

# 面向区域侦察的实拍实传卫星规划推演系统<sup>①</sup>



汪荣峰, 陈大春

(中国人民解放军战略支援部队航天工程大学, 北京 101416)

通讯作者: 汪荣峰, E-mail: wrfly@163.com

**摘要:** 为支持多颗实拍实传卫星区域侦察任务, 研制规划推演系统. 设计了规划推演系统的总体结构和信息流程, 并研究了系统研制所需关键技术, 分别提出了面向区域侦察的数传任务规划算法、基于网格的卫星区域覆盖分析算法、基于 OSGEarth 的目标区域和侦察范围组合可视化方法. 研制的规划推演系统已成功应用于某任务中, 进行数传任务规划、能力分析和过程推演.

**关键词:** 实拍实传; 卫星; 区域覆盖分析; 区域侦察; 过程推演

引用格式: 汪荣峰, 陈大春. 面向区域侦察的实拍实传卫星规划推演系统. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 271-275. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7231.html>

## Real-Time Data Transmission Satellite Plan Deduction System for Regional Reconnaissance

WANG Rong-Feng, CHEN Da-Chun

(PLA Strategic Support Force Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** A plan deduction system is developed to support multiple real-time data transmission satellite reconnaissance missions. The overall structure and information flow of system are designed, followed by research about the key technologies needed for system development. A data transmission task planning algorithm for area reconnaissance, a satellite area coverage analysis algorithm based on grid, a visualization method for target area and reconnaissance scope based on OSGEarth are proposed. The developed planning and deduction system has been successfully applied to an unnamed task to carry out the task planning, capability analysis, and process deduction.

**Key words:** real-time data transmission; satellite; regional coverage analysis; regional reconnaissance; process deduction

以多颗卫星或星座对作战区域进行侦察, 获取特定目标和移动目标信息, 可对区域进行全时空、全方位监控, 提高战场态势感知能力和指挥作战效率<sup>[1]</sup>. 卫星有存储转发和实拍实传 2 种数传方式<sup>[2]</sup>, 实拍实传数传方式是即时数据传输方式, 卫星在利用星载侦察设备对地面目标进行侦察的同时, 将所获数据下传至地面站. 当采用多颗实拍实传卫星对目标区域进行侦察时, 需进行数传任务规划、能力分析和仿真推演.

卫星数传调度问题研究的是独立于卫星数据获取的数据下载决策问题, 主要目的是为数传任务分配无

冲突的数传资源 (地面站数据接收天线) 及时间窗口. 数传任务规划已有大量研究成果, 如刘洋等<sup>[3]</sup>提出的基于贪婪算法的卫星地面站任务规划算法, 陈祥国等<sup>[4]</sup>提出的基于蚁群算法的规划技术. 在实拍实传卫星数传调度问题方面, 文献<sup>[2]</sup>设计了一个启发式调度算法, 姜维等<sup>[5]</sup>针对存储转发和实拍实传数传模式建立统一模型, 经飞等<sup>[6]</sup>提出的多数传模式组合调度算法可同时处理存储转发和实拍实传需求.

为衡量卫星完成侦察任务的能力, 一般以覆盖率作为核心指标. 现有卫星区覆盖分析方法主要有解析

<sup>①</sup> 收稿时间: 2019-06-13; 修改时间: 2019-07-08; 采用时间: 2019-07-15; csa 在线出版时间: 2019-12-27

