

# 导航卫星上行注入任务调度模型及启发式算法\*

龙运军, 陈英武, 邢立宁, 张忠山

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**合理安排导航卫星与地面上注站星地链路构建与导航电文上注,对保证星上导航电文的准确性和精确性有着重要意义。对卫星导航系统上行注入过程进行了分析,构建了上行注入任务调度问题的多目标混合整数规划模型,设计了基于规则的启发式求解算法。基于北斗二代和美国的GPS卫星导航系统构建仿真场景,仿真结果验证了模型和算法的正确性、可行性;通过分析仿真结果,得到影响卫星导航系统上行注入任务完成的关键因素。

**关键词:**卫星导航系统;上行注入;星地链路;调度模型;启发式算法

**中图分类号:** O212.6    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-2486(2013)02-0034-06

## Uplink task scheduling model and two-phase heuristic algorithm of navigation satellites

LONG Yunjun, CHEN Yingwu, XING Lining, ZHANG Zhongshan

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

**Abstract:** Scheduling the contact between the navigation satellites and ground unlink stations and navigation data uplink process is of important significance to keep the accuracy of the navigation data on board. After analyzing the navigation data uplink process of the satellite navigation system, a multi-objective mix-integer model was devised, considering the technological constraints in uplink process. Because of the complexity of the model, a two-phase heuristic algorithm based on rules is devised. A set of test scenarios were devised consulting the COMPASS of China, the GPS Satellite Navigation Systems. The mathematical model and algorithm proved effectively for the uplink task schedule process. Several factors that influence the completion of the uplink tasks were obtained by analyzing the computational results.

**Key words:** satellite navigation system; uplink process; contact; scheduling model; heuristic algorithm

导航卫星通过不断地向地面广播导航电文来向用户提供定位、测速和授时等服务<sup>[1]</sup>。星上导航电文及时更新维持导航电文的准确性和精确性,是保证卫星导航系统的服务精度的必要途径<sup>[2-3]</sup>。在非自主导航模式下,星上导航电文的更新主要通过导航卫星和地面上注站建立星地链路来实现。卫星导航系统是一个多星、多站、多任务的复杂系统,合理安排导航卫星与地面注入站建立链接,对保障卫星导航系统导航电文的及时更新有着重要的意义。

卫星导航系统上行注入调度主要解决哪个地面站在什么时间段内与哪颗导航卫星建立链接并进行导航电文注入的问题,该问题本质上是一类SRSP(Satellite Range Schedule Problem)问题。美国的Barbulescu<sup>[4-6]</sup>等人针对AFSCN(Air Force Satellite Control Network)调度问题进行了总结,分析了不同算法的性能。陈峰<sup>[7]</sup>构建了卫星测控

调度问题的混合整数规划模型和问题求解的遗传算法。康宁<sup>[8]</sup>构建了卫星测控调度问题的0-1整数规划模型,设计了拉格朗日松弛算法。Marinelli<sup>[9]</sup>构建SRSP问题的强时间指标的整数规划模型,设计了基于拉格朗日松弛的启发算法。针对卫星导航系统的SRSP问题的研究相对较少,Toribio<sup>[10]</sup>提出了卫星导航系统任务调度的概念,提出了长中短期相结合的规划思想。Hall和Franco<sup>[11]</sup>设计了伽利略卫星导航系统的测控调度系统,提出一种基于规则的调度算法。鲁志勇<sup>[12]</sup>等人针对卫星导航系统上注调度问题的约束特点,设计了一种多地面站协同选星策略。

目前SRSP问题的研究主要考虑时间窗约束、状态和资源约束等通常的约束条件,针对卫星导航系统中任务的周期性约束、任务关联性约束等考虑得很少。本文将对卫星导航系统上行注入问题进行深入分析,建立卫星导航系统上行注入

\* 收稿日期:2012-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071156,70971131)

作者简介:龙运军(1982—),男,湖南邵阳人,博士研究生,E-mail:longmail24@163.com;

陈英武(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ywchen@nudt.edu.cn

调度问题的多目标混合整数规划模型,设计模型的启发式求解算法,并对影响上行注入任务完成的关键因素进行分析。

### 1 卫星导航系统上行注入过程

如图 1 所示,一次完整的导航电文上行注入过程主要分成三个阶段:观测数据采集、导航电文生成和导航电文上注。

第一阶段:观测数据采集阶段。卫星导航系统的观测数据采集主要有两种途径:(1)监测站每秒钟采集一次导航信号监测结果反馈给主控站;(2)地面注入站星地时间同步测量。导航卫星与地面注入站建立持续的星地链路(如至少 20min),才能够满足主控站生成新的导航电文对观测数据采集的要求。为给主控站提供更准确、更精确的观测值,星地时间同步测量过程越长越好、越靠近主控站生成导航电文的时刻越好。

