

多卫星区域观测任务的侧摆方案优化方法研究

祝江汉¹ 李 曦¹ 毛赤龙¹ 张利宁¹

(1 国防科技大学信息系统与管理学院, 长沙市砚瓦池正街 137 号, 410073)

摘 要: 提出了多颗成像卫星对某一区域目标进行观测的侧摆方案优化方法。该方法主要包括调度预处理与优化两个步骤。在调度预处理阶段,集成 STK 软件解决了航天观测中时间窗口难以量化计算等问题;在优化阶段,建立数学优化模型,并基于遗传算法实现了模型的求解。
关键词: 优化; 成像侦察卫星应用; 遗传算法
中图法分类号: P228

目前,对卫星观测效率优化方面的研究大多集中在单星调度方面,并且许多问题的研究都同具体的卫星紧密相关^[1],即使有部分关于多星资源调度的研究工作^[2,3],但其观测目标大多为点目标。本文研究的内容为多星对区域目标进行观测的效率优化问题。

1 面向区域目标观测任务的多星效率优化模型

1.1 问题的边界及相关约束条件

实际的航天观测活动涉及到众多的约束条件,本文对这些约束条件进行了假设与简化,主要的假设包括:目标区域为面积较大的区域,卫星一次扫描无法完全覆盖;一颗卫星只携带一部遥感器材;卫星能量始终能够满足观测活动的需求;卫星在到达目标区域上空有足够的时间调整遥感设备的摆角;气象条件为理想条件,对观测活动不产生影响;卫星不实施机动变轨。由以上假设可以看出,本文简化的条件只会制约卫星能否进行观测,而对卫星以什么样的侧摆方案进行观测并无影响。

由于卫星选择不同的观测角,其地面分辨率也各不相同,因而必须对地面分辨率(ground sample distance, GSD)加以考虑。由文献[1]可知,GSD 与仰角和高度有关,如果卫星为圆轨道,高度就成为常量,则卫星能完成所要求的观测任

务的分辨率的约束条件可以表示为:

$$\forall e, R/\sqrt{\sin e} < \partial$$

式中, e 为卫星的仰角; ∂ 是卫星执行任务所需要的最低地面分辨率,其数据可在文献[3]中查到; R 是卫星的最佳地面分辨率,即卫星垂直观测星下线时的地面分辨率。

1.2 建模思路

对本文所研究的优化问题而言,其涉及的约束条件复杂多样,其中有的约束条件难以量化,很难用数学语言表示出来,如航天观测时间窗口的计算过程十分复杂,直接建模计算十分困难。为解决这一问题,本文在通常的建模求解之前加入了预处理的步骤,即先在预处理中利用专用的航天仿真软件计算出时间窗口,然后在包含时间窗口信息的数据的基础上建立模型(见图 1)。

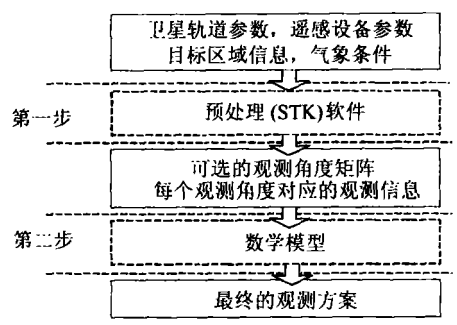


图 1 问题求解的两步法
Fig. 1 Two Steps Solving Method

2 预处理

本文的预处理是在 STK 软件^[4]的支持下把卫星观测过程量化为一系列包含时间窗口信息的矩阵和向量,其中,输入 STK 的是描述问题的原始参数,具体的仿真计算过程可见文献[3]。STK 计算出来的数据是以其本身固有的形式存在的,不能直接为建模使用,因而必须将其转换成一系列的适合于建模的矩阵和向量。

2.1 输入

原始输入如下。

1) 卫星轨道参数 $O_i, i \in \{1, 2, \dots, S\}$, S 为卫星的数目,如有 3 颗卫星,将其进行编号, O_i 表示的是第二颗卫星的轨道参数的向量。由于对地观测卫星通常为圆轨道卫星,则

$$O_i = \{Inclination, RAAN, Altitude\}$$

由以上 3 个参数,再加上起始时刻,就可以得到一个默认的圆轨道。

2) 目标区域参数。对目标区域作点格化的处理。将目标区域划分成多个小格,用格子的中心点来代表整个格子区域。在点格化的基础上,目标区域可以用一个布尔向量 P 表示:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$$

