

基于面向任务模型的陆基卫星测控资源克隆 选择优化调度

侯翠琴 焦李成

(西安电子科技大学智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部重点实验室 西安 710071)

摘 要 建立了面向任务的陆基卫星测控资源优化调度数学模型,与已有数学模型不同的是,该模型约束同一测控请求同一时刻只被一个可见陆基测控设备测控,为调度算法调度陆基测控设备完成更多的测控任务提供可能。基于此模型提出了基于面向任务模型的陆基卫星测控资源克隆选择优化调度算法(Clonal Selection land-based Satellite TT&C Resources Scheduling Algorithm based on the mission oriented model, CS_STT&CRSA),并从理论上证明了算法的收敛性。算法中采用能表示各测控请求时间先后及其与陆基测控设备关系的矩阵编码方式表示种群中的抗体;并针对该编码方式设计了相应的强约束满足算子,保证操作后的抗体满足强约束条件。在 5 颗同步卫星和 30、40、50 颗近地卫星请求测控的情况下,分别仿真了 10 组不同任务。对比实验表明,新建的数学模型可使调度算法更好地利用陆基测控设备;CS_STT&CRSA 有更强的搜索能力和约束解决能力,能调度测控资源完成更多的测控任务,它的性能也更加稳定。

关键词 矩阵编码;卫星测控资源;面向任务模型;克隆选择;调度算法
中图法分类号 TP301 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.01525

Clonal Selection Land-Based Satellite Tracking Telemetry and Command (TT&C) Resources Scheduling Based on the Mission Oriented Model

HOU Cui-Qin JIAO Li-Cheng

(Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China,
Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract This paper proposes a novel model, the mission oriented model, for the problem of land-based satellite tracking telemetry and command (TT&C) resources scheduling. Compared to other models, the mission oriented model constrains a satellite to be tracked and commanded by only a ground station which can observe the satellite. Therefore, the proposed model makes it possible that scheduling algorithms schedule TT&C resources to complete more missions. Then it proposes the clonal selection land-based satellite TT&C resources scheduling algorithm (CS_STT&CRSA) based on the mission oriented model and proves its global convergence in theory. The algorithm adopts a matrix coding scheme, which depends on the start times of tracked and commanded orbits and the relationships between satellites and ground stations. The severe-constraint satisfaction operator which guarantees the individual satisfies severe constraints is proposed. When there are 5 geostationary satellites and 30, 40 or 50 low earth orbit and medium earth orbit (LEO&MEO) satellites, 10 different groups of tasks are generated respectively.

收稿日期:2007-07-18;最终修改稿收到日期:2009-06-09。本课题得到国家自然科学基金(60703108,60803098)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2006AA01Z107,2009AA12Z210)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB705700)、国家教育部博士点基金(20070701022)、教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645)资助。侯翠琴,女,1983年生,博士研究生,主要研究方向为结构数据学习、半监督学习、特征选择、稀疏学习及数据挖掘等。E-mail: houcuiqin@hotmail.com; houcuiqin0304@163.com。焦李成,男,1959年生,教授,博士生导师,主要研究领域为智能计算、机器学习和智能信息处理等。

Experimental results illustrate that the mission oriented model enables scheduling algorithms to make better use of TT&C resources and complete more missions and CS_TT&CRSA has more powerful ability of searching and solving constraints and is more stable.

Keywords matrix coding scheme; satellite tracking telemetry and command (TT&C) resources; mission oriented model; clonal selection; scheduling algorithm

1 引 言

伴随航天事业的发展与进步,我国在轨卫星种类和数量日益增多,航天测控网“星多站少”的局面日趋显现.为了缓和这种局面,一种方法是通过增加更多的测控设备来满足卫星的测控请求,但这同时却大大增加了航天建设成本.为了尽量少地增加测控设备并满足测控请求,对 S 频段测控网采用“集中管理,统一分配”的管理模式^[1],提高航天测控资源利用率便成为改善这一局面的另一种解决方法.因此如何合理调度陆基卫星测控资源这一具有挑战性的问题,日益受到国内外学者们的关注^[1-3].

陆基卫星测控资源调度是一个复杂的约束优化问题,它与近地卫星的测控弧段或同步卫星的测控时段、陆基测控设备的属性、故障以及切换时间等等都有关.研究者们针对这个问题,建立数学模型,并提出许多调度算法.文献[1]考虑了测控站的负载均衡性问题,提出了航天测控网资源均衡分配的调度方法,但没有建立明确的数学模型,提出的方法是启发式方法,容易陷入一个很小的局部最优解.文献[2]应用离散事件系统中的事件调度法对陆基测控资源调度问题进行了研究,并抽象出排除测控中冲突的数学模型,该模型侧重单个基站的冲突问题,要求对任一弧段可分配到的测控设备的数量大于或等于其中申请中的临界设备的数量,并以保证优先级高的弧段得到测控、任一测控设备分配无冲突等为约束条件.文献[3]探讨了大规模调度问题的自适应解决方案,以卫星测控资源调度问题为例,建立了相应的数学模型.该数学模型以卫星、测控设备以及所有可能时间段的组合为变量,以最大化测控网总的测控时间为目标函数,以卫星的工程约束、测控设备同一时间只测控一颗卫星为约束条件.但该模型的变量范围过大,约束条件过于复杂,综合导致问题求解复杂.另外该模型没有考虑同一卫星可能被不同的测控设备可见,也没考虑优先级问题.

本文参照已有的数学模型,提出了面向任务的

陆基卫星测控资源优化调度问题数学模型,该模型考虑同一测控请求在同一时间可能被不同的陆基设备可见,约束同一测控请求只被一个可见陆基测控设备测控,统一考虑所有的陆基测控设备,而不是单独考虑每个陆基测控设备,解决单个陆基设备的冲突问题.本文还提出了基于面向任务模型的陆基卫星测控资源克隆选择优化调度算法;所设计的矩阵编码方式能表示各测控任务请求时间的先后及与陆基测控设备的关系;并设计了强约束满足算子,解决冲突问题,使强约束满足算子操作后的个体满足强约束.实验仿真了在轨同步卫星为 5 颗,近地卫星分别为 30、40、50 颗时,卫星提出测控请求、形成测控任务,测控网调度陆基测控设备完成测控任务的过程.比较了调度算法在面向任务的数学模型与传统的不考虑同一测控请求只被一个可见陆基测控设备测控的数学模型下的调度结果.仿真结果表明:面向任务的数学模型可使算法调度测控设备完成更多的测控任务,而基于面向任务模型的陆基卫星测控资源克隆选择优化调度算法优于基于面向任务模型的陆基卫星测控资源优化调度遗传算法,能得到更优的解,性能更稳定.

