

文章编号: 1007-4619(2007)01-0109-06

# 资源卫星(可见光)遥感数据获取 任务调度优化算法研究

徐雪仁<sup>1,2</sup>, 官 鹏<sup>1,3</sup>, 黄学智<sup>2</sup>, 金 勇<sup>2</sup>

(1. 南京大学 城市与资源学系, 江苏 南京 210093; 2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100011;  
3. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 从资源卫星(可见光)遥感数据获取任务调度的影响因子分析入手,在研究国外相关遥感任务调度算法的基础上,提出了基于目标的卫星遥感任务调度算法规则,并依据该规则研究建立了算法实现流程,以解决用户需求和星地资源使用约束之间的冲突,从而有效地满足用户对遥感数据的需求。

**关键词:** 卫星遥感; 任务调度; 算法规则

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## Study on Optimization Algorithms for Remote Sensing Data Collection Planning of Satellite

XU Xue-ren<sup>1,2</sup>, GONG Peng<sup>1,3</sup>, HUANG Xue-zhi<sup>2</sup>, JIN Yong<sup>2</sup>

(1. The Department of Urban and Resources Sciences of Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093, China;  
2. Beijing Remote Sensing Information Institute Beijing 100011, China;  
3. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China)

**Abstract** Remote Sensing data collection planning of satellite is made according to customer's request satellite instruments and ground station available. The variety requests of customer's and the instrument constrains of satellite lead to an optimization problem, that is the utility of the satellite resources and ground station resources. This paper analyses the factors affecting satellite mission planning, then presents algorithm's rules for remote sensing data collection planning. According to these algorithm's rules, we established the executive flow for optimization algorithms which can solve the conflicts between customer's requests and utility constrains of satellite and ground station. The customer's requests could be satisfied more effectively.

**Key words** satellite remote sensing; mission planning; algorithm's rules

## 1 引 言

资源卫星遥感数据获取任务的调度是依据用户需求 and 星地资源状况来进行的,由于用户需求的多样性和星地资源的使用约束,使得任务调度面临星地资源的优化分配问题,问题的复杂度随着卫星遥感资源

的增长而增加。从 20 世纪 80 年代中期开始,有关卫星遥感任务自动化、智能化管理技术研究受到了重视<sup>[1,2]</sup>。其中最具有代表性的就是由美国军方于 1986 年提出的基于资源分配自动化的智能卫星技术 IntelliSTAR (Intelligent Satellite Technology Automated Resource)<sup>[3]</sup>,该技术覆盖整个卫星任务管理过程,包括计划编制、任务调度、执行和分析。到了 20 世纪 90

收稿日期: 2005-09-15; 修订日期: 2005-11-21

**作者简介:** 徐雪仁(1965—),男,高级工程师,南京大学地图学与遥感专业毕业,现为该校地图学与地理信息系统专业在职博士生。主要从事 GIS、遥感应用和遥感卫星任务计划管理研究。已发表论文 10 余篇,合著专著一部。

年代,卫星遥感技术进一步发展,卫星遥感任务呈现多样化发展趋势,针对不同卫星遥感任务的管理,美国 NASA 的 JPL 实验室专门研究开发了通用的计划与调度环境 ASPEN (A Scheduling and Planning Environment)。它是一个标准组件系统<sup>[4]</sup>,是一个基于人工智能技术的可以重构应用系统的开发工具。它支持多样化的计划和调度应用。

1999年 10月 14日,中国成功发射了第一颗长寿命、传输型遥感卫星——“中巴资源一号”。随着中国航天科技事业的快速发展,将会有越来越多的长寿命、传输型遥感卫星发射升空。针对太空中越来越多的遥感卫星资源和不断增长的卫星遥感数据需求,如何充分利用这些遥感卫星资源,满足用户多样化的遥感数据需求,是中国卫星遥感任务调度技术要解决的问题。

## 2 卫星遥感任务调度影响因子分析

影响卫星遥感任务调度的因子主要包括,用户对遥感数据的需求因子、卫星有效载荷资源的可获得性因子和地面数据跟踪接收资源的可用性因子。卫星遥感任务调度就是根据卫星的轨道预报情况、目标数据位置、目标区域天气情况(可见光成像考虑因子)、传感器使用模式和限制、星上数据记录设备容量限制、地面数据接收资源的可用性等来制定卫星遥感数据获取计划,使该计划满足资源优化使用和无冲突的要求。

