

文章编号 1004-924X(2018)01-0150-11

## 敏捷成像卫星“逐级择优”在轨任务实时规划

苗悦, 王峰\*

(哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150009)

**摘要:**为实现对航班失联、自然灾害等突发事件的快速响应与有效观测,针对面向热点区域内多个目标的敏捷成像卫星在轨任务实时规划问题,设计了一种基于目标等级的逐级择优在轨任务实时规划算法,用以快速形成最优成像序列。首先,将热点区域内的多个地面目标按重要程度划分为多个等级,在分析目标位置与卫星性能之间约束条件的基础上,将任务规划问题转化为以成像收益为目标的优化问题。然后,针对该优化问题,在同等级目标中按“先到先得”的方法进行筛选,在当前级最优成像序列的基础上,进行下一级目标的筛选与插入,逐级实现成像收益的最大化。最后,对 18 个地面目标进行为期 500 s 的规划仿真。结果表明,算法能够在 1 s 内给出对应最大收益的对地成像序列。同遗传算法相比,所提算法解算更快,结果更为稳定,满足工程应用的快速性与高收益要求。

**关键词:**敏捷成像卫星;在轨任务实时规划;逐级择优;目标筛选

**中图分类号:**V474.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182601.0150

### Optimize-by-priority on-orbit task real-time planning for agile imaging satellite

MIAO Yue, WANG Feng\*

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150009, China)

\* Corresponding author, E-mail: wfhitsat@hit.edu.cn

**Abstract:** In order to realize quick response and effective detection in emergencies such as flight missing and natural disaster, an optimize-by-priority on-orbit task real-time planning algorithm based on priorities of targets was proposed. First, ground targets were divided into several priorities in order of importance, and the task planning was transformed to an optimization problem with objective of maximizing the imaging gain by analyzing constraints between target locations and satellite performance. Then, the targets of the same priority were selected by the rule of “first come, first served”, lower-priority targets were inserted into current optimal imaging sequences filled with several former-priority targets, and the maximum imaging gain will be obtained. Finally, a 500 s planning simulation of 18 ground targets was given. Results indicate that the algorithm proposed can give imaging sequence with the maximum gain within 1 s. The proposed algorithm calculates faster and gives more stable results as compared with the genetic algorithm.

**Key words:** agile imaging satellite; on-orbit task real-time planning; optimize by priority; target selection

收稿日期:2017-01-13;修订日期:2017-03-30.

基金项目:高分项目基金资助项目(No. GFZX04010801-3)

## 1 引言

随着成像卫星技术的发展,客户对成像卫星在突发状况下的紧急响应与快速观测也提出了越来越高的要求。传统方式的任务规划由地面人员预估卫星状态,根据成像需求提前规划,然后将结果上传给卫星。该过程受到预估误差,星地链路等限制,并且规划结果一旦上传便无法变更,在轨卫星难以应对突发的状态变化或观测需求,错失成像机会<sup>[1-3]</sup>。在敏捷卫星以其快速机动与快速稳定、观测范围广等优点在工程中广泛应用的背景下<sup>[4]</sup>,为实现在轨敏捷卫星对成像任务的快速响应与有效观测,不依赖于地面解算,由卫星对多个实时观测目标进行在轨规划、自主形成对地成像序列成为一种重要趋势<sup>[5-6]</sup>。

国内外学者针对自主任务规划开展了诸多研究。最早出现的星载自主规划调度系统为 NASA 应用于 Deep Space-1 上的 RAX-PS, RAX-PS 采用搜索算法求解约束模型,输出卫星观测某一个特定目标的时序动作方案<sup>[7]</sup>。应用于 Earth Observing-1 上的自主规划系统 CASPER 采用局部搜索算法求解任务规划模型,但系统算法规划耗时较长,无法快速应对实时观测任务<sup>[8-9]</sup>。算法方面, Wolfe 等人<sup>[10]</sup>提出了优先调度、向前看与改进的遗传算法求解建模为时间窗-约束填充的成像卫星任务规划问题,三种优化算法均考虑了目标优先级,但耗时较长。Florio 等人<sup>[11]</sup>同时考虑对地成像与数据下传,提出了序列选择和三明治式插入两种规划算法,核心思想为逐个判断目标是否满足成像条件与时间约束,满足者加入观测与下传序列,两种算法均未涉及对成像收益的优化过程。Beaumont 等人<sup>[12]</sup>对搭载云层探测器的敏捷成像卫星 Pleiades 进行了在轨任务规划可行性验证。通过反应/审议结构,对轨道/姿态机动、数据下传、对日充电、云层探测与规避、对地成像等七个动作进行在轨自主决议。根据当前卫星与环境状况,实时给出下一步最合适/最优的动作规划,算法对星载计算机的存储与计

算能力提出了较高要求。

目前,我国尚无经过在轨验证的自主任务规划系统。算法方面, Wu 等人<sup>[13]</sup>先规划紧急成像任务,再分配一般任务,采用数据处理-规划建模-算法解算的思路,考虑卫星每次过顶只观测一个目标,通过改进的蚁群算法规划卫星多轨运行的成像方案。与 Beaumont 算法思想类似,刘嵩等人<sup>[14]</sup>交叉考虑在轨卫星的规划与执行,以任务完成率为评价指标,用一个滚动窗口代表待执行任务,以此触发规划与决策,通过迭代求解输出收益最高的规划解,卫星执行后根据反馈信息进行下一轮滚动规划。文献<sup>[13]</sup>与<sup>[14]</sup>均侧重于通过设计优化算法,对卫星进行较长时间(24 小时)的成像任务规划。薛志家等人<sup>[15]</sup>综合考虑卫星平台与有效载荷,通过启发式搜索与改进的计划评审技术进行自主任务规划,输出卫星对特定成像目标的包含轨道与姿态机动等的低级指令序列。王抒雁等人<sup>[16]</sup>通过算例证明了一种地面任务规划系统的有效性,并指出敏捷卫星根据实时观测任务在轨自主解算指令序列是未来卫星任务规划的主要方向。

