

# 成像卫星任务周规划模型与算法\*

庞秀丽<sup>1,2</sup>, 于渤<sup>1</sup>, 姜维<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
2. 黑龙江大学经济与工商管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**作为卫星运控系统中的一个重要模块,卫星任务短期规划对充分发挥卫星系统效能有着重要影响。与卫星任务的日规划的作用和特点不同,它既涉及任务规划的技术问题,又涉及卫星管理问题。针对周规划任务,本文分析周规划的需求和特点,兼顾周规划的四项主要作用,构造周规划的分层框架;分析周规划优化目标及约束条件,建立卫星任务的负载度周规划模型;针对模型求解属于高维离散组合优化问题,仿真实验评价了几种基本智能优化求解算法,并应用引入分布式并行技术的遗传模拟退火算法求解。

**关键词:**卫星任务规划;短期规划模型;分布并行求解;遗传模拟退火算法

**中图分类号:**TP319 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0044-08

## The weekly task scheduling model and solving algorithm of imaging satellites

PANG Xiuli<sup>1,2</sup>, YU Bo<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Economic and Business Management, Hei Long Jiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Satellite weekly task scheduling is an important procedure for the Satellite Run and Management System, and it exerts influence on the effectiveness of satellite system. Different from the function and the characteristics of daily task scheduling, weekly task scheduling includes not only the technology problem but also the management problem. This study mainly expounds three aspects of work; firstly, analyzing the demand and the characteristic of weekly task scheduling, explaining four main functions of weekly scheduling, and constructing a hierarchical scheduling framework; secondly, summarizing optimization objects and constraint conditions, and building the weekly task scheduling model with considering the task overloading factor; thirdly, combing the Gene Algorithm and the Simulated Annealing Search to solve the model, while instigating the heuristic rules and introducing distributed parallel computing strategy.

**Key words:** satellite task optimize scheduling; weekly scheduling model; distributed parallel computing; gene and simulated annealing algorithm

任务规划是卫星运控系统中的一项重要工作,其决定着任务的执行与资源的有效利用<sup>[1]</sup>。相比以日为规划周期对各任务方案进行精细规划来说,周任务规划属于短期规划制定粗规划方案,需同时兼顾到任务集仍可能存在变动但一些重要任务又需做决定等多种需求要素。

现有专门针对短期性质的规划研究报道相对较少。在规划模型与求解上, Vasquez 等针对 SPOT-5 建立了单星约束满足模型<sup>[2]</sup>; Globus 等研究了多星联合规划模型和应用遗传算法求解,考虑了卫星最小摆角,每颗卫星具有多个设备资源的约束条件以及任务优先级<sup>[3]</sup>。BurrowBridge

针对多低轨卫星优化问题,采用了贪婪算法对卫星任务规划问题进行求解<sup>[4]</sup>。Frank 等构建了对地观测卫星任务规划模型,设计了基于约束的模型表示和描述方法,其模型中的约束条件包括卫星存储容量限制、数据下传的速率限制以及任务的优先级等<sup>[5]</sup>。贺仁杰<sup>[6]</sup>研究了区域目标和点目标的收益模型。王钧<sup>[7]</sup>建立任务规划有向图模型,并基于多目标遗传算法的图路径搜索求解。Globus 等<sup>[8]</sup>还比较了爬山法、模拟退火和遗传算法等几种优化算法。Chen 等<sup>[9]</sup>综合了遗传过程与微粒子群过程设计了多星调度算法。Lin 等<sup>[10]</sup>针对 ROCSAT-II 的规划调度,构建了整数规划模

\* 收稿日期:2013-03-28

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(71202168, 71271066);中国博士后基金资助项目(20090450973);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HIT.NSRIF.2010083);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511435)

**作者简介:**庞秀丽(1977—),女,黑龙江大庆人,博士后,E-mail:jwseabreeze@hit.edu.cn;  
姜维(通信作者),男,讲师,博士后,硕士生导师,E-mail:Jiangw@hit.edu.cn

型,研究了拉格朗日松弛和线性搜索求解技术。

因是短期规划,在执行之前,任务集仍可能存在任务插入、调整等变动情况,故周任务规划往往属于粗规划。本文分析周规划的需求和特点,构造周规划的分层框架;分析周规划优化目标及约束条件,建立周规划模型;针对模型求解属于高维离散组合优化问题,引入分布式求解策略,阐述遗传模拟退火的求解算法,改善求解算法的收敛速度和鲁棒性。

### 1 卫星任务周规划问题

周规划处于日规划之前,至少应具备四项功能:一是统计任务分布,权衡并协调各用户任务的重要性。(2)进行任务的可行性分析,实现超负

载任务过滤;三是对于重要任务实现初规划;四是对于协同任务制订规划约束并完成任务分配。

相比日规划,周规划特点有:(1)属于短期规划,由于任务仍存在较大变动空间,从管理角度不做全部精细规划;(2)管理者参与空间较大。如权衡各任务的重要性、挑选重要任务、选择重要协同任务等。当涉及不同部门提交的任务,哪个任务更重要有时不仅与部门特性有关,还往往与具体事件有关,甚至涉及时势、政治、军事等要素,故虽管理者已制定明确的规章制度,但鉴于特殊情况,应允许决策者交互式调整;(3)规划需要至少满足前述四项功能;(4)周规划的求解空间更大。由于以周为规划周期,相比日规划,其需要处理的任务数量大很多,求解难度大。