2 问题描述及相关定义

陆基卫星测控资源优化调度问题就是调度陆基测控设备,使整个测控网能测控更多的卫星,完成更多的测控任务,是一个典型的约束优化问题.每颗卫星都有工程约束^[4-6],包括在固定的时间段内最多和最少测控次数约束、每次测控过程最长和最短的时间约束以及两次测控过程相差的最长和最短时间限制.这些工程约束是在卫星设计的时候确定的,并且保持不变.除了每颗卫星的工程约束外,还要满足陆基测控设备的约束,测控设备在一段时间内只能和一颗卫星进行通信,并且这颗卫星在这段时间内要在这个测控设备的可视范围内.为了简化模型,假设陆基设备没有故障,待测请求的开始时间、结束时间、重要性以及它与陆基设备的可见

关系已给定.

在一段时间内, s_1 颗近地卫星按自己的轨道运行形成 m_1 段待测控的卫星弧段, 时间起点和时间长度分别为 t_i 和 $T_i, i=1, 2, \dots, m_1$. s_2 颗同步卫星形成 m_2 段待测控的时段, 时间起点和时间长度分别为 t'_i 和 $T'_i, i=1, 2, \dots, m_2$. n 套分布于不同地理位置的陆基测控和数据接收设备, 设备的地理位置和类型决定了该设备是否能为某个近地卫星弧段或同步卫星时段提供服务.

定义 1. 陆基卫星测控资源优化调度问题.

陆基卫星测控资源优化调度问题就是通过合理调度 m_1 段近地卫星测控弧段和 m_2 个同步卫星待测时段与陆基测控设备之间的服务关系, 能最优地利用测控网, 同时尽量满足各个卫星的测控需求.

为方便表示, 下面是一些符号说明:

$T = \{0, 1, 2, \dots, 3600 \times 24, \dots, T\}$ 为一段时间内秒钟的集合.

S_i 表示序号为 i 的在轨卫星, $i=1, 2, \dots, s$, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}$ 为所有在轨近地卫星和同步卫星的集合.

A_j 是序号为 j 的陆基测控设备, $j=1, 2, \dots, n$, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 为所有陆基测控设备的集合.

P_k 为近地卫星弧段或同步卫星测控时段的优先级, $k=1, 2, \dots, l$, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_l\}$ 为所有优先级的集合.

$Z = S \times T \times T \times P$, $V = S \times T \times T \times P \times A$.

定义 2. 测控请求 z_i .

$z_i \in Z$ 且 $z_i = (S(z_i), Start(z_i), End(z_i), P(z_i))$, 表示在轨卫星 $S(z_i) \in S$ 在 $Start(z_i) \in T$ 到 $End(z_i) \in T$ 时间段内请求测控, 请求的优先级为 $P(z_i) \in P$.

定义 3. 测控任务 v_i .

$v_i \in V$ 且 $v_i = (S(v_i), Start(v_i), End(v_i), P(v_i), A(v_i))$, 表示一个测控任务, 即卫星 $S(v_i) \in S$ 在 $Start(v_i) \in T$ 到 $End(v_i) \in T$ 时间段内请求测控, 并被陆基测控设备 $A(v_i) \in A$ 可见. v_i 是一个 0-1 变量, 当 $v_i=1$ 时, 表示接受该任务, 即在 $End(v_i) - Start(v_i)$ 内 $A(v_i)$ 测控 $S(v_i)$, 当 $v_i=0$ 时, 表示拒绝该测控任务.

由定义 2、3 可知, 测控请求是相对卫星而言的; 测控请求和可见其的陆基设备一块组成一个测控任务. 由于同一测控请求, 在同一时刻可能有几个可见陆基设备, 因此, 测控任务数大于等于测控请求数.

3 面向任务的卫星测控资源优化调度问题的数学模型

本文建立的面向任务的陆基卫星测控资源优化调度问题的数学模型以测控任务为变量, 以使同一时刻一个测控设备只能与一颗卫星通信、同一卫星同一时刻只被一个可见陆基设备测控等为约束条件, 以最大化测控网总的权重测控时间为目标函数.

基于上述符号约定, 面向任务的陆基卫星测控资源优化调度问题的数学模型为

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^N v_i \times (Start(v_i) - End(v_i)) \times P(v_i) \\ \text{Subject to CURUWUQ} \end{cases} \quad (1)$$

即在满足约束的前提下, 完成最多的测控任务. 其中的参数定义如下:

N 表示所有的测控任务数.

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, C_k 表示陆基测控设备 A_k 在同一时刻最多只能测控一个航天器, 即

$$\begin{aligned} C_k = \{v_i + v_j \leq 1 \mid i \neq j \wedge A(v_i) = A(v_j) = \\ A_k \wedge \{Start(v_i) \cdots End(v_i)\} \cap \\ \{Start(v_j) \cdots End(v_j)\} \neq \emptyset\} \end{aligned} \quad (2)$$

$R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, R_k 表示对于测控请求 k , 不管同时能被几个测控设备可见, 最多只用一个陆基设备对其测控, 即

$$\begin{aligned} R_k = \{v_1 + v_2 + \cdots + v_{k'} \leq 1 \mid S(v_1) = S(v_2) = \cdots = S(v_{k'}) \wedge \\ Start(v_1) = Start(v_2) = \cdots = Start(v_{k'}) \wedge \\ End(v_1) = End(v_2) = \cdots = End(v_{k'}) \wedge \\ P(v_1) = P(v_2) = \cdots = P(v_{k'}) \wedge \\ A(v_1) \neq A(v_2) \neq \cdots = A(v_{k'})\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 k' 表示测控请求 k 对应的测控任务数, m 表示所有的测控请求的个数 $m \leq N$.

$W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$, W_k 表示陆基测控设备 A_k 在完成一个测控任务后, 至少经过 t_k 后, 才可开始另一个测控任务, 即

$$W_k = \{Start(v_i) - End(v_j) > t_k \mid \forall i, j, A(v_i) = A(v_j) = A_k \wedge Start(v_i) > Start(v_j)\} \quad (4)$$

其中 t_k 表示陆基测控设备 A_k 的设备切换时间.