第二阶段:导航电文生成。主控站根据监测站、注入站的观测数据在每个周期的固定时刻(如每个小时的第 35 分钟)生成一次新的导航电文。

第三阶段:导航电文上注。为了降低导航卫星广播的导航电文的数据龄期,上行注入站通过与导航卫星建立星地链路,尽快地将主控站生成的导航电文上注给相应的导航卫星。为了确保导航电文的上注成功,注入站必须与导航卫星建立一段持续(如 5min)的星地链接。

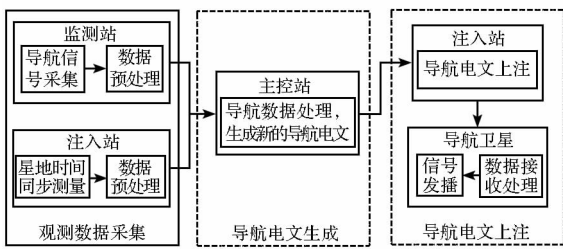


图 1 卫星导航系统上行注入过程  
Fig. 1 Flow chart of the algorithm

## 2 上行注入任务调度问题与模型

### 2.1 上行注入任务调度问题

地面主控站生成导航电文周期称为卫星导航系统上行注入的任务周期。每个任务周期内,每颗卫星要求在主控站生成导航电文的时刻前有一段进行数据采集的星地链路,在其后有一段进行导航电文上注的星地链路,两次链接越靠近导航电文生成时刻越好。

考虑到主控站生成新的导航电文的时间比较

短,本文对问题进行简化:每颗卫星完成一个任务周期内的导航电文上行注入任务,要求该卫星与地面注入站建立持续的星地链接,该链接必须覆盖观测数据采集和导航电文上注的最短时长,如图 2 所示。主控站在每个任务周期的  $t_2$  时刻生成导航电文,在此之前需要至少保持  $\Delta t_1$  时长的星地链接进行观测数据采集,之后需要保持  $\Delta t_2$  时长的星地链接将生成的导航电文上注给卫星。每颗卫星要完成一个任务周期内的上行注入任务必须在  $[t_2 - \Delta t_1, t_2 + \Delta t_2]$  时段内保持与某一固定地面站持续链接。在此基础上,每次星地链接时间越长,则导航电文更新的效果越好。数据采集段的链接时间越长,则能够更长地进行星地时间同步测量,获取更加准确的钟差、轨道等测量数据;上注段链接时长越长,则能够让上注任务有更大的冗余性,上注失败时能够有重注的机会。

导航卫星上行注入调度就是在考虑上注任务要求、星地链接构建约束基础上,为每颗导航卫星在每个上注任务周期内安排地面注入站与其建立持续的星地链接,最大限度地满足上行注入任务的需求。

### 2.2 上行注入任务调度模型

(1) 符号说明

$S = (1, 2, \dots, s)$  表示导航卫星集合;

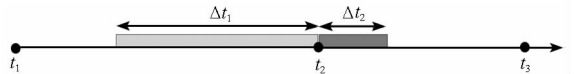


图 2 单颗卫星上行注入过程最短星地链接时长示意

Fig. 2 Uplink task minimum duration requirement of each satellite

$M = (1, 2, \dots, m)$  表示地面站设备集合,分为两类天线:转台天线和数字多波束天线;

$V(s, m) = \bigcup_{h=1,2,\dots,H_{sm}} [t_{sm}^{start(h)}, t_{sm}^{end(h)}]$ , 卫星  $s$  对地面站设备  $m$  的可见时间窗口集合,其中  $H_{sm}$  为卫星  $s$  对地面站设备  $m$  的可见时间窗口数,  $t_{sm}^{start(h)}$  和  $t_{sm}^{end(h)}$  表示对应窗口的开始和结束时间;

$C = (C_1, \dots, C_m)$ : 地站设备能够最多链接卫星的数量,转台天线为 1,数字多波束天线为 6;

$ST = (ST_1, \dots, ST_m)$ : 地面站设备链接不同卫星时的转换时间,转台天线为 15min,数字多波束天线为 5min;

