

基于效能评估的卫星资源调度方法

龚虹瑞, 陈露, 高越, 司洞洞, 苑四岩

(航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 对地观测卫星作为国家基础性战略资源, 在国民经济、社会发展和国家安全等方面发挥着关键作用; 一直以来, 如何通过调度手段, 发挥对地观测卫星资源的应用效能, 使其完成更多的观测任务, 是航天领域的一个研究热点; 通过卫星资源效能评估的方式, 对卫星对地观测效能进行事前评估的定量分析, 并将效能评估结果应用在对地观测卫星资源调度上, 采用一种基于KM算法的卫星资源最优调度方法, 实现卫星资源在执行多个对地观测任务过程中的整体效能最大化, 可为卫星资源调度、优化建设提供参考和决策支撑。

关键词: 对地观测; 效能评估; KM算法; 卫星资源调度

Satellite Resource Scheduling Method Based on Efficiency Evaluation

GONG Hongrui, CHEN Lu, GAO Yue, SI Dongdong, YUAN Siyan

(Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: Earth observation satellites, as a fundamental strategic resource of the country, play a crucial role in national economy, social development, and national security. How to leverage the application efficiency of earth observation satellite resources through scheduling methods to complete more observation tasks, it has always been a research hotspot in the aerospace field. By evaluating the effectiveness of satellite resources, a pre-evaluation quantitative analysis of satellite earth observation effectiveness is conducted, and the effectiveness evaluation results are applied in earth observation satellite resource scheduling. An optimal scheduling method for satellite resources based on the Kuhn Munkres (KM) algorithm is used to maximize the overall effectiveness of satellite resources in executing multiple earth observation tasks, providing a reference and decision-making support for satellite resource scheduling and optimization construction.

Keywords: earth observation; effectiveness evaluation; KM algorithm; satellite resource scheduling

0 引言

对地观测是利用空间位置优势在地球表面以外观测地球有关体系及其详细数据或信息的活动。随着航天技术的快速发展, 对地观测已应用于关乎国民经济、安全和社会发展的各领域, 在气象预报、国土普查、作物估产、森林调查、地质找矿、海洋预报、环境保护、灾害监测、城市规划、地图测绘以及军事侦察、导弹预警和战场评估等方面发挥着极其重要的作用。

但对地观测卫星造价昂贵、数量有限, 如何充分利用对地观测卫星资源及其效能, 为各领域提供观测效能最大化的信息支撑, 已成为当前航天系统建设的重点问题。本文通过定量和定性分析构建卫星对地观测的效能评估模型, 进而开展面向效能最大化的卫星资源调度方法研究, 解决对地观测卫星“高效”应用的关键问题。

卫星对地观测过程是一个复杂体系, 主要涉及电子卫星信号探测和光学卫星成像探测等多种手段, 以及“提交-规划-测控-观测-下传-应用”六大阶段^[1]。目前国内外学

者对卫星对地观测过程中的卫星资源调度方法的研究主要考虑满足时间窗口、目标可探测性、任务优先级等基本约束条件, 鲜有综合考虑观测效能整体最大化的相关研究。例如, 文献 [2] 对多星调度问题中的约束条件作形式化描述, 并将其转换为约束满足问题 (CSP, constraint satisfaction problem)。文献 [3] 考虑在任务迭代新增的前提下, 采用优先级总和最大化的计算策略, 研究多颗卫星约束的动态调度算法, 并构建了一种较为新颖的启发调度模型。文献 [4] 通过判断任务要求和卫星能力之间的映射关系, 构建了混合式卫星资源调度模型, 同时利用遗传学方法对其进行解算, 从而获得单项任务要求的最佳满足。文献 [5] 希望同时满足需求收益最大化, 和规划资源最小化的目标, 构建了最小单项竞争度约束条件下的启发式算法。总体来看, 以上研究缺少对卫星资源对地观测效能的综合性评估。

因此, 有必要建立一套实用的卫星对地观测效能评估指标体系, 根据卫星资源的工作机理, 定量评估多维度的效能, 提供决策支撑, 掌握能力边界, 分析不足, 为后续

收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-09-13。

基金项目: 盲信号处理国家级重点实验室稳定支持经费项目(61424132006)。

作者简介: 龚虹瑞(1990-), 男, 硕士, 工程师;

通讯作者: 陈露(1988-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 龚虹瑞, 陈露, 高越, 等. 基于效能评估的卫星资源调度方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(10): 313-318.