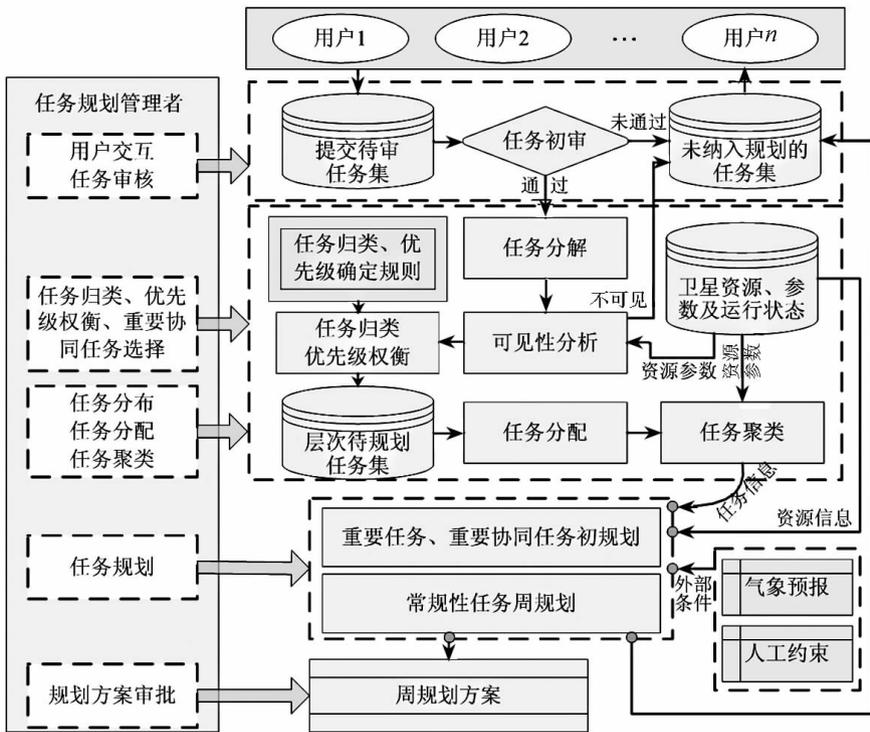


图1 卫星任务周规划过程框架

Fig. 1 The weekly task scheduling framework

图1 规划框架中包含一些基本过程,如任务分解、可见性分析、任务分配、任务聚类过程<sup>[1]</sup>。在本文中,(1)为权衡不同任务重要性,任务被分为四类:重要任务、重要协同任务、常规性任务、空闲性任务。其中,前两种任务被优先满足,其次满足常规性任务需求,最后再满足空闲性任务需求。重要任务是指从全局角度,经决策者审批的、在现有资源条件下优先满足的任务。协同任务,如多类型载荷协同、立体观测协同、周期性任务协同等,周规划中必须制定协同规划约束,否则在规划周期较短的日调度中,可能会因某一子任务未被规划而导致整个协同任务失败。(2)任务规划的

四项功能体现在规划过程中允许管理者交互式参与规划过程,增加人工规划约束,并借助任务规划模型和算法完成规划过程。

如图1,模型的输入来自:任务信息、资源信息、外部条件。下文称“重要任务与重要协同任务的初规划模型”为MC模型,称“常规性模型”为MN模型。区域目标经过任务分解后,可转换为具有点目标性质的元任务。区域目标因分解为多个元任务,故其收益需要考虑所完成区域的覆盖比,通过计算覆盖比,函数完成转换。限于篇幅,本文以点目标为例。

## 2 任务周规划模型研究

### 2.1 场景基本符号

场景基本符号如表 1 所示。

表 1 基本符号定义

Tab.1 The definition of basic symbol used in model

符号	含义	内 容
$ST$	场景时间	$ST = [sts, ste]$ 表示执行一次周规划的起止时间。
$S$	卫星集合	$S = \{S_1, S_2, \dots, S_{ns}\}$ , $ns$ 表示卫星数量。
$T$	任务集合	$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ , 代表用户任务经任务分解后形成的元任务, $nt$ 表示元任务数量。 $[tbs_i, tbe_i]$ 代表 $t_i$ 的观测时间要求。
$DTW_i$	地面站时间窗口集合	$DTW_i$ 表示卫星 $S_i$ 对所有地面站的时间窗口集合。
$TW_{ij}^k$	目标时间窗口集合	$TW_{ij}^k$ 表示卫星 $S_i$ 的传感器 $SS_i$ 对目标 $t_j$ 的第 $k$ 个可见时间窗口, 其中 $WS_{ij}^k$ 为时间窗口的开始时间, $WE_{ij}^k$ 为时间窗口的结束时间。
$N_{ij}$	时间窗口数量	$N_{ij}$ 表示卫星 $S_i$ 的传感器 $SS_i$ 对目标 $t_j$ 的时间窗口数量。
$WSlew_{ij}^k$	侧摆角度	$WSlew_{ij}^k$ 表示卫星 $S_i$ 的传感器 $SS_i$ 对目标 $t_j$ 的第 $k$ 个可见时间窗口的侧摆角度。
$Orbit_i$	轨道圈次集合	$Orbit_i = \{orbit_{i1}, orbit_{i2}, \dots, orbit_{i(O_i)}\}$ , 表示卫星 $S_i$ 的轨道圈次集合, 其中, $O_i$ 表示轨道圈次的数目, $orbit_{ir}$ 代表卫星 $S_i$ 的第 $r$ 个轨道圈次。轨道圈次 $orbit_{ir}$ 内包括 $N_{ir}$ 个合成任务。
$Q$	开关机时间	$Q = [QS(TW_{ij}), QE(TW_{ij})]$ , 代表开关机时间。
$\theta Sun_i$	观测角	表示能满足用户任务要求的最小观测角。
$OT_j$	元任务集合	$OT_j = \{ot_{j1}, ot_{j2}, \dots, ot_{j(N_o)}\}$ , 表示任务 $t_j$ 分解出来的元任务集合, $N_o$ 表示任务 $t_j$ 分解出来的元任务数量。

