

## 激光与光电子学进展

## 基于贪婪动态融合的卫星激光测距优化算法

杨梦雪<sup>1,2</sup>, 李祝莲<sup>1,3\*</sup>, 李语强<sup>1,3</sup><sup>1</sup>中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210034

**摘要** 结合当今技术的发展状况, 针对台站观测任务数量多、问题建模难、求解复杂度高等问题, 提出了一种基于贪婪算法与动态规划算法融合的改进贪婪动态规划算法。该算法首先将调度问题划分成几个子问题, 然后根据约束条件以最大化观测收益为目标函数对问题进行迭代求解, 进而生成近似最优观测计划。实验结果表明, 该算法在解决观测任务调度问题时具有一定的可行性和实用性, 并为下一步建立台站自动化运行系统奠定坚实的基础。

**关键词** 遥感; 卫星激光测距; 任务优化; 贪婪算法; 动态规划

中图分类号 V423.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213284

## Satellite Laser Ranging Optimization Algorithm Based on Greedy Dynamic Fusion

Yang Mengxue<sup>1,2</sup>, Li Zhulian<sup>1,3\*</sup>, Li Yuqiang<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, Yunnan, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Space Object & Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, Jiangsu, China

**Abstract** Combining with the development of current technology, this paper proposes an improved greedy dynamic programming algorithm based on the fusion of greedy algorithm and dynamic programming algorithm for the problems of large number of station observation tasks, difficult problem modeling, and high solution complexity. First, this algorithm divides the scheduling problem into several subproblems, iteratively solves them with the objective function of maximizing the observation income according to constraints and generates an approximate optimal observation plan. Experimental results show that this algorithm has certain feasibility and practicability in solving observation task scheduling problems, and lays a solid foundation for the next step of establishing an automated station operation system.

**Key words** remote sensing; satellite laser ranging; task optimization; greedy algorithm; dynamic planning

## 1 引言

卫星激光测距(SLR)技术是空间天文大地测量的重要技术之一,它涵盖了激光、电子、自动控制、机械、卫星轨道等多个学科领域。1964年10月,美国国家航空航天局(NASA)发射了第一颗带有激光反射器的“Beacon-B”,并很快实现了激光测距<sup>[1]</sup>。随着航天事业的高速发展,高精度的激光测距技术正应用于空间碎片监测领域,是航天器规避风险的重要保障<sup>[2-3]</sup>。目

前,太空环境对人类的生存发展和国民经济的可持续发展有着举足轻重的作用,为了实现激光测距技术对空间目标的精密探测,获取目标天体的变化规律以及各种参数之间的相互作用关系,自动化激光测距技术<sup>[4-7]</sup>逐渐成为卫星激光测距的重要发展方向。目前NASA、澳大利亚以及德国BKG的Wettzell等已经成功搭建了无人值守的全自动观测站。台站自动化观测技术的实现,不仅能减轻观测人员的劳动强度,还能长期、连续地对空间目标状态进行自动化观测、处理和分

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-01-07; 录用日期: 2022-01-27; 网络首发日期: 2022-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(U1431116)

通信作者: \*lzh@ynao.ac.cn

析统计<sup>[5-6]</sup>,极大地提高了观测数据质量和资料存储利用的效率,更兼具经济实用、灵敏便捷、通用性等特点。

本文针对台站自动化系统中卫星观测任务调度部分进行了研究。目前,卫星任务调度问题的研究大多针对成像卫星和对地观测卫星,通常对多资源约束、多观测任务请求而展开,而面向激光测距任务卫星调度算法的研究相对较少。本文基于卫星激光测距站的特点,首先,对调度问题进行统一描述,在相应的约束准则下以最大化任务观测收益值为目标函数构建调度模型。然后,设计了一种贪婪算法与动态规划算法融合求解的方式,即先利用动态规划算法从整体上将约束问题划分为小的子问题,再利用贪婪算法从时间和优先级约束等方面对每个子问题进行求解,进而生成近似最优观测计划。

## 2 问题分析与建模

### 2.1 问题分析

卫星任务调度问题是一个基于资源的约束优化(CSP)问题<sup>[8]</sup>。区别于普通规划调度问题,卫星任务调度的主要特点是观测目标的时间窗口特性与卫星相关,卫星与观测站之间并非时时可见,而是存在可见时间窗口约束<sup>[9]</sup>。只有在特定的时间窗口并满足观测要求,地面站对卫星的观测任务才能完成(图 1)。