建设规划论证提供依据^[6]；进而，根据现有资源情况，通过多指标最优匹配的方法，优化资源分配和调度策略，实现对地观测综合效能的提升，为卫星资源合理应用、后续航天系统优化建设提供指导^[7]。

1 卫星对地观测效能评估指标体系

卫星资源在对地观测任务中的主要作用包括两个方面：一方面是利用电子卫星信号探测进行目标定位和目标电子识别；另一方面是利用光学卫星成像探测进行目标光学识别。除此之外，还需结合应用场景和用户需求，对多任务筹划过程中的任务整体效能、各任务执行优先级进行评价，以分析对地观测过程中任务筹划的整体效率高低^[8]。

综上所述，卫星对地观测效能的综合评估指标应包括目标定位能力指标、目标识别能力指标、多任务执行能力指标 3 类核心指标。结合相关性分析和原理性分析对核心指标进行递阶分解^[9-10]，构建形成如图 1 所示的卫星对地观测效能评估指标体系。

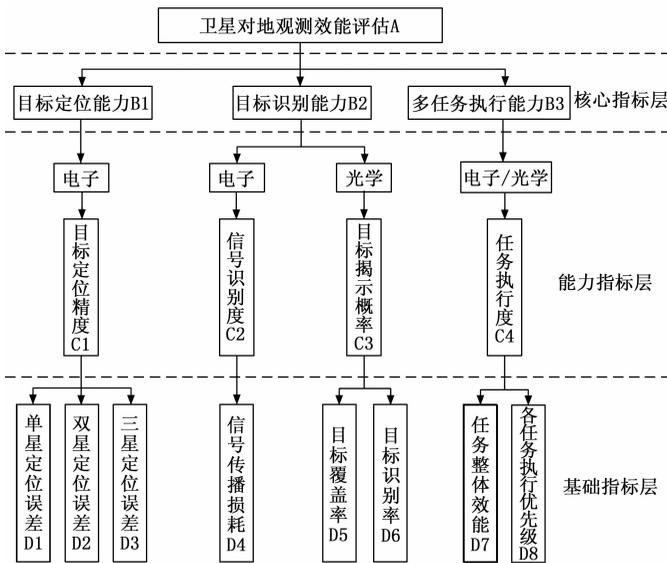


图 1 卫星对地观测效能评估指标体系

1.1 目标定位能力指标评估模型

按照卫星对地观测原理，卫星定位通常采用的 3 种无源定位方法包括单星定位、双星定位、三星定位，其中，单星定位主要基于测向法、双星定位主要基于时差和频差相结合的方法、三星定位则主要基于时差法^[11-13]。因此，针对目标定位能力指标（即目标定位精度指标）的研究主要面向单星定位、双星定位、三星定位 3 种方法展开。

1.1.1 单星测向定位误差评估模型

单星定位的原理：首先测得单个卫星（运动中的）后利用定位算法计算出被观测目标的位置。其中，俯仰角和方位角数据是利用星载测向模块远距离测量得到的，测量结果数据可传回地面接收站，由地面系统进行测算定位^[14]。

单星定位的算法：首先利用卫星（坐标 o ）的位置信息、测向角度（ α 和 β ）计算出视线 oT ，然后计算视线 oT 与地球椭球面的交点（这里需要去除增根），从而算出被观测目标的位