$J = \{1, 2, \dots, j\}$ : 上行注入任务集合;

$s(j) \in S$ : 上行注入任务对应的卫星;

$R(j) \in T$ : 上行注入任务最早可以开始时间,设定为每个任务周期的开始时刻;

$r(j) \in T$ : 最晚必须开始时间,  $r(j) = t_2 - \Delta t_1$ ;

$D(j) \in T$ :上行注入任务最晚必须结束时间, 设定为每个任务周期的结束时刻;

$d(j) \in T$ :最早可以结束时间, 如果任务在此之前结束则表示任务未完成,  $r(j) = t_2 - \Delta t_1$ ;

$w(j) \in Z_+$ :上行注入任务的权重;

(2) 决策变量

$x_{jm} \in (0, 1)$ :表示将上行注入任务  $j$  安排给了地面站设备  $m$ ;

$b_{jm} \in [R_j, r_j]$ :表示任务  $j$  在地面站设备  $m$  的开始时间;

$e_{jm} \in [D_j, d_j]$ :表示任务  $j$  在地面站设备  $m$  的结束时间;

(3) 优化目标

上行注入调度问题的优化目标主要考虑: (A) 完成上注任务的权重和最大; (B) 每颗卫星与地面站链接时间越长越好; (C) 每颗卫星与地面站链接时间尽可能均衡。即相应公式表示为

$$(A) \max \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M w(j) x_{jm}$$

$$(B) \max \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M x_{jm} (e_{jm} - b_{jm})$$

$$(C) \min \sqrt{\sum_{s=1}^S \left( \sum_{j \in J(s)} \sum_{m=1}^M x_{jm} (e_{jm} - b_{jm}) \right)^2}$$

(4) 主要约束

唯一性约束: 任何一个上行注入任务最多只能被执行一次。

$$\sum_{m=1}^M x_{jm} \leq 1, j \in J \quad (1)$$

设备链接能力约束: 在任何时候每个设备所连接的卫星数量不能超过其最大能力。

$$\sum_{j=1}^J x_{jm} \leq C_m, m \in M \quad (2)$$

时间窗口约束: 当一个上注任务被安排时, 其链接时段必须在卫星与地面站设备的一个连续可见弧段内。

$$\bigcup_{h=1,2,\dots,H_{sm}} (b_{jm} \in [t_{sm}^{start(h)}, t_{sm}^{end(h)}] \wedge e_{jm} \in [t_{sm}^{start(h)}, t_{sm}^{end(h)}]) \neq \emptyset, \text{if } x_{jm} = 1 \quad (3)$$

转换时间约束: 当地面站设备链接不同卫星时, 必须满足转换时间约束。

$$\min(e_{jm}, e_{hm}) + ST_m \leq \max(b_{jm}, b_{hm})$$

$$\forall m \in M, j \in J, h \in J, \text{while } x_{jm} = 1, x_{hm} = 1 \quad (4)$$

### 3 基于规则的启发式求解算法

本文设计了一种基于规则的启发式算法, 该算法主要分为两个阶段。第一阶段, 仅考虑任务最短持续时间要求, 确定每个上注任务是否执行,

由哪个地面站设备执行。第二阶段, 任务开始和结束时间扩展。对第一阶段已安排的上注任务的开始和结束时间进行扩展, 使每颗卫星尽可能长的与地面建立星地链接, 如图 3 所示。

#### 3.1 基于最短任务时长的上注任务调度

第一阶段只考虑上注任务最短持续时间长度时, 每颗卫星在同一任务周期内的上注任务开始和结束时间都是相同的。任意相邻两个任务之间的时间间隙足以满足各类地面站设备的转换时间要求。因此, 该阶段不需要考虑地面站设备的转换时间约束。基于最短任务时长的上注任务调度过程的基本流程如图 4 所示。

上注任务(卫星)的选择排序和对可用地面站设备选用顺序是影响上注任务安排的关键。分别针对上述两个过程设定一系列规则。

(1) 上注任务排序规则

规则 1: 任务优先级排序规则。任务优先级表示上行注入任务的重要程度, 将重要的上行注入任务优先安排。

规则 2: 出入境卫星优先安排规则。如果某颗卫星连续超过一个小时与所有地面注入站设备没有时间窗口, 则将这段连续不可见时间的开始时刻称为该卫星的出境时刻, 连续不可见时间的结束时刻为入境时刻。当卫星的入境时刻位于当前任务周期内或前一任务周期内, 或出境时刻位于当前或下一任务周期内, 则当前规划周期内该卫星的上行注入任务优先安排。

