中, 采用了框架模型形式, 把问题中的主要约束封闭于每个数传任务中, 这在降低调度模型复杂度的同时, 也降低了调度算法设计难度。还提出了调度算法设计思想, 并设计了一基于灵活度的调度算法。仿真表明, 所建立的模型及算法对解决卫星数传调度问题是可行的。

关键词: 卫星; 地面站; 卫星数传调度问题; 模型; 调度算法

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Research on the Model of Satellite Data Transmission Scheduling

LI Yun-feng, CHEN Xiang-guo, WU Xiao-yue

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

Abstract: The problem of satellite data transmission is an optimization problem with multi-time windows and multi-resources constrains. In view of the problem, the paper constructs satellite data transmission request model, task model and scheduling model. In the process of constructing models, the style of frame model is adopted, while all the constrains are put into every data transmission task. This not only reduces the complexity of scheduling model, but also reduces the difficulty of designing scheduling algorithm. In addition, this paper also presents the idea of designing scheduling algorithm, and designs a flexibility based scheduling algorithm. Results from simulation show that the model and algorithm are feasible for solving the satellite data transmission scheduling problem.

Key words: satellite; ground station; satellite data transmission scheduling problem; model; scheduling algorithm

卫星数传是指当卫星经过地面站上空时, 通过星-地链路把星载数据传递到地面站的过程。卫星数传必须满足两个基本条件: 一是卫星天线与同频段的地面站天线“可见”; 二是地面站天线“空闲”。卫星天线与地面站天线只有同频段且“可见”才有可能建立链路, 地面站天线只有“空闲”才有机会接收卫星发送的数据, 这是卫星数传必须满足的两个“硬”约束。卫星数传通常是卫星用户提出数传需求, 由专门的机构负责安排相应地面站天线在相应时间内接收数据。当数传需求较多, 而地面站天线数量又不能完全满足需求时, 就需要对这些数传需求进行调度, 以传递尽可能多的星载数据。这就是卫星数传调度问题, 也就是如何为卫星数传需求分配地面站天线及数传时间以尽可能满足这些需求的问题。在实际应用过程中, 为了研究方便, 通常把一颗卫星的一次数传视为一个数传任务(简称任务)。因此, 卫星数传调度问题就转化为如何执行每一个卫星数传任务的问题。

卫星数传调度问题是一类具有多时间窗口、多资源约束的优化问题。如何建立该问题模型, 建立何种模型是研究该问题首要解决的问题。在 20 世纪 90 年代, 国内外不少学者就展开了该问题或类似问题的研究, 美国 AFIT(Air Force Institute of Technology)的 Gooley^[1]在研究 AFSCN 低、中高轨卫星调度问题时, 建立了 MIP(Mixed Integer Programming)模型。Wolfe^[2]在研究卫星对地观测调度问题时, 建立了 WCP(Window-constrained Packing)模型。Frank 等^[3-4]对此类问题建立了 CBI(Constraint-based Interval Framework)模型。王远振等^[5]在研究多星地面站优化问题时采用了 Petri 网模型。Pemberton 等^[6]把卫星调度问题视为约束满足问题, 建立了 CSP(Constraint Satisfactory Problem)模型。贺仁杰^[7]、方炎申^[8]等分

* 收稿日期: 2007-04-28

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 李云峰(1975—), 男, 博士生。

别在卫星侦察调度、中继星调度方面建立了 CSP 模型。Mittal^[9] 和刘洋^[10] 研究了该类问题的 DCSP (Dynamic Constraint Satisfaction Problem) 模型。

在上述模型中, MIP 模型描述清楚, 可利用运筹学中的方法进行求解, 但不适合规模较大的问题(10 颗以上的卫星), 且不利于设计算法; WCP、CBI 和 Petri 模型描述精细, 但复杂且不易于理解; CSP 和 DCSP 模型具有通用性, 描述清楚, 易于理解, 但卫星数传调度中的某些约束难以直接套用。因此, 本文在分析上述模型的基础上, 充分考虑模型描述和算法设计两个方面的需求, 来建立卫星数传调度模型。

