

# 基于业务类型的微波与激光混合链路中继 卫星接入控制

赵卫虎 赵尚弘 赵 静 邓博于 东 晨 李勇军 董 毅

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 针对用户星数据中继接入请求超额订购问题,分析了用户星业务种类,研究了中继卫星接入控制所受多类约束的特点,建立了约束满足模型;以接入业务总优先级权值最高为原则,根据业务的类型、时间有效性和业务优先级设置链路接入灵活度和业务冲突集,以业务的接入顺序和选择接入的中继星链路为优化对象,提出了一种基于业务类型和自适应小窗口蚁群算法双层优化的中继卫星混合链路接入控制算法。仿真实验表明,所建模型可实现多类型业务与多种类天线的接入控制,提出的双层优化算法较单层寻优效果更佳,且具有较快的收敛速度和较强的全局优化能力,因而所提算法可有效解决多约束条件下多业务类型、多种类天线和多中继星的接入控制问题。

**关键字** 光计算; 中继卫星; 接入控制; 业务类型; 蚁群算法

**中图分类号** TP390 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0208005

## Access Control Algorithm of Data Relay Satellite with Microwave and Laser Hybrid Links based on Jobs Type

Zhao Weihu Zhao Shanghong Zhao Jing Deng Boyu Dong chen  
Li Yongjun Dong Yi

*School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shannxi 710077, China*

**Abstract** According to oversubscribed requests problem of user satellite for data relay access, the types of job and the features of the multi-constraint of access control are studied. A constraint satisfaction model is established based on it. The link access flexibility and jobs' conflict set are set according to the jobs type, valid time and priority setting. To maximize the number of priority weighted jobs, an access control algorithm of data relay satellite with microwave and laser hybrid links is introduced. The double-layer optimization hybrid links algorithm is based on the jobs type and adaptive small-window ant colony algorithm. The sequence of jobs access and the selection of relay satellite link are set as optimization objects. Simulation results show that the model can realize multi-type jobs access control efficiently. The proposed double-layer optimization algorithm is better than the single-layer optimization, and it is with a faster convergence speed and better global optimization ability. So the proposed algorithm can effectively solve the multi-type jobs with multi-constraint, multi-antenna and multiple relay satellites access control problem.

**Key words** optics in computing; relay satellite; access control; job type; ant colony algorithm

**OCIS codes** 200.2605; 200.3050; 200.3760

收稿日期: 2014-07-15; 收到修改稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61271250)、中国博士后科学基金(2012M512066)

作者简介: 赵卫虎(1986—),男,博士研究生,主要从事卫星通信方面的研究。E-mail: zhaoweihuandy@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星通信与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

## 1 引言

随着深空探测、遥感遥测、高分辨率对地观测等领域的不断发展,多种类型的星间数据中继业务需求不断增加,中继卫星系统的超额订购和接入冲突问题日益突出<sup>[1-3]</sup>。通常中继卫星的天线资源稀缺,且星间微波与激光链路的接入无法像地面网络一样频繁切换。一旦用户星接入某中继星进行数据中继传输,则将较长时间占用该资源直到业务完成。若采用先到先服务的原则,则因星间可见时间和数据有效时限的约束导致大量重要的和紧急的业务将无法完成。

由于卫星活动计划性很强,其业务产生的时间和数据量可预先确定<sup>[4-5]</sup>,因此可根据数据业务类型及重要程度,结合由卫星轨道限制的星间可见时间约束,确定用户星接入数据中继卫星的先后顺序及接入的资源类型。因此,数据中继卫星的接入控制问题即为其微波与激光链路的资源调度问题。针对此问题,国内外学者提出了不少解决方案。文献[6-7]采用并行机调度理论对美国的数据中继卫星系统调度问题进行研究,模型分析了两个时间窗口的调度特点。文献[8]基于约束满足模型,对数据中继卫星调度问题进行建模,并采用约束满足理论进行求解,提供了数据中继卫星单址链路调度问题的一种解决方案。文献[9]分析了数据中继卫星动态调度问题,采用动态扩展或删除树搜索算法求解。文献[10]研究了卫星通信的调度、优化和去冲突的一些原则和方法,对实例进行了深入分析,然而其算法优化效率相对较低。文献[11]针对微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度问题,建立调度规划模型,并仿真验证了算法有效性。

目前,关于卫星链路的接入控制问题的研究,主要针对宽带卫星通信网络的多址接入问题<sup>[12]</sup>,而关于用户星对中继卫星的接入控制问题,主要针对单中继星微波链路的调度,并未针对用户星业务类型和微波与激光链路的接入特点进行研究。针对此研究现状,本文以完成业务总优先级权值最高为原则,结合业务的类型和时间有效性,以业务的接入顺序和选择接入的中继星链路为优化对象,提出了一种基于业务类型和自适应小窗口蚁群算法双层优化的中继卫星混合链路接入控制算法。最后,以包含多种业务类型的多颗用户星和3颗中继星为仿真场景,采用对比实验,验证本算法在收敛速度、接入控制方面性能。