综上所述,国内外对自主任务规划的研究方兴未艾。但对于在轨卫星如何快速规划多个成像目标,形成当前对地观测序列的算法研究尚少。考虑任务的快速响应需求,以及星载计算机有限的运算能力与存储空间,在轨任务实时规划算法应具备简单易行、解算快速的特点<sup>[17]</sup>。基于此,本文针对敏捷成像卫星的自主任务规划问题,在建立敏捷成像卫星系统各类约束模型的基础上,提出了一种兼顾求解速度和结果收益的“逐级择优”在轨任务实时规划算法。在高优先级目标优先抢占成像机会的原则下,对目标按优先级先后进行逐级筛选与择优,最终形成包含多个目标等级、成像收益最大的卫星成像序列。最后结合敏捷成像卫星对四川省汶川县及其东部地区内 18 个分为 3 个等级的目标的任务规划实例,通过对比遗传算法验证了所提算法的优越性。算法基本满足工程应用的高收益与快速性要求。

## 2 敏捷成像卫星系统约束建模

### 2.1 卫星过顶约束

本文定义成像卫星  $S$  与某地面点目标  $T$  的连线与  $T$  所在地平面的夹角, 为  $S$  相对  $T$  的高度角, 记为  $\beta_{S-T}$ 。  $\beta_{S-T}$  示意图如图 1 所示。

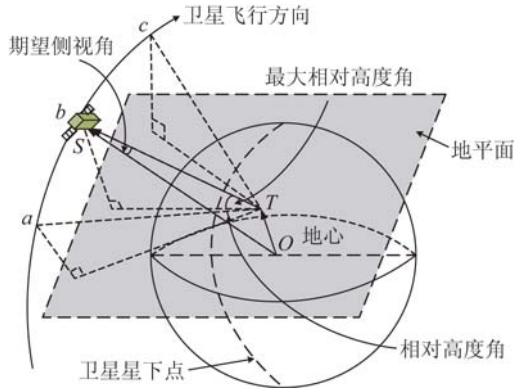


图 1 卫星相对地面点目标高度角示意图

Fig. 1 Relative elevation angle of satellite to ground point target

$S$  过顶  $T$  时,  $\beta_{S-T}$  由  $0^\circ$  逐渐变到最大值, 再逐渐减为  $0^\circ$ , 如图 1 中  $a \rightarrow b \rightarrow c$  示意的过程。  $\beta_{S-T}$  的计算公式为:

$$\beta_{S-T} = \arctan \left[ \frac{r_{S-T-x}|_U}{\sqrt{(r_{S-T-y}|_U)^2 + (r_{S-T-z}|_U)^2}} \right], \quad (1)$$

式中:  $r_{S-T}$  为  $S$  相对  $T$  的位置矢量,  $r_{S-T-x}|_U$ ,  $r_{S-T-y}|_U$ ,  $r_{S-T-z}|_U$  为  $r_{S-T}$  在天东北(UEN)坐标系下的三个坐标分量。  $\beta_{S-T}$  大于  $0^\circ$  的时间集合为  $S$  过顶  $T$  的时间窗口, 记为  $w_{S-T}$ 。  $w_{S-T}$  的表达式为:

$$w_{S-T} = \{t | t \in (\beta_{S-T} > 0^\circ)\}, \quad (2)$$

式中  $t$  表示时间。  $w_{S-T}$  内  $\beta_{S-T}$  达到最大值对应的时刻为  $S$  对  $T$  的期望成像时刻, 记为  $v_{S-T}$ 。 卫星过顶约束可表示为:

$$\{w_{S-T} \neq \emptyset\} \& \& \{v_{S-T} \in [t_s, t_o]\}, \quad (3)$$

式中  $t_s$ ,  $t_o$  分别表示某次任务规划的起始和终止时刻, 此任务规划范围  $[t_s, t_o]$  由地面给定并上传给卫星。

### 2.2 卫星侧视范围约束

$v_{S-T}$  时刻,  $S$  相对地心的位置矢量  $r_S$  与  $r_{S-T}$  的夹角为  $S$  相对  $T$  的期望侧视角, 记为  $\alpha_{S-T}$ 。

$\alpha_{S-T}$  示意图如图 1 所示, 其计算公式为:

$$|\alpha_{S-T}| = \left| \arccos \left[ \frac{r_S|_E \cdot r_{S-T}|_E}{|r_S|_E|_E| \cdot |r_{S-T}|_E|_E|} \right] \right|, \quad (4)$$

式中:  $r_S|_E$  为  $r_S$  在 ECEF 坐标系下的坐标列阵;  $r_{S-T}|_E$  为  $r_{S-T}$  在 ECEF 坐标系下的坐标列阵。 当  $T$  位于星下点轨迹方向左侧(如图 2 中  $T_1$  所示)时,  $\alpha_{S-T}$  取正值; 当  $T$  位于星下点轨迹方向右侧(如图 2 中  $T_2$  所示)时,  $\alpha_{S-T}$  取负值。