### 2.1 用户需求因子

用户需求因子包括对地观测模式需求、所需图像谱段需求、时间要求、目标位置需求等。对于一个卫星遥感数据获取任务调度系统来说,其最终目标是在用户规定的时间要求内,获取满足用户需要的遥感数据,但是,并不是每一个用户的需求都是机会均等安排的,就像商业或服务领域设立的 VIP 用户一样,用户需求同样也可区分为重要用户需求和一般用户需求,在进行卫星遥感任务调度时,当星地资源使用发生冲突时,可以据此作出资源分配的决策,优先满足重要用户需求。

### 2.2 卫星有效载荷资源的可获得性因子

卫星有效载荷资源的可获得性主要是指传感器工作的可分配时间段、传感器工作模式资源和星上存储设备的容量资源等。对于固定的地面目标区域

来说,卫星有效载荷资源访问该目标的时间是一定的,而受传感器工作模式的限制,同一时间只能观测某一特定的区域,当卫星飞临目标区域时,它所可观测的范围可能很大,但是,由于受成像幅宽的限制,只能选取某个目标区域成像。如“中巴资源一号”卫星飞行高度为 778 km,相机视场为  $8.32^\circ$ ,最大侧视角为  $\pm 32^\circ$ ,可以用图 1 表示在  $t_1$  时刻至  $t_2$  时刻的时间段内,该卫星可观测地面目标区域(图中花纹区域)和侧视角为  $10^\circ$  情况下的实际成像区域(图中阴影区域)。从图中可以看到,目标区域 A 和目标区域 B 在该时间段内都是可观测到的,但是,由于受实际成像幅宽的限制,不可能在该时间段内同时获取 A、B 两个区域的数据。

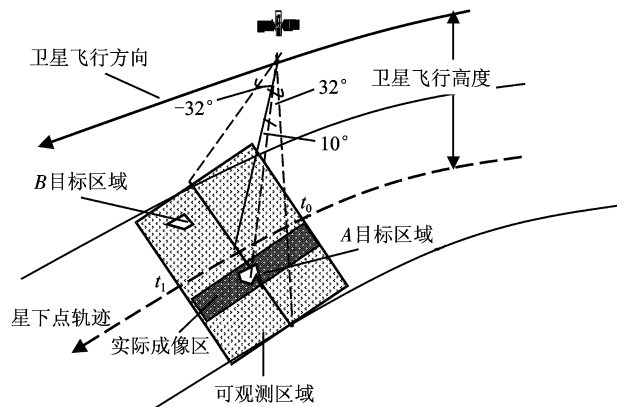


图 1 中巴资源一号卫星地面可观测区域和实际成像区域示意图

Fig 1 Sketch map of real imaging area and observational area of CBERS-1

对于雷达卫星来说,其工作模式更为复杂,不同的工作模式下获取的数据地面分辨率和成像幅宽有很大的差异,卫星有效载荷不同的工作模式也是制定卫星遥感数据获取计划时需要考虑的一种资源。

当卫星在地面跟踪接收站范围以外工作时,通常将卫星所采集的数据存储在星上数据记录设备上,在卫星经过可接收地面站时进行数据回放,由于星上数据记录设备的容量是有限的,因此,当制定需要使用数据记录设备的遥感数据获取计划时,需要获取可利用的数据记录资源信息。图 2 表示中巴资源一号卫星数据记录资源在  $T_0$  和  $T_1$  时刻的状态。

### 2.3 地面数据跟踪接收资源的可用性因子

地面数据跟踪接收资源是指负责跟踪接收卫星遥感数据的地面设施,这些设施在地理空间上是分布式的,各设施的功能也各不相同,有的只能接收某

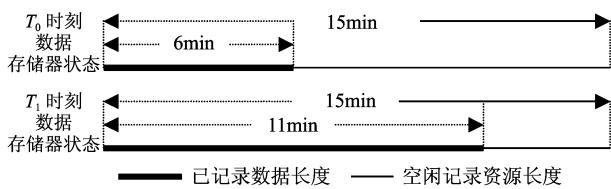


图 2 中巴资源一号卫星数据记录设备在  $T_0$  和  $T_1$  时刻的状态

Fig 2 Data recorder states of CBERS-1 at the time of  $T_0$  and  $T_1$

一种卫星的数据,有的可兼容接收多种卫星数据。在制定卫星遥感数据获取计划时,需要掌握各地面数据接收资源的空间分布位置和接收能力的相关信息,同时还需要统一协调接收任务的分配,在同一时间段内,一套数据接收设备只能接收一颗卫星的遥感数据。图 3 表示两地面站在 6:00 至 22:00 的设备资源使用情况。