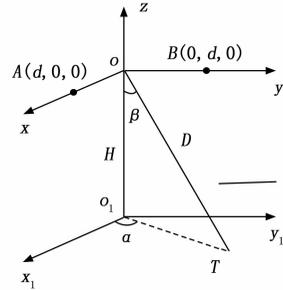


图 2 单星测向定位模型

置 T ，然后利用 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ （均为角度测量误差，可通过星载测量仪器的出厂指标获取）计算出被观测目标的误差位置 T' ，通过位置 T 和误差位置 T' 的坐标（三维坐标体系）的比较，可得出单星测向定位误差评估模型^[6]的数学表达式：

$$\Delta\gamma = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： $\Delta\alpha$ 为方位角的测量误差值， $\Delta\beta$ 为俯仰角的测量误差值， Δh 为被观测目标高度的测量误差值。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{(y_e^2 + z_e^2)^{-1/2}}{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \cdot [- (y_e^2 + z_e^2), x_e y_e, x_e z_e] \cdot M \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{(x_e^2 + z_e^2)^{-1/2}}{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2} \cdot [x_e y_e - (x_e^2 + z_e^2), y_e z_e] \cdot M \quad (4)$$

$$\alpha_3 = [2x \quad 2y \quad \frac{2z \cdot (\alpha + h)^2}{(b + h)^2}] \quad (5)$$

1.1.2 双星时差/频差定位误差评估模型

对于同一个被观测目标（地面），其辐射出的电磁信号到达两个不同卫星存在时间上的差值（TDOA），这是由于目标到两个卫星的距离通常是不完全相同的。从另一个角度而言，可理解为同一个被观测目标辐射出的电磁信号到达两个不同卫星的时间差值可转换为辐射源的空间坐标数据，所以，可利用到达的时间差值来定位辐射源位置。另一方面，对于同一个被观测目标（地面），其辐射出的电磁信号到达两个不同卫星存在频率上的差值（FDOA），产生的原因是被观测目标（地面）和两颗卫星之间的相对运动，机理是基于多普勒效应，观测者接收到的信号频率与辐射源发出的频率在两者存在相对运动时会存在差异。因此，针对运动的被观测目标，可通过测量多普勒频移来计算辐射源的空间坐标。双星定位通常将时间差和频率差相结合，来综合判定目标位置。具体而言，是将两个不同的卫星作为观测者，接收并测量辐射源电磁信号的时差和频差，再参照高程数据计算得到目标位置^[15-16]。

下面，通过研究基于地球椭球模型的双星 TDOA/FDOA 定位算法，对影响目标定位精度指标的参数进行理论分析。

以地固坐标为基准, 假定在某一时刻, 卫星 O_1 、 O_2 分别同时接收到了某一地面运动目标 T 辐射出的电磁信号, 依此算得一组时间差值 (及一组频率差值 (FDOA))。在三维地固坐标体系中, 利用时间差值算得一个双曲面 (通过去除增根可算得单叶双曲面); 利用频率差值再算得另一个曲面 (形状与轮胎相似); 再假定地面运动目标的高程为 0 (即目标的位置在地球表面), 从而得到第三个曲面——地球椭球面。三面交点即为被观测目标的空间三维坐标^[17-20]。

因此, 双星时差/频差定位误差评估模型的计算方法如下:

1) 分别计算 TDOA 双曲面、FDOA 曲面、地球椭球面的测量公式;

2) 假定目标高程 dH , 联立三式可算得目标的空间三维坐标 $u = [x \ y \ z]$ 。

双星定位方式的精度误差评估模型表达式为:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (6)$$

1.1.3 三星时差定位误差评估模型

三星定位通常采用双曲线联合定位的方式, 其原理是 3 颗卫星 (或者更多颗的卫星) 可以接收并测算得到三组 (或多组) 辐射信号在时间上的差值 (TDOA), 再利用双星定位方法中的时差计算公式, 可计算出目标的空间三维坐标。

下面, 通过研究基于地球椭球模型的三星时差定位算法, 对影响目标定位精度参数的参数进行理论分析。

以地固坐标为基准, 假定在某一时刻, 卫星 O_1 、 O_2 、 O_3 分别同时接收到了某一地面运动目标 T 辐射出的电磁信号, 依此算得两组时间差值 (TDOA)。在三维地固坐标体系中, 利用两组时间差值算得两个双曲面 (通过去除增根可算得单叶双曲面), 再假定地面运动目标的高程为 0 (即目标的位置在地球表面), 从而得到第三个曲面——地球椭球面。三面交点即为被观测目标的空间三维坐标。