$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_s\}$, Q_k 表示序号为 k 的在轨卫星在 T 时间内得到的测控时间要大于等于它的最短测控时间要求, 即

$$Q_k = \left\{ \sum_{S(v_i)=S_k} v_i \times [Start(v_i) - End(v_i)] \geq L_k \right\} \quad (5)$$

其中 s 表示在轨卫星的个数, L_k 为卫星 S_k 在时间 T

内要求的最短测控时间。

约束 C 、 R 和 W 是必须满足的,在下文我们称**强约束**;约束 Q 是尽量满足,在下文称**弱约束**。

该数学模型考虑了陆基测控设备之间的关系,避免不同测控设备在同一时刻测控同一卫星,浪费测控资源,为算法调度测控设备完成更多测控任务提供可能,但也要求算法把所有测控设备看作一个整体,考虑组成部分的关系,调度测控任务使整个测控网能完成更多的测控任务. 该问题为典型的 NP-Complete 问题^[7],因此本文考虑采用具有全局寻优能力的克隆选择算子的思想^[8],来解决陆基卫星测控资源优化调度问题。

4 基于面向任务模型的卫星测控资源克隆选择优化调度算法

免疫克隆选择算法^[9-12]是一种受免疫学中抗体克隆选择学说启发的新的智能算法. 在免疫克隆选择算法中,把随机产生的可行解看作抗体,依据抗体与抗原(问题)的亲密度,把一个抗体克隆成 q_i 个相同的抗体,经过变异和选择后产生进化的抗体群. 如此反复迭代,使抗体-抗原亲密度不断提高,逐步向最优抗体靠近。

4.1 编码方式

卫星测控资源优化调度问题是一个 0-1 规划问题,本文设计了基于矩阵的二进制编码方式. 首先按测控请求开始时间的迟早将测控请求排序并标号,而后将一行的测控请求扩展成 n 行,组成一个矩阵,使一列对应同一测控请求的不同任务,不存在的任务用 -1 代替;而一行对应一个陆基设备的所有测控任务,且按请求时间迟早排列. 一个个体的基因组成如下:

$$\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 $v_{ij} \in \{0, 1, -1\}$. $v_{ij} = 1$ 表示基站 A_i 被调度为该测控请求服务;而 $v_{ij} = 0$ 则表示基站 A_i 不为该测控请求服务. 若在该任务的时间段内, A_i 对提出该测控请求的卫星不可见,则 v_{ij} 只能取 -1 .

4.2 强约束满足算子设计

一个个体对应问题的一个解,但给除去 $v_{ij} = -1$ 的那些元素随机赋 0 或 1 得到的个体并不一定满足强约束,因此我们提出基于矩阵编码的强约束满足

算子. 强约束满足算子的操作对象是一个个体的基因,目的是解决同一时刻几颗不同的卫星请求同一陆基测控发生的冲突,并保证同一卫星的同一测控请求最多只被一个可见的陆基测控、测控设备有充足的切换时间. 主要思想是如果每个测控请求最多有一个测控设备对其测控,则依次调度测控设备以完成更多的测控任务. 否则随机地把 n 个陆基设备的顺序打乱,然后按照打乱的顺序操作每个设备对应的任务,这样可以保证同一测控请求被各个可见设备服务的概率相当. 对于每个设备对应的所有任务,如果发生冲突,按优先级服务,如果两个发生冲突的任务优先级相同,就考虑它们对应的卫星的约束满足情况,给还未满足约束的卫星的请求服务,如果两个卫星都满足约束或都不满足,则随机为一个服务。

强约束满足算子的步骤如算法 1,算法 1 中符号约定如下:

$lastindex$ 表示对一个测控设备而言,在当前已确定的开始时间最晚的任务的标号。

r 是一个长度为 n 的整数数组,对 $1, 2, \dots, n$ 这 n 个数随机排列,使每个数出现且仅出现一次。

V 是一个 $n \times m$ 的矩阵,表示一个个体的基因, v_{ij} 是矩阵 V 中的一个元素。

算法 1. 强约束满足算子.

输入: 一个个体的基因矩阵 V

输出: 一个个体的基因矩阵 V , 该个体满足强约束

for $i \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ do

$j = r[i]$

for $k \in \{0, 1, \dots, m-1\}$

if ($v_{jk} = 1$ & $j \in \{r[0] \cdots r[i-1]\}$)

$v_{jk} = 0$

endif

else if ($v_{jk} = -1$)

if(新来的任务 v_{jk} 与已分配的任务有冲突)

schedule ($j, lastindex, k$)

endif

else

$lastindex = k$

endif

end elseif

endfor

endif

schedule ($j, lastindex, k$)

if ($P(v_k) > P(v_{lastindex})$)

取消服务 $lastindex$ 对应的任务、服务 k 对应的任务

endif

else if ($P(v_k) == P(v_{lastindex})$)

```

if (j 和 lastindex 有且仅有一个任务对应的卫星
    已经满足最低测控要求)
    服务未满足测控要求的卫星对应的任务
endif
else
    随机为这两个任务中的一个服务
endelse
end elseif
else
    不服务 k 对应的任务
endelse

```

引理 1. 一个测控设备对应的任务按开始时间的迟早排序,且这个设备对应的基因段中标号为 $last$ 的任务及之前的各个任务都不冲突,若有与 $last$ 发生冲突的新任务,则解决该任务与 $last$ 之间的冲突,可使基因段表示新任务在内的所有任务,且都不发生冲突。

证明.

设新任务标号为 $index$,若新任务与 $last$ 发生冲突,即 $Start(v_{index}) < End(v_{last}) + t_k$, t_k 为该设备的切换时间,若舍弃新任务即对应的基因位赋 0,可得基因段表示新任务在内的任务都不发生冲突.若舍弃 $last$,而选择新任务,由于 $Start(v_{index}) \leq Start(v_{last})$,所以新任务不会与 $last$ 之前的任务发生冲突.故只要解决 $last$ 与 $index$ 之间的冲突,就可使基因段表示新任务在内的任务,且都不发生冲突.得证. 证毕.

定理 1. 一个个体经强约束满足算子操作后满足强约束.

证明.

强约束满足算子对于一个新来的任务,首先判断这个任务对应的测控请求,在这之前是否已有测控设备对该请求测控,如果有,强约束满足算子不会考虑再为该任务调度测控设备.这就保证对应相同请求的任务最多只被一个陆基设备测控.

强约束满足算子对于每个陆基设备对应的基因段,按任务的开始时间逐渐加入.初始状态是包含 0 个任务,加入第一个任务后,这个任务是不与别的任务发生冲突的.由引理 1 可得,只要保证按时间顺序逐个考虑这个陆基设备的任务,就可以保证修正后的基因段表示的任务是互不冲突的,即同一陆基设备在同一时刻最多只测控一颗卫星,且测控设备有足够的切换时间.由上可得:强约束满足算子可以保证操作后的个体满足强约束.得证. 证毕.

4.3 变异算子设计

变异算子是对个体的矩阵基因按行进行操作

的,也就是对每个陆基设备对应的任务操作的.变异算子操作如下:

$$M(v_{ij}) = \begin{cases} \hat{v}_{ij}, & v_{ij} \in \{0,1\} \wedge randp < \alpha/len_i \\ v_{ij}, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $randp$ 是 $(0,1)$ 内的随机数, α 是一个正常数,影响变异概率的大小,而 len_i 则是矩阵 V 中第 i 行中非-1 的个数,即第 i 行对应的陆基设备接到的总的请求的个数.

