基于遗传蚁群融合算法的混合链路中继卫星资源调度研究

邓博于[1],赵尚弘[1],侯 睿[2],赵卫虎[1],赵 静[1],张曦文[1]

(1. 空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077;
2. 中国电子设备系统工程公司,北京 1000141)

摘 要:针对遗传算法容易陷入局部最优和蚁群算法初始信息素匮乏的缺点,提出将遗传和蚁群融合算法应用于中继卫星系统的资源调度问题。通过改进蚁群算法信息素的定义,利用基于时间窗口序号编码思想,给出中继卫星资源调度约束条件与目标函数并建立数学模型。仿真分析了融合算法、标准遗传算法和改进蚁群算法的优化特性,结果表明融合算法是解决中继卫星调度问题的有效方法。

关键词:星间激光通信; 微波与激光混合链路; 中继卫星系统; 蚁群遗传融合算法; 资源调度
中图分类号:TN929.13 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)07-2211-07

Research for resources scheduling of relay satellite system with hybrid links based on fusion algorithm of genetic and ant colony

Deng Boyu[1], Zhao Shanghong[1], Hou Rui[2], Zhao Weihu[1], Zhao Jing[1], Zhang Xiwen[1]

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi′an 710077, China;
2. Institute of China Electronic Equipment System Engineering Company, Beijing 100141, China)

Abstract: According the defects that genetic algorithm easily falling into local optimum and ant colony optimization is little initial pheromone information, the fusion algorithm of genetic and ant colony was proposed for the resources scheduling problem. The definition of ant colony optimization pheromone was improved. The idea of coding based on the serial number of time windows was used. The restrictive condition and the objective function of the resources scheduling was given and the mathematical model was established. The optimization characteristics of fusion algorithm, standard genetic algorithm and modified ant colony algorithm were analyzed by simulation. The result shows that it is quite good to solve the relay satellite scheduling problem by using the fusion algorithm.

Key words: inter-satellite laser communication; microwave and optical hybrid links; relay satellite system; fusion algorithm of genetic and ant colony; resources scheduling

收稿日期:2014-11-11; **修订日期**:2014-12-15
基金项目:中国博士后科学基金(2012M512066)
作者简介:邓博于(1991-),男,硕士生,主要从事卫星光通信方面的研究。Email:kdydby2014@sina.com
导师简介:赵尚弘(1964-),男,教授,博士生导师,从事卫星光通信与激光技术方面的研究。Email:zhaoshangh@aligan.com

0 引 言

随着空间探测研究重点向深空发展，构建天基信息网络成为必然趋势[1-2]。1983 年 4 月，美国发射了第一颗中继卫星，并逐步建立起了跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System，TDRSS)[3-4]，随后各航天大国均建立了自己的中继卫星系统，我国自 2008 年 4 月陆续发射了天链一号 3 颗中继星[4]，初步实现全球中继。空间的竞争日趋激烈并伴随着数据传输的指数性增长，将激光与微波技术优势互补构建混合链路中继卫星系统，成为了解决微波链路不足、建立大规模数据高速传输中继网络的理想选择[5-6]。中继卫星系统资源有限，需要进行合理调度，方可最大限度满足全部数据中继用户需求。

中继卫星资源调度就是以传输任务为出发点，对中继卫星资源进行分配，生成可靠的资源调度方案，极大提升中继转发处理能力[7-8]。资源调度的核心问题是调度算法，顾中舜等[9]提出基于蚁群算法的调度模型求解，但其初始信息素匮乏，需要多次迭代，收敛速度较慢；赵静等[10]提出了基于遗传算法的激光链路中继卫星资源调度，收敛速度较快但结果易陷入局部最优；文中针对资源调度问题提出了遗传蚁群融合算法(Genetic and Ant Colony fusion Algorithm，GACFA)，期望实现资源调度问题的优化。