因此, 三星时差定位误差评估模型的计算方法如下:

在 WGS-84 地球椭球模型体系下, 三曲面的数学表达式为:

$$\begin{cases} x = (N + dH) \cos B \cos L \\ y = (N + dH) \cos B \sin L \\ z = [N(1 - e^2) + dH] \sin B \end{cases} \quad (7)$$

N 是辐射源所在位置的曲率半径, 其数学表达式为 $N = \frac{R}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$ 。其中, R 表示长半轴, ($L \ B \ dH$) 分别表示辐射源的经度、纬度、高度, e 表示第一偏心率。 N 、 B 、 L 、 dH 均与辐射源位置 ($x \ y \ z$) 有关。

三星时差定位误差评估模型表达式为:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (8)$$

1.2 目标识别能力指标评估模型

1.2.1 信号识别度评估模型 (电子)

微波是最主要的卫星电子信号载体, 它是一种空间直

射波, 其传播过程中的主要影响来自两个方面: 一方面是大气对流层, 包括了对流层里的水汽、沙尘、雾、雪、雨、雹等物质, 这些物质都会导致微波在传播过程中的衰减; 另外一方面, 微波在自由空间中传播也会存在电波损耗。

经过调研分析, 在当前大部分卫星采用 1~10 GHz 频段的微波通信时, 大气对流层的传播损耗对信号的传输影响很小约占 2%, 而自由空间传播损耗约占 98%, 因此, 在讨论由电磁波衰减对卫星效能的影响时, 可以忽略不计^[7]。所以在对地观测场景中, 观测信号传输的影响只考虑自由空间的传播损耗。

因此, 信号识别度评估模型即为自由空间传播损耗计算模型:

$$L_{rf} = 92.4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (9)$$

其中: f 为观测卫星的接收频率 (GHz); d 为信号源与观测卫星的距离 (km)。

1.2.2 目标揭示率评估模型 (光学)

利用光学卫星对地面目标进行观测的过程中, 通常采用多个 (或多种) 光学卫星联合探测的方式, 以保障观测信息的全面性和准确性^[8-9]。在多个光学卫星同时进行对地观测的过程时, 由于卫星工作时间窗口的限制, 导致对地面目标的观测行为呈间歇式触发, 也就是说单个卫星的每一次观测可视为一次单独的、重复的行为, 并设定第 i 次观测的目标揭示概率为 $p(\alpha_i)p(s_i)$, 那么执行 N 次观测的目标揭示率评估模型为:

$$P(N) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p(\alpha_i)p(s_i)] \quad (10)$$

其中: $P(\alpha_i)$ 为目标覆盖率, $P(s_i)$ 为目标识别率。

1.3 多任务执行能力指标评估模型

多任务执行能力主要考虑多对地观测任务整体效能和各对地观测任务执行优先级, 其中, 对地观测任务整体效能的计算方法是将目标定位精度模型评估结果、信号识别度模型评估结果或者目标揭示概率模型评估结果求和; 各对地观测任务执行优先级的数据来源通常由用户指定^[10-12]。

具体而言, 对地观测任务整体效能指标的数学模型是将目标定位精度指标计算结果 (单星定位误差、双星定位误差或者三星定位误差指标的计算结果)、信号识别度指标计算结果或者目标揭示概率指标计算结果求和。通常各对地观测任务执行优先级指标的数值由用户指定, 本文设定其输入数值范围为 0~5, 数值越大表示优先级越高^[13]。

2 基于效能评估的卫星资源调度方法

2.1 对地观测任务规划的最优匹配问题

根据对地观测任务的阶段规划可知, 卫星运控中心的任务筹划系统会根据对地观测任务信息、参与规划卫星信息及地面接收资源信息进行卫星规划调度, 在卫星资源及数传资源的有限约束下合理分配观测任务, 并确定卫星对地观测时间及数据下传时间^[14-16]。

