基于多星联合侦察的卫星数传调度问题模型

李云峰 武小悦

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于多星联合侦察的卫星数传调度问题是研究如何为卫星数传任务中每个单数传任务分配地面资源及数传时间的问题,对该问题的模型进行了研究. 首先建立了单数传任务模型及卫星数传任务模型;然后在此基础上建立了问题的约束满足优化模型,重点分析了问题的目标函数及主要约束条件;为了解决该问题,最后提出了一个基于双综合优先度的启发式调度算法,并通过实例验证了算法的有效性. 研究成果实现了问题的形式化描述,并给出了一种有效的问题求解算法.

关 键 词: 卫星; 地面站; 数传; 调度

中图分类号: TP 18

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)08-0948-04

Model of satellite data transmission scheduling problem based on multi-satellite combined reconnaissance

Li Yunfeng Wu Xiaoyue

(School of Information and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Satellite data transmission scheduling problem based on multi-satellite combined reconnaissance is such a problem that studies how to assign ground resources and data transmitting time for every single data transmission task belonged to satellite data transmission task. A study of the problem's model was made. To this problem, the models of single data transmission task and satellite data transmission task were constructed firstly. Based on these models, the model of this problem was constructed, and the object function and main constraints were analyzed especially. For solving the problem, a heuristic scheduling algorithm named double complex priority algorithm (DCPA) was presented and validated by an example lastly. The studying results realize formalizing description of the problem, and give a valid solving algorithm for it

Key words: satellite; ground station; data transmission; scheduling

多星联合侦察是指利用多颗(两颗或两颗以上)卫星对某个或某些地面目标实施的侦察,是为获取某个地面目标的立体化、多层次化信息或某些地面目标的综合信息而采取的一种侦察方式. 相对于单星侦察,多星联合侦察能够满足人们对地面目标信息需求的更高要求.

卫星侦察的目的是为人们提供所需的地面目标信息,因此当卫星对目标侦察后,下一步的任务就是及时、有效地将所侦察信息下传至地面,该过程被称为卫星-地面站数据传输,简称卫星数传. 实现卫星数传必须满足两个基本条件:一是卫星与地面站"可见";二是卫星的数传天线与"可见"地面站中的某天线同频段.

在卫星实施数传的整个过程中,首先是用户提出数传任务,然后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. 当数传任务较多,地面站天线数量有限时,就需要对这些数传任务进行调度,以生成合理的调度方案,尽可能实现调度目标. 这就是卫星数传调度问题.

根据用户对目标信息的需求及相应的卫星侦察方式,卫星数传调度问题可以分为两类:基于单星侦察的卫星数传调度问题和基于多星联合侦察

收稿日期: 2007-07-11

作者简介: 李云峰(1975-),男,山东金乡人,博士生, lyfwsc@sina.com.

的卫星数传调度问题. 在基于单星侦察的卫星数传调度问题中,用户分别为每颗卫星提出数传任务,任务之间相互独立,每个任务调度成功与否,均不对其他任务产生影响;而在基于多星联合侦察的卫星数传调度问题中,用户针对信息需求,可能同时对多颗卫星提出多个数传任务,这多个任务之间具有相关性,每个任务调度成功与否均对用户需求造成一定的影响,因此在调度时需要考虑任务间的相关性. 由于任务之间具有了相关性,使得基于单星侦察的卫星数传调度问题中所建立的任务模型、问题模型以及所设计的调度算法已无法适用,必须重新对问题进行研究,建立新的任务模型、问题模型,设计新的调度算法. 目前还未见到有关基于多星联合侦察的卫星数传调度问题的研究,对基于单星侦察的卫星数传调度问题,可参见文献[1 - 2]. 另外,有关卫星其他调度问题的研究,国外的可参见文献[3 - 8],国内的可参见文献[9 - 13]. 这些文献在问题描述、模型建立和算法设计方面均对本文所研究的问题具有一定的借鉴意义.

本文将对基于多星联合侦察的卫星数传调度问题模型进行研究,首先建立单数传任务及卫星数传任务模型,然后建立问题模型. 为了解决该问题,借鉴基于单星侦察的卫星数传调度算法,提出一种基于双综合优先度的调度算法.

1　卫星数传任务模型

1.1　基本假设

假设卫星集合 $S=\{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$,每颗卫星仅拥有一个数传天线;地面站集合 $G=\{g_1, g_2, \cdots, g_m\}$,其中 g_v 的数传天线集合 $A_v=\{a_v^1, a_v^2, \cdots, a_v^{z_v}\}$; s_u 与 g_v 在调度周期内的可见时间窗口集合 $W_{uv}=\{w_{uv}^l \mid 0\leq l\leq l_{uv}\}$.