1 混合链路中继星资源调度模型

1.1 中继卫星资源调度问题描述

中继卫星系统由中继卫星、用户星与地面站构成，其任务传输活动主要包括中继卫星转发地面站的跟踪测控信号，以及各类用户卫星需要返回地面站的大容量回传任务。由于激光光束窄，瞄准难度较大，星间激光链路建立相比于微波链路难度更大，因此建立星间链路是资源调度的关键问题。

在混合链路的中继卫星系统中，资源调度问题受较多约束条件影响，主要包括时间窗口约束、终端功耗约束、切换时间约束、任务优先级和有效期约束、数据容量约束等。其中时间窗口约束是中继卫星资源调度和一般调度问题的主要区别，可见时间窗口由承担任务的用户星与中继星相互可见的时间决定，即不同任务对应的可见时间窗口不同，有可能产生重叠或者覆盖，每个任务所选定的时间窗口会对后续任务选择时间窗口造成影响。当前任务执行时间段占用了预先分配给后续任务的时间窗口，因此每执行一个任务必须对后续任务进行时间窗口更新。

1.2 定义调度模型

微波与激光混合链路中继卫星资源调度问题由于其约束条件较多，可认为是多目标约束问题。为了获得资源调度的最优方案，在理解问题描述的基础上建立抽象的混合系统资源调度模型。模型可定义为四元组 $\Theta_0=\{J,M,TW,C\}$。J 为中继传输任务集合，N_J 为任务个数；M 为中继星天线资源集，N_m 资源总数；TW 为可见时间窗口集合，$TW_{i,j}$ 为任务 i 在天线 j 上的时间窗口，$|TW_{i,j}|$表示窗口数量；C 为约束条件集合。

为实现混合链路中继星任务调度优化，保证尽量多任务同时进行调度，使功耗与能耗尽可能小，定义多目标函数如下：

目标函数 f_1 代表调度目标是保证尽量多的完成高优先级任务。

$$\mathrm{Max}f_1=\sum_{i=1}^{N_J}\sum_{j=1}^{N_m}\sum_{k=1}^{|TW_{i,j}|}y_{i,j}^{k}p_i \tag{1}$$

式中：$y_{i,j}^{k}$ 为任务执行标识，调度方案中任务 J_i 在中继星天线 M_j 上被执行，则 $y_{i,j}^{k}=1$，否则 $y_{i,j}^{k}=0$；p_i 表示任务 J_i 的优先权值。

目标函数 f_2 代表调度目标是保证资源调度过程中传输任务的终端资源总能耗尽可能小。

$$\mathrm{Max}f_2=\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_J}\sum_{j=1}^{N_m}\sum_{k=1}^{|TW_{i,j}|}P_{cj}\cdot \mathrm{d}t_{i,j}^{k}+P_{sj}\cdot T_{sj}} \tag{2}$$

式中：P_{cj} 和 P_{sj} 分别表示中继星天线资源 M_j 的功耗与切换功耗；$\mathrm{d}t_{i,j}^{k}$ 表示在时间窗口 k 中任务 J_i 对中继星 S_j 的传输时间；T_{sj} 为中继星 S_j 天线连续执行任务所需的最大切换时间。

目标函数 f_3 代表调度的目标是保证任务调度总用时最短。

$$\mathrm{Max}f_3=\frac{1}{T_e} \tag{3}$$

式中：T_e 为调度完成时间。

定义模型的约束条件如下：

$$\text{s.t. (1) } st_{i,j}^{k} \geqslant TWs_{i,j}^{k},\ et_{i,j}^{k} \leqslant TWe_{i,j}^{k};$$

$$st_{i,j}^{k} \geqslant t_{si},\ et_{i,j}^{k} \leqslant t_{ei};\ \text{if } y_{i,j}^{k}=1$$

$$\text{(2) } et_{i,j}^{k}=st_{i,j}^{k}+\mathrm{d}t_{i,j}^{k}+T_{sj};\ \text{if } y_{i,j}^{k}=1 \tag{4}$$

$$\text{(3) } q_i-R_j(q_i/r_{i,j}) \leqslant C_j;\ \text{if } y_{i,j}^{k}=1$$

$$\text{(4) } \sum_{j\in M}\sum_{i\in J_i} P_{cj}\cdot \mathrm{d}t_{i,j}^{k}+\sum_{j\in M} E_s^j \leqslant E_B+P_g\cdot T_D$$