式中, $p_j (j \in \{1, \dots, M\})$ 为布尔变量, M 表示目标区域的格点总数的和。 $p_j = 1$, 表示目标区域的第 j 个格子被观测到; $p_j = 0$, 表示没有被观测到。

3) 遥感器材及观测带。假设遥感观测器材的垂直半角为 α 水平半角为 β , α 和卫星的高度共同决定了卫星的视场。对侧视能力,用仰角(e)来描述,不同的仰角代表着不同的地面观测带,仰角为 90° 时,卫星瞄准线正对星下点。通过这两个参数就可以将它们输入 STK 软件中来定义遥感器材可选的观测带。遥感器材的另外的参数是它的最佳分辨率、数据采集速率,这两个参数主要在约束条件中用到。

4) 时间。起止时间参数以如下的形式给定:

$$time = \{1 \text{ Jun} 2003 \text{ 12:00:00.00}, \\ 2 \text{ Jun} 2003 \text{ 12:00:00.00}\}$$

以上 4 个参数的格式都是参考 STK 软件的标准格式。

2.2 输出

将以上输入参数输入 STK 软件中进行仿真,应用 STK 软件的 access 模块可以得到一系列的访问报告。报告内容经过转换,可以用以下几个参数来描述这些访问报告的内容。

1) $X_{j,k} (j \in \{1, 2, \dots, N\}, k \in \{1, 2, \dots, K\})$, 其中, N 为卫星经过目标区域的总次数; K 为每次卫星经过目标区域时可选的观测仰角的数目。对每次访问,都将卫星可选的观测角度存储在矩阵 $X_{j,k}$ 中。如 $X_{1,2} = 75^\circ$, 表示卫星第一次访问目标区域时,可选的第二个观测仰角为 75° (即向右 15°)。

2) $X_{j,k,p}$: 矩阵的元素为向量矩阵, j 与 k 的涵义同前, p 表示第 p 个观测点。 $X_{j,k,p} = 1$, 表示选择第 k 个仰角的第 j 次访问中,目标区域点格中的第 p 个点被观测到; $X_{j,k,p} = 0$, 表示没有被观测到。

3 优化阶段

3.1 优化模型

在完成仿真预处理后,得到两个输出矩阵。这两个矩阵中, $X_{j,k}$ 存储的是观测角的角度,用于将最后得到的观测方案转换为具体的观测角度; $X_{j,k,p}$ 矩阵是不同观测角度条件下观测情况的记录。优化任务实际上就是从矩阵 $X_{j,k,p}$ 中选一些元素组成一个较优的观测方案。这个观测方案的优劣就通过上面提到的两个逐级优化的目标来评价。

首先,定义 $r_j (j \in \{1, \dots, N\})$ 为决策变量, r_j 表示第 j 次卫星访问目标区域时遥感观测器材选择第 r_j 个可选的仰角。 r_j 本身只是所选观测角的序号,并不是具体的角度值,但它可以十分方便地转换成对应的角度值。假设 X 为最终的观测方案,即一组具体的观测角度值,则有:

$$X = \{X_{1,r_1}, X_{2,r_2}, \dots, X_{N,r_N}\}$$

之所以用序号作决策变量而不用角度值,主要是为了方便算法求解时的表示与遗传算法的编码。

本文的主要目的就是要通过对卫星观测的侧摆方案进行优化,使得在给定的时间范围内尽可能多地覆盖目标区域,尽可能地增加对目标区域的观测时间。这两个目标之间是逐级优化的关系,即在保证满足第一个目标的基础上再考虑第二个目标。更少的地方被遗漏可以表示为:

$$\max \sum_{p=1}^M (X_{1,r_1,p} \mid X_{2,r_2,p} \mid \dots \mid X_{j,r_j,p})$$

对目标区域的观测时间最长可以表示为:

$$\max \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^M X_{j,r_j,p}; \text{约束条件为:} \\ R / \sqrt{\sin x_{j,r_j}} < \partial, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