### 2.2 决策变量

$TW_{ij} = [stw_{ij}, etw_{ij}]$  表示任务规划后, 具体的执行时段。规划时长  $TW_{ij}^{dur} = etw_{ij} - stw_{ij}$ 。

任务规划判别:  $sch_{ij}$  表示  $t_j$  是否被  $S_i$  上传感器  $SS_i$  执行,  $sch_{ij} = (TW_{ij}^{dur} > 0)$ 。同理,  $sch_j = \exists i, \exists l: sch_{ij}$ 。

规划方案:  $SCHEME = \{TW_{ij} | sch_{ij}\}$ 。因若确

定了任务执行的  $[stw_{ij}, etw_{ij}]$ , 则可通过地球坐标系, 依据目标位置、卫星位置、载荷状态, 易于计算俯仰角、侧摆角等规划参数<sup>[1]</sup>, 因篇幅关系, 本文的规划方案主要指规划时间窗。

### 2.3 函数符号定义

函数符号如表 2 所示。

表 2 函数符号定义

Tab.2 The representation of function symbol used in model

函数	解 释
$priority(t_j)$	$priority(t_j)$ 代表任务 $t_j$ 的优先级, 该值在任务输入、任务审核时确定。
$urgent(t_j)$	$urgent(t_j)$ 代表任务 $t_j$ 是否是重要任务且属于时间紧迫的任务。
$ObvAngle(t_j, ss_i, time)$	$ObvAngle(t_j, ss_i, time)$ 表示观测角, 可由 $t_j$ 的位置、传感器 $SS_i$ 运行路径和时刻 $time$ 计算得到。
$SunAngle(t_j, time)$	$SunAngle(t_j, time)$ 表示太阳高度角, 可由 $t_j$ 的地理位置和时刻 $time$ 计算得到。
$QS(TW_{ij})$	$QS(TW_{ij})$ 表示卫星 $S_i$ 的某次开机时间, 可由规划后的具体执行时间计算得到。
$QE(TW_{ij})$	$QE(TW_{ij})$ 表示卫星 $S_i$ 的某次关机时间, 可由规划后的具体执行时间计算得到。
$m(t_j, w_i)$	$m(t_j, w_i)$ 表示任意两个数传窗口 $j_1, j_2$ 之间被安排的观测任务 $t_j$ 所占用的卫星存储容量, 可由规划后的观测任务 $t_j$ 和卫星 $S_i$ 的存储读写速率 $w_i$ 计算得到。
$NUM(Q)$	$NUM(Q)$ 表示卫星 $S_i$ 的开关机次数, 可由规划后的开关机时间 $Q$ 计算得到。
$MOD(t_j)$	$MOD(t_j)$ 表示卫星 $S_i$ 的工作模式, 可由规划后的任务 $t_j$ 得到。
$WAV(OT_j)$	$WAV(OT_j)$ 表示卫星 $S_i$ 的工作波位, 可由规划后的元任务 $OT_j$ 得到。

## 2.4 考虑的主要约束条件

借鉴文献[6-7]中的成像卫星约束与参考文献[11]中的SAR成像约束,本文构建的周规划模型主要考虑下述约束:

(1) 可见窗约束。卫星载荷和观测目标必须可见,可表示为

$$\forall t \in TW_{ij}, \exists k: stw_{ij} \geq WS_{ij}^k, etw_{ij} \leq WE_{ij}^k \quad (1)$$

(2) 开机时间约束。开机时间必须在卫星  $S_i$  的传感器  $SS_i$  最短开机时间  $MinTM_{ii}$  与最大开机时间  $MaxTM_{ii}$  之内:两次开关机之间不能超过资源预设最短时间间隔  $minInterval_i$ 。

$$\forall i = [1, N_s], \forall j_1, j_2 \in [1, N_T], \forall k = [1, N_{ij}] \quad (2)$$

$$QE(TW_{ij}) - QS(TW_{ij}) \geq MinTM_{ii} \quad (3)$$

$$QE(TW_{ij}) - QS(TW_{ij}) \leq MaxTM_{ii} \quad (4)$$

$$QS(TW_{ij}) - QE(TW_{i(j-1)}) \geq minInterval_i \quad (5)$$

(3) 载荷动作约束。对于卫星  $S_i$  的传感器  $SS_i$ ,其连续观测任务的时间间隔不能小于侧摆调整的时间以及侧摆后的稳定时间。 $\theta_{il}$  为侧摆速度,暂以匀速运动做简化替代; $d_{il}$  为侧摆稳定时间:

$$\forall i \in [1, N_s], \forall j_1, j_2 \in [1, N_T], j_1 \neq j_2, \forall k_1, k_2 \in N_{ij}: \\ WS_{ij_2}^{k_2} - WE_{ij_1}^{k_1} > \frac{|WSlew_{ij_1}^{k_1} - WSlew_{ij_2}^{k_2}|}{\theta_{il}} + d_{il} \quad (6)$$