法<sup>[7]</sup>、网格点法<sup>[8]</sup>和基于几何运算的方法<sup>[9]</sup>。

王慧林等<sup>[10]</sup>设计实现了面向区域的电子侦察卫星规划系统,采用甘特图表现规划序列,基于STK显示规划方案执行过程。

本文根据实际任务所需研制规划推演系统,提出了新的数传调度算法、卫星区域覆盖分析算法,并设计实现了过程推演表现形式和可视化方法。

## 1 规划推演系统设计

系统组成如图1所示,包括4个软件。

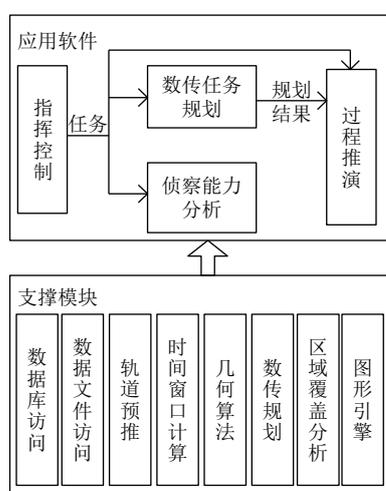


图1 实拍实传卫星区域侦察规划推演系统结构

指挥控制软件是区域侦察任务的逻辑起点,根据用户需求交互确定侦察时段、执行侦察任务卫星、测控站和待侦察目标区域,并将上述信息(图1中“任务”)写入到共享数据库中,供其他软件使用。

数传任务规划软件根据“任务”进行规划,以XML文件形式将结果提供给过程推演软件。

侦察能力分析软件以给定时间段内卫星对目标区域的覆盖率作为核心指标,分析任务完成能力。

过程推演软件基于OSGEarth开源引擎开发,根据“任务”信息和数传规划结果,对侦察和数传的过程进行仿真推演。

系统主要包括如下模块:数据库与数据文件访问模块,支持各软件通过共享数据库和XML数据文件交换信息;轨道预推模块,支持标准二体和SGP4两种轨道预推模型;时间窗口计算模块,为数传规划算法提供支持;几何算法,采用开源几何引擎GEOS(Geometry Engine-Open Source),为区域覆盖分析和三维绘制提供

支持;区域覆盖分析和数传规划算法,应用软件的核心算法;图形引擎,包括OpenGL和OpenSceneGraph(OSG),分别用于规划、分析软件二维绘制和过程推演软件三维绘制。

## 2 面向区域侦察的数传任务规划算法

多颗实拍实传卫星区域侦察数传规划的任务是在区域约束下计算卫星对目标的过境时间窗口,并为每个过境时间窗口分配一个或多个地面站天线作为数传资源。

卫星可数传的基本条件是卫星与地面站相互“可见”,且满足一定角度要求。此外还需考虑卫星数传能力、地面站天线个数与仰角、卫星与地面站天线频段、地面站天线跟踪时间等约束条件。根据任务要求做如下假设:每个地面站部署一天线,频段与卫星天线一致;卫星与地面站满足给定仰角方可进行数传;天线对卫星的捕获时间、准备时间等合在一起,为“任务切换时间”。

针对任务中卫星数量和地面站数量较少的实际,设计如下简洁、易实现的规划算法:

Step 1. 地面站天线的初始时间资源为整个时间轴;

Step 2. 计算卫星对目标区域所有过境时间窗口,时间窗口计算采用文献<sup>[11]</sup>的二次扫描算法;

Step 3. 根据预设准则对所有时间窗口排序,所有时间窗口组织为一个待分配任务列表;

Step 4. 按顺序取出待分配任务列表中的每个时间窗口,计算与各地面站具备数传条件(仰角)的细分时间窗口,进行资源分配(考虑任务切换时间),同时修改地面站时间资源。

以图2为例简要说明上述过程的第4步:设开始有2个地面站,其时间资源均为全部时间范围,如图中a、b所示;有一时间窗口存在数传需求,如图中AD区间,根据与地面站关系,细分为3个窗口,AB段与地面站a具备数传条件,CD段与地面站b具备数传条件,BC段与2地面站同时具备数传条件;AC段由地面站a进行数传,CD段由地面站b进行数传;修改相应地面站时间资源,减去已分配时间窗口,如图2中a'、b'所示。

开发的数传任务规划软件界面如图3所示。其中红色波纹扇形区表示规划结果,对应的卫星轨道时间范围进行数传。

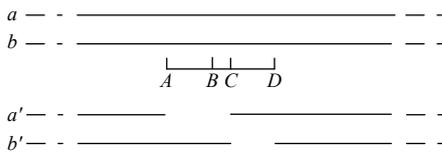


图2 地面站时间资源分配示意图

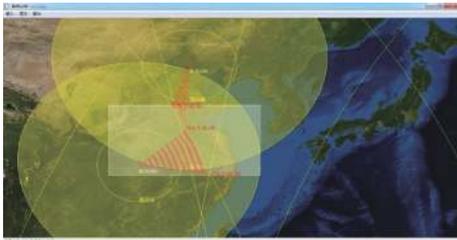


图3 数传任务规划软件界面

### 3 基于网格的卫星区域覆盖分析算法

为快速计算多颗卫星在给定时间范围内对目标区域的覆盖率, 本文提出了一种基于剖分网格的新算法: 将目标区域网格化, 判断各网格与卫星覆盖带相交情况, 以有交网格数除以全部网格数作为总覆盖率, 通过分类统计得到分类覆盖率指标。