4.4 抗体-抗原亲和度函数设计

本文设计抗体-抗原亲和度函数为

$$fit(V) = \sum_{v_{ij}=1} v_{ij} \times (End(v_{ij}) - Start(v_{ij})) \times P(v_{ij}) - \beta \sum_k U_k \quad (8)$$

其中, β 是一个正的常数,表示不满足约束部分的惩罚系数,在本文取 β 为 10000. 而

$$U_k = L_k - \sum_{S(v_{ij})=k \wedge v_{ij}=1} v_{ij} \times (End(v_{ij}) - Start(v_{ij})) \quad (9)$$

表示对卫星 k 还差多少时间的测控就能满足最低测控要求.当已经满足后取 $U_k = 0$,不影响抗体-抗原亲和度函数的大小.

4.5 算法流程

本文所提的基于面向任务模型的卫星测控资源克隆选择优化调度算法流程如算法 2.

算法 2. 基于面向任务模型的陆基卫星测控资源克隆选择优化调度算法(CS_STT&CRSA).

1. 给定抗体群规模 M ,克隆规模 q ,影响变异概率的 α 取值及算法终止条件.随机产生初始抗体群 $A^{(1)} = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$,并对每个抗体执行强约束满足算子操作,产生抗体群 $B^{(1)} = \{b_1, b_2, \dots, b_M\}$.

2. 对抗体群 $B^{(k)}$ 执行克隆操作:

$$B^{(k)}(1) = Clone(B^{(k)}).$$

3. 对抗体群 $B^{(k)}(1)$ 执行变异操作:

$$B^{(k)}(2) = Mutation(B^{(k)}(1)).$$

4. 对抗体群 $B^{(k)}(2)$ 执行强约束满足算子操作:

$$B^{(k)}(3) = Amend(B^{(k)}(2)).$$

5. 对抗体群 $B^{(k)}(3)$ 执行选择操作:

$$B^{(k+1)} = Compress(B^{(k)}(3)).$$

6. 终止条件判断,如果条件满足,输出最优抗体,算法结束;否则转步 2.

上述算法的结束条件是最大迭代代数或最优值在一定代数内不改变.克隆操作、选择操作与文献[10]相同.

5 算法复杂度及收敛性分析

5.1 复杂度分析

算法 CS_STT&CRSA 的时间复杂度包括把任务请求编码成个体的时间复杂度和执行克隆选择算法的时间复杂度^[13]. 设在一段时间内, 测控请求数为 m , 任务数为 N , 陆基设备为 n , 而群体中抗体的个数为 M , 对每个个体的克隆规模设为 q , 执行克隆选择算法的代数为 g . 把任务编码成个体基因时, 要求把任务按开始时间的迟早排序, 时间复杂度为 $O(m \log m)$. 而对每个抗体克隆 q 个相同的抗体复杂度为 $O(m \times n \times q)$, 对每个抗体执行变异和强约束满足算子的复杂度为 $O(m \times n)$, 最后计算抗体亲和度以及选择操作的复杂度为 $O((M \times q) \times (m \times n))$, 由此可得执行一代免疫克隆选择算法的时间复杂度为 $O(M \times k \times m \times n)$, 算法 CS_STT&CRSA 总的时间复杂度为 $O(g \times M \times q \times (m \times n) + m \log m)$.

再分析算法 CS_STT&CRSA 的空间复杂度, 空间复杂度主要包括任务的存储和群体中个体的存储. 存储任务的空间为 $O(N)$, 而每个个体的空间复杂度为 $O(m \times n)$, 则算法 CS_STT&CRSA 的空间复杂度为 $O(N + M \times q \times m \times n)$.

5.2 收敛性分析

定义 4^[14]. 设 $X^{(k)} = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 表示算法在 k 代的一个种群, 如果当且仅当 $\lim_{k \rightarrow \infty} P\{X^{(k)} \cap B^* \neq \emptyset | X^{(0)}\} = 1$, B^* 是最优抗体集, 则称算法以概率 1 收敛于最优种群集. 即表示算法迭代到足够多的代数后, 种群中包含全局最优抗体的概率接近 1.

引理 2. 强约束满足算子不破坏全局最优抗体.

证明.

设抗体 O 是最优抗体, 则 O 满足约束, 即同一卫星同一时刻只被一个陆基测控设备测控, 陆基设备所测控的任务不发生冲突.

由于同一卫星同一时刻只被一个陆基测控设备测控, 因此抗体 O 对应的矩阵每列最多有一个元素为 1, 所以在执行强约束满足算子时, 无论怎么打乱陆基测控设备的顺序, 在调度当前陆基设备对应的测控任务时都不会因为此卫星已被别的设备调度而改变当前设备对该测控任务的状态, 因此在执行强约束满足算子时, 每个陆基设备都是独立的, 相互之间不干扰. 另外由于每个陆基设备对应的测控任务都不发生冲突, 因此强约束满足算子不执行 $\text{schedule}(j, \text{lastindex}, k)$ 子函数, 所以每个陆基测

控设备对应的任务状态都不会改变, 矩阵每行都不改变. 因此强约束满足算子不破坏全局最优抗体. 得证. 证毕.

定理 2. 算法 CS_STT&CRSA 种群中任意抗体经变异算子和强约束满足算子一步操作后, 成为全局最优抗体的概率大于 0.

证明. 设抗体 O 是最优抗体, 抗体 B 是最差抗体, 则抗体 B 与抗体 O 每位都相反; $P'(O|B)$ 表示抗体 B 经变异算子一步操作后, 与抗体 O 完全一样的概率; 而 $P(O|B)$ 表示抗体 B 经变异算子和强约束满足算子一步操作后, 与抗体 O 完全一样的概率, 则

$$P'(O|B) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\alpha}{\text{len}_i} \right)^{\text{len}_i} \quad (10)$$

其中 len_i 表示抗体 B 对应的矩阵中第 i 行非 1 的个数, 即第 i 行对应的陆基设备可见的测控请求数, 可知 $\text{len}_i > 0$. 而 α 是影响变异概率的一个正常数, 因此 $P'(O|B) > 0$.

由引理 2 知, 最优抗体经强约束满足算子操作后保持不变, 可得 $P(O|B) \geq P'(O|B) > 0$.

最差抗体经变异算子和强约束满足算子一步操作后转移成最优抗体的概率大于 0, 因此种群中任意抗体经变异算子和强约束满足算子一步操作后, 成为问题最优解的概率大于 0. 得证. 证毕.

定理 3. 算法 CS_STT&CRSA 以概率 1 收敛.