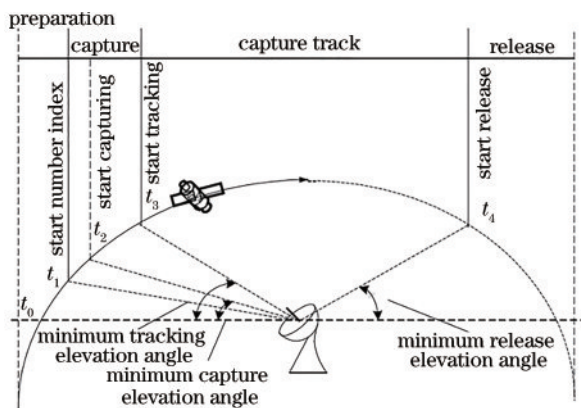


图 1 卫星与地面站的可见窗口示意图

Fig. 1 Schematic of visible window of satellite and grand station

通常情况下,对卫星调度问题建模需要考虑具体的卫星特性以及观测任务需求特点,不同特性的卫星一般约束条件不同,相应的目标函数和规划准则也不同<sup>[9]</sup>。激光测距卫星调度问题与一般的卫星调度问题稍有不同,卫星激光测距主要依靠激光进行观测,激光光束很窄,发射的光源亮度高,即使在不可见的情况下(如卫星处于地影或者白天条件),也可以进行距离测量。同时国际激光测距服务(ILRS)已根据卫星轨道参数和特殊项目需求对其跟踪优先级列表进行排序。此后,可能会增加某些卫星的优先级(比如:特殊任务或发射后密集跟踪阶段),会适当进行重新排序,即对

更重要的任务给予更高的优先级。目标的跟踪由观测站决定,台站也可以调整优先级,以获得足够多的数据。观测调度过程中高轨道目标过境时持续时间长,低轨目标过境时持续时间较短。设备在高低轨道之间调整时存在一定的时延,相邻目标之间切换时还有设备切换与目标跟踪搜索时延。另外,当外界环境(如云层、卫星故障)发生变化时可能还需要动态调整观测计划。实际上,在处理这类有预先设定的优先级问题时,主要先考虑任务之间的时间冲突。当任务的时间窗口发生重叠时,依据设计的优化策略首选高优先级的目标进行观测,以获得最大的观测收益。如果对应的时间窗口没有冲突,那么按照观测的时序要求对目标依次进行观测,尽可能多采集观测数据,提高任务整体完成率。

### 2.2 问题建模

根据上述分析,本文对卫星激光测距任务调度问题建立相应的 CSP 模型,在模型构建之前,需要先对整个问题进行假设。假设地面上的某个激光测距站  $G$ ,相对于待观测卫星而言,共有  $m$  个观测时间窗口,记为  $W = \bigcup_{1 \leq i \leq m} W_i$ ,观测窗口  $W_i$  的开始时间和结束时间分别为  $S_i$  和  $E_i$ 。假设有  $n$  个待完成的任务,记为  $M = \{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n\}$ ,每个任务所需时间为  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_n\}$ ,优先级为  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n\}$ ,每个优先级都有其对应的权值  $c_j$ ,如第一优先级对应的权值  $c_1 = n$ ,第二优先级对应的权值  $c_2 = n - 1$ ,依次类推第  $j$  优先级对应的权值为  $c_j = n - j + 1$ , $n$  为当前任务的总个数。第  $j$  个任务的开始时间变量记为  $s_j$ ,结束时间变量为  $e_j$ 。为每一个任务定义变量  $u_j$ , $u_j = 1$  表示任务被安排执行,否则  $u_j = 0$ 。定义变量  $\theta_j$  表示卫星过境时的俯仰角,俯仰角满足条件才能观测到卫星。地面站设备转换时间为  $t_{\text{switch}}$ ,即完成上一个测距任务,执行下一次测距时设备调整时间,对于 SLR 来说,每次只能观测一颗卫星,在不同目标之间切换观测时需要移动望远镜和圆顶,并校正激光光束正确指向卫星。不同目标之间跟踪搜索的时间为  $t_{\text{search}}$ ,即上一个目标观测完成,设备搜索下一个目标所花费的时间,卫星激光测距依赖卫星的精密预报,但是由于卫星的视运动较快,位置预报和跟踪机架均存在一定的误差,为了使激光光束击中远距离卫星,通常需要进行一定范围的搜索。此外,高轨道与低轨道之间的调整时间为  $t_{\text{adjust}}$ ,如果前后两次切换都是在高轨道或者低轨道之间,则该值默认为 0。在实际测量中,对于不同高度的卫星,一般会采用不同的发散角。对于低轨道卫星,发散角增大,便于击中卫星。这是因为低轨卫星距离较近,回波仍然足够强。但是对于高轨道卫星,通常要求系统发射角为  $2''$  左右,否则会导致光能量分散,回波减弱,测不到信号(这里假设