1.2　单数传任务模型

在建立多星联合侦察下的卫星数传任务模型之前,首先建立每颗卫星的单数传任务模型. 在单个数传任务中,用户通常提出以下要求:一是指定数传所位于的时间区间,称之为数传时间区间,卫星侦察的信息数据只有在该时间区间内下传至地面站,才具有价值;二是最少数传时间,只有为任务分配不少于该时间的数传时间,才能满足要求;三是指定接收数传数据的地面站. 由此,建立单数传任务模型为

$$j=\{s, T_q, t_q, G_q, A_q, W_q\} \tag{1}$$

其中, j表示卫星 s的某单数传任务; T_q 表示数传时间区间; t_q 表示最少数传时间; G_q 表示用户指定的接收 s下传数据的地面站集合, $G_q\subseteq G$; A_q 表示可用地面站天线集合; W_q 表示可用时间窗口集合. 模型中的可用地面站天线和可用时间窗口是根据卫星数传基本条件及用户要求进行确定的. 卫星在可用时间窗口内可以直接向对应的可用地面站天线下传数据.

1.3　卫星数传任务模型

多星联合侦察下的卫星数传任务由多个单数传任务组成,其模型为

$$J=\{R_q, P_q, p_q\} \tag{2}$$

其中, J表示卫星数传任务; R_q 表示组成 J的单数传任务集合, $R_q=\{J^i \mid 1\leq i\leq b\}$, J^i 为某卫星的某单数传任务; P_q 表示单数传任务集对应的相对优先级集合, $P_q=\{p^i \mid 1\leq i\leq b\}$, p^i 为 J^i 的相对优先级,表示相对于 R_q 中其他单数传任务, J^i 对 J的重要程度; p_q 表示 J的优先级.

2　卫星数传调度问题模型

2.1　问题基本假设和约束

假设卫星已对目标实施侦察,只要在 T_q 内提供不小于 t_q 的数传时间,就表示卫星将信息数据完整的下传至地面,若提供的数传时间小于 t_q,则表示卫星下传部分数据,部分数据仍具有一定价值;同一颗卫星的两个单数传任务的 T_q 不重叠;一个单数传任务只能属于一个卫星数传任务;一颗卫星同一时刻只能向一个地面站天线下传数据;一个地面站天线同一时刻只能为一颗卫星提供数传服务;地面站天线在接收某卫星下传数据过程中不可被抢占;地面站天线存在切换时间,该时间假设为常数;不考虑卫星、地面站故障.

2.2　问题模型

在建立问题模型之前,定义

$$x_{uvi}^c(t)=\begin{cases}1 & \text{时刻 } t, a_v^i \text{ 为 } s_u \text{ 进行数传切换}\\ 0 & \text{否则}\end{cases} \tag{3}$$

$$x_{uvi}^d(t)=\begin{cases}1 & \text{时刻 } t, s_u \text{ 向 } a_v^i \text{ 下传数据}\\ 0 & \text{否则}\end{cases} \tag{4}$$

T^C 为地面站天线切换时间

设用户共提交 N 个卫星数传任务,其集合定义为 $J^{\text{set}}=\{J_k \mid 1\leq k\leq N\}$,其中卫星 s_u 的单数传任务集合定义为 $j_u^{\text{set}}=\{j_{ur} \mid 1\leq r\leq r_u\}$. 在卫星数传调度过程中,对每一个卫星数传任务而言,重点考虑的其所含单数传任务执行情况,即为每个单数传任务提供数传时间的多少. 对于单数传任务,当

地面站天线提供的服务时间无法完全满足最少数传时间要求时,部分满足数传时间也具有一定价值.考虑卫星数传任务优先级、单数传任务相对优先级,在此以最大化加权卫星数传时间满足度为调度目标,建立卫星数传调度问题模型为

$$\max O = \left(\sum_{i=1}^{N} p_i \cdot D_1(J_i) \right) \Big/ \sum_{i=1}^{N} p_i \quad (5)$$

$$D_1(J_i) = \left(\sum_{h=1}^{b_i} p_i^h \cdot D_2(J_i^h) \right) \Big/ \sum_{h=1}^{b_i} p_i^h \quad (6)$$

$$D_2(J_i^h = j_{ur}) = \min\{ t_{ur} / t_q^{ur}, 1 \} \quad (7)$$

$$t_{ur} = \sum_{a_v^z \in A_q^{ur}} \int_{t \in T_q^{ur}} x_{uvz}^d(t)\, \mathrm{d}t \quad (8)$$