## 2 混合链路中继卫星系统接入控制问题建模

### 2.1 混合链路中继卫星系统特征

如图1所示,中低轨卫星(MEO/LEO)在不同时段将生成多种类型的数据中继业务,由于新型对地高分辨率遥感器的数据采集能力已达到太比特量级,传统的星间微波链路数据传输技术难以满足其需求。星间激光链路数据中继技术具有速率高、容量大、功耗低和体积小等优势<sup>[13-14]</sup>,而微波链路具有技术成熟、应用广泛和快速接入的特点,故未来星间高速可靠数据中继网络必然呈现微波与激光链路并存的局面。

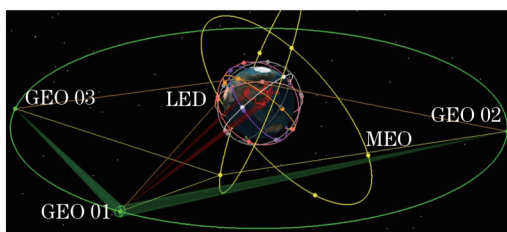


图1 多用户星接入三颗中继卫星场景

Fig.1 Multi-user-satellite access to three data relay satellites

### 2.2 用户星数据中继业务特点

未来用户星的业务种类繁多,主要分为以下几类:

- 1) 从业务数据容量上分为超大容量( $q > 0.1$  Tbit)、大容量( $10 \text{ Gbit} < q \leq 0.1$  Tbit)、中等容量( $1 \text{ Gbit} < q \leq 10 \text{ Gbit}$ )、小容量( $100 \text{ Mbit} < q \leq 1 \text{ Gbit}$ )、微小容量( $q \leq 100 \text{ Mbit}$ );
- 2) 从业务数据有效时限上分为实时数据( $t < 1$  s)、紧急数据( $t < 120$  s)、短期数据( $t < 2$  h)、中期数据( $t < 12$  h)、长期数据( $t < 24$  h);
- 3) 从业务数据重要程度上分为特别重要( $8 < P_n \leq 10$ )、很重要( $6 < P_n \leq 8$ )、较重要( $4 < P_n \leq 6$ )、重要( $2 < P_n \leq 4$ )、普通( $0 < P_n \leq 2$ )。

### 2.3 模型建立

用户星接入中继卫星混合链路进行数据中继传输时存在较多约束,主要包括:

1) 可见时间窗口和业务有效性约束:数据中继活动只能在用户星与中继星之间直视可见的时段进行,且必须在数据的有效时间范围内完成;

2) 星上天线终端约束:由于光终端体积小、功耗低,因此未来用户星上可装载一副微波天线终端和一副激光终端,设用户星只能选择一个天线与一个中继星进行数传;

3) 切换时间约束:中继星从一个用户星切换到另一颗用户星时,需要经过天线转动对准,建立稳定链路还需要捕获、跟踪等过程,因此数传活动前需要充分的天线切换时间。由于激光束发散角比微波波束发散角小3~5个数量级,空间激光束对准难度大,因此激光链路的切换时间较微波链路的长,通常达到数十秒甚至百秒量级<sup>[15]</sup>;

4) 星上存储容量约束:星载固态存储器容量有限(国际上通常约1 Tbit),用户星链路接入时,须考虑星上存储容量限制。

综合以上约束条件,混合链路中继卫星系统接入控制模型可表示为

$$\begin{aligned}
 \text{Max } f_0 &= \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{|w_{ij}|} y_{ij}^k P_{i_i}^i \\
 \text{s. t. } & 1) \quad w_{ij}^{s,k} \leq s_{ij}^k, \quad e_{ij}^k \leq w_{ij}^{e,k}; \\
 & \quad l_i^s \leq s_{ij}^k, \quad e_{ij}^k \leq l_i^e; \quad \text{if } y_{ij}^k = 1 \\
 & 2) \quad (s_{i_1j}^{k_1} - e_{i_2j}^{k_2})(s_{i_2j}^{k_2} - e_{i_1j}^{k_1}) \leq 0, \\
 & \quad \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{|w_{ij}|} y_{ij}^k \leq 1; \quad J_{i_1}, J_{i_2} \in J; \\
 & \quad k_1 = 1, \dots, |w_{a,j}|; \quad k_2 = 1, \dots, |w_{b,j}| \\
 & 3) \quad e_{ij}^k = s_{ij}^k + d_{ij}^k + T_{s_j}; \quad \text{if } y_{ij}^k = 1 \\
 & 4) \quad q_i - R_j(q_i/r_{ij}) \leq C_j; \quad \text{if } y_{ij}^k = 1.
 \end{aligned} \tag{1}$$