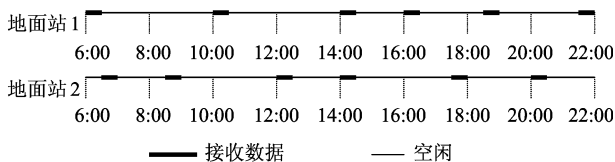


图 3 地面数据跟踪接收资源使用示意图

Fig 3 Sketch map of occupied resource for receiving data

### 3 国外相关算法研究及应用

在卫星遥感任务调度技术中,涉及的是卫星遥感数据获取任务的优化调度问题,由于该问题涉及的因子较多,而优化的目标也不是单一的,因此,实际上该技术要解决的是约束优化和多目标优化问题,也就是在一堆可能的选择中搜索对于某些目标来说是最优解的问题。相关的任务调度优化算法主要包括贪婪算法(Greedy Algorithm)和遗传算法(Genetic Algorithm)。

#### 3.1 贪婪算法

贪婪算法是解决遥感卫星任务管理的一种近似方法,它实际上是一种局部搜索算法,又称贪婪启发式算法。它采用分阶段逐步构造最优解的方法,在每个阶段,都作出一个在一定标准下看上去最优的决策,决策一旦作出就不可更改,这意味着选择的是某个局部的最优,当算法终止时,局部最优就是全局最优<sup>[5]</sup>。Muraoka H.等在 ASTER 的任务管理中就

是采用了这种算法<sup>[6]</sup>,该算法适合于携带单台传感器的单个卫星的任务计划调度问题。在 SPOT 5 卫星遥感任务调度管理<sup>[7]</sup>和 Landsat 7 的卫星任务遥感调度管理<sup>[8]</sup>中都采用了该算法。下面以 SPOT 5 卫星遥感任务调度管理为例来描述该算法的应用:

- 首先对需要观测的目标按照重要性从高到低进行排序,在这一阶段,遥感任务调度决策的标准就是需要观测目标的重要性,重要性高的目标优先安排观测。

- 当观测目标重要性相同时,单视成像模式需求优先于立体成像模式需求。该标准的设定是基于立体成像所需要的资源是单视成像的两倍。

- 低数据速率观测需求具有较高的优先级,这是因为较低的数据速率占用较少的内存。

- 具有较少冲突观测数量的观测优先安排。

- 采用依次排列的方式安排观测。

从上述算法应用描述来看,构造一个依次排列的卫星观测计划需要分 4 个阶段,每个阶段的决策标准不同。第一阶段的标准就是观测目标的重要性,重要性高就优先安排;第二阶段的标准就是成像模式需求,单视成像模式需求优先安排;第三阶段的标准就是观测目标数据传输速率需求,低速需求优先安排;第四阶段的标准就是观测冲突数量,低冲突数量观测优先安排。

#### 3.2 遗传算法

遗传算法是 20 世纪 70 年代早期 Holland 首次提出的,它的基本特点是多方向和全局搜索,80 年代开始受到不同领域研究人员的重视。遗传算法是一种强有力的、应用范围十分广泛的随机搜索优化技术,可用来解决工业工程中传统方法难以解决的问题<sup>[9]</sup>。特别是工业领域中的计划(Planning)和调度(Scheduling)问题,由于其具有需求互相矛盾、约束相关和高度的计算复杂性,因此很难用传统优化方法处理。20 世纪 90 年代初,美国空军技术研究所开始对遗传算法在卫星任务计划和调度中的应用进行研究<sup>[10]</sup>,到了 90 年代末和 21 世纪初,遗传算法在实际的卫星任务调度中的应用研究更加广泛,特别是在解决多星、多任务调度应用中,遗传算法更具有优势<sup>[11]</sup>。

### 4 基于遥感目标的任务优化调度算法规则

#### 4.1 用户需求目标选择规则

卫星遥感数据获取计划的制定,首先要针对用

用户需求目标来进行不同卫星的目标访问计算,从而得到用户需求目标的访问列表,该列表包括了目标的访问时间、载荷控制参数等。但是,由于卫星有效载荷控制在时间上或控制参数上的约束,会出现如果选择访问了目标 A 就不能再选择访问目标 B 的情况;或者出现要同时选取访问目标 A 和目标 B,需要调整目标 A、B 的访问时间和载荷控制参数。因此需要依据一定的选择规则,在目标访问计算结果中选取优先访问的目标。该规则可分为单目标优选规则和多目标优选规则。