$t_{\text{switch}}$ 、 $t_{\text{search}}$ 、 $t_{\text{adjust}}$  均为恒定值)。整个调度开始时间为  $T_s$ , 调度截止时间为  $T_E$ 。

基于上述模型假设, 本文构建单个卫星激光测距台站的任务调度模型<sup>[10]</sup>。

优化目标函数表示为

$$\max: F = \sum_{j=1}^n u_j p_j c_j, u_j = \{0, 1\}。 \quad (1)$$

式(1)表示所安排任务的总权值最大, 体现了优化方案的总体收益, 其中  $F$  为权值函数, 该函数的导向是尽量多完成观测圈数, 优先完成高收益高优先级的任务。

约束条件表示为

$$\text{s. t. } \theta_j \geq \alpha, 1 \leq j \leq n, \quad (2)$$

$$\sum_j (t_j + t_{\text{switch}} + t_{\text{search}} + t_{\text{adjust}}) \leq (E_i - S_i),$$

$$1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq m, \quad (3)$$

$$u_j s_j \geq u_j S_i, 1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq m, \quad (4)$$

$$u_j e_j \leq u_j E_i, 1 \leq j \leq n, 1 \leq i \leq m, \quad (5)$$

$$T_s \leq s_j \leq T_E, T_s \leq e_j \leq T_E, 1 \leq j \leq n。 \quad (6)$$

式(2)表示卫星过境时的俯仰角约束, 俯仰角只有满足条件目标才能可见, 否则任务将会被丢弃。式(3)表示完成任务的持续时间  $t_j$ 、设备转换时间  $t_{\text{switch}}$ 、目标跟踪搜索时间  $t_{\text{search}}$  以及高低轨道之间调整时间  $t_{\text{adjust}}$  的总和, 不能超过对应时间窗口的长度。式(4)表示如果任务  $a_j$  在时间窗口  $w_i$  内执行, 那么任务的开始时间必须在相应的时间窗口开始时间之后。式(5)则表示任务结束时间必须在相应的时间窗口结束时间之前。式(4)、式(5)确定了任务必须在满足自己约束的时间窗口内完成, 否则认为任务未执行。式(6)表示所有任务的开始时间和结束时间必须在规定的任务调度时间段  $[T_s, T_E]$  之内。

### 3 算法设计

在任务调度领域应用比较广泛的算法是动态规划算法(DPA)和贪婪算法(GSA)<sup>[8-14]</sup>。近些年受到人类智能、生物群体或自然规律的启发, 一些启发式算法, 如遗传算法、差分进化算法、免疫算法等开始逐渐被用作任务优化算法<sup>[15-17]</sup>。动态规划算法是一种递归算法, 其基本思想是将待求解的问题分成若干子问题, 对每个子问题求最优解, 前一个子问题的最优解为下一个子问题提供有效信息, 依次解决子问题, 最后一个子问题就是初始问题的最优解。动态规划算法的设计有一定的模式, 一般需要经历以下四个步骤:

1) 划分阶段。按照问题的时间或者空间特征, 把问题分为若干个阶段。划分后的阶段一定是有序的或者是可排序的, 否则问题就无法求解。

2) 确定状态和状态变量。将问题发展到各个阶段所处的各种客观情况用不同的状态表示出来。状

态的选择需满足无后效性。

3) 确定决策并写出状态转移方程。状态转移是根据上一阶段的状态和决策来导出本阶段的状态。如果确定了决策, 状态转移方程就可以写出。

4) 寻找边界条件。给出的状态转移方程是一个递推式, 需要一个递推的终止条件或者边界条件。

贪婪算法在对问题进行求解时, 采用逐步构造最优解的方法, 总是做出在当前看来是最好的决策。做出贪婪决策的依据是贪婪准则, 它是决策的依据和标准, 即在求解的每一步依据何种标准对变量进行赋值<sup>[12-14]</sup>。贪婪算法的求解需要经过以下几个步骤:

1) 对待求解序列进行逐步选择, 根据某个优化测度每一步都要保证获得局部最优解。

2) 每步只考虑一个数据, 它的选取应满足局部优化条件。

3) 若下一个数据与部分最优解连在一起不再是可行解时, 就不再将该数据添加到部分解中, 直到所有数据枚举完, 或者不能再添加为止。

本文结合了卫星激光测距站观测任务的特点, 根据动态规划与贪婪算法的优点, 提出了一种由动态规划与贪婪算法相结合的改进贪婪动态规划算法。贪婪动态规划算法在 2013 年由李博权等<sup>[13]</sup>提出, 应用于对地观测卫星调度中。本文在前人的基础上对该算法加以改进, 并在实际卫星激光测距任务调度中, 取得了较好的实验结果。本研究首先考虑任务开始时间早、持续时间长、收益较高的任务, 用动态规划算法进行规划, 同时删除不满足观测要求的任务。在选择任务观测时, 考虑当前卫星观测优先级、时间窗等约束条件, 用贪婪算法进行规划。算法详细流程如图 2 所示。

算法流程具体描述如下。

初始状态:  $M$  为所有候选观测的集合。

结果状态:  $Q$  为最终生成的观测计划。

步骤 1: 将卫星的候选观测集合  $M = \{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n\}$  按照任务的开始时间进行排序, 生成  $M_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_n\}$  序列。

步骤 2: 先令  $j = 1$ 。

步骤 3: 选择集合  $M_0$  中的第  $j$  个任务, 检查任务  $j$  的时间窗口是否满足约束, 若满足则检查俯仰角  $\theta_j$ , 若时间窗口和俯仰角均满足约束, 则将任务  $j$  加入新集合  $M_j$  中, 若不满足其中任意一个约束条件, 则将任务  $j$  从  $M_0$  中删除。

步骤 4: 令  $j = j + 1$ , 其中  $1 \leq j \leq n$ , 重复步骤 3, 当  $j > n$  时, 终止上述循环, 输出序列  $M_j$ 。

步骤 5: 动态规划法对  $M_j$  序列进行遍历, 从  $M_j$  中选择开始时间较早、持续时间短的任务进行优先规划。其伪代码如下, 其中  $k$  为迭代次数, 初始值为 1。

for ( $k = 1$ ;  $k < K$ ;  $k++$ )

{

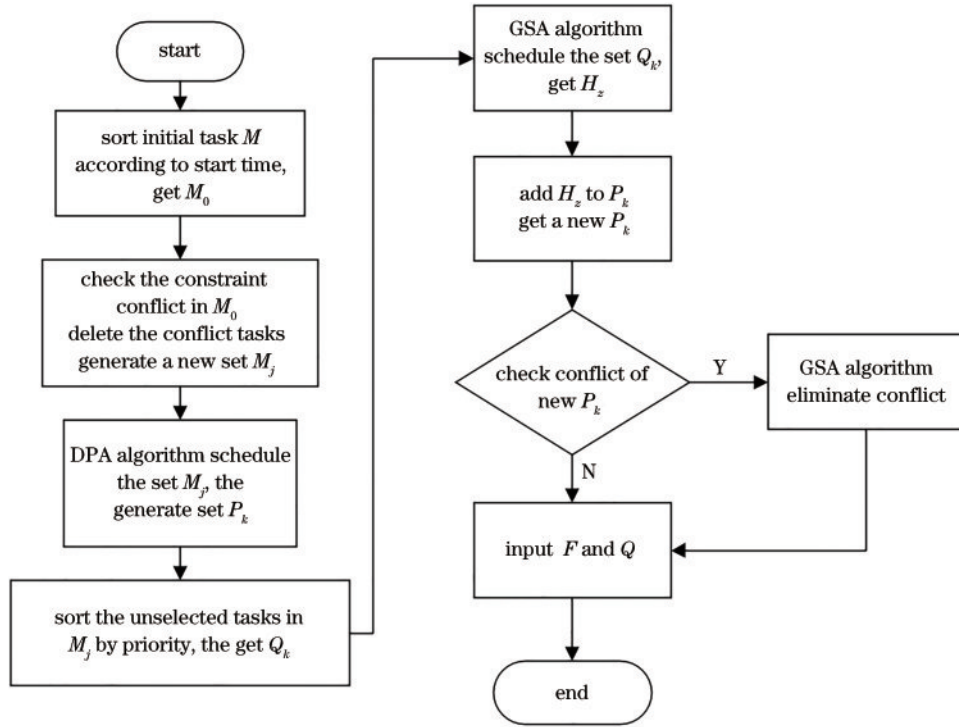


图 2 GSA 与 DPA 融合的算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart of GSA and DPA fusion

动态规划法对  $M_j$  进行规划, 形成初步观测序列  $P_k$ ;