模型中,目标函数 $f_0$ 为完成业务优先级权值和,则模型明确接入控制的目标是保证系统完成尽可能多的高优先级业务。模型中各参数定义如下: $M$ 为业务对中继星的可用天线资源集, $N_s$ 为资源总数; $J$ 为中继传输业务集合, $N_j$ 为业务个数; $C_j$ 为中继星天线资源 $M_j$ 当前的剩余存储容量; $P_{i_i}^i$ 为业务 $J_i$ 的优先权值, $J_i \in J$ ; $R_j$ 为天线资源 $M_j$ 所在中继星对地的数据传输速率; $q_i$ 为业务 $J_i$ 的数据容量; $r_{ij}$ 为业务 $J_i$ 对中继星天线资源 $M_j$ 的数据传输速率; $d_{ij} = q_i/r_{ij}$ ,表示业务 $J_i$ 对中继星资源 $M_j$ 的传输时间; $T_{s_j}$ 为中继星天线 $M_j$ 连续执行业务的最大切换时间; $s_i$ 为业务 $J_i$ 执行的开始时刻; $[l_i^s, l_i^e]$ 为业务 $J_i$ 的有效时间范围; $e_i$ 为业务 $J_i$ 执行的结束时刻;

$W_i = \left\{ W_{i,j} \mid W_{i,j} = \bigcup_{k=1}^{|w_{ij}|} [w_{ij}^{s,k}, w_{ij}^{e,k}] \right\}$ ,业务 $J_i$ 的可见时间窗口集,其中 $W_{i,j}$ 为业务 $J_i$ 的第 $j$ 个可见时间窗口, $|w_{ij}|$ 为窗口总数,

$w_{ij}^{s,k}$ 和 $w_{ij}^{e,k}$ 分别为窗口起始和结束时刻; $y_{ij}^k$ 为业务执行标识,接入方案中业务 $J_i$ 在中继星天线 $M_j$ 上被执行,则 $y_{ij}^k = 1$ ;否则 $y_{ij}^k = 0$ 。

### 3 基于小窗口蚁群算法双层优化的接入控制算法

如何实现对用户星业务的接入控制,即如何确定不同用户星接入的天线资源和接入资源顺序是一个复杂的组合优化问题。与传统的组合优化问题不同,中继卫星资源的接入控制具有特有的可见时间窗口和时间有效性约束。针对多颗中继卫星资源接入控制问题的复杂性,提出一种基于业务类型和自适应小窗口蚁群算法双层优化的中继卫星接入控制算法,具体流程如图2所示。算法主要思想是:从业务的接入资源和接入资源的分配顺序上进行优化,以最大化消除业务执行时的冲突。根据业务的冲突关系设置蚁群算法的下跳任务小窗口选择范围,由业务的时效和时间窗口设置任务的调度灵活度,以业务调度灵活度和优先级设

置蚁群算法的状态转移概率;按中继业务的紧迫程度和数据容量确定接入不同链路资源的概率,采用蚁群算法更新接入不同链路的概率和状态转移参数,从而优化业务的接入资源选择和资源的分配顺序。

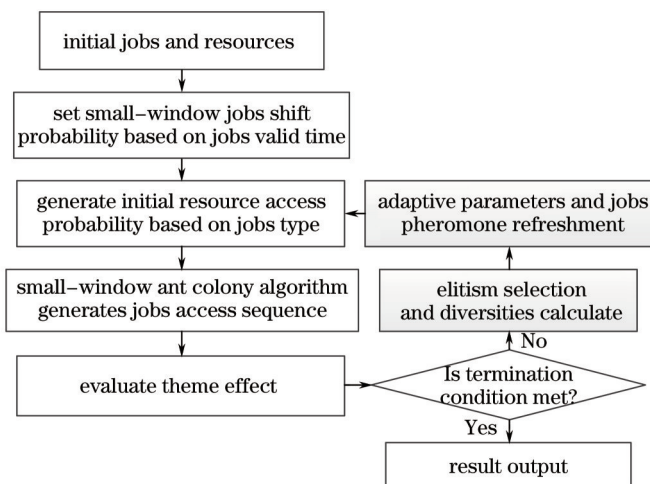


图2 算法流程

Fig.2 Algorithm flow chart

### 3.1 问题编码

根据接入顺序和接入资源依次判断(1)式中业务所受约束条件,若满足所有约束条件,则令业务执行标识  $y_{ij}^k=1$ , 否则令  $y_{ij}^k=0$ , 并最终计算方案的业务完成率。因此,本文分别对接入次序和接入资源进行编码:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \mathbf{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{a,1}, & \dots, & x_{a,i}, & \dots, & x_{a,N_j} \\ x_{b,1}, & \dots, & x_{b,i}, & \dots, & x_{b,N_j} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{x}_a$ 、 $\mathbf{x}_b$  分别为业务  $J$  接入次序和接入资源。算法根据决策变量  $\mathbf{X}$  和(1)式中约束条件依次确定业务标识符  $y_{ij}^k$  和相应的执行时间,从而得到决策变量数组  $\mathbf{X}$  对应的接入方案。由此,不同的决策变量数组  $\mathbf{X}$  代表了不同的可行解,即接入控制问题的一种可行方案。因此,解决多颗中继卫星接入控制问题的关键是基于启发策略快速高效地找出最佳的一组决策变量  $\mathbf{X}^*$ 。