#### 4.1.1 单目标优选规则

对于单个目标来说,其优选规则相对简单,涉及目标优先等级、载荷控制参数、目标访问时间等。通过简单的判别规则就可优选要访问的目标。在实现算法上通常采用贪婪算法<sup>[3]</sup>,具体规则如下:

(1)以目标等级为优先考虑,目标等级高,则优先安排照像;

(2)目标等级相同时,传感器控制参数小,则优先安排照像;

(3)当目标等级相同、传感器参数一致时,则访问时间靠前的目标优先安排照像。

目标的优先等级是根据用户的重要程度,所需目标数据的紧急程度,在作为用户需求输入系统时由人工确定的。

#### 4.1.2 多目标优选规则

对于一次载荷控制可以访问多个目标的情况,其目标优选规则比较复杂,由于所访问的目标数量、载荷控制参数、载荷连续工作时间长度等都不相同,因此,需要有一个综合量化指标来作为多目标优选

的依据。本文采用多目标访问因子加权算法的结果来作为选择依据。多目标访问因子加权算法就是把目标访问各种因子加权考虑,对所考虑的因子根据其重要程度赋予一定的权值,同时把所考虑的因子根据一定的规则划分为几个状态,然后进行加权计算,比较其最终值。

计算公式如下:

$$A = \sum \alpha_i X_i$$

式中, A 为最终值,  $\alpha_i$  为考虑因素的权值,  $X_i$  为考虑因素的状态值。

对于具有相机侧摆能力的资源卫星来说,多目标访问优选因子主要包括目标等级、目标的数量和访问目标的侧摆角大小。如果从单因子分析,等级高的目标优先安排;一次开关机访问目标数量多的优先安排;访问目标侧摆角小的优先安排。当一次开关机可访问多个目标时,将目标等级和数量综合成一个目标重要性因子进行计算。并作为绝对优先因子考虑。同等条件下再考虑侧摆角因子。可以假设不同等级的目标重要性权值,一级目标为 1,二级目标为 0.5,三级目标为 0.2。根据一次开关机访问目标数量来综合计算目标重要性参数,如在同一条轨道上,相同的开关机时间里,不同侧摆角所访问的目标数量不同。表 1 为本文研究中模拟的中巴资源一号卫星在 2004 年 6 月 7 日访问不同等级用户需求目标的情况。

从表 1 中可以看到,不同的侧视角可访问不同等级和不同数量的目标,这就存在到底采用哪一个相机控制参数问题,用加权算法可得到一个明确的结果,该结果可辅助计算机系统作出优先选择。

表 1 多目标访问重要性参数计算表

Table 1 Table for counting the weightiness parameters of multi-target observation

访问时间	侧摆角	访问目标等级	数量	目标权值	重要性参数	参数终值
2004年 6月 17日 10: 05: 05- 10: 14: 00	3°	一级	1	1	1	1.9
		二级	1	0.5	0.5	
		三级	2	0.2	0.4	
	5°	一级	1	1	1	2.2
		二级	2	0.5	1	
		三级	1	0.2	0.2	
	7°	一级	0	1	0	1.6
		二级	2	0.5	1	
		三级	3	0.2	0.6	

### 4.2 多星访问同一目标选择规则

有些用户的目标数据需求仅仅指出了目标区域位置需求,而对传感器类型没有提出特别要求,当多星可以访问同一目标时,就存在卫星选择问题。由于不同卫星传感器具有不同的成像特性,对于没有指明卫星传感器数据要求的用户目标,主要依据被访问目标的特性、成像环境条件和图像质量等因子来制定相关的选择规则。主要包括传感器适应性规则和图像质量优先规则。

#### 4.2.1 传感器适应性规则

该规则主要依据被访问目标的特性、成像环境条件并结合长期的卫星数据获取计划经验,通过人工判别方式来实现。主要考虑光学成像的受限因子和雷达成像的全天候及一定的穿透能力因子,如计划目标区域天气情况,对于常年阴雨天气的区域目标,可采用雷达卫星成像,对于晴好天气目标区域使用光学卫星成像可获取更清晰的图像。在程序设计中可以采用人机交互工具进行卫星选择;也可根据区域历史气象数据自动获取选择结果。