C_1:若 $x_{uvz}^d(t) \le 1$,则 $t \in w_{uv}^*, w_{uv}^* \in W_q^{ur}$;

C_2: $\sum_{v=1}^{m} \sum_{z=1}^{z_v} x_{uvz}^c(t) \le 1,\ \sum_{u=1}^{n} x_{uvz}^c(t) \le 1$;

C_3: $\sum_{v=1}^{m} \sum_{z=1}^{z_v} x_{uvz}^d(t) \le 1,\ \sum_{u=1}^{m} x_{uvz}^d(t) \le 1$;

C_4:若 $x_{uvz}^d(t_1) = 1,\ x_{uvz}^d(t_2) = 1$,且 $t_1 \in T_q^{ur}$, $t_2 \in T_q^{u'r'}$, $T_q^{ur} \ne T_q^{u'r'}$, $t_2 > t_1$,则 $t_2 - t_1 \ge T^C$;

C_5:当 $r \ne r'$时, $T_q^{ur} \cap T_q^{ur'} = \varnothing$

其中,O为目标函数;$D_1(J_i)$为计算卫星数传任务 J_i 加权数传时间满足度的函数;p_i 为 J_i 的优先级;$D_2(J_i^h)$为计算 J_i 中单数传任务 J_i^h 数传时间满足度的函数;p_i^h 为 J_i^h 的相对优先级,此时假设 $J_i^h = j_{ur}$;t_{ur}为提供给 j_{ur} 的数传时间;t_q^{ur} 为 j_{ur} 的最少数传时间;A_q^{ur}, T_q^{ur} 分别为 j_{ur} 的可用地面站天线集合和可用时间窗口集合. C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 表示问题中主要的约束,具体表示为:C_1 表示数传时间必须位于可见时间窗口内,并且该可见时间窗口属于单数传任务对应的可用时间窗口集合;C_2, C_3 表示同一时刻,一颗卫星只能向一个地面站天线下传数据,且一个地面站天线只能为一颗卫星提供数传服务;C_4 表示当一个地面站天线分配给两个数传任务时,从一个数传任务结束数传至另一任务开始数传之间的时间间隔不小于切换时间;C_5 表示同一颗卫星的两个单数传任务的数传时间区间互不重叠.

3 卫星数传调度算法

在调度过程中,将采用一启发式调度算法,称之为基于双综合优先度的卫星数传调度算法 DCPA (Double Complex Priority Algorithm). 所谓双综合优先度,其一是单数传任务自身的综合优先度,其二是由单数传任务组成的卫星数传任务的综合优先度. 所谓综合优先度,指的是综合考虑了多种因素后能够合理表达优先级的一种综合指标. 单数传任务综合优先度是在综合考虑可用地面资源、可用时间窗口、任务间冲突等因素的基础上,结合任务相对优先级,为每个单数传任务在分配地面资源及数传时间时设定的一个综合优先级数值. 具体计算方法可参见文献[2]. 对于卫星数传任务综合优先度,由其所含单数传任务的综合优先度决定.

3.1 卫星数传任务综合优先度

卫星数传任务综合优先度由组成其单数传任务的综合优先度综合而成,对于卫星数传任务 J_i,其综合优先度定义为

$$C_i = (P_H - p_i + 1) \cdot \left(\sum_{h=1}^{b_h} c_i^h \Big/ b_h \right) \quad (9)$$

其中,c_i^h 为 J_i 中单数传任务 J_i^h 的综合优先度;b_h 为 J_i 所含单数传任务的数量;p_i 为 J_i 的优先级,假设 p_i 数值越大,J_i 优先级越高;P_H 为卫星数传任务优先级的上限值,假设卫星数传任务优先级数值范围为 1～10,则 $P_H = 10$.

3.2 卫星数传调度算法

DCPA 的步骤为:

1) 计算每个单数传任务综合优先度以及每个卫星数传任务综合优先度;

2) 按照综合优先度不减的顺序对卫星数传任务排序,综合优先度相同的再按所含单数传任务数量不减的顺序排序;

3) 对于每个卫星数传任务,对其所含的单数传任务按综合优先度不减的顺序排序,综合优先度相同的再按数传所在时间区间上限不减的顺序排序;

4) 从前至后依次为每个单数传任务分配地面资源及数传时间,分配过程如下:

①若为所有单数传任务已分配地面资源及数传时间,则结束;否则,转向②.