### 3.2 小窗口蚁群算法优化业务接入资源和顺序

#### 3.2.1 基于业务类型生成资源接入概率

微波与激光链路具有不同的传输速率和接入时间,大容量数据业务应侧重于采用激光链路,而时效要求高、数据量小的业务应优先采用微波链路中继,其他类型的业务需要根据全局的业务量和资源可用情况综合规划。为确定不同链路资源的初始接入概率,作如下定义:

定义链路接入灵活度  $F_0$  为业务的有效时间去掉不同链路的接入和执行时间后的剩余量 ( $F_0=F_o$  或  $F_w$ , 分别为激光/微波链路接入灵活度),可由(3)式中业务数据容量  $q$  和时效性  $t_v$  计算:

$$F_0 = \max\{t_v - (q/r_0 + T_{s,0}), 0\}, \quad (3)$$

式中  $r_0$  和  $T_{s,0}$  分别为链路(激光/微波)的传输速率和切换时间。则不同链路的初始接入概率如下:

$$\begin{cases} p_{\text{optic}} = 1, p_{\text{wave}} = 0; & q \geq 0.11 \text{ Tbit}, \forall t_v \\ p_{\text{optic}} = F_o / (F_o + F_w), & q < 0.1 \text{ Tbit}, t_v > 120 \text{ s} \\ p_{\text{wave}} = F_w / (F_o + F_w); & q < 0.1 \text{ Tbit}, t_v > 120 \text{ s} \\ p_{\text{optic}} = 0, p_{\text{wave}} = 1; & q < 0.1 \text{ Tbit}, t_v \leq 120 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

由蚁群算法确定任务的执行顺序后,再按随机数依不同链路资源的接入概率选择该业务接入的链路资源。并根据全部业务的完成效果更新不同链路资源的接入概率。

#### 3.2.2 非均匀小窗口构造业务接入顺序

如图3所示,由于资源冲突,同一资源上两个业务接入顺序不同,呈现两种不同的任务完成效果。故业务接入顺序不同,对全局业务的需求满足度影响很大。故本文采用改进的蚁群算法优化业务的接入次序。

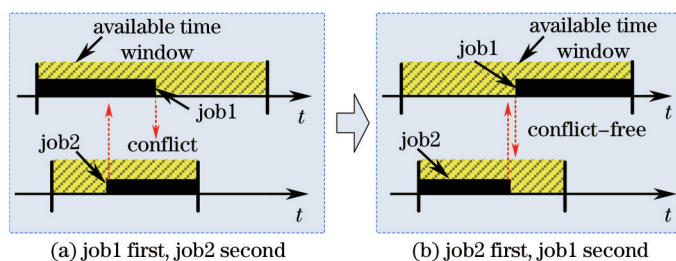


图3 同一资源上不同业务顺序的接入效果

Fig.3 Effect of different jobs scheduling sequence on same resource

基本蚁群算法在整个解空间中搜索,当需要接入的业务量较大时,算法搜索时间长且易陷入局部最优。由图3可知,只有当两个业务的可用时间存在交集时,才会产生直接冲突。因此,提高算法效率的关键在于调整好可用时间具有交集的业务接入顺序,以减少冲突,最大化业务完成量。

定义业务冲突集  $J_i^c$  为与业务  $J_i$  具有可用时间交集的其他业务的集合。

设每个蚂蚁个体从虚拟起始业务  $J_0$  (切换时间和执行时间均为0)开始,依次对每个业务的冲突集选择下跳业务,即每个业务的下跳候选业务  $J_i^c$  为其小窗口业务集(业务冲突集)。蚂蚁在可行解的构造过程中,根据产生的伪随机数  $\xi$  和启发选择比例  $\xi_0$  ( $\xi_0 \in [0,1]$ ) 来选择下跳候选集中的业务:

$$x_{a,j} = \begin{cases} \arg \max_{J_j \in J_i^c} ([\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{i,j}(t)]^\beta), & \xi \leq \xi_0 \\ x'_{a,j}, & \xi > \xi_0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\tau_{i,j}(t)$  和  $\eta_{i,j}(t)$  分别为第  $t$  代信息素浓度和启发式信息,  $\alpha$  和  $\beta$  为对应项的重要程度。  $x'_{a,j}$  为按轮盘赌方式依(6)式状态转移概率选择的下一个业务;  $\eta_{i,j}(t)$  可由(7)式计算:

$$p_{i,j} = \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_i^c} [\tau_{i,l}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{i,l}(t)]^\beta}, J_j \in J_i^c, \quad (6)$$

$$\eta_{i,j}(t) = \frac{P_{ri}^j}{P_{ri,max}^j} \cdot \left( 1 - \frac{F_j}{F_{max} + t_{min}} \right)^\gamma; \quad i,j = 1, \dots, N_j, \quad (7)$$