1 卫星数传调度模型

1.1 基本假设

设 n 个地面站集合为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, 其中地面站 g_i 拥有 k_i 架天线 $A^i = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_{k_i}^i\}$, 则所有地面站天线集合为 $A = \{A^1, A^2, \dots, A^n\}$, 其中的每一架天线在某一时刻只能为一颗卫星“服务”。设 m 颗卫星集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, 其中每颗卫星仅有一架数传天线(文后所指卫星天线有时可用卫星代替)。卫星数传只能在卫星天线与地面站天线相互“可见”时进行, 由于卫星沿轨道运行, 只有在某些特定时间段内才能与地面站天线相互“可见”, 这样的时间段定义为可见时间窗口, 简称为可见窗口。设卫星天线-地面站天线可见窗口集合 $TW = \{tw(s_j, a_z^i) \mid s_j \in S, a_z^i \in A^i, A^i \in A\}$, 其中 $tw(s_j, a_z^i)$ 表示地面站 g_i 的天线 a_z^i 与卫星 s_j 在调度周期(所研究的某段时间)内的可见窗口集合, 则 $tw(s_j, a_z^i) = \{[ts_l, te_l] \mid l \geq 0\}$, $[ts_l, te_l]$ 表示 a_z^i 与 s_j 在该调度周期内第 l 个可见窗口, ts_l 表示该可见窗口开始可见时刻, te_l 表示结束可见时刻。

1.2 框架模型

借鉴 C++ 中类设计的形式, 对调度问题中的任务采用一种框架形式进行描述, 称之为框架模型, 其基本形式为 $ID \{RC; TC; OC; BA; \}$, 其中, ID 为任务标识, RC 为物质资源方面的约束, TC 为时间资源方面的约束, OC 为其他方面的约束(若存在), BA 为基本属性。利用框架模型描述任务, 将主要约束封闭于每个任务中, 在降低调度模型建模复杂度的同时, 也降低了调度算法的设计难度。另外, 框架模型描述层次比较清楚, 且便于编程实现。

1.3 卫星数传需求模型

当卫星用户需要某颗卫星的星载数据时, 通常要向有关部门提出数传需求。对于某颗卫星来说, 数传基本需求主要有: (1) 数传所在时间区间, 即数传必须在哪个时间段内进行; (2) 最少数传时间。

只要满足这两项需求, 就认为该卫星实现了此次数传。对于某颗卫星的某次数传需求, 建立其框架模型: $DTQ_i \{s_j \in S; [qts_i, qte_i]; qet_i; p_i; \}$, 其中, DTQ_i 表示第 i 颗卫星数传需求; s_j 表示需要进行数传的卫星, 此为物质资源约束; $[qts_i, qte_i]$ 表示数传所在时间区间, qts_i 为数传最早可以开始时间, qte_i 为最迟必须结束时间; qet_i 表示最少数传时间, 此两项为时间资源约束; p_i 表示数传需求优先级, 表示此次数传的重要程度, 由专门机构设定, 此为基本属性。

1.4 卫星数传任务模型

卫星数传需求是一种概略描述, 为了调度, 需要把每一个数传需求转化为数传任务, 数传任务也用框架模型进行描述: $Task_i \{s_j \in S; \{A^{z*} \mid A^{z*} \subset A^z, A^z \in A\}; TW^* \subset TW; qet_i; p_i; \}$, 其中, $Task_i$ 表示第 i 数传任务的标识, 对应于数传需求 DTQ_i ; A^{z*} 表示数传任务可用的地面站 g_z 中的天线集合, $\{A^{z*} \mid A^{z*} \subset A^z, A^z \in A\}$ 表示所有可用地面站天线集合, $1 \leq z \leq n$; TW^* 表示数传可用的可见窗口集合。

卫星数传需求转化为数传任务主要是确定数传可用地面站天线和可用可见窗口, 该过程分为三步: (1) 根据卫星天线频段确定出同频段地面站天线; (2) 根据数传所在时间区间确定出可用可见窗口; (3) 根据上两步确定出的可用地面站天线和可用可见窗口最终确定数传可用地面站天线和可用可见窗口。