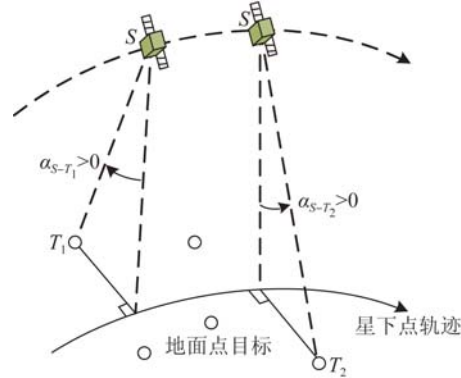


图 2 卫星相对目标的期望侧视角

Fig. 2 Expected side-watch angle of satellite to target

卫星侧视范围约束可表示为:

$$|\alpha_{S-T}| \leq |\alpha_{\max}|, \quad (5)$$

式中:  $|\alpha_{\max}|$  为  $S$  的最大侧视角。

### 2.3 卫星侧摆时间约束

本文假设  $S$  不执行观测任务时, 其体坐标系  $x$  轴与  $v_S$  方向重合, 体坐标系  $z$  轴指向地心方向,  $S$  搭载的成像设备与体坐标系  $z$  轴平行。 在  $v_{S-T}$  时刻,  $S$  通过绕体坐标系  $x$  轴的转动实现横向侧摆, 继而对  $T$  成像, 对  $T$  成像所需的横向侧摆角等于  $\alpha_{S-T}$ 。

设  $S$  从当前  $\alpha_{S-T}$  机动到下一观测任务  $T'$  对应的  $\alpha'_{S-T}$  所需的卫星姿态机动时间记为  $m_S$ , 时间与侧摆角速度的对应关系如图 3 所示。

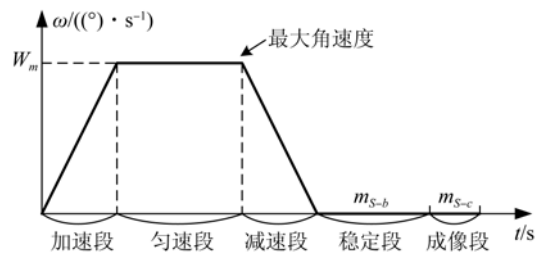


图 3 卫星姿态机动时间示意图

Fig. 3 Satellite attitude maneuver time

$m_s$  等于图 2 中加速、匀速、减速段对应的梯形面积与稳定段、成像段对应的时间之和<sup>[18]</sup>。设 S 绕  $x$  轴转动的最大角速度为  $W_m$ , 平均角加速度为  $a_m$ , 若  $|\alpha_{S-T} - \alpha'_{S-T}| \leq (W_m)^2 / a_m$  时,  $m_s$  的计算公式为:

$$m_s = 2 \times \sqrt{\frac{|\alpha_{S-T} - \alpha'_{S-T}|}{a_m}} + m_{S-b} + m_{S-c}, \quad (6)$$

式中:  $m_{S-b}$  为稳定段的时间;  $m_{S-c}$  为成像段的时间。若  $|\alpha_{S-T} - \alpha'_{S-T}| > (W_m)^2 / a_m$ ,  $m_s$  的计算公式为:

$$m_s = \frac{a_m \times |\alpha_{S-T} - \alpha'_{S-T}| - (W_m)^2}{a_m \times W_m} + m_{S-b} + m_{S-c}. \quad (7)$$

S 进行连续观测的侧摆时间约束为:

$$m_s \leq |v'_{S-T} - v_{S-T}|, \quad (8)$$

式中:  $v'_{S-T}$  为  $kS$  对  $T'$  的期望成像时刻;  $|v'_{S-T} - v_{S-T}|$  表示  $v'_{S-T}$  和  $v_{S-T}$  对应时刻之间的时间间隔。

### 2.4 太阳高度角约束

搭载可见光相机的成像卫星无法在太阳高度角过小时执行对地观测任务。设  $v_{S-T}$  时刻  $T$  所在位置的太阳高度角为  $\gamma_T$ ,  $\gamma_T$  的计算公式为:

$$\gamma_T = \arcsin(\sin(\delta_T) * \sin(\varphi_T) + \cos(\delta_T) * \cos(\varphi_T) * \cos(\tau_T)), \quad (9)$$

式中:  $\varphi_T$  为  $T$  的地心纬度;  $\delta_T$  为  $T$  在  $v_{S-T}$  时刻的太阳赤纬角;  $\tau_T$  为  $T$  在  $v_{S-T}$  时刻的太阳时角<sup>[19]</sup>。搭载可见光相机的 S 对地面成像时, 太阳高度角约束为:

$$\gamma_T \geq \gamma_{\min}, \quad (10)$$

式中:  $\gamma_{\min}$  为 S 对地观测要求的最小太阳高度角。

### 2.5 能量与存储约束

对于在轨飞行的敏捷成像卫星, 其能量与存储空间都是有限的。在时间为  $[t_s, t_o]$  的某次任务规划中, 将 S 的成像序列记为  $Q_s$ , 将  $Q_s$  中的成像任务个数记为  $|Q_s|$ 。能量与存储约束为:

$$|Q_s| \leq |Q_{\max}|, \quad (11)$$

式中  $|Q_{\max}|$  表示 S 的  $|Q_s|$  的规定最大值。

### 2.6 卫星位置约束

通过轨道递推, 给出任务规划时段内每个时刻卫星的位置与速度。采用考虑 J2 地球引力摄动项的轨道动力学模型:

$$\begin{bmatrix} \ddot{r}_{S-x|J} \\ \ddot{r}_{S-y|J} \\ \ddot{r}_{S-z|J} \end{bmatrix} = -\frac{\mu}{|r_{S|J}|^3} * \begin{bmatrix} r_{S-x|J} + \frac{\frac{3}{2}J_2 R_e^2 \left(1 - \frac{5(r_{S-z|J})^2}{|r_{S|J}|^2}\right)}{|r_{S|J}|^2} r_{S-x|J} \\ r_{S-y|J} + \frac{\frac{3}{2}J_2 R_e^2 \left(1 - \frac{5(r_{S-z|J})^2}{|r_{S|J}|^2}\right)}{|r_{S|J}|^2} r_{S-y|J} \\ r_{S-z|J} + \frac{\frac{3}{2}J_2 R_e^2 \left(3 - \frac{5(r_{S-z|J})^2}{|r_{S|J}|^2}\right)}{|r_{S|J}|^2} r_{S-z|J} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:  $r_{S|J}$  为  $r_s$  在 J2000 坐标系下的坐标阵;  $r_{S-x|J}, r_{S-y|J}, r_{S-z|J}$  为  $r_{S|J}$  的三个坐标分量;  $|r_{S|J}|$  为  $r_{S|J}$  的模长;  $J_2 = 1.082\ 64 \times 10^{-3}$ , 为地球引力摄动项;  $R_e = 6\ 378.140$  km, 为地球赤道平均半径<sup>[20]</sup>。