式中  $P_{ri}^j$  和  $F_j$  分别为业务  $J_j$  的优先级权值和调度灵活度,分别由业务的类型和业务的时效性决定,  $P_{ri,max}^j$  和  $F_{max}$  分别为业务  $J_j$  的优先级权值最大值和调度灵活度最大值。  $\gamma$  为调节优先权值和调度灵活度的权重系数。  $t_{min}$  为尽量小的单位时间长度,设置为1s,以避免出现  $\eta_{i,j}(t) = 0$ 。  $F_j$  为业务  $J_j$  的每个时间窗口去除执行业务的时间剩余量,其值越小表明业务接入的冲突越大,算法应尽量先规划灵活度值较小的业务,可表示为

$$F_j = \sum_{d_{j,l}^{w,k} \geq d_{j,l}} \max\{d_{j,l}^{w,k} - d_{j,l}, t_{min}\}, \quad \text{where } d_{j,l}^{w,k} = w_{j,l}^{e,k} - d_{j,l}^{s,k}. \quad (8)$$

### 3.2.3 信息素和资源接入概率更新

蚁群选择业务调度次序后将在路径上留下信息素和更新链路资源的接入概率,以指导后代蚁群寻优。

设生成业务调度次序时,业务间转移初始信息素为  $\tau_0$ ,假设蚂蚁个数为  $N_a$ ,本文算法采用全局信息素更新原则,更新规则为

$$\begin{cases} \tau_{i,j}(t+1) = (1-\rho)\tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j}(t) \\ \Delta\tau_{i,j}(t) = \sum_{k=1}^{N_a} \Delta\tau_{i,j}^k(t), \quad \rho \in [0,1] \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $\tau_{i,j}(t+1)$  为第  $t+1$  代业务间信息素浓度,  $\rho$  为挥发系数,  $\Delta\tau_{i,j}(t)$  为本次循环中业务  $J_i$  与  $J_j$  间的信息素增量,算法采用 Ant cycle 模型只对每一代精英个体路径上的信息素增强,即当蚂蚁  $k$  路过路径  $(i,j)$  时,

$$\Delta\tau_{i,j}^k(t) = \frac{Q}{L_k}, \quad (10)$$

式中  $Q$  信息素增强比例常数,  $L_k$  为第  $k$  个蚂蚁的个体适应度值的倒数。为避免算法过早收敛,将每代业务路

径上的信息素限定在 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ 区间内。

设业务  $J_i$  对相同类型链路资源的初始接入概率相同(即  $p_{i,j}=p_{\text{wave}}$  或  $p_{\text{optic}}$ ), 此后则根据各代种群中所有方案中业务  $J_i$  对每个资源加权的選擇比例更新链路资源的接入概率  $p_{i,j}$ , 更新规则为

$$p_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^{N_a} L_k \cdot S_{i,j}^{\text{sign},k}}{\sum_{j=1}^{N_a} \sum_{k=1}^{N_a} L_k \cdot S_{i,j}^{\text{sign},k}}, S_{i,j}^{\text{sign},k} = \begin{cases} 1, & x_{b,j}^k = j \\ 0, & x_{b,j}^k \neq j \end{cases}, \quad (11)$$

式中  $S_{i,j}^{\text{sign},k}$  为第  $k$  个个体中业务  $J_i$  对第  $j$  个链路资源的选择标识,  $M_i$  为业务  $J_i$  的可用链路资源集。

### 3.3 多样性检测和自适应参数调整

#### 3.3.1 种群多样性检测

多颗中继星的资源接入控制问题属于高维多峰问题, 解空间极大, 对其寻优极易陷入局部最优。为增强算法的全局寻优能力, 定义种群多样性, 以自适应调整算法参数。

定义种群多样性  $D_{iv}$  来表示整个种群个体差异程度。最大取值为 1, 表示种群个体均完全不同, 多样性最佳; 最小为 0, 表示种群个体均完全相同, 无多样性; 种群多样性  $D_{iv}$  可表示为

$$\begin{cases} D_{iv} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} g_{i,j}}{N_a(N_a - 1)}, & i \neq j \\ g_{i,j} = 1 - \frac{\sum_{l=a,b} \sum_{k=1}^{N_j} (x_{il}^k \oplus x_{jl}^k)}{2N_j}, & \forall i \neq j \end{cases}, \quad (12)$$

式中  $g_{i,j}$  表个体间相似度,  $x_{il}^k$  和  $x_{jl}^k$  分别为个体  $X_i$  和  $X_j$  的第  $k$  位基因, “ $\oplus$ ” 为异或运算。相似度值  $g_{i,j}$  最大为 1, 最小为 0, 分别表示两个个体完全相同和完全不同。

