

面向应急对地观测任务的星座设计与机动调度

朱阅詠*, 金柯, 肖瑶, 张赛, 杨震, 罗亚中

空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 国防科技大学, 长沙

1. 背景

随着空间快速响应技术的迅猛发展, 卫星的制造和发射成本将大大降低, 部署入轨所需的时间也将显著减少, 基于库存卫星快速搭建一个可执行应急任务的小规模星座将具备可行性。第十三届中国空间轨道设计竞赛丙题(本科生专属赛题)即设定为: 面向应急对地观测任务的星座设计与机动调度。

2. 问题描述

2035 年 9 月下旬, 全球多地安全形势严峻, 某国拟利用地面库存的低成本观测卫星快速构建一个星座, 针对 20 个地面重点目标以及 1 个海上移动目标开展应急观测任务。任务时段为 UTC 时间 2035 年 9 月 26 日 12 时至 9 月 28 日 12 时。图 1 给出了 20 个地面目标的位置以及海上移动目标在该时段的行驶轨迹, 具体数据详见给定的 ATK 软件场景文件 CTOC13.xml。

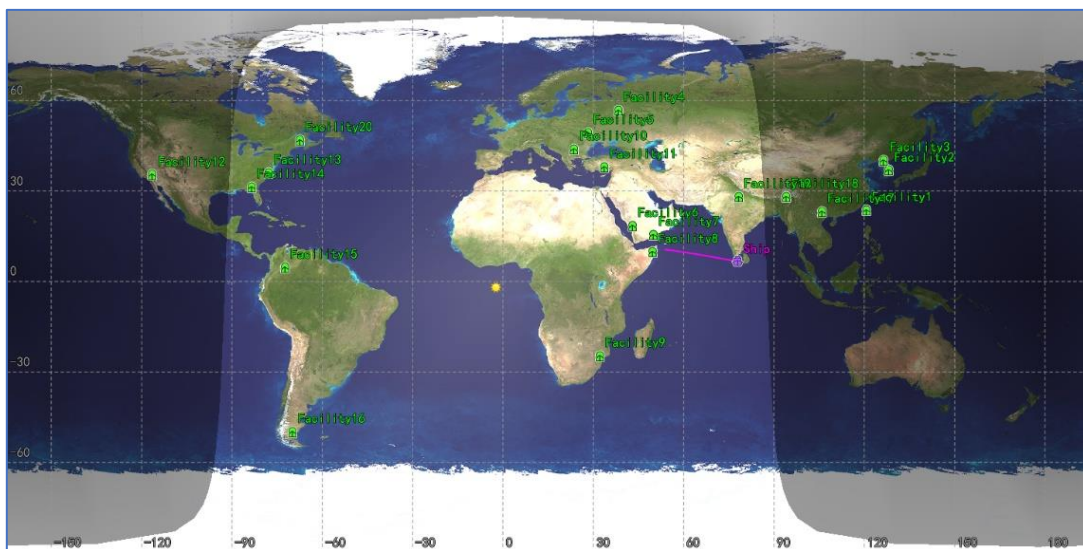


图 1 待观测地面重点目标及海上移动目标示意图

已知地面共库存有可用卫星 20 颗, 每卫星均具备全天候对地观测能力, 视

* Email: zhuyueche@nudt.edu.cn

场半锥角均为 20° 。当某一时刻某个地面或海上目标进入到任意一颗卫星的视锥内，即认为成功观测到该目标一次，如图 2 所示。

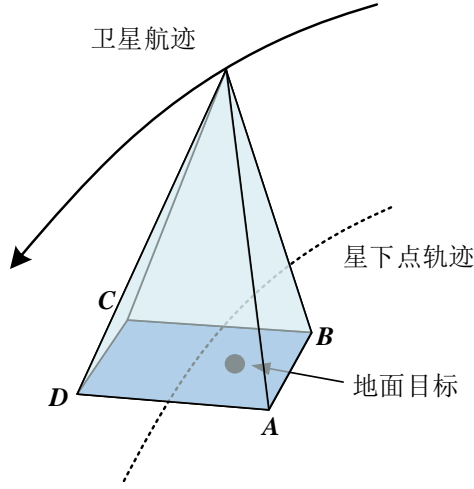


图 2 卫星成功观测地面目标

在任务时段内，若对某个地面固定目标的最大重访时间小于 6 小时，即认为成功完成对该目标的重访观测任务，若对海上移动目标的最大重访时间小于 3 小时，即认为成功完成对海上移动目标的跟踪观测任务。**本题要求采用尽量少的库存卫星构建一个星座，设计每颗星的初始轨道以及任务时段内部分或全部卫星的轨道机动方案，尽可能多地完成对上述地面目标和海上移动目标的观测任务。**