设某热点区域内共有  $N$  个目标参与任务规划, 记为  $T_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。首先对  $N$  个目标按 1-N 标号, 然后基于轨道递推, 对每个  $T_i$  分别在  $[t_s, t_o]$  判断其是否同时满足式(3)与式(5), 然后形成目标初步筛选结果, 如表 1 所示。

表 1 目标初步筛选结果

Tab.1 Results of targets after preliminary selection

目标序号	$v_{S-T}$	$\alpha_{S-T}$	$y_{S-T}$
1	06:19:59	-37.22°	1
2	0	0	0
...	...	...	...
N	06:20:32	-37.22°	1

表 1 中:  $y_{S-T}$  为标志量, 当目标不同时满足式(3)和式(5)时,  $y_{S-T} = 0$ , 表示 S 不具备对该目标的成像条件; 当目标同时满足式(3)与式(5)时,  $y_{S-T} = 1$ , 需要通过后续算法进一步判断该目标能否加入  $Q_s$  之中。

## 3 敏捷成像卫星在轨任务实时规划算法设计

### 3.1 逐级无择优算法

本节提出一种基于目标等级的逐级无择优在

轨任务实时规划算法,即按照目标的重要等级,逐级为卫星筛选目标,最终形成高收益的成像序列。

首先为热点区域内的  $N$  个地面目标设置  $\lambda$  个等级,记为  $T_k^u (k=1, 2, \dots, \lambda; u=1, 2, \dots, u_k)$ , 其中  $k$  表示目标等级,  $k$  值越小对应优先级越高, 其成像收益  $\tilde{\omega}_k$  越大;  $u_k$  表示第  $k$  级目标的个数, 并且满足:

$$\sum_{k=1}^{\lambda} u_k = N. \quad (13)$$

算法的优化目标为使  $Q_S$  的成像收益  $J_S$  达到最大。  $J_S$  的表示式为:

$$J_S = \sum_{k=1}^{\lambda} (\tilde{\omega}_k * m_k), \quad (14)$$

式中  $m_k$  表示  $Q_S$  中第  $k$  级目标的个数。

然后为  $S$  设置虚拟起始任务  $T_s$  和虚拟终止任务  $T_o$ , 其中  $T_s$  的序号为 0, 其期望成像时刻为  $t_s$ 、期望侧视角为  $0^\circ$ ;  $T_o$  的序号为  $N+1$ , 其期望成像时刻为  $t_o$ 、期望侧视角与传入  $T$  对应的  $\alpha_{S-T}$  相同。给出某个地面目标  $T$  传入  $S$  时,  $S$  对  $T$  的筛选过程:

(1) 若  $Q_S$  中只含有  $T_s$  与  $T_o$ , 考查传入  $T$  的  $y_{S-T}$ , 若  $y_{S-T}=1$ , 判断  $S$  从  $0^\circ$  机动到  $\alpha_{S-T}$  并稳定下来所需的时间  $m_s$ , 是否满足:

$$m_s \leq |v_{S-T} - t_s|, \quad (15)$$

式中:  $m_s$  由式(6)或式(7)计算得到。若式(15)成立, 则该  $T$  能够加入  $Q_S$ ; 若  $y_{S-T}=0$ , 或式(15)不成立, 则该  $T$  无法加入  $Q_S$ ;

(2) 若  $Q_S$  中已含除  $T_s$  与  $T_o$  以外的  $\vartheta$  个观测任务: 将  $Q_S$  中的  $(\vartheta+2)$  个任务按其期望成像时刻的先后顺序排序, 记为  $T_s, T'_1, T'_2, \dots, T'_\vartheta, T_o$ 。将其对应的  $t_s, v'_{S-1}, v'_{S-2}, \dots, v'_{S-\vartheta}, t_o$  作为节点将  $Q_S$  分成若干段,  $Q_S$  中每个节点对应一个期望侧视角, 分别为  $0^\circ, \alpha'_{S-1}, \alpha'_{S-2}, \dots, \alpha'_{S-\vartheta}, \alpha_{S-T}$ 。考查传入  $T$  的  $y_{S-T}$ , 若  $y_{S-T}=1$ , 判断  $v_{S-T}$  是否位于  $Q_S$  中某两个节点之间, 将这两个节点分别记为  $v_{S-a}, v_{S-b}$ , 其期望成像侧视角记为  $\alpha_{S-a}, \alpha_{S-b}$ 。判断:

(a)  $S$  由  $\alpha_{S-a}$  机动到  $\alpha_{S-T}$  并稳定、成像所需的时间  $m_a$  是否满足:

$$m_a \leq |v_{S-T} - v_{S-a}|. \quad (16)$$

(b)  $S$  由  $\alpha_{S-T}$  机动到  $\alpha_{S-b}$  并稳定、成像所需的时间  $m_b$  是否满足:

$$m_b \leq |v_{S-b} - v_{S-T}|. \quad (17)$$

若式(16)与式(17)均成立, 则该  $T$  能够加入  $Q_S$ ; 若  $y_{S-T}=0$ , 或式(16)与式(17)不全成立, 则该  $T$  无法加入  $Q_S$ 。这体现了传入的  $T$  加入  $Q_S$  要以不影响  $Q_S$  中已存在的成像任务为前提。  $S$  对传入的  $T$  的筛选过程如图 4 所示。