因此, 对地观测任务规划的定义为: 在同时满足多卫星资源和多任务需求的约束条件下, 对卫星资源进行综合

调度,为观测任务分配卫星资源,进一步再优化任务整体的观测效能,制定最优观测方案,从而达到多观测任务收益之和最大的目标^[17]。

根据目前国内外研究及应用情况,单个对地观测任务筹划中的目标可观测性计算、时间冲突消解已经有较多研究成果和应用成果。以光学探测为例,通常某一个目标的探测任务经过筹划后可获得多个执行方案,每个执行方案的效能不同,若不考虑多个任务冲突的情况,可直接选择效能最优的方案^[18-19]。

而实际情况是任务多卫星少,即同一时间段内,有多个目标探测任务需要执行,每个任务都有多种执行方案,各任务的方案之间极易产生冲突。例如,目标 1 由卫星 1、卫星 2、卫星 3 都可执行探测,目标 2 由卫星 1、卫星 2 可执行探测,目标 3 可由卫星 3 执行探测,另考虑卫星执行不同目标探测任务时的侧摆角可能不同(若侧摆角相同,则理论上该卫星可同时执行多个目标探测任务,这种情况不存在冲突,本文不考虑),因此本文考虑一个卫星只执行一个目标探测任务的情况,就会产生如何匹配使得整体效能最优的问题。

同理,针对电子卫星,受限于卫星能力等主观因素,以及观测区域广阔等客观因素,观测卫星每一次只用某一个(或者某几个)频段对该观测区域的某一部分进行观测,不能将频率和区域完全覆盖,因此也存在上述最优匹配问题。

2.2 基于 KM 算法的卫星资源最优调度方法

综上,本文所研究的对地观测卫星资源效能提升的调度策略是指:有限的卫星资源(包括卫星数量、工作频段、工作姿态等)需执行大量对地观测任务的情况下,利用算法匹配目标与卫星(方案),使卫星发挥最大的效能、从而使对地观测任务获得最大的收益^[20]。

对地观测卫星资源协同调度算法的重点是如何满足整体效能最优。根据问题分析,对地观测卫星资源协同调度算法应完成目标与卫星(方案)的匹配,使得整体筹划方案的效能之和最大。结合图论进行分析,该问题可以抽象为带权二分图的最大权完备匹配,故而考虑采用 KM 算法实现。

KM 算法是一种计算机算法,功能是求完备匹配下的最大权匹配。在一个二分图内,假设左顶点为 X ,右顶点为 Y ,现对于每组左右连接 $X_i Y_j$ 有权 w_{ij} ,求一种匹配使得所有 w_{ij} 的和最大。

该算法是通过给每个顶点一个标号(叫做顶标)来把求最大权匹配的问题转化为求完备匹配的问题的。设顶点 x_i 的顶标为 $A[i]$,顶点 y_j 的顶标为 $B[j]$,顶点 x_i 与 y_j 之间的边权为 $w[i][j]$ 。在算法执行过程中的任一时刻,对于任一条边 $\langle i, j \rangle A[i] + B[j] \geq w[i][j]$ 始终成立。

3 仿真实验验证

下面以光学卫星执行卫星对地观测任务为例,说明采

用 KM 算法的优化结果。

3.1 对地观测目标相关参数

被观测目标的相关参数如表 1 所示。

表 1 对地观测目标相关参数列表

目标	经纬度	最大速度 / (km/h)	长度 / m	宽度 / m	发现时间	观察时间
1	113° 31°	52	230	50	2022-04-21 • 12:00:00	2022-04-21 • 12:30:00
2	112.8° 30.9°	42	130	40	2022-04-21 • 12:10:00	2022-04-21 • 12:31:00
3	113.6° 29°	60	280	70	2022-04-21 • 12:05:00	2022-04-21 • 12:30:00