#### 3.3.2 自适应参数调整

蚁群算法初始种群的多样性接近 1, 但算法收敛后多样性将下降, 种群多样性较差。根据种群多样性  $D_{iv}$  大小对算法参数进行负反馈的自适应控制。采用(13)式调整蚁群算法中的启发选择比例参数:

$$\xi_0 = D_{iv}^\mu, \quad (13)$$

式中  $0 < \mu \leq 1$ ,  $\mu$  为自适应控制参数, 其大小根据业务量调节, 业务量越大,  $\mu$  越小。

## 4 仿真及结果分析

### 4.1 仿真场景

国际上许多航天及天文机构都提供目前在轨运行卫星的轨道参数, 本文所采用的轨道数据来源于美国 AGI 公司于 2010 年 6 月发布的全球卫星轨道数据库, 选取美国跟踪与数据中继卫星系统的三颗中继星 TDRS-7、TDRS-8、TDRS-9, 设每颗中继卫星上带有 2 幅 Ka/Ku/S 三波段单址天线和 2 个光通信终端用于数据中继, 由于光终端体积小、重量轻, 因此可设每个用户星载荷有 1 幅微波天线和 1 个光通信终端。各类型天线的参数见表 1<sup>[15-16]</sup>。仿真时段为 00:00:00~06:00:00, 采用 16 颗用户星(LEO01~LEO16)共发起 128 个业务, 每个用户星发起 8 个业务, 则 LEO01 星业务为  $J_1, J_{17}, J_{33}, \dots$ , 其他用户星业务依此类推。业务大小及优先级根据 2.2 节业务类型按正态分布随机生成。设每个业务的产生时刻为整个周期内的一个随机时刻, 业务有效时间段为其最大传输时长再加一个随机时间。由于数据中继多为近地轨道的成像卫星和空间站等, 故用户星轨道高度设为 300~600 km, 其数据见表 2。利用 STK 软件对用户星进行可见性分析, 获得中继星与用户星的可见时间窗口。

表1 天线终端参数

Table 1 Terminal parameters of the antenna

Antenna type	S	Ku	Ka	Optic
Data rate /(Mbit/s)	10	100	500	1800
Switch time /s	10	10	10	100

表2 用户星基本情况

Table 2 Basic situation of user satellites

Satellite(LEO)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
Altitude /km	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
Orbit inclination	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	85°

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 算法整体分析

为验证本文提出的基于自适应小窗口蚁群算法双层优化的接入控制算法(ASAC-DLO)有效性,分别仿真对比基于自适应小窗口蚁群优化顺序和最早可接入天线选择的接入控制算法(ASAC-EAS)、基于业务类型选择天线和业务优先级顺序的接入控制算法(JTAS-JPS),分析三种算法的搜索过程。各算法迭代次数为500,算法参数结合文献[17]和测试经验设置,如表3所示( $q_0$ 由算法自适应生成)。

表3 参数设置

Table 3 Configuration of parameters

Parameter	$N_s$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\rho$	$Q$	$\tau_0$	$\tau_{min}$	$\tau_{max}$	$\mu$
Value	60	0.5	1.5	2.5	0.1	0.05	0.2	0.01	1	0.5

三个算法的100次重复对比实验如图4所示,图5为单次搜索过程对比。

在图4的100次重复对比实验中,128个业务的总优先级权值总和为520,各算法最优结果平均值分别为515.54(ASAC-DLO)、504.08(ASAC-EAS)和484.32(JTAS-JPS),表明算法ASAC-DLO结果优于算法ASAC-EAS和JTAS-JPS。由于三种算法均为随机搜索开始,故100次重复实验中,ASAC-DLO有82%的结果为全局最优值516,表明ASAC-DLO具有较强的全局搜索能力。由图5可知,ASAC-DLO收敛曲线在213代和289代出现了两次小的跳跃,这是由于算法收敛后多样性下降,此时算法能自适应调整启发选择比例参数 $q_0$ ,从而增强了算法全局搜索能力。对比三条收敛曲线可知,ASAC-EAS和JTAS-JPS的收敛速度较ASAC-DLO快,但全局寻优能力较差,当两算法陷入局部最优值后(分别在122代和184代)较难跳出。这是由于算法ASAC-EAS只优化了接入次序,算法JTAS-JPS只基于业务类型依概率优化了接入的天线选择,两者均只优化了问题的一个方面;而ASAC-DLO对接入次序和接入的天线选择进行双层优化,其算法收敛速度较单层优化算法必然会下降,却能增强ASAC-DLO的全局优化能力。