如图4所示, 目标区域共24个网格, 卫星覆盖带为 $abcd$ 和 $ABCD$ . 与 $abcd$ 有交的网格为11、21、31、22、32、23、33、43、24、34、44, 与 $ABCD$ 有交的网格为41、32、42、33、43、34, 被覆盖网格共13个, 网格总数为24, 覆盖率为 $13/24=54\%$ . 网格34、33、43、32同时被2颗卫星覆盖, 其他被1颗卫星覆盖, 据此可得到其他分类统计信息。

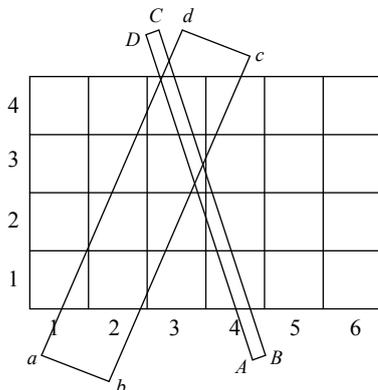


图4 基于网格的卫星区域覆盖分析方法示意图

根据经纬度平面网格大小, 可进行均匀或非均匀网格划分. 均匀网格划分时, 网格对应的实际地理范围

大小不一致. 非均匀网格划分则按对应地理范围近似一致的原则, 不同纬度网格大小不同。

划分网格后, 需判断各网格与卫星覆盖带是否相交. 逐网格判断效率过低, 但由于各行网格大小不一定相同, 因此也无法整体判断. 故采用逐行判断技术: 遍历覆盖带所有边, 计算边与该行网格2水平边所有交点; 水平边上2交点之间的网格与覆盖带相交。

基于覆盖分析算法, 开发侦察能力分析软件, 设计分析结果的可视化输出方式: 以柱状图形式输出按卫星、分辨率等统计的覆盖结果, 图5(a)为按卫星的柱状统计图, 表现各卫星及卫星组合的覆盖网格数与覆盖率。

另外, 以遥感影像为底图显示覆盖情况: 绘制目标区域的剖分网格, 以不同颜色表示网格的覆盖情况, 图5(b)为针对次数的覆盖情况可视化, 红色网格被覆盖1次, 绿色网格被覆盖2次, 透明网格未被覆盖。

### 4 目标区域和侦察范围组合可视化方法

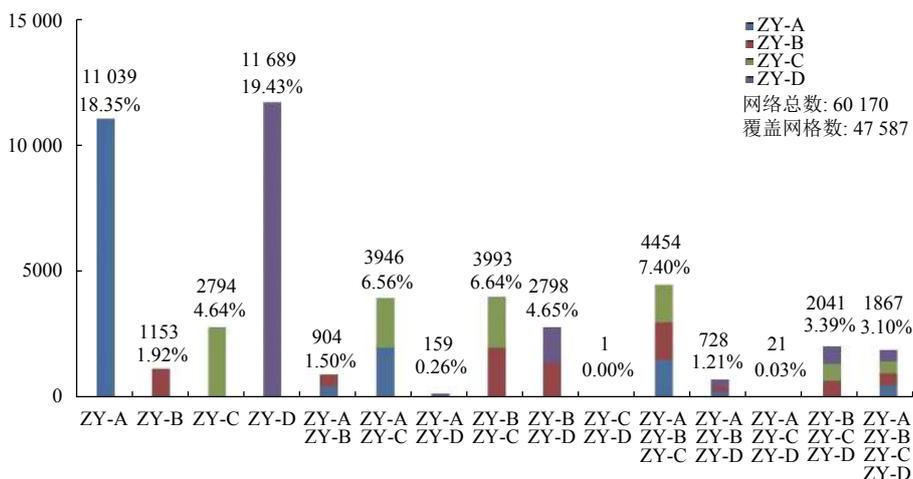
实拍实传卫星区域侦察过程推演软件的任务是: 根据指挥控制软件所确定的地面站、卫星、地面目标区域、侦察时段等信息, 以及数传规划软件给出的数传资源与时间窗口, 在三维场景中将卫星区域侦察的要素以及侦察、数传过程表现出来. 采用OSGEarth为开发引擎, OSGEarth是基于OSG开发的地形模型加载和渲染工具. 图6为推演软件显示效果图。