3.2 卫星资源相关参数

卫星资源的相关参数如表 2 所示。

表 2 卫星资源相关参数列表

目标	卫星 001	卫星 002	卫星 003	卫星 004
卫星类型	OPT	OPT	OPT	OPT
轨道高度/km	680	530	980	750
运动方向	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE
对地速度/(m/s)	2 200	2 500	1 900	200
开机时间	2022-04-21 12:30:00	2022-04-21 12:35:00	2022-04-21 12:40:00	2022-04-21 12:33:00
关机时间	2022-04-21 12:33:00	2022-04-21 12:38:00	2022-04-21 12:41:00	2022-04-21 12:35:30
视场角/(°)	3	5	3.5	3.2
侧摆角/(°)	20.2	16.2	16.2	10.2
俯仰角/(°)	24.5	24.5	21.5	14.5
轨道夹角/(°)	150	65	79	85
卫星经纬度/(°)	115 24.5	112 32	112 27	112.5 26.5
载荷相机焦距/cm	1.68	2.0	1.9	1.58
CCD 像元尺寸/ μm	0.7	0.75	0.8	0.86
目标	卫星 005	卫星 006	卫星 007	
卫星类型	OPT	OPT	OPT	
轨道高度/km	650	600	680	
运动方向	TRUE	TRUE	TRUE	
对地速度(m/s)	1 800	2 200	2 100	
开机时间	2022-04-21 12:32:00	2022-04-21 12:31:00	2022-04-21 12:30:00	
关机时间	2022-04-21 12:42:00	2022-04-21 12:35:00	2022-04-21 12:35:00	
视场角/(°)	3	3	2.5	
侧摆角/(°)	12	19	19	
俯仰角/(°)	26	24	24.2	
轨道夹角/(°)	60	145	70	
卫星经纬度/(°)	108 24	113.5 29	111.1 23	
载荷相机焦距/cm	1.68	1.8	1.68	
CCD 像元尺寸/ μm	0.7	0.81	0.56	

3.3 效能评估

首先根据目标可观测性计算、时间冲突消解进行初步筹划, 并利用 2.2.2 节的目标揭示率评估模型(光学)计算获得效能评估结果, 如表 3 所示(其中权重为用户自定义)。

表 3 任务相关参数列表

任务	卫星	目标	权重	揭示概率/%
1	001	1	0	62.817
2	002	1	0	0
3	003	1	0	10.253
4	004	1	0	0
5	001	2	1	21.907
6	003	2	1	0
7	004	2	1	0
8	005	2	1	14.282
9	001	3	1	0
10	002	3	1	0
任务 11	005	3	1	0
任务 12	006	3	1	23.521
任务 13	007	3	1	57.680

根据效能评估结果可知, 目标 1 可被卫星 001 和卫星 003 探测, 揭示概率分别为 62.817% 和 10.253%; 目标 2 可被卫星 001 和卫星 005 探测, 揭示概率分别为 21.907% 和 14.282%; 目标 3 可被卫星 006 和卫星 007 探测, 揭示概率分别为 23.521% 和 57.680%。该评估结果符合“多探测任务多执行方案冲突”的最优匹配问题情况, 可执行下一步最优调度方法解算。

3.4 卫星资源调度计算

在效能评估结果基础上, 采用 KM 算法开展图论形式的分析计算, 获得任务整体效能的计算结果, 最终根据侧重效能最大化、侧重任务优先级两种情况进行卫星资源调度策略的选择。

3.4.1 侧重效能最大化的卫星资源调度计算结果

下面给出所有可能的探测方案, 对最优计算结果进行验证说明:

方案一: 目标 1 采用卫星 001 探测, 揭示概率为 62.817%; 目标 2 采用卫星 005 探测, 揭示概率为 14.282%; 目标 3 采用卫星 006 探测, 揭示概率为 23.521%。由此可算得, 方案一的整体效能为: $0.62817 + 0.14282 + 0.23521 = 1.0062$ 。

方案二: 目标 1 采用卫星 003 探测, 揭示概率为 10.253%; 目标 2 采用卫星 005 探测, 揭示概率为 14.282%; 目标 3 采用卫星 006 探测, 揭示概率为 23.521%。由此可算得, 方案二的整体效能为: $0.10253 + 0.14282 + 0.23521 = 0.48056$ 。