(4) 存储容量约束。对于卫星  $S_i$ ,使用多个传感器  $SS_i$  进行观测,其任意两个相邻数传窗口  $r_1, r_2$  之间观测的任务所占用的存储容量不能超过卫星  $S_i$  存储容量  $M_i$ 。 $w_i$  表示卫星  $S_i$  存储的读写速率。

$$\forall i \in [1, N_s], \forall r_1, r_2 \in DTW_i, r_1 \neq r_2:$$

$$\sum (m(t_1, w_i) + m(t_2, w_i) + \dots m(t_j, w_i)) < M_i \quad (7)$$

(5) 成像次数约束。因卫星硬件设计限制,每个滑动圈内的侧视成像次数具有约束。则

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_s, r = 1, 2, \dots, O_i: N_{ir} \leq R_i \quad (8)$$

(6) 能量约束。卫星活动消耗能量,表示成观测时间、传感器侧摆、开关机的相关函数,而消耗不能超出最大限制  $P_i \circ p_{il}$  为观测单位时间所消耗的能量; $q_{il}$  为侧摆单位角度所消耗能量; $c_i$  为开关机消耗。

$$\sum_{i=1}^{N_i} (WE_{ij}^k - WS_{ij}^k) p_{il} \\ + \sum_{i=1}^{N_i} |WSlew_{i(j+1)}^k - WSlew_{ij}^k| q_{il} \\ + \sum_{i=1}^{N_i} (WE_{ij}^k - WS_{ij}^k) p_{il} + NUM(Q) c_i \leq P_i \quad (9)$$

(7) 观测角度约束。卫星载荷和观测目标必须满足用户指定最小观测角  $\theta Obv_i$  需求,可表示为

$$\forall i, l: ObvAngle(t_j, ss_i, time) \geq \theta Obv_i, time \in TW_{ij}$$

(8) 模式转换。对于SAR载荷,在一次开机过程中,不能更换工作模式  $MOD(t_j)$ 。

$$\forall t_m, t_n \in T, m \neq n, \text{if}$$

$$\exists j: TW_{im}, TW_{in} \in [QS(TW_{ij}), QE(TW_{ij})]. \text{ then} \\ MOD(t_m) = MOD(t_n) \quad (10)$$

(9) 波位约束。对于SAR载荷,一次SAR成像不能切换工作波位约束。

$$\forall t_j \in T, ot_{jm}, ot_{jn} \in OT, m \neq n: \\ WAV(ot_{jm}) = WAV(ot_{jn}) \quad (11)$$

(10) 太阳高度角。对于可见光载荷,传感器  $SS_i$  必须满足太阳高度角限制  $\theta Sun_i$ :

$$\forall i: SunAngle(t_i, time) \geq \theta Sun_i, time \in TW_{ij} \quad (12)$$

注:(1) 针对具体卫星可能还有其他特有约束形式,可采用上述方式对其加以描述;(2) 约束中为简化描述,若对下标未限定,则作用域为在2.1节中描述的有效取值范围。

## 2.5 周规划模型

### 2.5.1 周规划中MC模型

由于MC模型所针对的任务仅是全部任务中的较少部分,故从“任务收益”角度确定优化目标。

子目标1:最大化任务收益率,即

$$taskPFR = \frac{\sum_{j=1}^n Priority(t_j) * sch_j}{\sum_{j=1}^n Priority(t_j)}$$

该式中元任务对应着点目标用户任务<sup>①</sup>。

子目标2:最大化任务完成率,即

$$taskNFR = \sum_{j=1}^n sch_j / n$$

子目标3:最小化对执行时间有紧迫性要求的任务的等待时间,即

$$taskFTE = \frac{\sum_{j=1}^n (swt_j - tbs_j) / (tbe_j - tbs_j) * urgent(t_j) * sch_j}{\sum_{j=1}^n urgent(t_j) * sch_j}$$

优化目标:利用加权法合成子目标。

$$maxf_1 = \alpha * taskPFR \\ + \beta * taskNFR + \gamma * (1 - taskFTE)$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma$ 为影响因子,一般约定 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ,

<sup>①</sup> 本文以点目标为例,若模型中考虑区域目标,只需计算区域任务的覆盖完成率,增加区域目标收益计算。

各因子的不同取值决定着各子目标在规划方案优化中的重要程度,需要决策者依需求指定。本文考虑到任务执行是主要的,暂令  $\alpha = 0.7, \beta = 0.2, \gamma = 0.1$  用于仿真实验。

### 2.5.2 周规划中 MN 模型

MN 模型优化中需要考虑到 MC 模型的规划结果,且 MN 建模过程需要考虑到周规划需求及面临大规模求解问题,实现负载度限制的规划。建模中在规划的业务性能上与模型的求解效率上寻求平衡是周规划中 MN 建模的重要环节之一。