图6中, 三维地球、A处卫星、B处地面站、C处空间链路、D处圆锥传感器覆盖、E处矩形传感器覆盖等可视化要素, OSGEarth可直接支持。

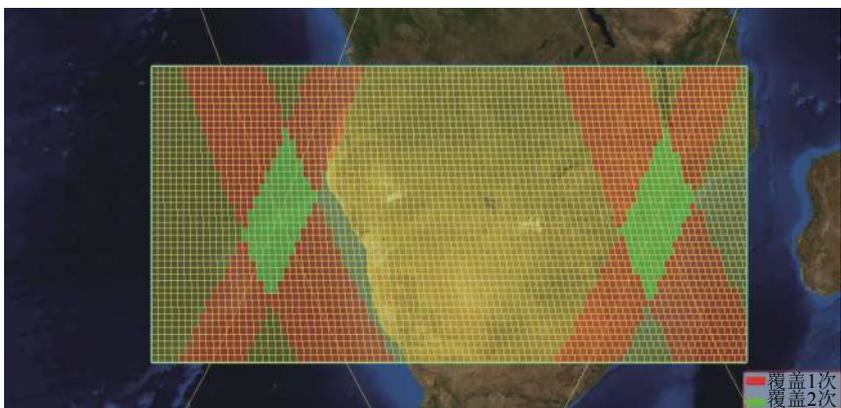
推演系统中最核心的2项可视化要素是F处大范围半透明多边形所代表的目标区域和H、G处所表现的随时间动态变化的已侦察范围. OSGEarth引擎无法直接支持, 需设计专门的算法来实现。

目标区域是定义在经纬度平面的多边形, 已侦察范围是卫星覆盖带与目标区域的交. 三维场景中进行可视化时, 一是需将其转化为大地坐标系中的曲面, 二是避免绘制共面多边形产生的显示混乱。

因此设计目标区域与已侦察范围的组合绘制算法: 首先在经纬度平面将目标区域离散为可作为曲面表达的小多边形; 然后当卫星位置改变时, 计算覆盖带与每个离散多边形的交与差, 交表示已侦察范围, 差表示目标区域; 最后进行绘制。



(a) 分析结果统计图



(b) 覆盖情况可视化效果

图5 实拍实传卫星区域侦察能力分析软件输出结果

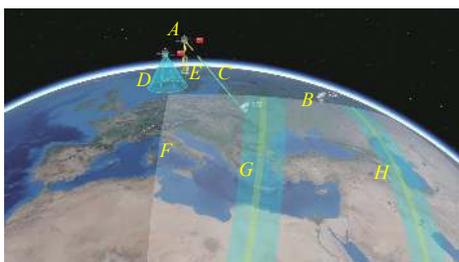


图6 卫星区域侦察过程推演显示效果

(1) 目标区域离散

目标区域一般采用经纬度平面的多个点定义,但其实际形状为贴合于地球表面的曲面,必须离散为多边形表示,采用如下技术:在经纬度平面计算目标区域的矩形包围盒,并根据预设离散精度将包围盒范围离散为均匀网格,如图7所示,目标区域为ABCD,经纬度平面包围盒离散为24个均匀网格;目标区域与各网

格的交作为离散结果,如网格32位于目标区域内部,离散结果为矩形defg,网格51与目标区域部分相交,离散结果为三角形abc.