举例说明: 假设某卫星 s_j 的天线频段为 H , 其某个数传需求 DTQ_i 的数传所在时间区间为 $[qts_i,$

qte_i];再假设有3个地面站,每个地面站各有2架天线,天线频段如表1所示。

转化过程为:首先根据卫星天线频段确定出可用地面站天线集合为 $\{a_1^1, a_2^1\}, \{a_1^2\}, \{a_1^3\}$,然后根据 $[qts_i, qte_i]$ 确定出可用可见窗口,如图1所示, $\{1, 2, 4, 5, 11, 13\}$ 为可用可见窗口集合,最后根据初步确定的可用地面站天线和可用可见窗口确定出最终的可用地面站天线和可见窗口为 $\{a_1^1, a_2^1\}, \{a_1^3\}$ 和 $\{1, 2, 4, 5, 11\}$ 。

表1 地面站天线频段

Tab.1 Frequency span of ground station antennas

地面站	天线	频段
\mathcal{E}_1	a_1^1	H
	a_2^1	H
\mathcal{E}_2	a_1^2	H
	a_2^2	F
\mathcal{E}_3	a_1^3	H
	a_2^3	F

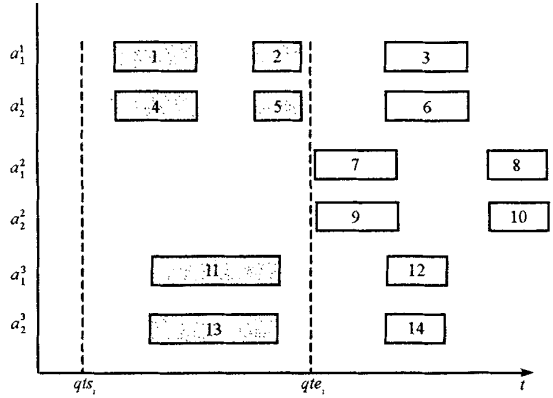


图1 确定某卫星数传需求可用可见窗口示意图

Fig.1 Finding out usable time window for one satellite data transmission request

1.5 卫星数传调度模型

设卫星数传任务集合为 $Task = \{Task_1,$

$Task_2, \dots, Task_r\}$ 。在卫星数传调度过程中,对每一个任务而言,重要的是为其提供了多少数传时间。当无法完全满足数传最少时间时,部分满足数传时间也具有一定价值。在此采用与任务优先级、数传时间相关的指标来衡量调度结果的优劣,定义为加权调度成功率,则卫星数传调度模型为

$$PSSR = \max\left\{\sum_{i=1}^r [C(Task_i) \cdot p_i] / \sum_{i=1}^r p_i\right\}, \quad C(Task_i) = \min\left\{\frac{pet_i}{qet_i}, 1\right\}$$

其中, $PSSR$ 为加权调度成功率; $\sum_{i=1}^r [C(Task_i) \cdot p_i]$ 为任务调度加权和; $\sum_{i=1}^r p_i$ 为任务加权和; $C(Task_i)$ 为 $Task_i$ 数传时间满足程度; pet_i 为 $Task_i$ 的实际数传时间; qet_i 为 $Task_i$ 的最少数传时间。

在实际分配资源及时间过程中,由于采用时间窗口整个分配方法,因此有可能实际数传时间大于数传最少需求时间,此时任务的数传时间满足度取为1。

2 卫星数传调度算法

2.1 算法设计基本思想

(1)根据某种规则确定任务的排序,从前至后依次为每个任务分配资源(地面站天线和可见窗口);

(2)在为每个任务分配资源时,由于每个任务可能有多个可用地面站天线和可用可见窗口,此时可以采用某种策略分配资源,比如“先见先服务”策略,即开始时间最早的可见窗口优先分配给任务,或者“冲突最小”策略,即优先选择冲突小的可见窗口分配给任务;