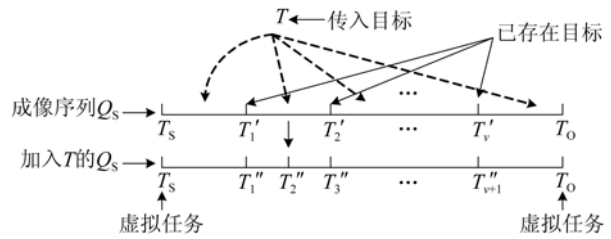


图 4 卫星对传入目标的筛选过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of satellite selecting input target

图 4 中筛选过程为: 假设传入目标  $T$  对应的  $v_{S-T}$  在  $Q_S$  的  $T'_1$  与  $T'_2$  之间, 在  $T$  满足式(16)与式(17)的情况下,  $T$  加入到  $Q_S$  之中。

以  $S$  对  $T$  的筛选过程为核心, 设计逐级无择优算法。算法输入为: (1) 由地面站上传的所有地面目标的位置及其等级; (2) 任务规划时间范围。算法输出为卫星在给定规划时段内的成像任务序列, 具体步骤如下:

第 1 级: 将第一级目标  $T'_1 (u=1, 2, \dots, u_1)$  按某种方式排序, 依次传给  $S$  进行筛选。当  $u_1$  个一级目标均完成筛选过程, 或  $|Q_S|$  达到  $|Q_{\max}|$  时, 第一级规划结束;

第  $h$  级 ( $h=2, 3, \dots, \lambda$ ): 在上一级规划结果  $Q_S$  的基础上, 将第  $h$  级  $u_h$  个目标按某种方式排序, 依次传给  $S$  进行筛选。当  $u_h$  个  $h$  级目标均完成筛选过程, 或  $|Q_S|$  达到  $|Q_{\max}|$  时, 第  $h$  级规划结束。

当所有目标均完成筛选, 或  $|Q_S|$  达到  $|Q_{\max}|$  时, 算法结束。当  $|Q_S|$  未达到  $|Q_{\max}|$  时, 逐级无择优算法流程如图 5 所示。

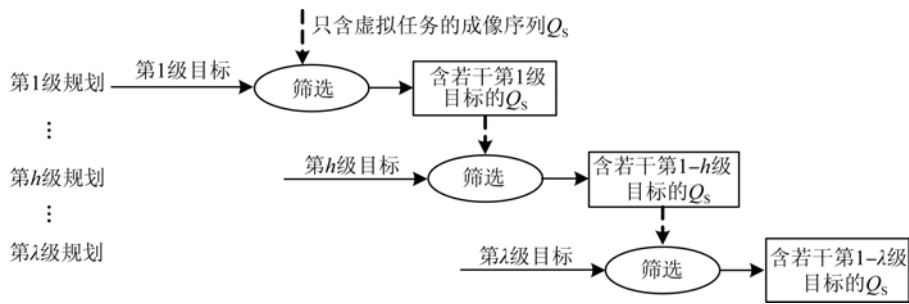


图 5 逐级无择优算法流程图

Fig. 5 Flow chart of select-by-priority algorithm

在逐级无择优算法的每级规划中,由于后传入的目标要在  $Q_s$  中已存在的某两个成像任务之间被成像,因而越是后传入的目标,可供卫星姿态机动与稳定、成像的时间越少,因此该目标被成像的可能性越小,这体现了“先到先得”的原则,即越是先传入的目标,其得到成像机会的可能性越大。逐级规划保证了优先级高的目标优先抢占成像资源,从而保证了较高的成像收益。

该算法中每级目标均以某一种顺序依次传入,经过  $\lambda$  级目标传入与筛选后,形成一种  $Q_s$ 。算法中无择优过程,无法保证  $Q_s$  对应的  $J_s$  达到最大值。

### 3.2 逐级择优算法

逐级择优算法是在逐级无择优算法的基础上,在每级规划中加入将目标以多种方式传入、逐级保留当前最优规划结果的过程,最终形成对应  $J_s$  取

得最大值的一种或互异的多种  $Q_s$ 。算法步骤为:

第 1 级:将  $u_1$  个第 1 级目标按序号全排列,形成  $(u_1!)$  种传入方案。在每种传入方案下依次对每个目标进行筛选,从而形成  $(u_1!)$  个  $Q_{s-1}$ ,分别计算当前  $J_s$ ,从中选出使  $J_s$  取得最大值的一种或互异的多种  $Q_{s-1}$  作为第一级规划结果,假设共有  $f_1$  种;

第  $h$  级 ( $h=2,3,\dots,\lambda$ ):将  $u_h$  个第  $h$  级目标按序号全排列,形成  $(u_h!)$  种传入方案。分别在  $f_1$  种  $Q_{s-1}$  的基础上,依次对  $(u_h!)$  种传入方案下的每个目标进行筛选,从而形成  $(f_1 * (u_h!))$  个  $Q_{s-h}$ 。分别计算其当前成像收益  $J_s$ ,从中选出使  $J_s$  取得最大值的一种或互异的多种  $Q_{s-h}$  作为第  $h$  级规划结果。当所有目标均完成筛选,或  $|Q_s|$  达到  $|Q_{max}|$  时,算法结束。当  $|Q_s|$  未达到  $|Q_{max}|$  时,逐级择优算法流程如图 6 所示。