②为当前单个数传任务分配地面资源及数传时间:若不存在可用时间窗口,转向①;否则,优先选择对其他任务影响小可用时间窗口,直至满足最少数传时间要求或无可用时间窗口可分配;每成功分配一可用时间窗口,都要修改其他任务中与该时间窗口对应同一地面站天线并与之存在重叠的时间窗口以及同一任务中与之重叠的其他可用时间窗口;然后转向①.

4 应用实例

4.1 场景设定

在所设定的场景中,包括 30 颗卫星 4 个地面

站,每个地面站拥有 2个天线.所有卫星、地面站天线频段均相同,即每个地面站天线均可接收来自每颗卫星的数传数据.调度周期设为 2004-07-01T 12: 00: 00至 2004-07-07T 12: 00: 00.

4.2 卫星数传任务生成规则

首先为每颗卫星随机生成一组单数传任务,生成规则:①每颗卫星每 4 h产生一单数传任务,这就确定了数传所在时间区间;②随机为单数传任务产生最少数传时间,选择时间范围为 10～20 min;③每个单数传任务均指定所有地面站;④若某单数传任务不存在可用地面站天线或可用时间窗口,则舍弃该任务.

其次是生成卫星数传任务,生成规则:①从 2～5中(包括 2和 5)随机生成一整数随机数 b,表示该卫星数传任务　　单数传任务数量;②从所有单数传任务中随机选择 b个单数传任务,并为其中每单个数传任务随机产生一相对优先级,范围为 1～10;③随机为该卫星数传任务产生一优先级,范围为 1～10;④一个单数传任务只能属于一个卫星数传任务.

4.3 调度结果

为了验证 DCPA性能,可与一些传统算法相比较,主要有:先到先服务算法 FCFS(First Come First Service),该算法中,对于每一地面站天线,优先为先看到的卫星服务; STK/Scheduler的 MPA(Multi Pass Algorithm)算法.在调度过程,将整个调度周期平均划分为 6个时段,分别对每个时段中的卫星数传任务进行调度.各时段及整个调度周期的调度结果见表 1.

表 1 调度结果

时　段	DCPA	FCFS	MPA
1	0.975 1	0.960 9	0.961 0
2	0.996 5	0.977 7	0.982 5
3	0.982 5	0.979 2	0.977 0
4	1.000	0.988 8	0.984 8
5	0.947 4	0.925 2	0.933 3
6	0.954 8	0.908 6	0.935 2
整个周期	0.976 1	0.956 7	0.962 3

从表 1中可以看出,本文所提出的 DCPA算法优于另外两种算法.分析其中原因,主要有两点:一是由于 DCPA对任务优先级、调度资源等因素进行了综合考虑,使得卫星数传任务和单数传任务调度时机具有一定的合理性;二是在为每个任务分配资源时,考虑了每个时间窗口对其他任务的影响,提高了其他任务能够被成功调度的概率.

5 结束语

多星联合侦察已成为卫星侦察的主要方式,随之而来的是如何将多星侦察信息下传至地面的问题.多星联合侦察下的卫星数传调度不同于单星侦察下的卫星数传调度,必须要考虑单数传任务之间的相关性,只有这样才能满足用户对信息的需求.针对多星联合侦察下的卫星数传调度问题,首先建立了多星联合侦察下的单数传任务模型及卫星数传任务模型;然后建立了多星联合侦察下的卫星数传调度问题模型,在问题模型中,充分考虑了用户的需求及问题约束,使模型的目标函数符合用户要求;在解决问题的过程中,借鉴已有的成果,提出了基于双综合优先度的调度算法;最后通过一实例对问题的模型及算法进行了验证.

参考文献 (References)

[1] 李云峰,武小悦.基于试探性的卫星数传任务调度算法研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(5):764 - 767
Li Yunfeng, Wu Xiaoyue. The study of tentative-based satellite data transmission tasks scheduling algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 764 - 767(in Chinese)

[2] 李云峰,武小悦.侦察卫星实拍实传的综合优先度调度算法[J].飞行器测控学报,2008,27(1):39 - 44
Li Yunfeng, Wu Xiaoyue. Complex priority scheduling algorithm of reconnaissance satellite real-time data transmission[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(1): 39 - 44(in Chinese)

[3] Gooley T D. Automating the satellite range scheduling process[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 1993

[4] Gooley T D, Borsi J J, Moore J T. Automating air force satellite control network(AFSCN) scheduling[J]. Mathl Comput Modelling, 1996, 24(2): 91 - 101

[5] Burrowbridge S E. Optimal allocation of satellite network resources[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999