对  $M_j$  中未安排但是符合时间间隔的任务按照卫星观测优先级从高到低排序形成  $Q_k$ 。

}

步骤 6: 利用贪婪算法规划  $Q_k$ , 对集合  $Q_k$  依次检查条件约束。对于无法满足的约束进行适当处理或者直接删除, 选择高优先级的任务先观测, 若优先级相同, 则选择开始时间最早的进行观测, 并生成观测序列  $H_z$ 。其伪代码如下, 其中  $z$  表示步骤 5 动态规划后  $M_j$  中剩余未调度的任务个数, 初始值为 1。

for( $z=1$  ;  $z < Z$  ;  $Z++$ )

{

贪婪算法对  $Q_k$  序列进行规划, 生成观测序列  $H_z$ 。

}

步骤 7: 将  $H_z$  加入步骤 5 动态规划法生成的初步观测序列  $P_k$  中, 检查此时集合  $P_k$  中是否存在多星互斥访问约束, 若存在, 则按贪心算法消除冲突, 若不存在, 则组合成新的  $Q$  序列,  $Q$  即为近似最优观测计划。

步骤 8: 输出最大收益值  $F$  和最终观测计划  $Q$ 。

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真场景

为了验证本文算法在卫星激光测距站调度中应用的优越性, 对中国科学院云南天文台激光测距站进行了任务调度仿真实验, 实验平台如图 3 所示。该平台利用 1.2 m 望远镜、53 cm 双筒望远镜, 以及高功率脉冲固体激光器、超导探测器等设备对空间目标进行激光测距实验。整个激光测距实验系统主要由激光发射子系统、回波接收子系统、计算机控制系统三部分组成

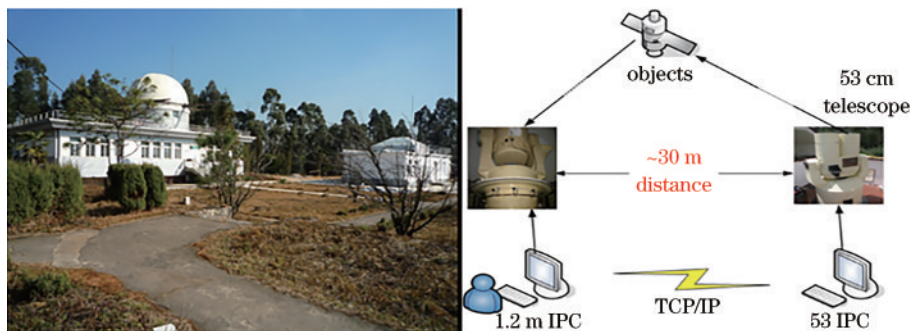


图 3 任务调度实验平台

Fig. 3 Task scheduling experiment platform

成,该系统最大的特点是采用了高功率红外波段激光器与超导阵列探测器,因而具有十分强大的空间目标探测能力。

原始观测任务表来自于台站观测系统生成的 Predschedule 文件(表 1),出于文章篇幅考虑本文仅列举了前 5 个观测任务。表中:第一列是观测目标编号;第二列是观测目标名称;第三列是观测目标代码;第四列是观测开始时间(前两位数为小时,后两位为分钟,例如第一行中 1229 代表 12 时 29 分);第五列是观测结束时间;第六列是观测目标可达到的最高俯仰角(HM),单位为( $^{\circ}$ );第七列是观测可持续时长(LEN),单位为 min。

表 1 激光测距原始观测任务(部分)

Table 1 Original observation tasks of laser ranging (partial)

Star ID	Star name	Star SIC	Start	End	HM / ( $^{\circ}$ )	LEN / min
8606101AJ	Ajisai	1500	1229	1239	15	10
0000000DB	Beidou3m3	0000	1210	1453	60	163
1000101G1	Compassg1	2002	1210	2225	35	615
1101301H3	Compassi3	2003	1210	1309	21	59
1107301H5	Compassi5	2005	1210	2225	71	615

任务调度的优先级列表(表 2)从国际激光测距服务下载,具体网址见参考文献[18],本文仅展示前 5 个数据。其中,COSPAR ID 为国际卫星标识符,SIC 为卫星目标代码。

表 2 观测任务优先级(部分)

Table 2 Observation task priority (partial)

Priority	Mission	ILRS name	COSPAR ID	SIC
1	GRACE-FO-1	Gracefo1	1804701	123
1	GRACE-FO-2	Gracefo2	1804702	124
2	ICESat-2	Icesat2	1807001	6873
3	CryoSat-2	Cryosat2	1001301	8006
4	PAZ	Paz	1802001	2501