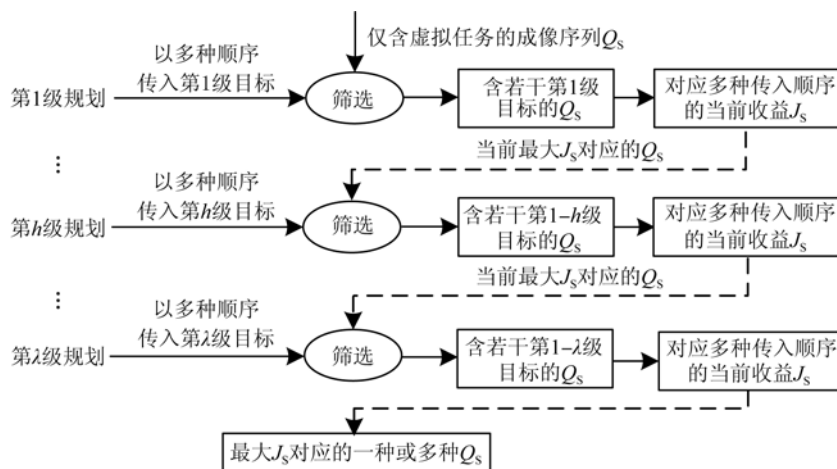


图 6 逐级择优算法流程图

Fig. 6 Flow chart of optimize-by-priority algorithm

逐级择优算法在保留逐级无择优算法“先到先得”、重要目标优先成像等特点的同时,在每级规划中均选出了使当前级成像收益达到最大的一种或多种成像序列,以此分别作为当前级的规划结果再进行下一级规划,由此实现了逐级择优,保证最后形成的  $Q_s$  对应的  $J_s$  取得最大值。

当卫星规划大量目标时,逐级择优算法在择优过程中需解算与对比大量的序列方案,导致计算速度下降。为保证在轨卫星的自主任务规划速度,此时可选用逐级无择优算法,从而兼顾较高的成像收益与快速的解算速度。

#### 4 仿真分析

为验证上节中设计的逐级无择优与逐级择优两种算法的有效性,本节进行数学仿真及分析。仿真背景为四川省汶川县及其东部地区,应用两种算法分别为单颗敏捷成像卫星筛选地面观测目标,解算出卫星的成像序列,同时实现高成像收

益。本节仿真条件包括:

(1)敏捷成像卫星搭载可见光相机,卫星最大侧视角为  $\pm 15^\circ$ ,卫星对地成像要求地面太阳高度角  $\geq 30^\circ$ ;

(2)敏捷卫星进行姿态机动平均角加速度为  $0.2 (^\circ)/s^2$ ,最大角速度为  $2 (^\circ)/s$ ;卫星姿态机动后稳定段时间为 15 s,成像段时间为 5 s;

(3)应用算法规划 2016 年 5 月 2 日 6 时 18 分 40 秒至 2016 年 5 月 2 日 6 时 27 分 00 秒卫星的成像序列。在此 500 s 内,卫星最多可以对 10 个目标成像;

(4)卫星的轨道根数如表 2 所示,轨道根数对应的 UTC 时刻为 2016 年 5 月 2 日 6 时 18 分 40 秒。

(5)观测对象为四川省汶川县及其东部地区的 18 个、共 3 个等级的地面目标,其中第一级目标标号 1~6,成像收益为 100/个;第二级目标标号 7~12,成像收益为 40/个;第三级目标标号 13~18,成像收益为 10/个。目标的位置信息如表 3 所示。

表 2 卫星轨道根数

Tab. 2 Orbital elements of satellite

半长轴	偏心率	轨道倾角	升交点赤经	近地点幅角	真近点角
6 665.232 072 km	0.000 808	32.953°	350.967°	168.388°	255.320°

表 3 地面目标位置

Tab. 3 Positions of ground targets

目标序号	大地纬度	大地经度	目标序号	大地纬度	大地经度
1	31.70°N	104°E	13	32.30°N	104.44°E
2	31.00°N	100°E	14	29.87°N	104°E
3	30.00°N	100°E	15	32.50°N	115°E
4	33.30°N	117°E	16	30.63°N	103.86°E
5	32.90°N	128°E	17	33.00°N	125°E
6	32.00°N	111°E	18	32.50°N	130°E

下面分别给出了应用逐级无择优/逐级择优两种在轨任务实时规划算法的仿真结果。运行环境为 3.0 GHz E5700 CPU 配置下的 Matlab R2014a。

采用逐级无择优算法,将目标按期望成像时刻的前后顺序传入卫星,得到的卫星成像序列如表 4 所示。

表 4 采用逐级无择优算法的卫星成像序列

Tab. 4 Imaging sequence of satellite by select-by-priority algorithm

目标序号	3	8	6	9	17	5
成像时刻	06:19:45	06:21:10	06:22:18	06:22:58	06:25:26	06:26:06
侧视角度/(°)	-7.45	-1.84	-4.59	-10.95	2.10	1.90

表 4 给出的结果表示卫星自任务规划起始时刻(2015-05-02 06:18:40),依次对标号为 3,8,6,9,17,5 的地面目标,在对应的期望成像时刻以对应的横向侧摆对目标成像。表 4 中卫星成像序列的示意图如图 7 所示。图 7 中的背景为四川省汶川县及其以东地区的地形简图,其中:黑色弧线为 2016 年 5 月 2 日 6 时 18 分 40 秒至 2016 年 5

2 日 6 时 27 分 00 秒卫星的星下点轨迹;“■”、“▲”、“●”图形及其右上方的标号分别示意第 1 级、第 2 级、第 3 级目标;黑色箭头指向为卫星的观测顺序,每个箭头的起始和终点所在位置为卫星的成像目标,其标号依次为 3→8→6→9→17→5。采用逐级择优算法得到的卫星成像序列如表 5 所示。