证明. 记 $P_0(k) = P\{X^{(k)} \cap B^* = \emptyset\} = P\{\vartheta(X^{(k)}) = 0\}$, 由贝叶斯条件概率公式得 $P_0(k+1) = P(\vartheta(X^{(k+1)}) = 0) =$

$$P(\vartheta(X^{(k+1)}) = 0 | \vartheta(X^{(k)}) \neq 0) \times P(\vartheta(X^{(k)}) \neq 0) + P(\vartheta(X^{(k+1)}) = 0 | \vartheta(X^{(k)}) = 0) \times P(\vartheta(X^{(k)}) = 0) \quad (11)$$

由算法保持最优抗体可知: $P(\vartheta(X^{(k+1)}) = 0 | \vartheta(X^{(k)}) \neq 0) = 0$, 故

$$P_0(k+1) = P\{\vartheta(X^{(k+1)}) = 0 | \vartheta(X^{(k)}) = 0\} \times P_0(k) \quad (12)$$

由定理 2 知: $P\{\vartheta(X^{(k+1)}) > 0 | \vartheta(X^{(k)}) = 0\} \geq P'(O|B) > 0$, 所以

$$\begin{aligned} & P\{\vartheta(X^{(k+1)}) = 0 | \vartheta(X^{(k)}) = 0\} \\ &= 1 - P\{\vartheta(X^{(k+1)}) \neq 0 | \vartheta(X^{(k)}) = 0\} \\ &= 1 - P\{\vartheta(X^{(k+1)}) > 0 | \vartheta(X^{(k)}) = 0\} \\ &\leq 1 - P'(O|B) < 1 \end{aligned} \quad (13)$$

因此

$$\begin{aligned} 0 \leq P_0(k+1) &\leq (1 - P_0(O|B)) \times P_0(k) \\ &\leq (1 - P_0(O|B))^2 \times P_0(k-1) \dots \\ &\leq (1 - P_0(O|B))^{k+1} \times P_0(0) \end{aligned} \quad (14)$$

又因为 $\lim_{k \rightarrow \infty} (1 - P'(O|B))^{k+1} = 0, 0 \leq P_0(0) \leq 1$, 所以

$$0 \leq \lim_{k \rightarrow \infty} P_0(k) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} (1 - P'(O|B))^{k+1} \times P_0(0) = 0 \quad (15)$$

故

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_0(k) = 0 \quad (16)$$

因此可得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P\{X^{(k)} \cap B^* \neq \emptyset | X^{(0)}\} = 1 - \lim_{k \rightarrow \infty} P_0(k) = 1 \quad (17)$$

所以由定义 3 知:算法 CS_STT&CRSA 以概率 1 收敛. 得证. 证毕.

6 仿真对比实验及分析

6.1 仿真数据

在模拟卫星提出测控请求之前,对于近地卫星,先规定一次测控的最长和最短时间、一颗卫星在一天内要测控的最多和最少次数以及测控事件的最长和最短间隔,并在此基础上为每颗近地卫星随机产生一个测控请求数、一次测控的最长和最短时间、测控事件的最长和最短间隔.而后在满足这些约束的条件下,为每颗卫星产生要求次数的请求弧段,并对每个请求弧段赋优先级和可见的测控设备,组成测控任务.对于同步卫星,只要规定测控时段即可.

本文假设陆基测控设备是 5 套,同步卫星为 5 颗,在轨近地卫星分别是 30、40、50 颗,请求的优先级为 1~5,数值大表示优先级高.要求测控的 5 颗同步卫星被 5 套陆基设备 24h 可见,每颗同步卫星总的请求数是 20,请求平均时段为 1200s.在轨近地卫星分别为 30、40 和 50 颗时,10 组测控请求的统计数据列于表 1~表 3.所有测控设备的切换时间规定为 90s.

表 1 在轨近地卫星为 30 颗时,10 组不同任务的数据特征

任务标号	请求总数	任务总数	卫星的平均请求数	平均请求测控时间/s	弧段可见的平均基站数
1	202	359	6.73	851.97	1.78
2	197	327	6.56	859.84	1.66
3	199	339	6.63	895.68	1.70
4	187	310	6.23	870.29	1.66
5	205	340	6.83	818.15	1.66
6	192	315	6.40	895.82	1.64
7	178	303	5.93	881.88	1.70
8	201	336	6.70	918.51	1.67
9	177	291	5.90	897.62	1.64
10	212	377	7.07	870.17	1.79

表 2 在轨近地卫星为 40 颗时,10 组不同任务的数据特征

任务标号	请求总数	任务总数	卫星的平均请求数	平均请求测控时间/s	弧段可见的平均基站数
1	260	452	6.5	854.47	1.74
2	261	439	6.53	912.01	1.68
3	260	447	6.5	948.50	1.72
4	266	463	6.65	845.04	1.74
5	234	371	5.85	900.34	1.59
6	260	447	6.5	890.37	1.72
7	272	463	6.8	929.63	1.70
8	254	419	6.35	906.12	1.65
9	270	477	6.75	916.63	1.76
10	245	416	6.13	970.04	1.70

表 3 在轨近地卫星为 50 颗时,10 组不同任务的数据特征

任务标号	请求总数	任务总数	卫星的平均请求数	平均请求测控时间/s	弧段可见的平均基站数
1	337	563	6.74	908.27	1.67
2	341	554	6.82	908.05	1.62
3	316	520	6.32	828.20	1.65
4	306	511	6.12	856.38	1.67
5	340	561	6.80	947.86	1.65
6	338	544	6.76	876.78	1.61
7	334	551	6.68	891.71	1.65
8	350	591	7.00	816.12	1.69
9	335	542	6.70	953.54	1.62
10	337	565	6.74	915.63	1.68

6.2 算法比较及分析

为了验证所提模型及算法的有效性,比较了传统算法(CA_STT&CRSA)、基于面向任务模型的陆基卫星测控资源优化调度遗传算法(GA_STT&CRSA)及本文所提算法(CS_STT&CRSA)的调度结果.传统算法不考虑陆基设备之间的关系,只考虑解决同一陆基设备接到的冲突任务,冲突解决方法采用本文所提的强约束满足算子中的冲突解决方法,同样随机排列基站,然后调度每个基站对应的任务,不考虑这一任务对应的测控请求是否已被别的基站测控.而算法 GA_STT&CRSA 按标准遗传算法^[15]框架执行.交叉算子按行操作,两个父体的矩阵基因中同一行的基因按标准遗传算法中的单点交叉法交叉,产生两个后代的矩阵基因对应的那一行.按式(7)计算个体的适应度值,如果有个体的适应度值为负,则把它们的适应度值映射到一个新的正区间辅助选择操作的执行.映射函数如下:

$$map(x) = \begin{cases} \lambda \times x, & x > 0 \\ (1 + \epsilon) P_{\min} - x \times \frac{P_{\min}}{N_{\min}}, & x \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\lambda > 1$ 表示对正数的放大倍数, ϵ 表示一个很小的正数,使最小适应度值映射后大于 0, P_{\min} 和 N_{\min} 分别表示群体中最小的正适应度值和最小的负适应度值.上式保证了负的适应度映射值小于正的适应

度映射值,而越小的适应度的映射值也越小,基本能反映群体中个体的竞争力.若群体中,所有个体的适应度值均小于 0,则采用如下的映射函数:

$$\text{map}(x) = -1 \times N_{\min} + x + \epsilon \quad (19)$$

本文参数设置如下:算法 CS_STT&CRSA 中初始抗体数为 20,克隆规模为 30, α 为 5.算法 GA_STT&CRSA 初始群体中个体数为 600,个体每行交叉概率为 0.2,每位变异概率为 0.1.两个算法的最大执行代数都是 10000,如果 500 代内最优

解不改变,算法结束.