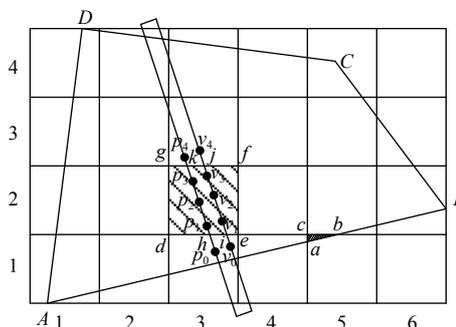


图7 目标区域与侦察范围组合可视化方法

(2) 生成覆盖多边形

根据卫星位置、载荷类型、视场角等,每个卫星

采样点生成 2 个覆盖带边界点, 将边界点按顺序组织在一起, 构成覆盖带多边形. 为优化效率, 采用增量式计算方法: 如新形成 2 点所形成区域与目标区域无交, 不必继续处理; 否则, 或创建新的覆盖带多边形 (原来无覆盖多边形), 或更新原覆盖多边形.

### (3) 计算覆盖多边形与区域离散结果的交与差

交多边形作为已侦察区域绘制用多边形, 差多边形作为目标区域绘制用多边形. 以图 7 中多边形  $defg$  为例说明, 覆盖带多边形与该多边形相交的部分是  $v_0v_1v_2v_3v_4p_4p_3p_2p_1p_0$ , 交点为  $h, i, j, k$ , 以多边形  $hiv_1v_2v_3jkp_3p_2p_1p_0$  表示已侦察区域, 以多边形  $iv_1v_2v_3jfe$  和  $kp_3p_2p_1hdg$  表示目标区域.

### (4) 绘制

上述交、差多边形需转换为大地坐标进行绘制. 转化后多边形与地表并不完全贴合, 即使完全贴合, 采用多边形偏移绘制技术也会导致消隐不正确、时现时隐. 采用解决方法为: 根据经纬度计算大地坐标时增加固定高程, 使其高于地表; 为避免视点贴近地表时观察到悬空效果, 交互操作限制视点高度.

## 5 结束语

研制的实拍实传卫星规划推演系统是更大规模信息系统的组成部分, 成功应用于某任务的指挥决策、规划分析和仿真验证. 本文提出的面向区域侦察的实拍实传卫星数传规划算法、基于网格的卫星区域覆盖分析算法、基于 OSGEarth 的目标区域和侦察范围组合可视化方法均为首次提出, 对相关研究具有借鉴和

参考意义.

### 参考文献

- 1 杨敏, 徐慨, 孙洋. 面向作战区域覆盖的成像侦察小卫星及星座应用. 信息通信, 2014, 27(7): 34-36.
- 2 李云峰, 武小悦. 侦察卫星实拍实传的综合优先度调度算法. 飞行器测控学报, 2008, 27(1): 39-44.
- 3 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. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1239-1241. [doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2003.10.019]
- 4 陈祥国, 武小悦. 蚁群算法在卫星数传调度问题中的应用. 系统工程学报, 2009, 24(4): 451-456, 488. [doi: 10.3969/j.issn.1000-5781.2009.04.010]
- 5 姜维, 庞秀丽, 李丽欣. 卫星数传接收规划模型与算法研究. 运筹与管理, 2013, 22(6): 11-20. [doi: 10.3969/j.issn.1007-3221.2013.06.003]
- 6 经飞, 王钧, 李军, 等. 考虑多数传模式组合的卫星数传调度方法. 系统工程学报, 2012, 27(2): 160-168. [doi: 10.3969/j.issn.1000-5781.2012.02.003]
- 7 张润. 基于重访周期的对地侦察小卫星星座设计[硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2012. 23-32.
- 8 沈欣. 光学遥感卫星轨道设计若干关键技术研究[博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2012. 67-68.
- 9 汪荣峰. 基于多边形布尔运算的卫星区域覆盖分析算法. 装备学院学报, 2016, 27(2): 83-87. [doi: 10.3783/j.issn.2095-3828.2016.02.019]
- 10 王慧林, 黄维, 马满好, 等. 面向区域的电子侦察卫星规划系统设计与实现. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 209-213. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.27.059]
- 11 汪荣峰. 空间态势可视化与分析技术. 北京: 国防工业出版社, 2017. 337-351.