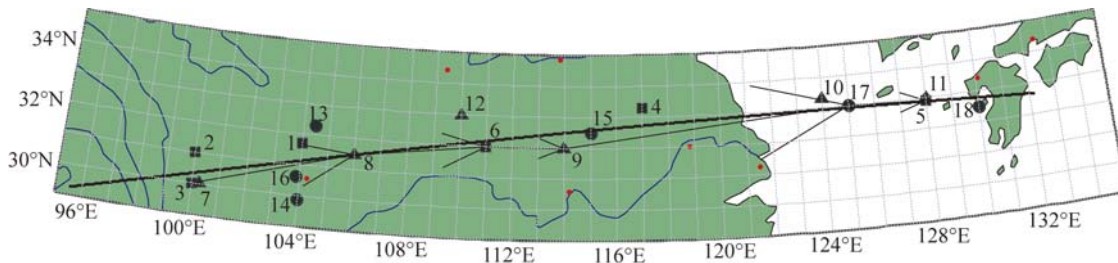


图 7 采用逐级无择优算法的卫星成像序列示意图

Fig. 7 Diagram of satellite imaging sequence by select-by-priority algorithm

由表 5 可知,逐级择优算法给出了两种成像序列,两种序列只有第一个成像目标不同,目标序号分别为 2 和 3,由于二者均为第 1 级目标,因此其成

像收益相同。即在此仿真背景下,逐级择优算法给出了最大成像收益对应的两种互异的成像序列。表 5 中卫星成像序列的示意图如图 8 所示。

表 5 采用逐级择优算法的卫星成像序列

Tab. 5 Imaging sequence of satellite by optimize-by-priority algorithm

目标序号	3/2	1	6	9	4	10	5
成像时刻	06:19:45/06:19:49	06:20:44	06:22:18	06:22:58	06:23:40	06:25:12	06:26:06
侧视角度	-7.45°/13.63°	11.62°	-4.59°	-10.95°	12.17°	7.43°	1.90°

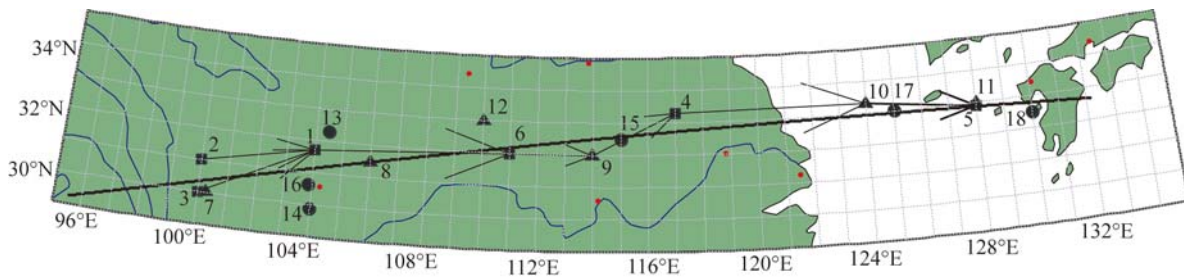


图 8 采用逐级择优算法的卫星成像序列示意图

Fig. 8 Diagram of imaging sequence of satellite by optimize-by-priority algorithm

图 8 的背景与图 7 相同,图 8 中示意的两种成像序列的观测顺序分别为  $3 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 10 \rightarrow 5$  与  $2 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 10 \rightarrow 5$ 。通过观察图 7 与图 8 可以发现,当目标位于示意图中星下点轨迹上方时,目标对应的卫星横向侧摆角为正值;当目标位于示意图中星下点轨迹下方时,目标对应

的卫星横向侧摆角为负值,符合 1.2 节的假设条件。为证明两种设计算法的有效性及其快速性,选用规划问题的通用算法之一——遗传算法对本算例进行求解(将卫星成像序列设为个体,每个成像目标设为基因,成像收益设为适应性函数)。三种算法的对比如表 6 所示。

表 6 三种算法的结果对比

Tab. 6 Comparison of three algorithms

算法	逐级无择优算法	逐级择优算法	遗传算法
成像序列	$3 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 17 \rightarrow 5$ 或 $2/3 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 10 \rightarrow 5$	$2/3 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 10 \rightarrow 5$	$2 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 17 \rightarrow 5$ 或 $2/3 \rightarrow 1 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 10 \rightarrow 5$
包含目标/个	6~7	7	7
成像收益	390~580	580	550~580
第 1/2/3 级目标/个	3 / 2 / 1(390)~5 / 2 / 0(580)	5 / 2 / 0	4 / 1 / 2(550)~5 / 2 / 0(580)
算法运行时间/s	<1	≤1	≤4
平均成像收益	485	580	565

由表 6 可知,逐级无择优算法与遗传算法均无法给出唯一的成像序列。逐级无择优算法结果的不确定是由于传入目标顺序的不同导致的,不同的目标传入顺序对应不同的成像序列;遗传算法结果的不确定是由于其选择、交叉与变异过程均具有一定的随机性,在给定的运行时间内,算法结果不一定是对应成像收益为 580 的最优解。

相比于逐级无择优算法与遗传算法,逐级择优算法以最快(≤1 s)的运行速度给出了确定的、包含最多第 1 级目标的最优成像序列。这是由于逐级择优算法在第 1 级规划时,筛选出了使第 1 级目标最多被成像的方案。逐级无择优算法的解算时间快于逐级择优算法,这是由于逐级择优算法中加入了择优过程,导致计算量增大。

## 5 结 论

本文提出了一种利用成像约束条件判断目标是否能够加入卫星成像序列的筛选过程,以此过程为核心,在卫星系统约束建模的基础上,设计了逐级无择优与逐级择优两种在轨成像任务实时规划算法。通过将每个成像目标的期望成像时刻与侧视角提前解算,淘汰不满足约束的目标;对剩余目标按重要等级分层依次判断筛选,从而减少每次判断筛选的目标数目等方法提高算法的实时解算效率。仿真验证表明,逐级择优算法能够在 1 s 时间内给出最优成像序列,算法在结果稳定度、成像收益与运行速度方面整体优于逐级无择优算法