约束条件(1)是前面介绍卫星的地面分辨率的约束条件, R 指卫星的最佳地面分辨率。

3.2 求解算法

具体实现如下。

- 1) 编码: 可以直接将向量 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 作为染色体, R 中的元素 r_j 作为基因。由于 r_j 是一个整数, 因而这里实际上是一个类似于普通的十进制编码的编码方式。不同之处在于, 对十进制编码来说, 其基因都是 0~9 之间的整数, 而对本文编码来说, 其基因因为 1~ k 的整数。这里, 将这种编码暂时称之为“ k ”编码, “ k ”编码的原理与十进制编码的原理完全一样, 只是基因数值的取值范围不同而已。
- 2) 适应度函数: 可以直接将目标函数作为适应度函数。目标函数值越大, 其适应度也就越好。由于本文数学模型的目标是一个逐级优化的问题, 因而每一级目标函数对应着一个适应度函数。
- 3) 进化操作: 对每个观测方案来说, 交叉就是指不同的染色体 R 之间的某些元素进行交换, 突变是指 R 中的某个元素以一定的随机概率变化成一个 1~ k 之间的整数。

4 实例研究

实例所用的参数如下: 卫星轨道参数 $Q_1 = \{50^\circ, 55^\circ, 500 \text{ km}\}$, $Q_2 = \{80^\circ, 52^\circ, 440 \text{ km}\}$; 目标区域参数: 目标区域为一个矩形, 其 4 个顶点的经纬度坐标分别为 $(122^\circ, 26^\circ)$ 、 $(128^\circ, 26^\circ)$ 、 $(128^\circ, 22^\circ)$ 、 $(122^\circ, 22^\circ)$ 。

对该区域进行点格化, 一共得到了 96 个格子。遥感器材的最佳分辨率为 5 m, 视角为 10° , 侧向观测范围为 $\pm 40^\circ$, 共划分为 9 个可选的观测带。开始时间为 1 Jun 2003 12: 00: 00. 00, 结束时间为 3 Jun 2003 12: 00: 00. 00。

首先应用 STK 软件进行仿真预处理, 得到了

访问报告, 然后将这个报告用模型中的 3 个矩阵描述出来(由于篇幅有限, 这里不单独列出)。接下来在这些矩阵和相关的约束条件的基础上进行优化。这里分别应用到了穷举法和遗传算法。算法实现的软件是 matlab6. 5, 计算机的 CPU 为赛扬 600, 内存为 128 M。遗传算法的求解结果是 $R = \{3, 4, 4, 1, 4, 6, 7, 7\}$, 即 8 次访问分别采用的侧摆角度为 $\{\text{向右 } 20^\circ, \text{向右 } 30^\circ, \text{向右 } 30^\circ, 0^\circ, \text{向右 } 30^\circ, \text{向左 } 20^\circ, \text{向左 } 30^\circ, \text{向左 } 30^\circ\}$ 。

在这个观测方案下, 目标区域的 96 个点中有 88 个至少被观测到一次, 一共观测到的点的数目为 138 次。遗传算法的计算时间为 5. 598 s。本文还尝试利用穷举法对实例进行了求解, 计算了 2 h 依然无法完成求解。

参 考 文 献

[1] Potter W. A Photo Album of Earth: Scheduling Landsat 7 Mission Daily Activities[C]. SpaceOPS, Tokyo, Japan, 1998

[2] Burrow Bridge S. Optimal Allocation of Satellite Networks Resource[D]. Virginia: Virginia Tech. University, 1999

[3] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005

[4] Claire R, Carmine P. Improving Satellite Surveillance Through Optimal Assignment of Assets[R]. Australia's Department of Defence, Defence Science and Technology Orga, Australia, 2004

第一作者简介: 祝江汉, 副教授。现主要从事军事运筹学和卫星应用研究。
E-mail: mouse720224@sohu.com

Elevations Selection Approach of Area Target Observation Task Using Satellites Resource

ZHU Jiangnan¹ LI Xi¹ MAO Chilong¹ ZHANG Lining¹
(1 College of Information Systems and Management, National University of Defence Technology,
137 Yanwachi Street, Changsha 410073, China)

Abstract: An elevations selection approach of area target surveillance task using multi-satellites is presented. The approach includes two stages: pretreatment and optimization. In the pretreatment stage, STK is applied to solve the difficult problem of computing access time; in the optimization stage, models and solving method based on genetic algorithm is presented, and a scenario instance proves the validity of the method.

Key words: optimization; EOS application; GA