3. 动力学模型

所有卫星在运动过程中仅考虑地球中心引力和非球形 J_2 项摄动，忽略其它摄动力的影响。在地心惯性坐标系下，卫星的轨道动力学方程为

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\mathbf{r} + \mathbf{a}_{J_2} \quad (1)$$

其中， μ 为地球引力常数， $\mathbf{r}=[x,y,z]^T$ 为卫星的位置矢量， \mathbf{a}_{J_2} 为地球扁率引起的 J_2 项摄动加速度，表达式为

$$\mathbf{a}_{J_2} = \mathbf{M} \cdot \frac{3}{2} \frac{\mu J_2 R_E^2}{r^5} \begin{bmatrix} 5 \frac{x_F z_F^2}{r_F^2} - x_F \\ 5 \frac{y_F z_F^2}{r_F^2} - y_F \\ 5 \frac{z_F^3}{r_F^2} - 3z_F \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, R_E 为地球赤道平均半径, J_2 为摄动项系数, $\mathbf{r}_F = [x_F, y_F, z_F]^T$ 为卫星在地心固连系下坐标, \mathbf{M} 为 ICRF 惯性系到地球固连系 ECF 的坐标转换矩阵, 采用 IAU2006 标准。

卫星采用大推力化学推进器, 机动过程近似为瞬时脉冲。设地心惯性坐标系下的脉冲矢量为 $\Delta \mathbf{v}$, 脉冲前后时刻分别记为 t^- 和 t^+ , 卫星的位置 \mathbf{r} 和速度 \mathbf{v} 的变化满足如下方程:

$$\begin{cases} \mathbf{r}(t^+) = \mathbf{r}(t^-) \\ \mathbf{v}(t^+) = \mathbf{v}(t^-) + \Delta \mathbf{v} \end{cases} \quad (3)$$

4. 评价指标

本题目的第一评价指标为最大化观测任务完成度:

$$S_1 = 4 \sum_{k=1}^{20} \delta_k + 20 \delta_h \quad (4)$$

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta t_{\max k} < 6h \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, 20 \quad (5)$$

$$\delta_h = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta t_{\max h} < 3h \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta t_{\max k}$ 和 $\Delta t_{\max h}$ 分别为第 k 个地面目标和海上移动目标的最大重访时间间隔, δ_k 和 δ_h 分别为第 k 个地面目标和海上移动目标的观测任务完成情况。每完成一个地面目标的观测任务加 4 分, 完成海上移动目标的观测任务加 20 分, 最高可得 100 分。

第二评价指标为最小化星座部署卫星数量:

$$S_2 = n \quad (7)$$

第三评价指标为最小化所有机动卫星的总脉冲:

$$S_3 = \sum_{i=1}^n \Delta v_i \quad (8)$$

其中, Δv_i 为第 i 颗机动卫星的脉冲总量。

对于任意的两个方案，若 S_1 相同，则 S_2 更小的方案更优；若 S_2 也相同，则 S_3 更小的方案更优。

5. 约束条件

（1）任务时间约束

观测任务必须在 UTC 时间 2035 年 9 月 26 日 12 时至 9 月 28 日 12 时之间完成，对应的儒略日为 2464597~2464599，任务时长为 2 天。

（2）卫星状态约束

初始时刻，所有卫星的轨道高度必须在 500 km~1000 km 之间；初始时刻之后至任务结束前的 2 天内，所有卫星的轨道高度必须在 200 km~1000 km 之间。

（3）机动能力约束

每颗卫星的总速度增量上限为 1000 m/s，脉冲次数不限。

（4）卫星数量约束

星座中部署的卫星总数量不得超过 20 颗。

（5）场景约束

初始场景中地面固定目标与海上移动目标的参数不能作任何修改，所有添加的卫星必须携带一个半锥角为 20° 的矩形敏感器才能开展观测任务。

6. 方案设计与结果提交

本题目的方案设计和结果验证均依托 ATK 软件开展。打开 ATK 软件，导入初始场景文件 CTOC13.xml 后，即可看到 20 个地面目标的位置和海上移动目标的行驶轨迹。各参赛队均以此为基础开展方案设计。