调度周期从 2020-09-05T12:00:00.000 开始到 2020-09-05T22:30:00.000 结束,总调度时长 10.5 h。仿真实例中观测站与卫星之间的可见窗口,由地面站和卫星的俯仰角关系确定,根据约束模型定义星地可见约束为卫星俯仰角不小于  $10^{\circ}$ 。根据 Predschedule 文件,可以获取到卫星与地面站的所有可见时间窗口

表 3 三种算法调度不同任务数时的任务完成率对比

Table 3 Comparison of task completion rates when three algorithms schedule different numbers of tasks

Algorithm	Task completion rate / %				
	Number of task is 35	Number of task is 45	Number of task is 55	Number of task is 65	Number of task is 75
GSA	91.40	88.90	87.30	85.30	84.00
DPA	95.20	95.60	92.70	92.30	90.10
DPA+GSA	99.10	98.80	97.30	96.90	96.00

集合,将每个窗口定义为一个任务,从而得到观测的原始任务集合。

#### 4.2 结果分析

本文分别用动态规划算法、贪婪算法和改进的贪婪动态规划算法对获取的任务集合在载有 AMD-4600H@3.00 GHz, Windows10, 64 位操作系统,编程环境为 Visual Studio 2017 下使用 C++ 编程进行调度优化。本文实验对比了在一个调度周期内,任务个数分别是 35、45、55、65、75 时,三种算法的平均收益值、任务完成率、时间消耗的情况。图 4 所示为三种算法在任务数为 35、45、55、65、75 时的平均任务收益值。随着任务数的增大,三种算法的任务收益值都在递增,但是 GSA 和 DPA 算法的收益值变化幅度很小,变化幅度较明显的是本文算法,且在同样的任务数下,本文算法总能获得更高的卫星观测收益值。当任务数为 75 时,本文算法收益值高达 13255,比 GSA 算法高出 2535,比 DPA 算法高出 1840。

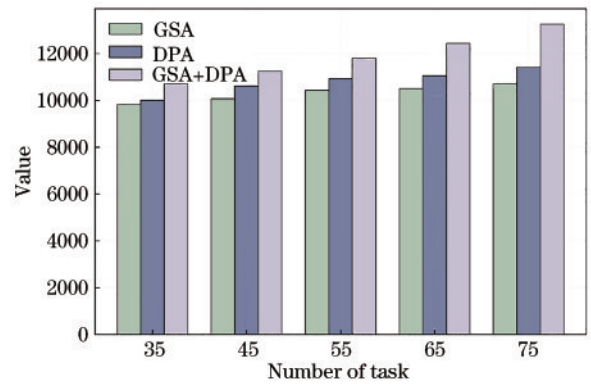


图 4 三种算法在不同任务数下的收益值

Fig. 4 Profitability of three algorithms under different numbers of tasks

表 3 展示了在调度不同任务数时,三种算法的任务调度完成情况。从表 3 可以看出,随着任务数的增多,三种算法的任务完成率呈现下降趋势,这是因为任务的约束冲突不断加大。其中变化较大的是 GSA 算法,这说明 GSA 在规模较大的任务调度规划上,处理效果较差。变化幅度较小的是本文算法,仅在 1% 左右。在最大任务数时,本文算法任务完成率仍然高达 96%。这说明本文算法对规模较大的任务调度具有较好的适应性。

图 5 是宏观上算法的平均耗时对比图。算法耗时与任务调度过程中的搜索次数有关,其中:平均用时较少的是 GSA 算法,为 36.79 s;其次是 DPA 算法,为 39.39 s;本文算法平均耗时最多,为 43.63 s。这也反映出了算法为找寻最优解而进行了多次搜索。整体上看,本文算法与前两者的差距不是特别明显,仅在 4~7 s 之间。不过,综合观测收益和任务完成率来看,本文改进算法性能更好。

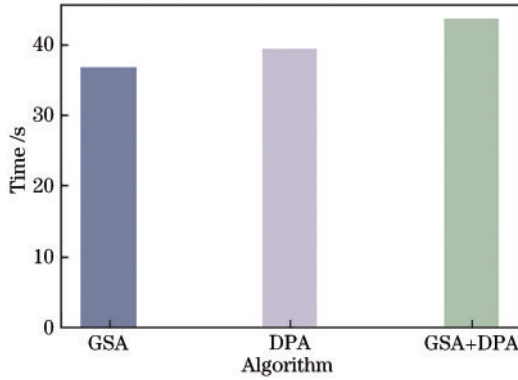


图 5 不同算法平均用时对比  
Fig. 5 Comparison of average time of different algorithms

本文算法对 2020 年 9 月 5 日云南天文台激光测距台站全天的 75 个任务调度优化后,生成了最终的调度计划表(表 4),有 3 个任务因为约束冲突无法完成调度。本文仅展示前 10 个任务。