本文用“负载度因子  $\theta$ ”对任务规划中的最大负载程度进行描述,包括载荷观测重叠,如式(13),资源指定时段  $RST_{ilk}$  内的任务数量负载程度,如式(14),以及指定时段  $RST_{ilk}$  内的工作时长,如式(15):

$$\forall i, l, time: count(t_j) \leq |\theta|, time \in TW_{ij} \quad (13)$$

$$\forall i, l, k: \sum_{j=1}^m innerT(t_j, RST_{ilk}) \leq \theta * WorkCountLimit(RST_{ilk}) \quad (14)$$

$$\forall i, l, k: \sum_{j=1}^m ExeLen(t_j) * innerT(t_j, RST_{ilk}) \leq \theta * WorkTimeLimit(RST_{ilk}) \quad (15)$$

其中  $innerT(t_j, RST_{ilk})$  表示任务  $t_j$  处于卫星  $s_i$  传感器  $SS_i$  上的第  $k$  个时段  $RST_{ilk}$  执行,  $WorkCountLimit(RST_{ilk})$  表示时段  $RST_{ilk}$  上资源的开关机次数限制,而相应工作时间的限制为  $WorkTimeLimit(RST_{ilk})$ ,这两个限制是在资源设计时指定的。

模型求解空间大小主要来自于三方面因素:任务需求的规模、资源的规模、规划时长。业务并行可起到降低求解规模作用,(1)依据图像类型将任务和资源分类,按照不同任务类型建模,例如可见光、SAR 分开求解;(2)将任务筛选引入规划模型求解前的预处理过程,即在进行负载度因子  $\theta$  的任务规划前,利用启发规则算法获得负载度因子  $\theta$  的规划任务,例如计划进行  $\theta = 1.1$  的规划,可以利用规则进行  $\theta = 1.2$  规划,从而实现冗余任务或局部冗余任务的筛选工作。

规划模型与卫星系统整体优化需求密切相关,依运控管理者需求可设定不同优化目标,本文列出三个典型的子优化目标。

子目标 1:最大化任务收益率。

子目标 2:最大化任务完成率。

子目标 3:最大化资源使用均衡度,即各可用载荷上负载工作时长接近。令

$$SenWorkTime_{il} = \sum_{j=1}^r (ewt_{ij} - swt_{ij}), when sch_{ij}$$

$$maxSenWorkTime = \max_{il} (SenWorkTime_{il}),$$

则资源均衡度使用下式度量:  $resSat =$

$$\sqrt{1 - std\left(\frac{SenWorkTime_{i1}}{maxSenWorkTime}, \dots, \frac{SenWorkTime_{i1}}{maxSenWorkTime}\right)}$$

优化目标:利用加权法集成三个子目标。

$$maxf_2 = c1 * taskPFR + c2 * taskNFR + c3 * resSat$$

其中  $c1, c2, c3$  为影响因子,约定  $c1 + c2 + c3 = 1$ ,类似 MC 模型因子取值,各因子也应由管理者根据规划整体优化目标来论证确定,本文暂令  $c1 = 0.7, c2 = 0.2, c3 = 0.1$ 。

注意:(1)与日规划<sup>[1]</sup>有所不同,周规划中以“任务”角度优化,通过指定  $\theta$  实现最大负载度规划,当  $\theta > 1.0$  时实现冗余规划,当  $\theta < 1.0$  时实现资源预留规划;(2)MN 模型优化中需要考虑到 MC 模型的规划结果,因此 MN 模型除满足 2.4 节的主要约束条件外,还需增加约束:保持 MC 模型的原有规划结果。

## 3 模型求解算法研究

周规划问题求解有三个特点:求解空间大、多优化目标多约束规划、MC 初规划与 MN 冗余规划结合。在已有遗传禁忌<sup>[1]</sup>和蚁群算法<sup>[11]</sup>基础上,本文引入启发式信息,并通过分布式并行运算,从提高外部计算能力角度,增强算法的实用性。算法具体描述如下:

1) 初始化。采用某种策略,产生大小为  $N$  的初始化种群  $P_0$ ;令  $t = 0$ 。本文可选两种策略:

1.1) 随机生成。对染色体的各个基因位在有效取值范围内随机生成,形成初始种群。

1.2) 蚁群算法初始种群。由于蚁群算法有较好的初期收敛速度,故可获得初始种群。

2) 适应度值计算。计算当前种群  $P_t$  中每个个体的目标向量,并对精英解集  $G_t$  升级。

3) 选择。在  $P_t$  中选择出需要进一步操作的父个体,选择出  $N - N_{elite}$  个体。

3.1) 选择概率为:

$$ps(x_i) = \frac{objv(x_i)}{\sum_{j=1}^N objv(x_j)} \quad (16)$$

3.2) 调整选择概率。令  $\sigma$  表示种群最大“个体间区分度”,则  $P_t$  的线性变换过程如下

$$\frac{(ps(x_i) - \min Objv_i) * \sigma}{\max Objv_i - \min Objv_i} + (1 - \sigma) \quad (17)$$