和遗传算法,能够满足在轨任务实时规划对算法的快速性要求。

后续工作将细化约束模型,并将算法推广应用于多星多目标的在轨任务实时规划。

#### 参考文献:

- [1] KARAPETYAN D, MINIC S M, MALLADI K T, *et al.*. Satellite downlink scheduling problem: a case study [J]. *Omega*, 2015, 53: 115-123.
- [2] WANG P, REINELT G, GAO P, *et al.*. A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 61(2): 322-335.
- [3] KIM H, CHANG Y K. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 40: 17-32.
- [4] 陈雪芹, 耿云海, 王峰, 等. 敏捷小卫星对地凝视姿态跟踪控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1031-1040.  
CHEN X Q, GENG Y H, WANG F, *et al.*. Starling imaging attitude tracking control of agile small satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1031-1040. (in Chinese)
- [5] 张冰, 邹焕新. 成像卫星任务规划模型及求解方法研究进展 [J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(S1): 116-120.  
ZHANG B, ZOU H X. The model of imaging satellite task scheduling and research progress of algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(S1): 116-120. (in Chinese)
- [6] 贺仁杰, 李菊芳, 姚峰, 等. 成像卫星任务规划技术 [M]. 长沙: 科学出版社, 2011: 1-15.  
HE R J, LI J F, YAO F, *et al.*. *Task Planning Technology of Imaging Satellite* [M]. Changsha: Science Press, 2011: 1-15. (in Chinese)
- [7] JÓNSSON A K, MORRIS P H, MUSCETTOLA N, *et al.*. Planning in interplanetary space: theory and practice[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems*, AAAI Press, 2000: 177-186.
- [8] RABIDEAU G, TRAN D, CHIEN S, *et al.*. Mission operations of Earth Observing-1 with onboard autonomy[C]. *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology*, IEEE, 2006: 367-373.
- [9] SHERWOOD R L, CHIEN S, DAVIES A, *et al.*. Real-time decision making on EO-1 using onboard science analysis [J]. *SPIE*, 2005, 5657: 47-55.
- [10] WOLFE W J, SORENSEN S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain [J]. *Management Science*, 2000, 46(1): 148-166.
- [11] DEFLORIO S, ZEHETBAUER T, NEFF T. Optimal operations planning for SAR satellite constellations in low earth orbit[C]. *Proceedings of the 6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations*, European Space Agency, 2005: 1-6.
- [12] BEAUMET G, VERFAILLIE G, CHARMEAU M C. Feasibility of autonomous decision making on board an agile earth-observing satellite [J]. *Computational Intelligence*, 2011, 27(1): 123-139.
- [13] WU G H, MA M H, ZHU J H, *et al.*. Multi-satellite observation integrated scheduling method oriented to emergency tasks and common tasks [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2012, 23(5): 723-733.
- [14] 刘嵩, 陈英武, 邢立宁, 等. 敏捷成像卫星自主任务规划方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(4): 928-934.  
LIU S, CHEN Y W, XING L N, *et al.*. Method of agile imaging satellites autonomous task planning [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(4): 928-934. (in Chinese)
- [15] 薛志家, 杨忠, 李晶, 等. 面向突发性事件的卫星自主任务规划 [J]. *指挥控制与仿真*, 2015, 37(1): 24-30.  
XUE ZH J, YANG ZH, LI J, *et al.*. Autonomous mission planning of satellite for emergency [J]. *Command Control & Simulation*, 2015, 37(1): 24-30. (in Chinese)
- [16] 王抒雁, 谢松, 杨芳, 等. 敏捷卫星地面任务规划系统研究及应用算例 [J]. *测绘通报*, 2014: 163-165.  
WANG SH Y, XIE S, YANG F, *et al.*. Research and application example of agile satellite ground mission planning system [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014: 163-165. (in Chinese)
- [17] 李志亮, 李小将, 王志恒. 敏捷卫星任务规划问题研究现状与展望 [J]. *装备学院学报*, 2016, 27(1): 69-75.

- LI ZH L, LI X J, WANG ZH H. Current status and prospect of agile satellite mission planning [J]. *Journal of Equipment Academy*, 2016, 27 (1): 69-75. (in Chinese)
- [18] 范国伟, 常琳, 戴路, 等. 敏捷卫星姿态机动的非线性模型预测控制 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23 (8): 2318-2327.
- FAN G W, CHANG L, DAI L, *et al.*. Nonlinear model predictive control of agile satellite attitude maneuver [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23 (8): 2318-2327. (in Chinese)
- [19] 张玉燕, 刘勇, 温银堂, 等. 基于 STM32 的太阳自动追踪系统 [J]. *光学 精密工程*, 2016, 24 (10): 415-420.
- ZHANG Y Y, LIU Y, WEN Y T, *et al.*. Automatic sun tracking system based on STM32 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (10): 415-420. (in Chinese)
- [20] 李丹, 于洋. 基于轨道根数的低轨卫星轨道预测算法 [J]. *光学 精密工程*, 2016, 24 (10): 2540-2548.
- LI D, YU Y. Prediction algorithm of close-orbit satellite based on orbit elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2540-2548. (in Chinese)

#### 作者简介:



苗悦(1991—),女,河北唐山人,博士研究生,2014年、2016年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为敏捷卫星在轨任务实时规划。E-mail: tsslzfx@126.com

#### 通讯作者:



王峰(1981—),男,浙江江山人,教授,博士生导师,2003年、2005年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为航天器在轨服务、编队飞行协同控制。E-mail: wfhitsat@hit.edu.cn