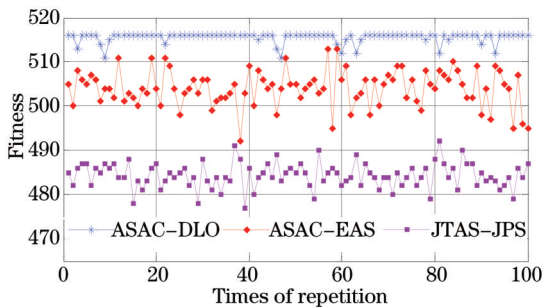


图4 三种优化算法的重复实验

Fig.4 Repeated tests for three optimization algorithms

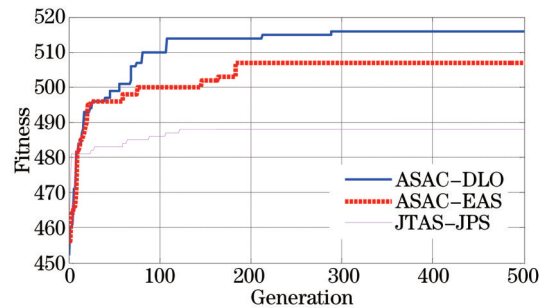


图5 混合优化算法搜索过程

Fig.5 Search process of hybrid optimize algorithm

### 4.2.2 算法小窗口蚁群算法模块验证

在本文提出的ASAC-DLO中,为提高蚁群算法收敛速度,采用业务冲突集作为“小窗口业务集”限制下跳业务选择范围。为验证此设计的有效性,分别仿真未采用小窗口限制的双层优化接入控制算法(AAC-

DLO)和采用小窗口限制的 ASAC-DLO 对比,仿真结果如图 6 所示。

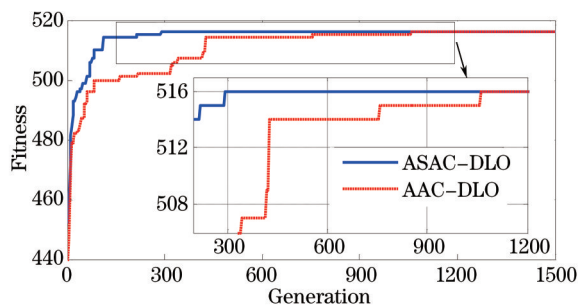


图 6 采用“小窗口”对收敛速度的影响

Fig.6 Convergent features with “small-window”

由图 6 可知, ASAC-DLO 算法在 289 代即已收敛, 而 AAC-DLO 算法到 1059 代才收敛到最优值, 表明采用业务冲突集作为“小窗口业务集”限制下跳业务选择范围的算法设计可显著增加算法的收敛速度。另外, 在仿真中算法 ASAC-DLO 生成接入次序的计算时间比 AAC-DLO 算法少 68.54%, 这是由于限制了下跳业务选择范围, 在每一个接入次序生成过程中, 每个业务只需计算  $k$  个 ( $k \ll N_j$ ) 业务的转移概率, 从而降低每一代个体生成的计算量, 提高了算法的计算效率。

### 4.2.3 接入控制结果分析

图 7 中显示了 3 颗中继星不同天线资源上业务接入的具体时间及接入顺序, 不同的色块代表不同业务, 色块长度代表业务传输时间长短, 色块上的标签表示业务号。

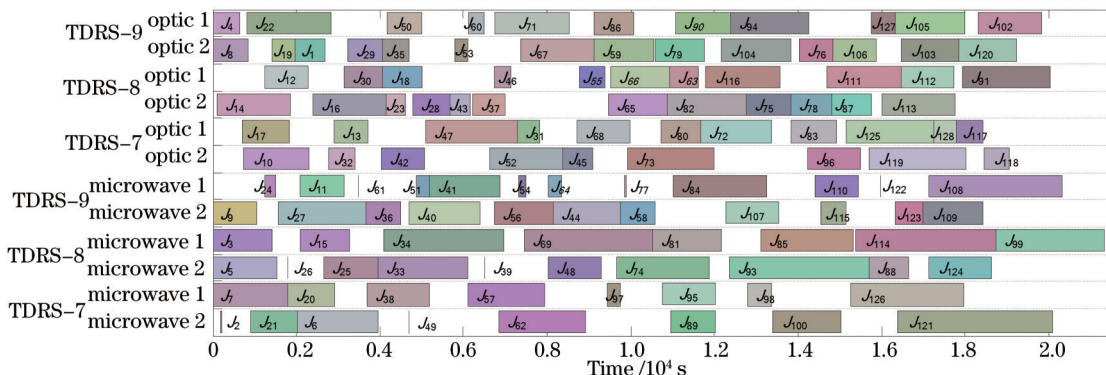


图 7 所有业务接入结果甘特图

Fig.7 Gantt chat of scheduling results

在接入结果中, 完成业务 125 个, 完成率为 97.66%, 接入业务的总权值之和占总业务权值的 99.26%。因为资源冲突, 业务 70、92 和 101 未能接入, 其优先级权值分别为 1、2 和 1。如图 7 所示, 大容量业务大部分在光天线上接入, 而小容量和微小容量业务均在微波天线上完成中继, 光天线与微波天线中继的数据量分别为 142.4731 Tbit 和 41.1537 Tbit, 表明优化算法能够根据业务类型和业务总量自适应选择接入的天线终端。考虑到业务必须在有效时间段内完成, 又须在特定的时间窗口内安排, 因此, 接入控制结果可表明本文所建接入模型和优化算法能有效解决多业务类型、多天线种类的多颗中继卫星系统接入控制问题。