#### 4.2.2 图像质量优先规则

目标成像的分辨率因子是图像质量优先规则要考虑的重要因子,它直接关系到所获取的图像质量。当不同卫星分辨率有差异时,同等适用条件下,采用分辨率较高的卫星来拍摄目标图像。当传感器分辨率相同时,由于采用不同的侧视角所获取的卫星图像分辨率不同,因此,在选择时尽可能选用侧视角小的卫星拍摄目标图像。

### 4.3 目标访问参数优化规则

在目标访问计算结果中,经常会出现相邻目标访问问题,由于目标访问计算是根据单个目标位置和卫星轨道预报数据计算得到的,因此所得到的目标访问时间和访问参数是针对单个目标。实际上,如果根据卫星传感器的控制约束,通过一定的规则来优化目标访问参数,可以使一次载荷控制动作获取更多的目标数据。

#### 4.3.1 参数优化条件

遥感数据获取计划参数优化的条件包括两个:一是目标访问侧视角相同或在一个传感器视场范围内;二是相邻目标的访问时间在有效载荷一次开机时间约束长度内。当相邻目标访问参数符合上述条件时,可以对该参数进行优化。

为 T,其中包括有效载荷开机预置时间  $t_0$ ,有效载荷关机后置时间  $t_n$ 。访问目标 A 的参数为时间  $t_1$ ,侧视角为  $\sigma_1$ ;访问目标 B 的参数为时间  $t_2$ ,侧视角为  $\sigma_2$ 。

优化条件:(1)  $|\sigma_1 - \sigma_2| \leq \theta$  (2)  $|t_1 - t_2| \leq T - t_0 - t_n$

#### 4.3.2 目标访问参数优化规则

访问参数优化包括得到优化后的目标访问开机时间和侧视角。对于上例中目标 A 和目标 B 的优化规则如下:

(1)访问时间参数优化规则

设时间  $t_1$  早于时间  $t_2$ ,有效载荷开机预置时间  $t_0$ ,有效载荷关机后置时间  $t_n$ ,则对于目标 A 和目标 B 观测计划优化后时间参数为:

$$\text{开机时间 } T_1 = t_1 - t_0 \quad \text{关机时间 } T_2 = t_2 + t_n$$

(2)访问侧视角参数优化规则

为使优化后目标访问侧视角居中,取其平均值作为优化后目标访问侧视角参数。即对于上例中目标 A 和目标 B 优化后目标访问侧视角参数  $\sigma$  的优化计算方法为:

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

## 5 任务调度优化算法实现流程

在实验研究中,以中巴资源一号遥感卫星为例,该卫星遥感数据获取计划优化算法的实现流程包括:目标访问参数计算、数据跟踪接收站预报参数计算和计划优化参数计算三个主要流程。

### 5.1 目标访问参数计算流程

将用户对目标数据的需求存储在目标数据库中,通过 Oracle 访问目标数据库服务器获取目标的经度、纬度、权值等信息,通过计算获取目标的访问参数,包括访问时间、侧摆角等,并把访问参数储存在目标访问参数表中。具体计算流程如图 4 所示。

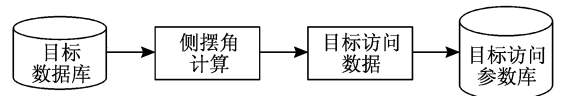


图 4 目标访问参数计算流程

Fig 4 The flow for counting the observational parameter of target

### 5.2 数据跟踪接收站预报参数计算

通过计算地面跟踪接收站的进出站时间,并把

卫星的预报参数储存到卫星数据接收站预报参数表中。具体计算流程如图 5 所示。

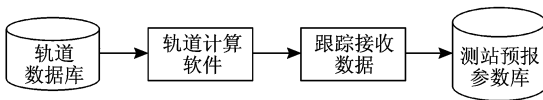


图 5 数据跟踪接收站预报参数计算流程

Fig 5 The flow for counting receiving parameter of ground station

### 5.3 计划优化参数的计算

通过识别卫星的编号和计划安排的时间段及卫星相机的侧摆角范围,在数据库选出相应的目标访问数据和接收站数据,这些数据信息就是计划优化算法的初始输入信息。同时以界面输入的方式来调整卫星的磁带容量、最短开机时间、相机视场及载荷的其他约束等。当所有的输入条件确定以后,就可以按已经确定的优化规则进行优化计算,同时生成载荷数据并保存入库。在上面的优化流程中,侧摆角计算优化是关键,图 6 是侧摆角优化计算流程示意图。