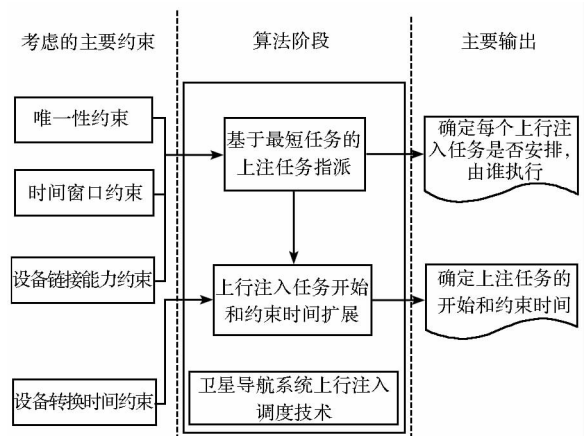


图 3 基于规则的两阶段求解算法框架

Fig. 3 Basic flow chart of the two-phase algorithm

规则 3: 上一任务周期内未安排任务的卫星优先安排。

(2) 地面站设备使用排序规则

规则 4: 空闲能力大的资源优先使用规则。

当上注任务的可用设备中包含多个设备时,

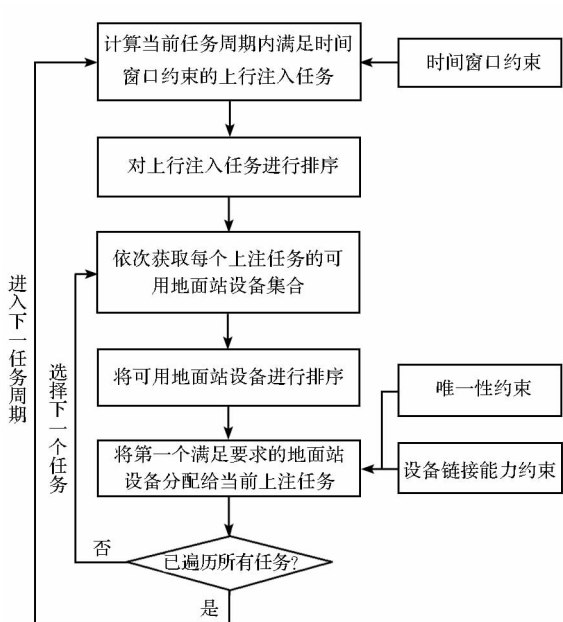


图4 基于最短任务时长的上注任务调度基本流程

Fig. 4 Flow chart of uplink task schedule based on minimum task duration

则优先使用资源空闲能力大的资源,以给后续上行注入任务更多的选择机会。

**规则5:**可见弧段质量高的地面站设备优先使用规则。上注任务对应的卫星与地面站设备可见时间窗口成为可见弧段,在俯仰角范围边缘的可见弧段相对于俯仰角范围中心的可见弧段质量要低。当上行注入任务的可用设备中包含多个设备时,则优先使用可见弧段质量高的地面站设备。

上注任务排序规则的优先顺序为1、2、3,地面站设备使用排序规则的优先顺序为4、5。

### 3.2 上行注入任务开始和结束时间扩展

第一阶段的调度只考虑最短链接时长要求,调度方案中卫星和地面站设备之间仍有大量空余可见时间窗口未被利用。第二阶段的调度就是将剩余的可见窗口分配各个卫星,以满足优化目标(B)和优化目标(C)。

**Step1:**计算第一阶段方案中每颗卫星在规划周期内的所安排的星地连接时间长度。按照链接时间长短,从短到长进行排序。

**Step2:**依次对当前任务周期内的上注任务的开始和结束时间进行扩展。

**Step2.1:**按照排序从序列中选择一颗当前任务周期内上注任务已经安排的卫星 $s$ 。

**Step2.2:**该卫星在当前周期内与其建立星地链接的地面站设备为 $m$ 。根据整个规划周期内的时间窗口 $V(s, m)$ ,计算得到当前任务周期内卫星 $s$ 和地面站设备 $m$ 在当前任务周期内的可见时

间窗口 $v(s, m)$ ,  $t_{sm}$ 和 $e_{sm}$ 为其开始和结束时间。

**Step2.3:**将卫星 $s$ 当前任务周期内的上注任务 $j$ 的结束时间扩展到 $e_{sm}$ 。

**Step2.4:**如果该卫星当前任务周期内的上注任务 $j$ 与前一周期内的上注任务 $j'$ 所安排的地面站设备相同均为 $m$ ,则将当前阶段的上注任务 $j$ 的开始时间扩展为该上注任务的释放时间 $R(j)$ ,这时 $R(j)$ 等于 $t_{sm}$ 。