其中  $\max Objv_i, \min Objv_i$  分别代表  $P_t$  中最大和最小适应度值,当二者不相等时,才应用式(17)。

4) 交叉。对选择出的父代个体按照交叉概率

pc 执行交叉操作,任意两个父代个体 ( $x_{pa}, x_{pb}$ ) 生成两个子代个体 ( $x_{ca}, x_{cb}$ )。交叉方法可选单点交叉或多点交叉,本文默认双点按基因片段交叉。

5) 变异。对新生成的子代个体 ( $x_{ca}, x_{cb}$ ),按照变异概率  $pm$  执行变异操作。算法执行前一次性计算每个基因的变异系数  $mux_i = (\text{任务时间冲突度} + \text{任务数冲突度} + \text{执行时间灵活度} + \text{任务执行机会})/4$ 。变异时,在  $[1, \max(5, n/100)]$  区间随机生成变异基因位个数。按照  $mux_i$  值进行轮盘赌选择变异的基因位。

5.1) 任务时间冲突度。即任务在使用资源时,其他待分配任务等待该资源的在时间分配上的冲突。

5.2) 任务数冲突度。即任务在所有资源上,与其他任务的冲突个数。

5.3) 执行时间灵活度。代表任务的所有可见时间段长短与任务执行时长的比值。

5.4) 任务执行机会。即规划时间段内,任务在所有资源的执行机会更少,则优先安排。

6) 精英个体保留。从精英解集  $G_t$  中随机选出  $N_{elite}$  个个体与前面产生的  $N - N_{elite}$  个个体组合构成新种群  $P_{t+1}$ 。

7) 应用启发式信息。在种群  $P_{t+1}$  中随机选择  $k$  个解  $x_i$  进行启发式信息尝试,包括下述三个规则:

7.1) 如果资源仍有空闲,且存在未安排的任务,分析空闲时间与未安排任务间的链状关系,尝试变动关系链上的任务,安排未排定的任务;

7.2) 如果资源仍有空闲,尝试将与该资源有可见窗的任务安排在优先级更高的资源上;

7.3) 如果存在任务间的冲突,优先安排风险更小的任务。

8) 模拟退火策略。对种群  $P_t$  中每个个体  $x_i$  按分界点  $2 \cdot \max Objv_t / 3 + \min Objv_t / 3$ , 和  $\max Objv_t / 3 + 2 \cdot \min Objv_t / 3$  划分为三类,按取值大小称为“优秀”“一般”“较差”个体。

8.1) 对“较差”个体,按照模拟退火策略,进行概率接受。

8.2) 对于不接受的较差个体,从“优秀组”的个体按照轮盘赌抽取一个个体,进行变异后形成新的个体,利用该个体进行替换。

9) 终止条件。如果  $t \geq g_{\max}$  或者最佳个体满足求解要求,则停止搜索;否则,  $t = t + 1$ , 跳到2)。

分布并行技术是通过增加外部计算能力以改善求解速度和鲁棒性。在算法中,第1)步中的种

群各个个体初始化可以并行计算;第2)步中并行各个个体适应度计算中需要对多种约束冲突消解目标函数值;第5)步中需要变异的个体,可并行计算;第7)步中  $k$  个解  $x_i$  进行启发式信息尝试可并行计算;第8)步中需要重新生成的个体,可并行生成。

### 4 仿真实验与分析

本文仿真想定包括20颗卫星,2000个常规性任务,200个重要任务。卫星选自 STK 中卫星库,轨道高度在 500 ~ 800km,任务按照“大陆为主,兼顾重点地区”的原则随机生成,任务观测时间要求按照周一至周三随机生成,时段要求在 2 天至 7 天随机生成。

图2、图3展示执行2个小时寻优过程的平均性能和方差稳定情况,算法运行10次,综合评价采用  $f_2$  量度。因 MC 模型首先规划,在任务较少情况下,可全被规划,本实验采用优先级规则算法。MN 模型中,遗传算法 GA 和遗传模拟退火算法 GASA 默认参数:种群规模 40,交叉率 0.95,变异率 0.08,  $\sigma = 0.6$ 。