式中:(1) 为可见时间窗口和业务有效性约束,其中 $st_{i,j}^{k}$ 与 $et_{i,j}^{k}$ 分别表示任务 J_i 执行的开始、结束时刻;$TWs_{i,j}^{k}$ 与 $TWe_{i,j}^{k}$ 分别表示时间窗口的开始、结束时刻,$[t_{si},t_{ei}]$为任务有效时间段。任务只允许在可见时间窗口内传输,且必须在数据的有效时间范围内完成。(2) 表示切换时间约束,即中继星在释放链路与再次建立链路过程中用于卫星切换所耗的时间。(3) 为星上存储容量约束,其中 q_i 表示任务 J_i 的数据容量;R_j 为天线资源 M_j 所在中继星对地的数据传输速率;$r_{i,j}$ 为任务 J_i 对中继星天线资源 M_j 的数据传输速率;C_j 表示天线资源 M_j 当前剩余存储容量。(4) 为星上能耗约束,其中 P_{cj} 表示天线 M_j 的切换功率;E_{sj} 表示天线 M_j 连续执行任务切换能耗;E_B 表示调度开始时星上储存能量;P_g 表示中继星工作平均功率;T_D 表示调度持续时间。

1.3 模型假设

(1) 中继卫星资源的切换时间为常数,且光学天线的切换时间大于微波链路。

(2) 中继卫星资源调度问题研究中假设中继卫星与地面站之间链路实时可用,中继卫星系统的地面终端站只负责与中继卫星进行数传,数传动作同步完成。

(3) 中继卫星在与用户星和地面终端进行任务传输时,信道损耗较小,数传任务可有效完成。

2 遗传蚁群融合算法设计

遗传算法(Genetic Algorithm,GA)与蚁群算法(Ant Colony Optimization,ACO)常用于中继卫星资源调度的多目标资源优化问题,以实现卫星资源高效分配。文中提出遗传与蚁群融合算法是利用遗传算法随机快速收敛产生初始解空间,之后利用蚁群算法的正反馈性、适应能力强、高收敛性等特点求得最优解。遗传算法产生的初始种群可有效生成作用于蚁群算法的信息素,弥补了蚁群算法初始信息素匮乏的缺点;蚁群算法使遗传算法中已经收敛的较优解跳出局部最优,提高了融合算法的可靠性。遗传与蚁群融合算法流程如图 1 所示。

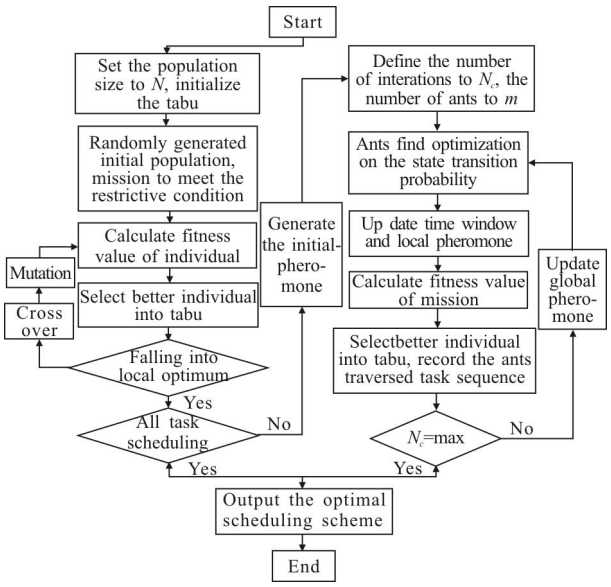

图 1 遗传与蚁群融合算法流程

Fig.1 Flow diagram of GACFA

2.1 遗传算法构建初始种群

对于混合链路中继卫星资源调度模型,采用遗传算法的具体步骤如下所示:

(1) 定义初始种群规模为 N,构建禁忌表 tabu 并设置表长为 L;

(2) 随机产生初始种群。即随机按任务顺序分配时间窗口,生成 N 组编码个体;

(3) 开始迭代,计算种群中个体的多目标适应度值,比较其大小并更新禁忌表 tabu;

(4) 禁忌表中最优值多次迭代后不再更新,即陷入局部最优,转入(6),否则转入(5);

(5) 交叉与变异。对种群中的个体进行交叉、变异,产生新个体,生成新的种群,转入(3);

(6) 遗传算法完成,输出 tabu 表中存放的个体。

具体算法设计如下:

(1) 染色体编码

遗传算法种群中的个体表示对问题的解,称作染色体。该文以时间窗口为编码依据,将任务所选时间窗口序号作为染色体上的基因。任务以优先级权值顺序传输,按时间窗口顺序依次判断,若传输任务

不能满足时间窗口的约束条件,则视为无法传输,该任务编码置 0;若满足时间窗口约束,则记录当前时间窗口序号作为该任务编码,同时更新后续时间窗口[11]。

(2) 适应度值函数

对于中继卫星混合资源调度问题的多目标函数采用线性加权的方法,公式如下:

$$f=\sum_{i=1}^{k} f_i w_i \tag{5}$$

文中采用调度模型中 3 个目标函数, 即执行任务的优先级和、天线终端总功耗、调度完成用时,在计算适应度值前将目标函数值归一化。线性权值是根据每个目标函数的重要程度确定的, 引入基于偏好关系的权值确定[9],依据 f_i 的重要程度为 f_1 远比 f_2 和 f_3 重要,f_2 比 f_3 重要, 可获得权值 w_1=0.64,w_2=0.23,w_3=0.13。

(3) 禁忌表

禁忌表存放迭代过程中产生的较优个体及其适应度值,禁忌表长度决定了存放个体的数量,禁忌表中个体按适应度值由大到小排列。每当迭代产生个体的适应度值大于禁忌表中已有个体的适应度值,将禁忌表更新。遗传算法结束后调用禁忌表中的所有个体作为蚁群算法的初始种群, 此时的解经过多次迭代已趋于局部最优。

2.2 蚁群算法全局搜索最优

蚁群算法的作用是依据初始信息素, 利用其随机快速收敛性,寻找出最优个体,即最优解或多个非支配解。具体步骤如下:

(1) 依据遗传算法产生的初始种群生成初始信息素,定义蚁群算法迭代次数为 N_c,设置人工蚂蚁数量为 m,开始迭代 N_c=1;

(2) 每个蚂蚁依照任务顺序,按状态转移概率大小选择下个需要执行任务的时间窗口, 若任务满足时间有效性和时间窗口约束,则该任务传输成功,同时更新局部信息素;

(3) 每个蚂蚁完成遍历, 以遗传算法中定义的适应度值进行评价, 比较其大小并更新禁忌表 tabu,若产生解的适应度值超过禁忌表中当前最优解;

(4) 若 N_c=max,传输完成转入步骤(6),否则转入步骤(5),N_c=N_c+1;

(5) 信息素挥发,更新全局信息素,转入步骤(2);

(6) 蚁群算法完成,输出 tabu 表中存放个体。

具体算法设计如下:

(1) 信息素的定义与初始化

信息素是指导蚁群算法搜索的重要依据。将蚁群系统的信息素定义为每个任务安排在各时间窗口的概率, 可获得二维矩阵 $A_{|J|\times\max(TW)}$,$|J|$表示任务个数,max(TW)表示任务对应时间窗口数量的最大值,$A(i,k)$表示将任务 i 安排在时间窗口 k 上的概率。