（1）方案设计

本题目的设计内容主要包括两个部分：初始时刻所有卫星的部署轨道和整个任务时段内部分或全部卫星的轨道机动方案。在 ATK 软件中，包括添加卫星、构造星座、添加机动脉冲以及调用内置函数开展轨道机动方案规划等功能的实现方法详见附件 1。

（2）结果验证与提交

竞赛专用版 ATK 软件内置了结果验证工具。在软件右上方点击“CTOC13 验

证”即进入结果验证页面，再点击计算按钮即可对设计方案进行验证，如图3所示，软件会自动给出当前方案的三个评价指标以及违反约束的情况。

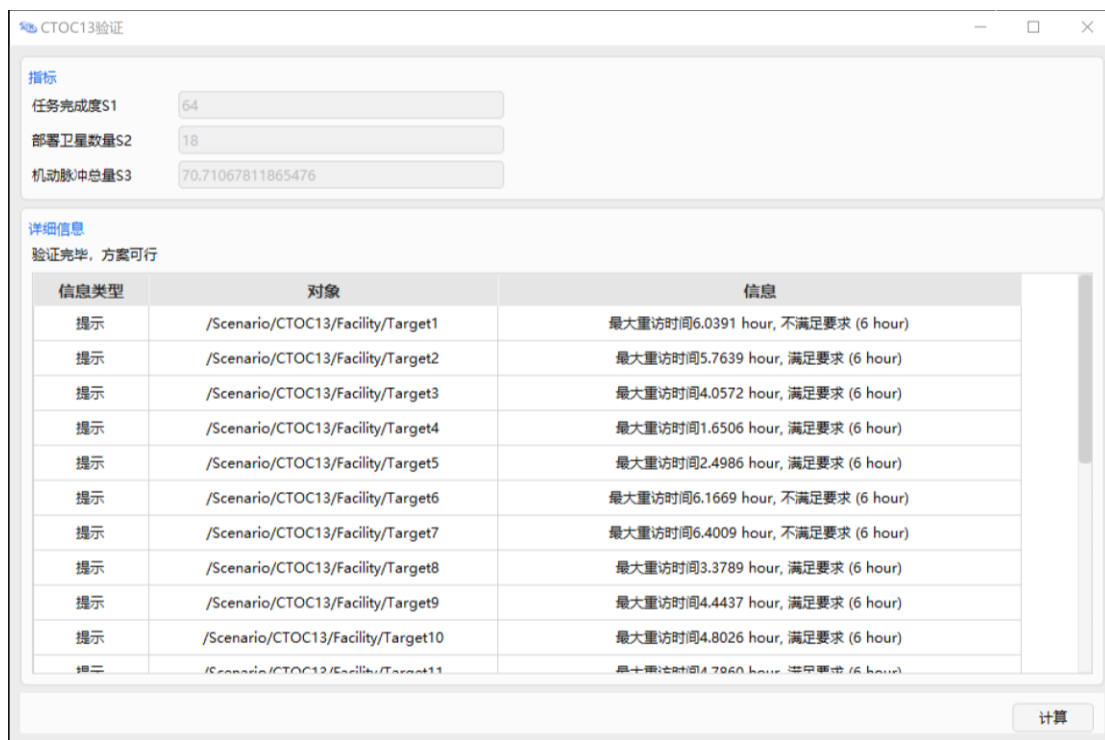


图3 ATK 软件中的 CTOC13 结果验证页面

将包含观测目标信息、星座卫星参数以及轨道机动方案的 xml 场景文件保存并提交到竞赛网站上进行验证，验证通过并提交即可在排行榜上显示该结果。竞赛结束前可多次更新设计方案，排行榜上只会显示每个队伍提交的最优方案。排行榜按照先第一指标后第二指标再第三指标的顺序排名，若三个评价指标均相同，则提交时间更早的结果排名更靠前。需要说明的是，网站上的结果验证工具与 ATK 软件中的结果验证工具相同，能通过线下验证的设计方案均能通过线上验证。

(3) 常用参数设定

本题中用到的常数取值如表1所示。

表1 常数取值

符号	含义	数值	单位
R_E	地球赤道平均半径	6378137	m
ω_E	地球自转角速率	7.2921151467e-5	Rad/s
μ	地球引力常数	3.986004418e14	m ³ /s ²
J_2	摄动项系数	从所选取的重力场系数文件读取	-