表 4 最终任务调度计划(部分)  
Table 4 Final task scheduling plan (partial)

Star ID	Star name	Start	End
160320136	Glomass136	1210	1212
1501701203	Galileo203	1214	1216
1306702SA	Swarma	1218	1220
1101301I3	Compassi3	1222	1224
8900103E1	Etalon1	1226	1228
8606101AJ	Ajisai	1230	1232
1504502206	Galileo206	1234	1236
0000000DB	Galileo222	1238	1240
0000000DB	Geoik2	1243	1245
090700116	Glomass116	1247	1249

为了尽可能详尽地描述算法的求解能力,下面对三种算法在相同条件下进行 10 次优化调度,每次进行 100 组蒙特卡罗仿真模拟<sup>[19]</sup>,求其平均值。优化后的结果稳定性(图 6),这里用方差来表示。从图 6 可以看到,波动性较大的是 GSA 算法,而 DPA 算法相对平缓,相比之下,本文算法方差值较小且整体波动幅度不大,这说明该算法的稳定性较强。图 7 展示了三种算法在不同优化次数下的优化精度,也反映了计算机算法仿真后的优化结果与理论意义上算法优化结果之间的近似

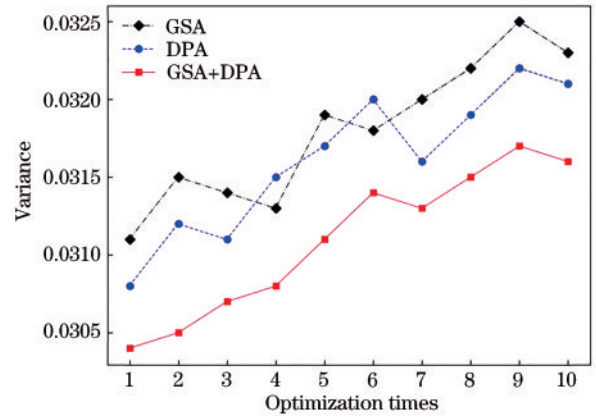


图 6 三种算法在不同优化次数后的方差变化  
Fig. 6 Variance changes of three algorithms after different optimization times

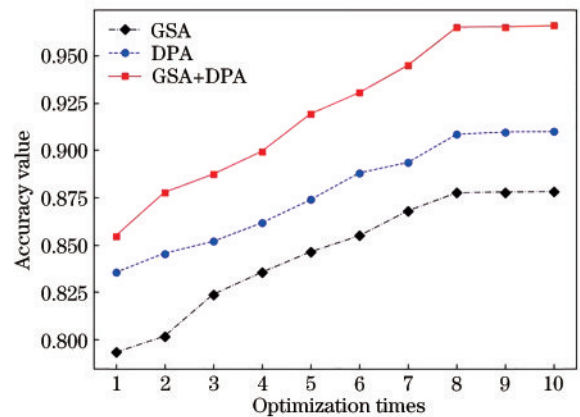


图 7 三种算法在不同优化次数下的精度值  
Fig. 7 Accuracy values of three algorithms under different optimization times

程度。整体上看,三种算法都是随着优化次数的增加,优化精度不断提升,从第 8 次以后,优化精度变化趋于平缓。其中,本文算法在优化性能方面较其他两种算法更好,这也进一步证明了本文算法性能的优越性。

## 5 结 论

本文针对卫星激光测距站任务调度问题,重点考虑了调度资源与任务之间的约束冲突,设计了一种改进的贪婪动态规划算法。通过实验仿真,从收益值、算法稳定性、优化精度等方面论证了所提算法的有效性。然后与 GSA 和 DPA 算法相比,本文算法整体效率上提高了 4.7%。该研究为未来卫星激光测距站实现自动化运营奠定了基础,不足之处在于算法平均运行时间较长。下一步的研究将结合智能领域中的优化算法,更加注重输入参数的权重分配问题并兼顾标准点数据的数量,设计出更高效、稳定、可扩展性强的算法,进一步提高任务调度效率并逐渐应用到空间碎片的观测任务中。