根据遗传算法产生的初始种群初始化信息素,首先,将矩阵中的所有元素初始化为 φ_1(一个较小的值);再依据禁忌表中每个个体的编码,在其对应信息素矩阵位置赋值为 φ_2(一个较大的值)。使所有任务均有可能被调度, 且在遗传算法中已调度过的较优方案更易被选择。经过多次验证,φ_1 设为 0.02,φ_2 设为 0.15。

(2) 确定状态转移概率

对于当前时间窗口 k, 选取不同的任务 a_i 进行调度,可得转移概率公式(6)。

$$P(a_i,k,t)=\begin{cases}\dfrac{[A(i,k)]^a c(i,k)}{\sum_{j}^{a_j}[A(j,k)]^a c(j,k)} & a_i\in J(k,t)\\ 0 & a_i\notin J(k,t)\end{cases} \tag{6}$$

式中:$P(a_i,k,t)$表示 t 时刻在可见时间窗口 k 内安排任务 a_i 的概率;$c(i,k)=[\eta(i,k)]^a[\lambda(i,k)]^a[\mu(i,k)]^a$;$A(i,k)$表示将任务 a_i 安排在时间窗口 k 中信息素的值。$\eta(i,k)$表示任务 a_i 的优先权值;$\lambda(i,k)$表示任务 a_j 的资源能耗启发值;$\mu(i,k)$表示任务 a_i 的耗时启发值。a,b,c,d 表示以上不同启发值的权重。权重 a 越大,蚂蚁对走过路径选择的概率越大,随机性降低,易陷入局部最优。b,c,d 权值越大,在某个任务点上选取局部最优的概率就越大,从而易陷入局部最优,故在仿真中应选取适当的参数值。

(3) 信息素更新

文中蚁群算法采用全局信息素更新。每完成一次迭代将信息素 $A(i,k)$进行更新。具体定义如下:

$$A(i,k)=\begin{cases}(1-\rho)A(i,k)+Q_A & y_{i,j}^{k}=1\\ (1-\rho)A(i,k) & \text{else}\end{cases} \tag{7}$$

式中:ρ 表示信息挥发速率;Q_A 表示全局更新时信息素的增加量。Q_A 越大,正反馈性越强,蚁群算法的随机性降低,收敛速度加快,易陷入局部最优。

3 仿真实验及分析

3.1 仿真场景

文中的仿真场景采用 1 颗中继星与 4 颗用户星组成的中继卫星系统,中继星选用东经 10°,星上搭载 3 个天线终端，包括 S 波段单址天线、Ku 波段单址天线和光学天线,天线参数参考表 1 与表 2。将中继星与用户星轨道参数导入 STK，可获得可见时间窗口参数。仿真时段定为 00:00:00~06:00:00。取遗传算法中交叉概率为 0.8,变异概率为 0.3,蚁群算法中状态转移概率的启发值 a、b、c、d 分别设为 3、5、1.5、1,局部与全局信息素增加量 Q_p 与 Q_A 分别设为 0.02 和 0.05,信息素挥发速率 ρ 为 0.05,遗传算法种群规模和蚁群算法人工蚂蚁数量均取为 30。

表 1 天线终端参数

Tab.1 Antenna terminal parameters

Type of antenna	S band	Ku band	Optical antenna
Transmission rate	10 Mbps	200 Mbps	1.8 Gbps
Power consumption	500 W	500 W	100 W

表 2 用户星基本情况

Tab.2 User star parameters

Satellite	LEO 01	LEO 02	LEO 03	LEO 04
Highly/km	400	600	800	1 000
Inclination/(°)	35	45	55	65