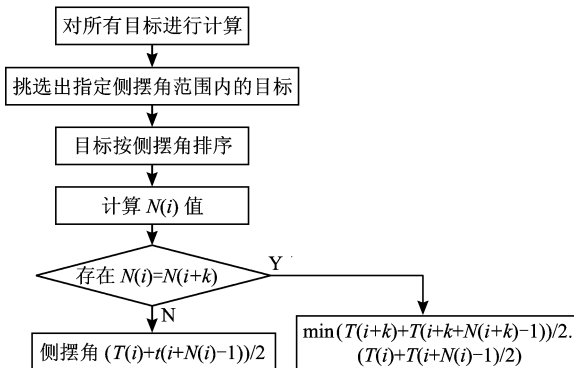


图 6 侧摆角优化计算流程

Fig 6 The flow for counting the optimized swing angle

设相机的视场是固定的,假设双相机视场为  $2p$  相机的侧摆角范围  $(-32, 32)$ , 首先计算一定时间段内的目标侧摆角访问信息,由于卫星相机的侧摆次数是有限制的,优化的目的在于怎样在相同的侧摆次数的情况下拍摄到最多的目标。

对可访问目标的侧摆角按侧摆角的升序进行排序如下:  $(T_1, T_2, T_3, T_4 \dots T(i), T(i+1), T(i+2) \dots)$

计算出从  $T(i)$  开始沿数轴的正向  $2p$  范围内的目标数  $N(i)$ , 则一次侧摆可访问的最多目标为  $\max(N(i))$ , 且侧摆角度为  $(T(i) + T(i + N(i) - 1)) / 2$ , 如果有  $N(i) = N(i + k)$ , 则取侧摆角小的即:  $\min((T(i+k) + T(i+k + N(i+k) - 1)) / 2, (T(i) +$

$T(i + N(i) - 1) / 2)$ 。

## 6 结 论

目前,中国针对卫星平台的任务管理技术已经成熟,并且可以同时管理多颗卫星,但是对于卫星遥感数据获取任务的管理在中国才刚刚起步,本文结合用户需求所研究建立的卫星遥感数据获取任务优化算法规则,可应用于卫星遥感任务的计划管理。但是,随着卫星有效载荷资源的不断增长,将导致计划算法规则的复杂程度不断提高,如何使规则易于修改,计划优化算法模型适应多颗卫星的遥感数据获取计划管理,是今后研究工作的重点。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Ferguson J C, Siemens R W, Wagner R F. STAR\_PLAN: A Satellite Anomaly Resolution and Planning System [A]. Proceedings of AAAI Workshop on Coupling Symbolic and Numerical Computing in Expert Systems[C], 1985.
- [2] Britt Daniel L. Scheduling Spacecraft Operations [A]. 3rd Conference on Artificial Intelligence for Space Applications[C]. NASA Publication 2492, Huntsville, AL, November 1987.
- [3] Thomas P G, Gathmann Linas, Raslavicius. System Approach to the Satellite Operations Problem [J]. IEEE AES Systems Magazine 1990; 20-24.
- [4] Fukunaga A, Rabideau G, Chien S. ASPEN: A Framework for Automated Planning and Scheduling of Spacecraft Control and Operations [A]. Proceedings of the International Symposium on AI [C]. Robotics and Automation in Space Tokyo, Japan 1997.
- [5] Mark Allen Weiss. Data Structures and Algorithm Analysis in C: Second Edition [M]. Boston: Pearson Education, Inc 1997.
- [6] Mumoka H, Cohen R H, Ohno T. ASTER Observation Scheduling Algorithm [A]. Proceedings of Space Ops 98 [C]. Tokyo, Japan 1998.
- [7] Wolfe W, Stephen E, Sorensen. Three Scheduling Algorithms Applied to the Earth Observing System Domain [J]. Management Science 2000, 46(1): 148-166.
- [8] Potter W, Gasch J. A Photo Album of Earth: Scheduling daily Landsat 7 activities [A]. Proceedings of Space Ops 98 [C]. Tokyo, Japan 1998.
- [9] Gen Mitsuo, Cheng R W. Genetic Algorithms and Engineering Optimization [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc 2000.
- [10] Parish D A. A Genetic Algorithm Approach to Automating Satellite Range Scheduling [D]. Master's thesis Air Force Institute of Technology 1994.
- [11] Frank J, Jonsson A, Morris R. Planning and Scheduling for Fleets of Earth Observing Satellites [A]. Proceeding of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space [C]. 2001.