**Step2.5:**如果不相同,则需要根据判断在设备 $m$ 上一阶段所安排的星地连接是否已经达到其最大能力。如果没有达到其最大能力,则将上注任务 $j$ 的开始时间扩展为 $t_{sm}$ ;否则,上注任务 $j$ 的开始时间扩展为 $e'_{sm} + ST_m$ ,  $e'_{sm}$ 为设备 $m$ 在上一阶段所安排的上注任务的最晚结束时间,  $ST_m$ 为设备 $m$ 链接不同卫星时的转换时间。

**Step3:**进入下一任务周期进行Step1,直到规划周期结束。

## 4 计算分析

计算分析的目的主要有两个:(1)评估模型和算法对于求解原问题的有效性;(2)分析各项参数的改变对上注任务完成的影响。对于第一个目的,主要通过约束检查检验调度方案是否满足各项约束。对于第二个目的,通过不断改变上注任务的最短持续时间及地面站设备的能力、地理位置、俯仰角等参数,分析各个工作参数对上注任务完成的影响。

### 4.1 场景设置

参照我国的北斗和美国的GPS卫星导航系统,本文设定了7个不同的计算场景。所有场景的规划周期都为2012年4月20日00:00:00到2012年4月28日00:00:00(共8天)。上行注入的任务周期为1h。地面主控站在每个任务周期的第35分钟产生上注导航电文。所有场景中,空间段导航星座的构型参数完全相同,由24颗完全相同的卫星构成walker星座,星座构型为24/3/2,轨道倾角 $55^\circ$ ,高度21528km。

地面站基本参数和上注任务最短时长等在各个场景中有所不同。

#### 场景1:

(1)上注任务最短持续时长为25min,从每个小时的第15分钟到第40分钟。

(2)地面站基本参数如表1所示。

#### 场景2:

(1)上注任务最短持续时长为45min,从每个小时的第0分钟到第45分钟。

(2)地面站基本参数不变,如表 1 所示。

场景 3:

(1)上注任务最短持续时长为 45min,从每个小时的第 15 分钟到第 60 分钟。

(2)地面站基本参数不变,如表 1 所示。

场景 4:

(1)上注任务最短持续时长跟场景 1 完全相同。

(2)地面站设备的最大链接能力如表 2 所示,其余参数如表 1 所示。

场景 5:

(1)上注任务最短持续时长跟场景 1 完全相同。

(2)地面站设备的地理位置如表 2 所示,其余参数如表 1 所示。

场景 6:

(1)上注任务最短持续时长跟场景 1 完全相同。

(2)地面站设备的地理位置和最大链接能力如表 2 所示,其余参数如表 1 所示。

场景 7:

(1)上注任务最短持续时长跟场景 1 完全相同。

(2)地面站设备的工作仰角范围限制如表 2 所示,其余参数如表 1 所示。

4.2 计算结果

根据调度模型设定的优化目标,从规划周期内平均任务完成率、没有时间窗口引起的任务失败率、资源冲突引起的任务失败率、平均单星链接率、单星连续未链接最大时长等方面对规划结果进行总结,如表 3 所示。

表 1 地面站基本参数配置

Tab. 1 Basic parameters of the ground facilities

地面站名称	地面站类型	最大链接能力	准备时间/min	地理位置/(°)	俯仰角/(°)
设备 1	转台天线	1	10	(19.7,110.3)	(5,85)
设备 2	转台天线	1	10	(38.9,115.6)	(5,85)
设备 3	转台天线	1	10	(38.0,77.8)	(5,85)
设备 4	数字多波束天线	6	5	(19.7,110.3)	(15,90)
设备 5	数字多波束天线	6	5	(38.9,115.6)	(15,90)
设备 6	数字多波束天线	6	5	(38.0,77.8)	(15,90)
设备 7	转台天线	1	10	(38.9,115.6)	(5,85)