3.2 算法收敛特性

资源调度以 64 的任务规模为例研究其算法特性，图 2 分别给出了融合算法与标准遗传算法的收敛曲线。

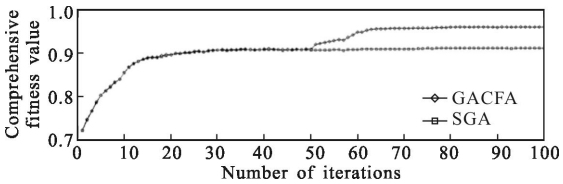

图 2 融合算法与遗传算法收敛示意图

Fig.2 Convergence figure of GACFA and SGA

由图 2 可以得知:SGA 在第 33 次迭代收敛,陷入局部最优;融合算法产生了两次收敛,第 1 次为遗传算法在 33 代收敛，收敛时其综合适应度值为 90.65%，第 2 次为蚁群算法在 71 代寻到了最优解,其综合适应度为 98.11%。可见融合算法不仅避免算法陷入局部最优,而且优化效果较好。

3.3 调度优化性能及分析

将任务量分别设为 32、64、80 和 100 进行仿真运算,每组任务量所对应场景优化 100 次,并取每次运算的均值与标准遗传算法(Standard Genetic Algorithm, SGA)和改进蚁群算法(Modified Ant Colony Algorithm, MACO)对比,结果如表 3 所示。

表 3 表明在基于时间窗口序号编码的情况下,融合算法对于任务完成量和权值完成率的调度结果均优于 SGA 与 MACO。在任务量为 32 迭代次数为 100 的情况下,融合算法实现了全调度,权值完成率较 SGA 与 MACO 分别提高了 4.09%和 0.58%;在任务量超过 64 后,其对任务完成量与权值完成率的优化效果更加明显，权值完成率较另两种算法分别提高了 12.06%和 6.58%，说明遗传蚁群融合算法对于任务量大、调度安排复杂的场景可获得更优的调度

表 3 GACFA、SGA、MACO 优化结果

Tab.3 Optimization results of GACFA, SGA and MACO

Total of mission	GACFA		SGA		MACO		Number of iterations
	Completion of mission	Weights of completion	Completion of mission	Weights of completion	Completion of mission	Weights of completion	
32	32	100%	29	95.91%	31	99.42%	100
64	62	98.13%	52	90.69%	59	93.48%	100
80	73	95.85%	63	81.84%	68	89.54%	200
100	90	94.11%	77	79.38%	84	85.23%	200

方案。

针对任务量为 64 的场景分别对 3 种算法进行 100 次的仿真,结果如图 3 所示。

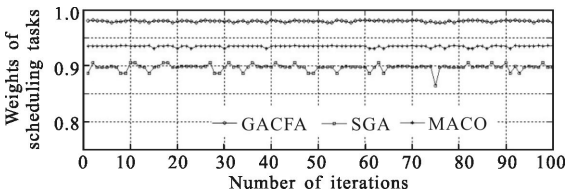

图 3 历次仿真结果图

Fig.3 All results of simulation

由图可见融合算法多次实验的最优值均优于 SGA 和 MACO,完成总权值比率可达 98.03%,且实验最优结果总权值波动较小，表明融合算法寻优具有较强稳定性,资源调度方案选择较为集中。

以 64 的任务量为例进行资源调度仿真,可获得任务调度方案的甘特图。

图 4 为天线资源调度任务的甘特图，描述了任务传输选择天线、传输时间和传输顺序,每个色块代表不同的任务，色块上的标签分别表示任务序号和优先级权值,色块长度代表传输任务时间。调度周期为 21 600 s(00:00:00~06:00:00),完成总用时 20 997.7 s,调度权值完成率为 98.033%,完成任务量为 62。

激光链路传输速率高于微波链路，在传输任务相同的情况下,激光链路所耗时间大大减少。目标函数 f_2 定义了功耗，即任务优先选择光学天线进行传输;当激光天线终端传输饱和,将后续任务安排在微波链路终端传输，故图中光学天线分配到的任务占总任务量的 70.968%,利用率较高,而微波链路中继能力有限,Ku 和 S 天线安排的任务较少，所占比重分别为 20.968%和 8.065%。