(3)每当一个可见窗口分配给任务,都要修改排在其后续待分配任务中与该可见窗口相冲突的可用可见窗口。

2.2 基于灵活度的调度算法

根据算法设计基本思想,设计一种基于灵活度的调度算法,利用灵活度来确定任务调度序列。该算法的设计思路为:在整个任务集中,有些任务分配资源的选择余地大,容易调度;有些任务分配资源的选择余地小,若不优先调度,就有可能被其他任务阻塞而不可调度。任务分配资源选择余地的大小用一个称之为灵活度的指标进行衡量,任务的灵活度越高,任务在分配资源时的选择余地越大;反之,选择余地

越小。在任务优先级的基础上,优先调度灵活度小的任务,尽可能使得更多任务得以调度。任务的灵活度用 DF 表示,它包括两个分指标:可用天线灵活度和可用窗口灵活度,分别用 ADF 、 TDF 表示。

$$ADF = \frac{\sum_{z=1}^n |A_z^*|}{\sum_{z=1}^n |A_z|}, \quad TDF = \frac{|TW^*|}{M}$$

$$DF = \alpha \cdot ADF + (1 - \alpha) \cdot TDF, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

其中, $|A_z^*|$ 为地面站 g_z 中任务可用的天线数量; $|A_z|$ 为地面站 g_z 拥有的天线数量; $|TW^*|$ 为任务可用的可见窗口数量; M 为一个较大的正整数,可以取值为拥有可用可见窗口数量最多的任务所拥有的窗口数量。

由上式可知,当一个任务可用地面站天线数量越多, ADF 越大,任务可用天线灵活度越高;可用可见窗口越多, TDF 越大,任务可用窗口灵活度越高。 DF 综合了 ADF 、 TDF 。当一个任务 DF 值越大时,该任务越容易调度;反之,调度越发困难,尤其是调度时机较晚时,成功调度的可能性更小。举例说明,如图 2 所示, $Task_1$ 有 2 个可用地面站天线, 3 个可用窗口, $Task_2$ 仅有 1 个可用地面站天线和 1 个可用窗口,则 $Task_1$ 的灵活度大于 $Task_2$ 的灵活度, $Task_1$ 的资源选择余地大于 $Task_2$ 的资源选择余地。若 $Task_1$ 先调度, $Task_2$ 就有可能被阻塞无法调度,如图 2(a);反之,若 $Task_2$ 优先分配资源, $Task_1$ 还可被调度,如图 2(b)。

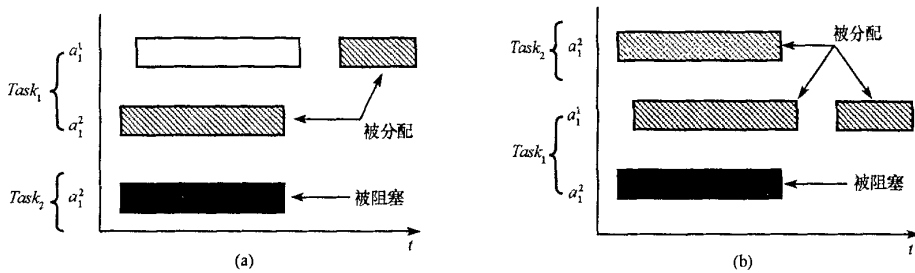


图 2 任务分配资源

Fig. 2 Assigning resources for tasks

基于灵活度的调度算法基本步骤为:

Step 1 计算每个任务的灵活度;

Step 2 按优先级由大到小的顺序对任务排序;

Step 3 对同优先级的任务按灵活度由小到大排序;

Step 4 从前至后依次为每个任务分配资源,在为当前任务分配资源过程中:

Step 4.1 优先选择开始时间早的可见窗口分配给任务,直至满足任务最小数传时间要求或无可见窗口继续分配;

Step 4.2 每分配一个可见窗口,修改排在其后与其冲突的可见窗口,并检查排在其后每个待调度任务可用可见窗口数量,若某任务无可用可见窗口,则删除该任务;