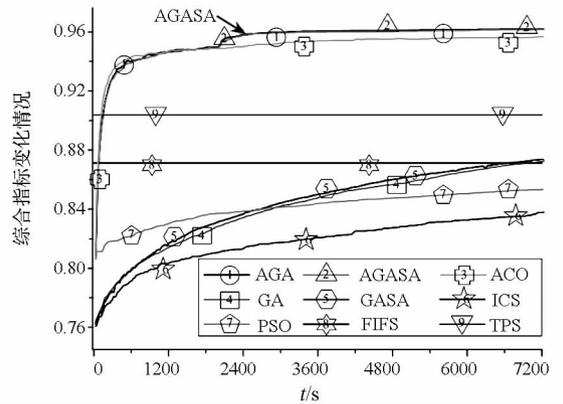


图2 几种算法周规划性能对比

Fig.2 The comparison among several algorithms

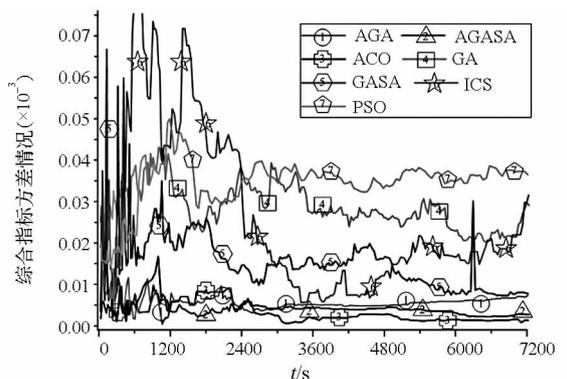


图3 算法的方差稳定性情况

Fig.3 The comparison of algorithm variance

图2表明:(1)基于蚁群算法初始化种群策

略的 AGASA 算法具有最佳的寻优性能,此外,蚁群遗传 AGA 算法曲线与 AGASA 接近但略低;(2)AGASA 曲线高于蚁群算法 ACO 也恰说明 GA 的后期搜索能力强于 ACO 算法;(3)AGASA 与 ACO 在约 1 分钟、2 分钟处分别超过先来先服务 FCFS 和优先级 TPS 规则算法;(4)周规划任务数量大、卫星多、规划周期长,因此求解空间巨大,此时基本 GA 算法在 2 小时内无法达到预期性能,而 AGASA 算法则表现较佳。图 3 表明:(1)ACO 算法最稳定,其次是 AGASA 算法和 AGA 算法,在约 20 分钟后,三种算法都进入较稳定状态;(2)AGASA 算法比 AGA 算法稳定,说明增加模拟退火策略也可提高算法的稳定性。

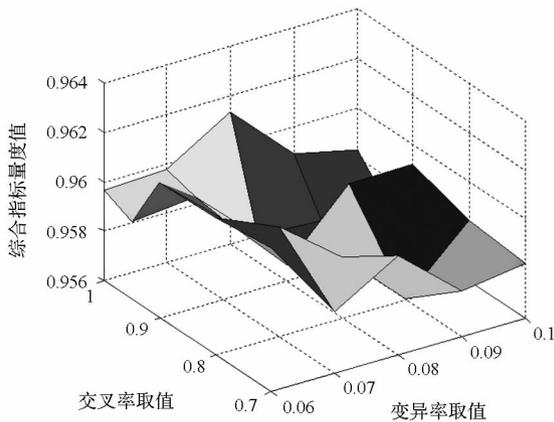


图 4 AGASA 算法交叉率与变异率参数

Fig. 4 The influence by the cross rate and mutation rate

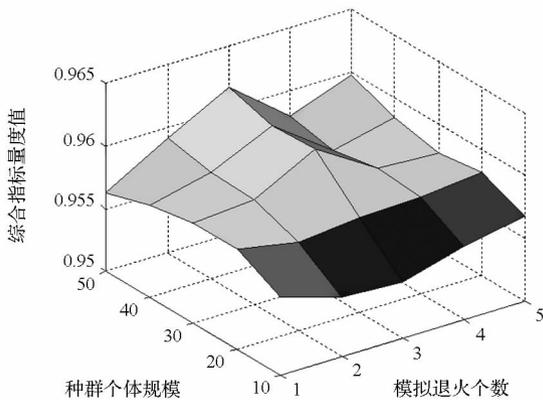


图 5 种群规模与模拟退火个数对性能影响

Fig. 5 The parameter of population size and SA count

图 4 表明在交叉率为 1.0,变异率为 0.8 处取得较佳性能,此外在交叉率 0.8,变异率 0.06 也表现出较佳性能。图 5 表明:(1)种群数 50 时,模拟退火个体为 3 时性能最佳;(2)几种规模下,模拟退火个体为 3 时性能较好;(3)大种群更稳定,且有利于分布并行计算,具有较好的工程实用性。

图 6 展现分布式并行计算改善算法性能情

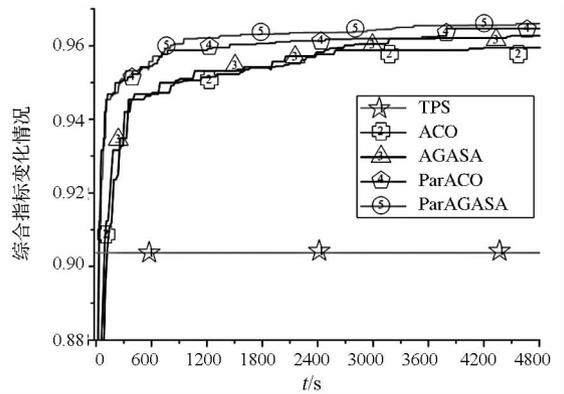


图 6 分布并行计算性能曲线

Fig. 6 The performance of distributed parallel technology

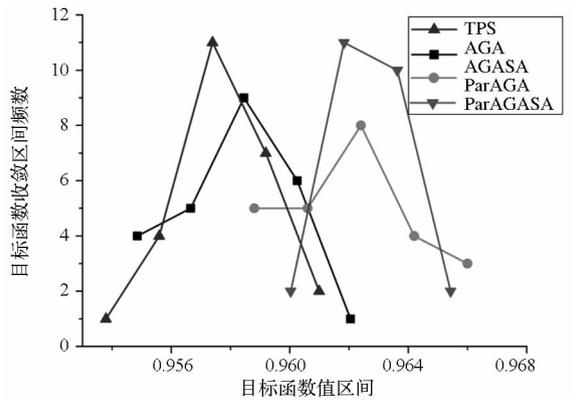


图 7 算法收敛区间频数分布情况

Fig. 7 The frequency distribution of algorithm convergence

况,图 6 中并行算法 ParAGASA 曲线处于最上方,表明引入分布并行计算策略会令进化过程更快收敛,甚至并行蚁群 ParACO 也通过增加外部硬件的计算能力,甚至超过 AGASA 算法的性能。图 7 是由 25 次实验分布统计表明四种算法整体上具有类似正态分布特性。该图中 ParAGASA 的分布均值偏右且较为集中,表明其求得的最佳解相比其他三种方法最为优化且算法较为稳定。