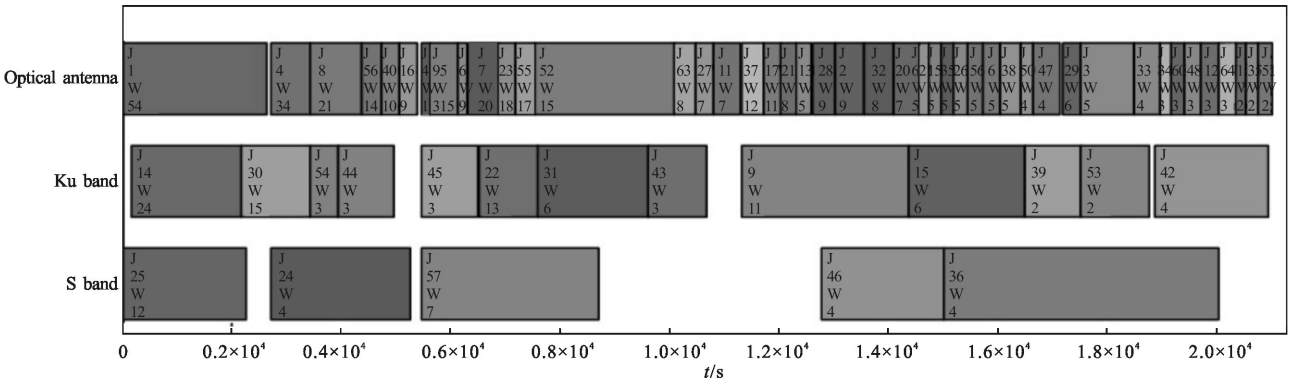

图 4 任务调度甘特图

Fig.4 Task scheduling gantt chart

4 结束语

文中针对混合链路中继卫星资源调度模型给出了遗传蚁群融合算法，提出了基于时间窗口序号的编码策略,改进了信息素定义,解决了蚁群算法初始信息素匮乏、收敛缓慢与遗传算法局部优化性能差等缺陷,生成可靠的资源调度方案,对已有资源调度算法进行了较明显的改进优化。当然,中继卫星资源调度受较多约束条件限制,除文中已考虑之外,还包括任务类型约束和终端功耗约束等，此类问题有待进一步全面研究。

参考文献:

[1] Cesarone R J, Abraham D S, Shambayati S. Deep-space optical communications [C]//International Conference on Space Optical Systems and Application, 2011, 8: 410-423.

[2] Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, et al. Laser communication terminals for the european data relay system [C]//SPIE, 2012, 82460D: 1-7.

[3] Zillig D, McOmber R, Home W D. Demand access service for TDRSS users [C]//AIAA 16th International Communications Satellite Systems Conference, 1996.

[4] Wang Jiasheng. Proposal for developing China′s data relay satellite system[J]. ***Spacecraft Engineering***, 2011, 20(2): 1-8. (in Chinese)
王家胜.我国数据中继卫星系统发展建议[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 1-8.

[5] Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Advance on data relay technology for inter-satellite laser links [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(11): 3103-3110. (in Chinese)
赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 星间激光链路数据中继卫星技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013: 42(11): 3103-3110.

[6] Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, et al. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2011, 48(9): 25-39. (in Chinese)
赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 25-39.

[7] Zhang Yan, Sun Zhanjun, Li Jian. Study of TDRS dynamic scheduling problem[J]. ***Journal of System Simulation***, 2011, 23(7): 1464-1468. (in Chinese)
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.

[8] Zhao Jing, Zhao Weihu, Li Yongjun, et al. Scheduling algorithm for data relay satellite with microwave and laser hybrid links [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2013, 40(10): 1005005-1-8. (in Chinese)
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): 1005005-1-8.

[9] Gu Zhongshun. Research on the relay satellite dynamic scheduling problem modeling and optimizational technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 27-43. (in Chinese)
顾中舜. 中继卫星动态调度问题建模及优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 27-43.

[10] Yang J, Shi X, Marchese M, et al. An ant colony optimization method for generalized TSP problem [J]. ***Progress in Natural Science***, 2008, 18(11): 1417-1422.