对于 6.1 节中每组给定的任务都独立运行这 3 个算法 30 次,统计结果如表 4、表 5 和表 6.其中,ST 表示测控网总的平均权重测控时间,cons 表示未满足约束的卫星还要求测控的平均时间,gen 表示算法运行的平均代数,time 表示算法实际运行所耗的平均时间.ST、cons 及 time 的单位都是 min.为了更直观地比较 3 个算法的计算结果,将表 4~表 6 中的部分数据分别表示成图 1、图 2 和图 3.

表 4 同步卫星为 5 颗,在轨近地卫星为 30 颗,CA_STT&CRSA、GA_STT&CRSA、CS_STT&CRSA 调度结果的比较

	CA_STT&CRSA		GA_STT&CRSA				CS_STT&CRSA			
	ST	cons	ST	cons	gen	time	ST	cons	gen	time
1	9237.79± 164.26	360.92± 40.08	11888.14± 38.26	0.00± 0.00	869.07± 299.20	3.85± 1.29	12015.63± 12.66	0.00± 0.00	1087.47± 289.29	5.44± 1.46
2	9677.68± 181.57	485.57± 46.22	11945.78± 87.88	3.38± 1.88	875.07± 306.27	3.87± 1.33	12000.50± 49.58	0.20± 0.28	952.07± 274.92	4.08± 1.22
3	9488.05± 168.41	526.94± 49.78	11901.27± 85.43	25.22± 4.03	854.33± 182.00	3.69± 0.76	12026.70± 44.08	15.53± 0.34	1245.07± 405.79	4.66± 1.51
4	8841.33± 193.82	317.34± 49.25	10905.92± 44.62	4.88± 0.00	826.20± 339.47	3.54± 1.45	11019.44± 15.79	4.88± 0.00	955.07± 302.92	3.39± 1.07
5	8966.90± 209.72	452.45± 57.98	11267.90± 56.76	0.00± 0.00	910.10± 302.33	4.13± 1.37	11495.24± 34.57	0.00± 0.00	1117.20± 455.11	4.26± 1.74
6	9733.69± 175.96	336.12± 48.71	11905.30± 60.72	0.00± 0.00	759.73± 229.25	3.26± 0.98	12088.62± 50.08	0.00± 0.00	1061.80± 502.98	3.83± 1.82
7	8461.07± 186.86	440.42± 62.91	10479.43± 74.71	3.39± 1.28	864.03± 251.64	3.59± 1.04	10601.77± 29.00	2.13± 0.00	927.10± 233.68	3.24± 0.82
8	10376.97± 250.66	393.99± 53.33	12858.98± 100.41	12.26± 2.99	830.93± 324.54	3.76± 1.46	12857.09± 91.25	8.84± 3.81	1098.37± 394.21	4.03± 1.44
9	9239.28± 226.05	363.75± 49.13	11998.62± 109.51	13.20± 3.91	876.47± 295.77	3.89± 1.42	12137.80± 35.79	6.01± 1.09	1280.47± 465.09	4.50± 1.63
10	10361.95± 236.20	573.52± 62.26	12896.92± 72.55	24.41± 4.21	905.73± 367.24	4.96± 1.99	13022.02± 27.39	13.38± 1.12	1322.07± 512.33	5.03± 1.86

表 5 同步卫星为 5 颗,在轨近地卫星为 40 颗,CA_STT&CRSA、GA_STT&CRSA、CS_STT&CRSA 调度结果的比较

	CA_STT&CRSA		GA_STT&CRSA				CS_STT&CRSA			
	ST	cons	ST	cons	gen	time	ST	cons	gen	time
1	10488.79± 182.61	680.03± 61.14	13269.81± 111.87	50.06± 5.64	899.47± 282.35	4.77± 1.46	13303.37± 74.90	31.33± 3.34	1433.20± 606.77	8.19± 3.46
2	11533.47± 231.46	644.88± 58.69	14391.10± 136.46	34.67± 4.58	817.57± 251.34	4.35± 1.33	14495.78± 133.60	7.38± 0.51	1104.73± 404.87	4.74± 1.74
3	11804.46± 304.71	804.18± 53.26	14719.76± 197.93	139.85± 11.16	837.87± 396.15	4.62± 2.18	14744.84± 132.78	100.71± 8.82	1124.43± 417.14	4.94± 1.83
4	10683.46± 286.69	641.05± 44.11	13661.25± 103.55	46.30± 6.12	973.37± 286.88	5.25± 1.54	13725.65± 137.86	30.60± 4.93	910.70± 380.07	4.07± 1.69
5	10474.15± 219.52	596.65± 50.03	12899.06± 74.51	64.34± 6.12	833.57± 278.26	4.06± 1.34	12990.00± 84.05	46.22± 4.45	1056.10± 379.62	4.26± 1.53
6	10814.26± 197.80	834.34± 59.39	13544.07± 145.26	103.48± 6.93	899.33± 252.24	4.68± 1.30	13525.30± 96.89	56.30± 5.91	1152.47± 383.01	4.47± 1.55
7	10369.28± 245.06	631.34± 50.22	13380.17± 147.02	49.95± 5.34	901.40± 247.33	4.84± 1.32	13381.60± 115.45	36.32± 5.97	1048.40± 371.10	4.67± 1.65
8	10703.68± 266.24	689.47± 68.09	13628.98± 110.52	57.78± 5.10	859.97± 274.96	5.07± 1.59	13709.75± 89.02	54.98± 2.95	883.17± 300.83	3.85± 1.31
9	10909.93± 249.57	799.80± 55.54	14341.30± 101.13	71.07± 5.03	828.03± 307.59	5.42± 1.28	14334.86± 103.75	36.22± 5.65	1189.87± 513.18	5.41± 1.74
10	10158.60± 224.11	899.19± 60.39	12965.47± 129.09	133.11± 7.70	933.73± 331.72	3.60± 2.02	13003.78± 113.71	85.47± 5.14	1071.90± 406.99	4.58± 2.33