[6] Frank J, Jonsson A, Morris R, et al. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites[C]// Proceedings of the Sixth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation and Space. Montreal, Canada: Robotics Institute Publications, 2001

[7] Parish S A. A genetic algorithm approach to automating satellite range scheduling [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 1994

[8] Soma P, Venkateswalu S, Santhalakshmi S, et al. Multi-satellite scheduling using genetic algorithms [C]// SpaceOps 2004. Montreal, Canada: Canadian Space Agency, 2004

(下转第 960页)

4 结 论

本文从3个不同的角度对圆锥运动下产生的等效陀螺漂移公式进行了研究,得到以下结论:①G-R法与Bortz法是等价的,但G-R法的推导较为简单;②Dieter法的推导过程简单明了,但由于欧拉角旋转轴的非正交性,没有严格遵守圆锥运动的定义,因此只在小角度圆锥运动时,与Bortz法、G-R法等价;③鉴于Bortz法和G-R法的严格性及适用性,研究人员可利用它们指导圆锥补偿算法的设计;④3轴转台的运动特性与Dieter法对应,可用Dieter法指导圆锥运动的转台实验以检验Bortz法和G-R法推导得出的圆锥补偿算法的补偿效果.

参考文献 (References)

[1] Bortz J E. A new mathematical formulation for strapdown inertial navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, AES-7(1): 61 - 66

[2] Joos D K. Real time gyro error compensation in strapdown systems[C]//Sorg H. Symposium Gyro Technology Conference Proceedings. Stuttgart, Germany: Universität Stuttgart, 1983: 18.1 - 18.22

[3] Mckern R, Musoff H. Strapdown attitude algorithms from a geometric viewpoint[R]. AIAA81-4311, 1981

[4] 王养柱,崔中兴. 捷联惯导系统圆锥补偿算法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(3): 264 - 267
Wang Yangzhu, Cui Zhongxi. Research on coning compensation algorithms for SINS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(3): 264 - 267 (in Chinese)

[5] 刘危,解旭辉,李圣怡. 捷联惯导系统的圆锥误差补偿算法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(3): 348 - 352
Liu Wei, Xie Xuhui, Li Shengyi. Coning algorithm for strapdown inertial navigation system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautic, 2004, 36(3): 348 - 352 (in Chinese)

[6] Blankinship K. A new kinematic theorem for rotation motion[J]. IEEE, 2004: 285 - 295

[7] 刘道静,李立新,纪志农,等. 李萨如图在捷联惯导系统圆锥误差估计中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(3): 61 - 63
Liu Daojing, Li Lixin, Ji Zhinong, et al. Application of lissajous figures in SINS's coning error estimation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(3): 61 - 63 (in Chinese)

[8] 魏晓虹,张春熹,朱奎宝. 一种高精度角速率圆锥补偿算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(12): 1312 - 1316
Wei Xiaohong, Zhang Chunxi, Zhu Kuibao. High accuracy coning compensate algorithm by angular velocity[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(12): 1312 - 1316 (in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)

(上接第951页)

[9] 贺仁杰. 成像侦察卫星调度问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学信息系统与管理学院, 2004
He Renjie. Research on imaging reconnaissance satellite scheduling problem[D]. Changsha: School of Information and Management, National University of Defense Technology, 2004 (in Chinese)

[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:国防科技大学信息系统与管理学院, 2004
Li Yang. Research on dynamic rescheduling model, algorithm and its applications of imaging reconnaissance satellite scheduling problem[D]. Changsha: School of Information and Management, National University of Defense Technology, 2004 (in Chinese)

[11] 王远振,赵坚,聂成. 多卫星-地面站系统的Petri网模型研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 7 - 11
Wang Yuanzhen, Zhao Jian, Nie Cheng. Study on petri net model for multi-satellites-ground stations system[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(2): 7 - 11 (in Chinese)

[12] 金光,武小悦,高卫斌. 卫星地面站资源调度优化模型及启发式算法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(12): 1839 - 1841 (in Chinese)
Jin Guang, Wu Xiaoyue, Gao Weibin. Ground station resource schedul ing optimization model and its heuristic algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(12): 1839 - 1841 (in Chinese)

[13] 阎志伟,牛轶峰,李汉铃. 基于并行禁忌遗传算法(PTGA)的预警卫星传感器调度研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(6): 598 - 603
Yan Zhiwei, Niu Yifeng, Li Hanling. Study of sensor scheduling for early warning satellite based on parallel tabu genetic algorithm (PTGA)[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(6): 598 - 603 (in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)