## 5 结 论

高效的数据中继卫星混合链路接入控制是天基综合信息网建设的一项关键技术。通过分析业务类型和接入控制所受约束特点, 建立了约束满足模型; 提出了基于业务类型和自适应小窗口蚁群算法双层优化的中继卫星混合链路接入控制算法。算法根据业务的容量设置链路接入灵活度; 以业务时间有效性设置业务冲突集, 结合优先级计算业务间转移概率; 定义种群多样性以自适应调整算法参数。算法根据业务类型实现对业务的接入顺序和选择接入的中继星链路的双层优化。仿真实验表明, 所建接入控制模型可实现多颗中继卫星混合链路接入的有效控制, 提出的自适应双层优化算法较单层寻优效果更佳, 具有较强的全局优



化能力,改进的小窗口蚁群算法可有效加快收敛速度,表明本文算法可实现多约束条件下多业务类型、多天  
线资源和多中继星的接入控制。

下一步工作可对允许业务续传切换的混合链路接入控制问题继续研究,同时可对算法进一步改进,以  
提高全局优化能力和算法计算效率。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Manhao, Qiu Dishan, Wang Liang. Modeling topology structure of space-based information system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 606-610.  
马满好,邱涤珊,王 亮. 天基信息系统网络拓扑结构建模方法研究[J]. 武汉大学学报, 2009, 34(5): 606-610.
- 2 Tatsuyuki Hanada, Shiro Yamakawa, Hiroki Kohata. Study of optical inter-orbit communication technology for next generation space data-relay satellite[C]. SPIE, 2011, 7923: 79230B.
- 3 J Teles, M V Samii, C E Doll. Overview of TDRSS[C]. Adv Space Res, 1995, 16(12): 67-76.
- 4 J Meng-Gérard, P Chrétienne, P Baptiste, *et al.*. On maximizing the profit of a satellite launcher: Selecting and scheduling tasks with time windows and setups[J]. Discrete Applied Mathematics, 2009, 157(17): 3656-3664.
- 5 Fabrizio Marinelli, Salvatore Nocella, Fabrizio Rossi, *et al.*. A Lagrangian heuristic for satellite range scheduling with resource constraints[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38 (11): 1572-1583.
- 6 S Rojanasoonthon, J Bard. A GRASP for parallel machine scheduling with time windows[J]. Journal on Computing, 2005, 17(1): 32-51.
- 7 Harry C Shaw, Michael W Rackley. TDRSS space ground link terminal user services subsystem replacement and upgrades[C]. Space Ops, 2010. 1-13.
- 8 Fang Yanshen, Chen Yingwu, Gu Zhongshun. CSP model of the relay satellite scheduling[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(2): 6-10.  
方炎申,陈英武,顾中舜. 中继卫星调度问题的CSP模型[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 6-10.
- 9 Zhang Yan, Sun Zhanjun, Li Jian. Study of TDRS dynamic scheduling problem[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(7): 1464-1468.  
张 彦,孙占军,李 剑. 中继卫星动态调度问题研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1464-1468.
- 10 Dick Stottler. Satellite communication scheduling, optimization, and deconfliction using artificial intelligence techniques[C]. AIAA Infotech@Aerospace, 2010. 1-9.
- 11 Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun, *et al.*. Scheduling algorithm for data relay satellite with microwave and laser hybrid links[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005005.  
赵 静,赵卫虎,李勇军,等. 微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005005.
- 12 Li Dou, Wang Feng, Ji Binghui, *et al.*. The predictive multi-access channel allocation scheme in broadband satellite Mesh network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(4): 763-767.  
李 斗,王 峰,姬冰辉,等. 宽带卫星 Mesh网多址接入信道预测分配方案研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 763-767.
- 13 Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun. Scheduling algorithm for data relay satellite based on view period window refreshing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 110602.  
赵 静,赵尚弘,李勇军,等. 一种基于时间窗口更新的激光链路中继卫星资源调度算法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 110602.
- 14 Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun, *et al.*. Multi-objective resources scheduling algorithm for microwave and laser hybrid links data relay satellite based on improved NSGA-II algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1205003.  
赵 静,赵卫虎,李勇军,等. 基于改进NSGA-II算法的微波/光混合链路中继卫星多目标资源调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1205003.
- 15 Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.*. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305005.  
赵 馨,宋延嵩,佟首峰,等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- 16 Wu Feng, Yu Siyuan, Ma Zhongtian, *et al.*. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite-ground laser communication links[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605008.  
武 凤,于思源,马仲甜,等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605008.
- 17 Wang Haibo, Xu Minqiang, Wang Rixin, *et al.*. Solving space and ground TT&C resources integrated scheduling problem with ant colony optimization-simulated annealing algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(11): 1636-1645.  
王海波,徐敏强,王日新,等. 基于蚁群优化-模拟退火的天地测控资源联合调度[J]. 宇航学报, 2012, 33(11): 1636-1645.

栏目编辑: 王晓琰