### 5 结语

周规划是卫星任务运控的一个重要模块,其已被证明属于 NP Hard 问题,从管理角度和模型求解角度都与日任务规划有所不同。本文针对周规划主要完成三项工作:(1)分析周规划的需求和特点,阐述周规划的任务以及过程框架;(2)针对周规划的需求,建立基于负载度的周规划模型,将重要任务与一般性任务分层规划,体现出管理需求;(3)针对任务规划这一高维离散组合优化问题,组合蚁群算法、遗传算法和模拟退火算法实现周规划模型的求解,并进一步采用分布并行求解策略促进算法的工程实用性。利用 STK 提供仿真数据进行实验分析,验证了三种模型的有效

性,实验表明分布式并行求解算法在求解方案的评价、算法收敛速度和稳定性都表现较高的性能。

未来工作主要集中在:(1)在周规划中引入交互式规划过程、探索任务动态权重调整过程;(2)将其他多种求解算法有机集成在分布式框架中,充分利用各算法在收敛速度、适合的求解规模上的优势,提供分布式并行求解方案,以获得更佳工程实用性能。

## 参考文献(References)

- [1] 姜维,庞秀丽,郝会成. 成像卫星协同任务规划方法研究[J]. 系统工程与电子技术(录用待发表)2013.  
JIANG Wei, PANG Xiuli, HAO Huicheng. The collaborative scheduling model and algorithm for the imaging satellite network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Al Globus J C, Lohn J, Morris R. Scheduling earth observing fleets using evolutionary algorithms: Problem description and approach [C]//Proceedings of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, 2002:1 - 9.
- [4] Burrowbridge S E. Optimal allocation of satellite network resources [D]. University Libraries, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [5] Frank J, Jonsson A, Morris R, et al. Planning and scheduling

for fleets of earth observing satellites[C]//Proceedings of 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007:1 - 12.

- [6] 贺仁杰,高鹏,白保存,等. 成像卫星任务规划模型、算法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3):411 - 422.  
HE Renjie, GAO Peng, BAI Baocun. Models, algorithms and applications to the mission planning system of imaging satellites[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, 31(3):411 - 422. (in Chinese)
- [7] 王钧,李军,陈健,等. 多目标 EOSs 联合成像调度方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 354 - 359.  
WANG Jun, LI Jun, CHEN Jian. An approach for multi objective uniting imaging scheduling of earth observing satellites[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 354 - 359. (in Chinese)
- [8] Globus A, Crawford J, Lohn J, et al. Comparison of techniques for scheduling earth observing satellites[C]// Proceedings of the 16th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence (IAAI - 04), USA, 2004:836 - 843.
- [9] Chen Y, Zhang D, Zhou M, et al. Multi-satellite observation scheduling algorithm based on hybrid genetic particle swarm optimization [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 136: 441 - 448.
- [10] Lin W C, Liao D Y, Liu C Y, et al. Daily imaging scheduling of an earth observation satellite[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 2005, 35(2): 213 - 223.
- [11] Jiang W. The mission planning model and improved ant colony solving algorithm for networking SAR satellites [C]// Proceedings of the 20th International Conference on Management Science & Engineering, Jul, 2013.

(上接第30页)

## 参考文献(References)

- [1] 陈小前,袁建平,姚雯,等. 航天器在轨服务技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2009.  
CHEN Xiaoqian, YUAN Jianping, YAO Wen, et al. On-orbit servicing of spacecraft [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009. (in Chinese)
- [2] Shen H J. Optimal scheduling for satellite refuelling in circular orbits[R]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2003.
- [3] Alfriend K T, Leed J, Creamer N G. Optimal servicing of geosynchronous satellites [R]. Monterey, CA: AIAA Astrodynamics Specialist Conference, 2002.
- [4] 任仙海,杨乐平,朱彦伟. 基于整数规划的在轨服务任务指派问题研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2):52 - 56.  
REN Xianhai, YANG Leping, ZHU Yanwei. Research on the on-orbit servicing mission assignment based on integer programming [J]. Journal of the Academy of Equipment Command and Technology, 2008, 19(2): 52 - 56. (in Chinese)

- [5] Xue D, Li J F, Baoyin H X, et al. Reachable domain for spacecraft with a single impulse [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(3): 934 - 942.
- [6] 卜慧蛟. 多星地面站测控调度多目标优化研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.  
BU Huijiao. Study on multi-objective optimization of multi-satellite-station TT & C scheduling [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1985. (in Chinese)
- [7] 唐国金,罗亚中,雍恩米. 航天器轨迹优化理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.  
TANG Guojin, LUO Yazhong, YONG Enmi. Trajectory optimization theory, method and application [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [8] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 - 197.
- [9] Luo Y Z, Tang G J, Lei Y J. Optimal multi-objective linearized impulsive rendezvous [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2007, 30(2): 383 - 389.