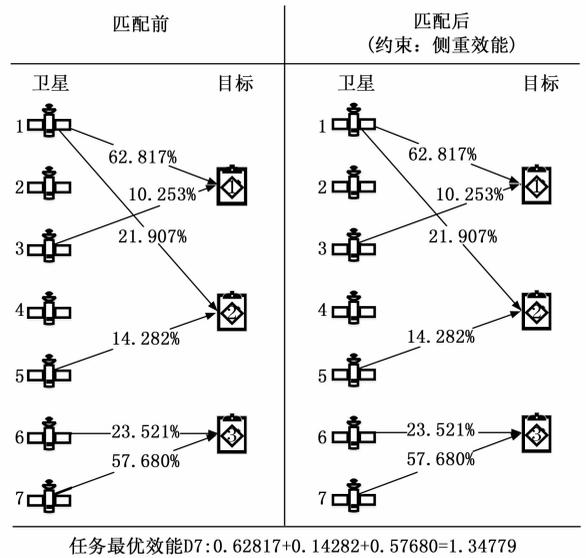


图 3 侧重效能最大化的卫星资源调度计算结果

方案三: 目标 1 采用卫星 003 探测, 揭示概率为 10.253%; 目标 2 采用卫星 001 探测, 揭示概率为 21.907%; 目标 3 采用卫星 006 探测, 揭示概率为 23.521%。由此可算得, 方案三的整体效能为: $0.10253 + 0.21907 + 0.23521 = 0.55681$ 。

方案四: 目标 1 采用卫星 001 探测, 揭示概率为 62.817%; 目标 2 采用卫星 005 探测, 揭示概率为 14.282%; 目标 3 采用卫星 007 探测, 揭示概率为 57.680%。由此可算得, 方案四的整体效能为: $0.62817 + 0.14282 + 0.57680 = 1.34779$ 。

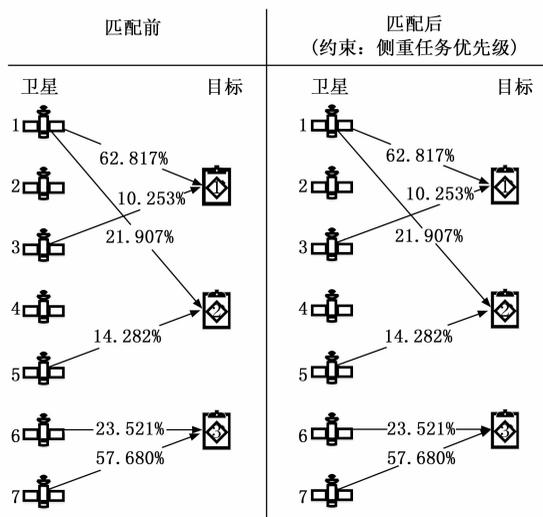
方案五: 目标 1 采用卫星 003 探测, 揭示概率为 10.253%; 目标 2 采用卫星 005 探测, 揭示概率为 14.282%; 目标 3 采用卫星 007 探测, 揭示概率为 57.680%。由此可算得, 方案五的整体效能为: $0.10253 + 0.14282 + 0.57680 = 0.82215$ 。

方案六: 目标 1 采用卫星 003 探测, 揭示概率为 10.253%; 目标 2 采用卫星 001 探测, 揭示概率为 21.907%; 目标 3 采用卫星 007 探测, 揭示概率为 57.680%。由此可算得, 方案六的整体效能为: $0.10253 + 0.21907 + 0.57680 = 0.8984$ 。

分析可得, 方案四为效能最大化的卫星资源调度方案, 方案的最优效能计算结果为 1.34779, 与图中 KM 算法计算结果一致。

3.4.2 侧重任务优先级的卫星资源调度计算结果

在侧重任务优先级的前提下, 首先对目标权重进行分析, 由表 3 可知, 目标 2 探测任务的优先级大于目标 1 探测任务的优先级(权重数值越大优先级越高), 因此首先满足目标 2 的卫星资源效能最大化调度, 即目标 2 采用卫星 001 进行探测。