## 参 考 文 献

- [1] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2000.  
Ye S H, Huang C. Astronomical geodynamics[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 2000.
- [2] 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104004.  
Li Y Q, Fu H L, Li R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan observatories [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104004.
- [3] 张海涛, 李祝莲, 汤儒峰, 等. 阵列探测技术在激光测距中的应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 140-147.  
Zhang H T, Li Z L, Tang R F, et al. Application of array detection technology in laser ranging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 140-147.
- [4] Riepl S, Böer A, Schade C, et al. Improvements of the SOS-W automatic scheduler for special campaign support [C]//21st International Workshop on Laser Ranging, October 21-25, 2019, Stuttgart, Germany. Wettzell: Geodetic Observatory Wettzell, 2019.
- [5] Eckl J J, Neidhardt I A, Kirschbauer K, et al. The status of WLRs system automation[C]//21st International Workshop on Laser Ranging, November 4-9, 2018, Canberra, Australia. Wettzell: Geodetic Observatory Wettzell, 2018.
- [6] Riepl S, Eckl J, Leidig A, et al. Automatic scheduling of satellite passages at the SOS-W[C]//2017 ILRS Technical Workshop, October 2-5, 2017, Riga, Latvia. Wettzell: Geodetic Observatory Wettzell, 2017.
- [7] Riepl S, Eckl J, Leidig A, et al. Autonomous tracking with high repetition rate systems[C]//20th International Workshop on Laser Ranging, October 9-14, 2016, Potsdam, Germany. Wettzell: Geodetic Observatory Wettzell, 2016.
- [8] 金云忠, 高扬. 基于蚁群算法的卫星地面站任务规划方法[J]. 计算机与现代化, 2012(12): 11-15.  
Jin Y Z, Gao Y. Mission planning method of satellite ground station based on ant colony algorithm[J]. Computer and Modernization, 2012(12): 11-15.
- [9] 王茂才, 戴光明, 宋志明. 成像卫星任务规划与调度算法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 11-12.  
Wang M C, Dai G M, Song Z M. Research on satellite mission planning and scheduling algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2016: 11-12.
- [10] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 卫星地面站系统任务调度的动态规划方法[J]. 中国空间科学技术, 2005, 25(1): 44-47.  
Liu Y, Chen Y W, Tan Y J. The method of mission planning of the ground station of satellite based on dynamic programming[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005, 25(1): 44-47.
- [11] 代树武, 孙辉先. 基于动态规划理论的规划与调度系统 [C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十八次学术会议论文集(上册). 北京: 中国空间科学学会, 2005: 128-132.  
Dai S W, Sun H X. Planning and scheduling system based on dynamic programming theory[C]//Proceedings of the 18th Academic Conference of Space Exploration Professional Committee of Chinese Society for Space Science (Volume 1). Beijing: Chinese Society of Space Science, 2005: 128-132.
- [12] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 基于贪婪算法的卫星地面站任务规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1239-1241.  
Liu Y, Chen Y W, Tan Y J. Mission planning method of the satellite ground station based on the greedy algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(10): 1239-1241.
- [13] 李博权, 李绪志, 王红飞, 等. 贪婪算法与动态规划结合的任务规划方法[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(2): 144-147.  
Li B Q, Li X Z, Wang H F, et al. Mission planning method of the greedy algorithm and dynamic programming [J]. Microelectronics & Computer, 2013, 30(2): 144-147.
- [14] 董军军. 动态规划算法和贪心算法的比较与分析[J]. 软件导刊, 2008, 7(2): 129-130.  
Dong J J. Comparison and analysis of dynamic programming algorithm and greedy algorithm[J]. Software Guide, 2008, 7(2): 129-130.
- [15] 章密, 胡笑旋. 基于遗传算法的多星调度方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(7): 995-999, 1008.  
Zhang M, Hu X X. Scheduling of multi-satellite based on genetic algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(7): 995-999, 1008.
- [16] 陈昊, 赵斐, 白建东. 对地观测卫星动态任务调度优化算法研究[J]. 无线电工程, 2021, 51(9): 947-954.  
Chen H, Zhao F, Bai J D. Research on optimization algorithm for dynamic task scheduling of earth observation satellites[J]. Radio Engineering, 2021, 51(9): 947-954.
- [17] Li Y Q, Wang R X, Liu Y, et al. Satellite range scheduling with the priority constraint: an improved genetic algorithm using a station ID encoding method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3): 789-803.
- [18] Pearlman M R, Degnan J J, Bosworth J M. The international laser ranging service[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(2): 135-143.
- [19] 王加冕, 陶翼飞, 罗俊斌, 等. 基于蒙特卡洛仿真的机场值机系统优化研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(8): 82-86.  
Wang J M, Tao Y F, Luo J B, et al. Optimization of airport check-in system based on Monte Carlo simulation [J]. Software Guide, 2021, 20(8): 82-86.