表 2 调整后的各地面站参数

Tab. 2 Changed parameters of the ground facilities

地面站名称	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4	设备 5	设备 6	设备 7
最大链接能力	2	2	2	6	6	6	2
地理位置/(°)	(0,159.9)	(0,29.9)	(0,100.5)	(0,134.9)	(0,1.9)	(0,120.4)	(0,137.4)
俯仰角范围/(°)	(5,90)	(5,90)	(5,90)	(5,90)	(5,90)	(5,90)	(5,90)

表 3 计算结果

Tab. 3 Computational results

场景	规划周期内平均任务完成率/(%)	由于没有时间窗口引起的任务失败率/(%)	由于资源冲突引起的任务失败率/(%)	平均每星链接率/(%)	单星连续未链接时间最大时长/s
场景 1	40.34	58.05	1.61	37	66406
场景 2	38.5	6033	1.17	36.17	67199
场景 3	38.61	60	1.39	37.16	66959
场景 4	39.91	60	0.01	39.56	64638
场景 5	87.91	8.72	3.36	85.43	7435
场景 6	91.13	8.72	0.15	87.56	2437
场景 7	41.90	58.05	0	38.62	65806

4.3 结果分析

各个场景计算得到的调度方案均能够满足卫

星导航系统的各类约束,这表明我们得到的调度结果虽然不是最优解,但都是符合各种约束的满

意解。

通过对实验结果进行分析总结,得到以下结论:

(1)地面站设备布局不合理是导致上行注入任务未能完成的主要原因。

(2)延长上注任务的最短持续时间要求,对上注任务完成的影响非常小,表明本文对问题的简化是合理的。

(3)冲突主要出现在注入站的低仰角可见范围内。这是由于 $5^{\circ}$ 到 $15^{\circ}$ 的低仰角范围内只有转台天线能够工作,而转台天线每次只能够链接一颗卫星。

## 5 总结

卫星导航系统上行注入调度是其运行管理过程中的一个重要技术环节。由于卫星和地面站数量较多、地面站工作约束复杂等原因,得到有效的上行注入调度方案是一个复杂的过程。本文着手解决这一复杂的调度问题,主要贡献体现在三个方面:调度模型、求解策略和应用分析。在模型方面,本文构建了上注调度问题的多目标混合整数规划模型;在求解算法方面,本文构建了一种基于规则的两阶段求解策略算法;在应用分析方面,本文构建了多个仿真场景对提出的模型和算法进行验证,同时分析了影响上注调度结果的几个主要因素。本文提出的方法对解决我国的北斗卫星导航系统的上注调度问题能够提供技术支持。

## 参考文献 (References)

[1] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. second edition, Norwood MA 02062: ARTECH HOUSE, 2006.

- [2] Misra P, Enge P. Global positioning system, signals, measurements, and performance [M] second edition. Norwood Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [3] 谭述森. 导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- TAN Shusen. Navigation and positioning engineering [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [4] Barbulescu L, Howe A E, Watson J P. Satellite range scheduling: a comparison of genetic, heuristic and local search [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSNVII), Granada Spain: Springer Verlag, 2002: 611-620.
- [5] Barbulescu L, Watson J P, Whitley D, et al. Scheduling space-ground communications for the air force satellite control network[J]. Journal of Scheduling, 2004, 1(7): 7-34.
- [6] Barbulescu L, Howe A E, Whitley D. AFSCN scheduling: How the problem and solution have evolved[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 43(9): 1023-1037.
- [7] 陈峰. 多星测控调度问题的遗传算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- CHEN Feng. Research on genetic algorithm for multi-satellite TT&C scheduling problem [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 康宁. 航天测控优化调度模型及拉格朗日松弛算法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- KANG Ning. Optimal scheduling models of space TT&C system and lagrangean relaxation algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [9] Marinelli F, Nocella S, Rossi F, et al. A lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraints [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38: 1572-1583.
- [10] Toribio S, Merri M, Birtwhistle A. Galileo: mission planning [C]//Proceedings of SpaceOps 2004, Montreal, Canada: AIAA, 2004.
- [11] Hall S, Moreira F, Franco T. Operations planning for the Galileo constellation [C]. SpaceOps 2008, Heidelberg, Germany: AIAA, 2008.
- [12] 鲁志勇, 马立君. 导航卫星上行注入策略研究[C]. CSNC 2011, 上海: 2011.
- LU Zhiyong, MA Lijun. Research on uploading strategy of navigation satellites [C]. CSNC2011, Shanghai: 2011.