表 6 同步卫星为 5 颗,在轨卫星为 50 颗,CA_STT&CRSA、GA_STT&CRSA、CS_STT&CRSA 调度结果的比较

	CA_STT&CRSA			GA_STT&CRSA				CS_STT&CRSA			
	ST	cons		ST	cons	gen	time	ST	cons	gen	time
1	11493.94± 240.11	1055.72± 77.21		15021.92± 130.73	163.76± 8.84	937.90± 301.63	4.62± 1.45	15006.71± 111.77	109.38± 8.18	1225.77± 439.60	6.56± 2.32
2	12434.78± 264.07	1062.21± 83.87		15875.07± 126.93	192.15± 9.41	939.43± 352.93	4.82± 1.97	15998.12± 111.96	107.23± 10.15	1906.07± 656.74	10.37± 3.60
3	10470.96± 254.77	871.70± 62.92		13781.08± 114.63	104.57± 6.57	911.40± 296.02	4.59± 1.45	13752.95± 108.67	62.27± 5.79	1299.07± 549.04	6.98± 2.96
4	10826.35± 228.41	811.89± 59.96		14012.60± 122.94	99.47± 6.71	899.90± 382.23	4.40± 1.85	14059.77± 88.06	84.87± 5.83	1021.30± 418.36	5.42± 2.22
5	12344.65± 272.84	1409.94± 70.43		15917.04± 141.77	346.24± 10.64	974.70± 350.32	4.97± 1.78	16102.49± 118.50	249.56± 16.82	1393.00± 542.96	6.89± 2.58
6	12247.79± 268.26	690.60± 47.16		15143.95± 148.03	78.10± 7.77	965.37± 283.88	4.85± 1.42	15320.03± 115.41	23.20± 6.72	1325.03± 419.23	6.29± 1.99
7	12237.51± 311.09	655.71± 73.50		14963.00± 155.78	51.93± 5.94	789.77± 298.88	4.17± 1.56	15039.94± 111.82	19.48± 2.54	1165.23± 380.96	6.25± 2.06
8	11520.15± 241.93	726.38± 59.80		14392.19± 143.94	88.95± 6.49	903.50± 220.06	5.65± 1.38	14452.52± 88.03	37.81± 7.10	1257.47± 443.71	6.95± 2.48
9	11635.18± 266.76	990.51± 68.90		14986.43± 136.20	121.67± 15.52	828.33± 298.23	4.83± 1.73	15202.59± 139.04	56.89± 12.85	1214.93± 474.88	6.78± 2.65
10	12773.88± 273.64	779.99± 65.50		16232.95± 151.81	67.60± 8.02	915.43± 278.49	4.21± 1.32	16278.86± 139.29	27.79± 4.26	1313.60± 524.31	7.33± 2.92

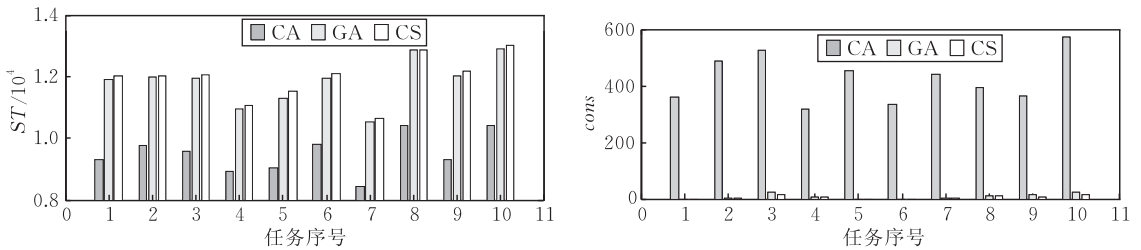


图 1 同步卫星为 5 颗,在轨卫星为 30 颗时,CA_STT&CRSA、GA_STT&CRSA、CS_STT&CRSA 的 ST、cons 比较

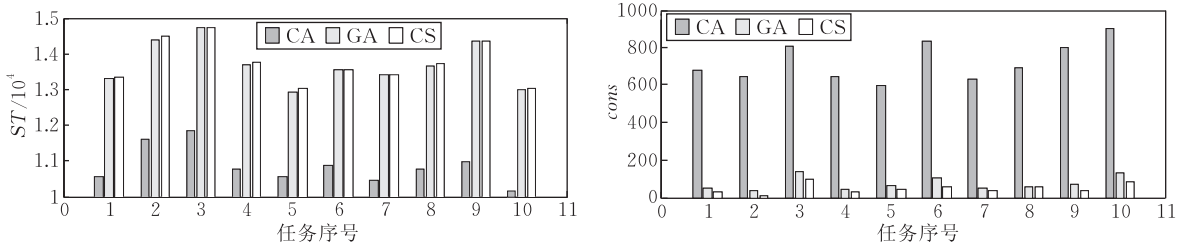


图 2 同步卫星为 5 颗,在轨卫星为 40 颗时,CA_STT&CRSA、GA_STT&CRSA、CS_STT&CRSA 的 ST、cons 比较

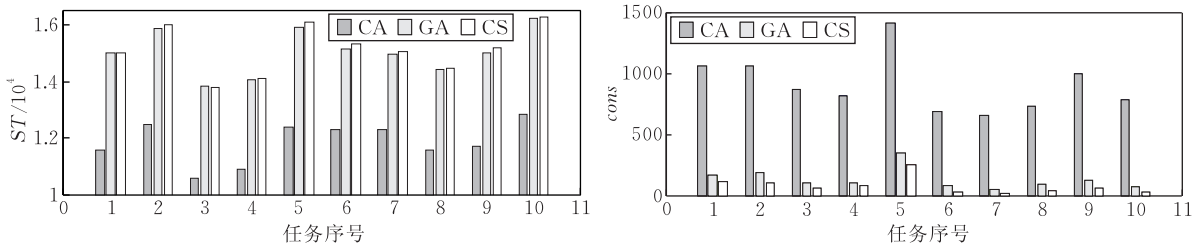


图 3 同步卫星为 5 颗,在轨卫星为 50 颗时,CA_STT&CRSA、GA_STT&CRSA、CS_STT&CRSA 的 ST、cons 比较

从图 1、图 2 和图 3 中,可以很容易发现,传统算法 CA_STT&CRSA 在找最优解上,比算法 GA_STT&CRSA 和算法 CS_STT&CRSA 都差,

在解决约束问题上,也远差于采用本文模型的这两个算法。实验结果表明,考虑同一测控请求在同一时刻可能被不同的陆基设备所见,可更好地调度陆基

设备,完成更多的测控任务.可见,所提面向任务的数学模型可使算法更合理地调度陆基测控设备,完成更多的测控任务.

比较算法 GA_STT&CRSA 和算法 CS_STT&CRSA 的运行结果可得,当在轨卫星为 35 颗,任务数比较少时,两个算法解决约束问题的能力相当,而在找最优解方面,算法 CS_STT&CRSA 找到的最优解大都略好于算法 GA_STT&CRSA 找到的;当在轨卫星为 45、55 颗,调度任务比较复杂时,不管从解决约束问题上,还是比较二者找到的最优解,CS_STT&CRSA 都明显优于算法 GA_STT&CRSA,而且 CS_STT&CRSA 结果的方差都远小于 GA_STT&CRSA 的.在算法实际运行代数方面,算法 GA_STT&CRSA 的进化代数大都少于算法 CS_STT&CRSA 的进化代数.对于算法实际运行所耗的时间,由于两个算法总的迭代代数不同,总耗时间在同一数量级上,基本能满足实际工程中的需要.如果遇到突发事件,系统可以限制算法的运行时间和迭代次数,得到一个满意解.