Step 4.3 当一个任务分配资源后,对排在其后的任务重新计算灵活度,重新在优先级排序的基础上按灵活度进行排序,然后继续为待调度任务分配资源。

3 算例

创建一仿真场景,其中有 8 颗卫星, 3 个地面站,每个地面站有 2 架天线,假设所有卫星天线频段、所有地面站天线频段均相同。仿真时间为:2006/7/1 12:00:00 ~ 2006/7/7 12:00:00。生成一组数传任务,其中某些任务见表 2。运行算法、调度结果见表 3。

表 2 数传任务

Tab.2 Data transmission tasks

任务	卫星	可用地面站天线	可用可见窗口	最小数传时间(min)	优先级
:	:	:	:	:	:
Task ₃₄	s ₁	a ₁ ¹	[2006/7/2 03:34:08,2006/7/2 03:47:10]	15	5
		a ₂ ¹	[2006/7/2 03:34:08,2006/7/2 03:47:10]		
		a ₁ ²	[2006/7/2 03:55:19,2006/7/2 04:05:21]		
		a ₂ ²	[2006/7/2 03:55:19,2006/7/2 04:05:21]		
Task ₃₅	s ₂	a ₁ ²	[2006/7/2 03:58:27,2006/7/2 04:09:55]	18	8
		a ₂ ²	[2006/7/2 03:58:27,2006/7/2 04:09:55]		
		a ₁ ³	[2006/7/2 03:44:33,2006/7/2 03:52:18]		
		a ₂ ³	[2006/7/2 03:44:33,2006/7/2 03:52:18]		
Task ₃₆	s ₃	a ₁ ³	[2006/7/2 03:39:21,2006/7/2 03:48:27]	15	4
		a ₂ ³	[2006/7/2 03:39:21,2006/7/2 03:48:27]		
:	:	:	:	:	:

表 3 调度结果

Tab.3 Scheduling results

任务数量	任务加权和	任务调度加权	加权调度成功率
289	1475	1420.8	96.3%

4 结束语

卫星数传调度问题是一个复杂的组合优化问题,具有多约束、高冲突的特点。在建立该问题模型过程中,如何处理约束是关系到建立的模型是否合理、设计的算法是否简便的关键问题。本文通过把所有约束置于每个任务中,在降低调度模型复杂度的同时,也降低了调度算法的设计难度,并提出了算法设计思想。最后通过实例仿真,验证了本文中所建立的卫星数传调度模型和调度算法是可行的。

参考文献:

[1] Gooley T D. Automating the Satellite Range Scheduling Process[D].Ohio: Air Force Institute of Technology, 1993.

[2] Wolfe W J, Sorensen S E. Three Scheduling Algorithms Applied to the Earth Observing Systems Domain[J]. Management Science, 2000,46(1): 148 - 168.

[3] Frank J, Jonsson A, Morris R, et al. Planning and Scheduling for Fleets of Earth Observing Satellites[C]//International Symposium on Artificial Intelligence Robotics, Automation and Space, 2001.

[4] Smith D, Frank J, Jonsson A. Bridging the Gap Between Planning and Scheduling[J]. Knowledge Engineering Review, 2000,15(1).

[5] 王远振,赵坚,聂成. 多星地面站设备优化调度方法研究[J]. 计算机仿真, 2003,20(7):17 - 19.

[6] Pemberton J C, Galiber F, III. A Constraint-based Approach to Satellite Scheduling[J]. DIMACC Workshop on Discrete Optimization, September 1998.

[7] 贺仁杰. 成像侦察卫星调度问题研究[D].长沙:国防科技大学, 2004.

[8] 方炎申,陈英武,顾中舜. 中继卫星调度问题的 CSP 模型[J]. 国防科技大学学报, 2005,27(2):6 - 10.

[9] Mittal S, Falkenhiner B. Dynamic Constraint Satisfaction Problems[C]//Proceeding of the 8th AAI, 1990:25 - 32.

[10] 刘洋. 成像侦察卫星动态重调度模型、算法及应用研究[D].长沙:国防科技大学,2004.