任务整体效能 $D7: 0.10253+0.21907+0.57680=0.89840$

图 4 侧重任务优先级的卫星资源调度计算结果

下面给出侧重任务优先级前提下的所有探测方案，对最优计算结果进行验证说明：

方案一：目标 1 采用卫星 003 探测，揭示概率为 10.253%；目标 2 采用卫星 001 探测，揭示概率为 21.907%；目标 3 采用卫星 006 探测，揭示概率为 23.521%。由此可算得，方案一的整体效能为： $0.10253+0.21907+0.23521=0.55681$ 。

方案二：目标 1 采用卫星 003 探测，揭示概率为 10.253%；目标 2 采用卫星 001 探测，揭示概率为 21.907%；目标 3 采用卫星 007 探测，揭示概率为 57.680%。由此可算得，方案二的整体效能为： $0.10253+0.21907+0.57680=0.8984$ 。

分析可得，方案二为侧重任务优先级前提下的效能最大化卫星资源调度方案，方案的最优效能计算结果为 0.8984，与图中 KM 算法计算结果一致。

综上所述，利用 KM 算法可将卫星资源调度问题转换为图论匹配问题，在添加一定前置约束条件的情况下，利用卫星资源对地观测效能评估结果，可最终算得满足约束条件的最佳卫星资源调度方案。

4 结束语

本文首先对卫星对地观测预期效能进行评估分析，然后根据评估结果，利用 KM 算法对初步筹划结果进行优化调度，使得优化调度结果能够达到整体卫星资源效能最大化，在卫星资源规划调度方面具有重要的实用价值。

参考文献：

[1] 李兴泽. 多星任务统筹配置与数传规划方法研究 [D]. 长沙：国防科学技术大学，2012.

[2] SUN B L, WANG W X, QIAN Q Q. Satellites scheduling algorithm based on constraint satisfaction problem [C] //Proc. of the Conference on Computer Science and Software Engineering, 2008: 167-170.

[3] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 一种有新任务到达的多卫星动态调度模型与方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2005 (4): 35-41.

[4] SUN B, WANG W, XIE X, et al. Satellite mission scheduling based on genetic algorithm [J]. Kybernetes, 2010, 39 (8): 1255-1261.

[5] WANG J M, LI J F, TAN Y J. Study on heuristic algorithm for dynamic scheduling problem of earth observing satellites [C] //Proc. of the 8th Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2007: 9-12.

[6] 邓兵, 任凯强. 单星测向与测频联合定位模型及误差分析 [J]. 电信技术研究, 2013 (5): 39-46.

[7] 杨超然, 常广平, 常江涛. 海上卫星移动通信传播损耗仿真研究 [J]. 科技传播, 2019, 11 (1): 6-10.

[8] 李菊芳, 白保存, 陈英武, 等. 多星成像调度问题基于分解的优化算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29 (8): 134-143.

[9] IANCHESSI N, CORDEAU J F, DESROSIERS J. A heuristic for the multi-satellite, multi-orbit and multi-user management of earth observation satellites [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 177 (2): 750-762.

[10] 高越, 李轩, 温志军. 光学卫星对海上移动目标揭示能力分析 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (2): 1-4.

[11] 多路哈诺夫. 无线电波传播 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1963.

[12] 谢益溪. 无线电波的传播原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.

[13] 夏克文. 卫星通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.

[14] 吴志忠. 移动通信无线电波传播 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.

[15] 杨超然, 常广平, 常江涛. 海上卫星移动通信传播损耗仿真研究 [J]. 科技传播, 2019, 11 (1): 6-10.

[16] 熊皓. 无线电波传播 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

[17] 谢益溪. 计算大气折射弯曲角的简便公式 [R]. 中国电波传播研究所技术报告, 1981: 10.

[18] 张栋, 易东云, 罗强, 等. 多卫星系统资源建模与能力计算方法研究 [J]. 飞行器测控学报, 2008, 27 (4): 10-14.

[19] 邓旭, 朱立东. 多用户场景下卫星网络匹配博弈资源分配策略 [J]. 无线电通信技术, 2019, 45 (6): 615-621.

[20] 祝佳, 陶峰. 敏捷成像卫星需求筹划系统应用探析 [J]. 电讯技术, 2016, 56 (5): 508-516.