综合上面对寻找最优解、解决约束问题以及实际进化代数等方面的分析,算法 GA_STT&CRSA 较早收敛到局部最优解,更易出现早熟问题,算法 CS_STT&CRSA 寻找最优解和解决约束问题能力都强于算法 GA_STT&CRSA,能调度测控设备完成更多的测控任务,而且性能也更加稳定.

7 结 论

(1) 本文建立了一个面向任务的卫星测控资源优化调度数学模型,考虑测控网中不同测控设备之间的关系,把所有测控设备看作一个整体.实验结果表明所提数学模型能使调度算法调度测控设备完成更多的测控任务.

(2) 本文针对卫星测控资源优化调度问题,提出了适合问题的矩阵编码,很好地表示了各测控任务的时间先后关系及各任务与测控设备的关系.

(3) 本文所提的强约束满足算子保证一个测控设备同一时间只与一颗卫星通信,同一测控请求只被一个测控设备测控,使个体经强约束满足算子操作后,满足问题的强约束.

(4) 基于面向任务模型的卫星测控资源克隆选择优化调度算法有更强的搜索能力和解决约束问题能力,能调度测控设备完成更多的测控任务,性能也更加稳定.

(5) 两颗中继卫星和一个地面测控站就可组成新的航天测控网,可以取代配置在世界各地由许多陆基测控站构成的航天测控网,故中继卫星和地面测控资源有很多区别.随着我国第一颗中继卫星的成功发射,调度由两颗中继卫星和一个地面测控站组成的新航天测控网以及综合调度陆基、天基卫星测控设备是我们下一步的工作.

参 考 文 献

- [1] Zhai Zheng-An, Tang Chao-Jing. Scheduling algorithm to balance the space TT&C network. Chinese Space Science and Technology, 2006, (4): 55-60(in Chinese)
(翟政安, 唐朝京. 航天测控网资源均衡分配的调度方法. 中国空间科学技术, 2006, (4): 55-60)
- [2] Yang Yong-An, Fan Heng-Hai et al. Simulation & realization of satellite TT&C resources scheduling based on event scheduling method. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(4): 982-985(in Chinese)
(杨永安, 樊恒海等. 一种基于 ES 法的卫星测控资源调度仿真及实现. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 982-985)
- [3] Gratch J, Chien S. Adaptive problem-solving for large-scale scheduling problems: A case study. Journal of Artificial Intelligence Research, 1996, 4: 365-396
- [4] Pemberton J C, Flavius Galiber I. A constraint-based approach to satellite scheduling. DIMACS: Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 2001, 57: 101-114
- [5] Frank Jeremy, Jonsson Ari et al. Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites//Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Montreal, Canada, 2001: 16-22
- [6] Wolfe W J, Sorensen S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain. Management Science, 2000, 46(1): 148-168
- [7] Motta Enrico, Rajpathak Dnyanesh et al. The epistemology of scheduling//Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence. Lyon, France, 2002: 215-219
- [8] Bonissone P P, Subbu R et al. Evolutionary algorithm + domain knowledge = real-world evolutionary computation. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 256-280
- [9] Du Hai-Feng, Gong Mao-Guo et al. Immune memory clonal programming algorithm for high-dimensional function numerical optimization. Progress in Natural Science, 2004, 14(8): 925-933(in Chinese)
(杜海峰, 公茂果等. 用于高维函数优化的免疫记忆克隆规划算法. 自然科学进展, 2004, 14(8): 925-933)
- [10] Jiao Li-Cheng, Du Hai-Feng et al. Clonal optimization computation, learning and recognition. Beijing: Science Press, 2006(in Chinese)

(焦李成, 杜海峰等. 免疫优化计算、学习与识别. 北京: 科学出版社, 2006)

- [11] de Castro L N, Von Zuben F J. Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Special Issue on Artificial Immune Systems, 2002, 6(3): 239-251
- [12] Hou Cuiqin, Jiao Licheng et al. Clone selection based multicast routing algorithm//Proceedings of the 1st International Conference on Natural Computation. Changsha, China, 2005: 768-771
- [13] Oliverto P S, He J et al. Time complexity of evolutionary

algorithms for combinatorial optimization: A decade of results. *International Journal of Automation and Computing*, 2007, 4(3): 281-193

- [14] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, 5(1): 96-101
- [15] Chen Guo-Liang, Wang Xu-Fa et al. *Genetic Algorithms and Its Applications*. Beijing: Posts & Telecom Press, 1996 (in Chinese)
- (陈国良, 王煦法等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996)



HOU Cui-Qin, born in 1983, Ph. D. candidate. Her current research interests include structural data learning, semi-supervised learning, feature selection, data mining and so on.

JIAO Li-Cheng, born in 1959, professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include intelligent computation, machine learning, intelligent information processing and so on.

Background

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China with the title “Kinetic Models of Artificial Immune Systems and Their Applications in Intrusion Detection”, the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China with the title “High-Performance Optimal Computation Models Based on Organizational Evolution and Immune Kinetics and Their Key Techniques” and the Program for Cheung Kong Scholars and Innovative Research Team in University with the title “Intelligent Information Processing”.

The problem of the land-based satellite tracking telemetry and command (TT&C) resources scheduling is of importance to the development of aeronautic and space cause. The problem is a typical constraint optimal problem. It is related to the constraints of satellites and land-based satellite TT&C resources. It also relates to the visible relationships between satellites and land-based satellite TT&C resources. This problem has appealed to many researchers. Zhai and Tang consider the balance of each station and propose a balanced scheduling algorithm. However, they do not give a mathematic model for the problem and the proposed algorithm is prone to trap in a local optimal solution. Yang et al. study the satellite TT&C resources scheduling strategies by use of one of the discrete event system simulation methods, the

Event Scheduling (ES) method, and propose the mathematical models. However, the models focus only on the conflict of individual ground stations. Gratch et al. investigate adaptive problem solver and take the problem of scheduling the Deep Space Network (DSN) 26-meter subnet as example. They formulate the problem. However, the formulation lets the time periods specifying all temporal intervals when a satellite can legally communicate with an antenna be the variables. The formulation does not consider the constraint that a satellite to be tracked and commanded by only a visible ground station and the priorities of orbits. This paper proposes a novel model, the mission oriented model, for the land-based satellite tracking telemetry and command (TT&C) resources scheduling problem. The model constrains a satellite to be tracked and commanded by only a visible ground station to make better use of ground stations. This paper also proposes a global optimization method based on the clonal selection operator to solve the problem.

Authors have made researches on fields of evolutionary computation, such as immune clonal evolutionary algorithms and so on, and have applied these algorithms to many engineering problems, such as the multicast routing problem and so on.