

基于四叉树网格的卫星可见性快速获取方法

曾凡琳¹, 宋庆龙¹, 王 港², 朱光熙², 张 超²,
王 萍³, 侯谨毅⁴

(1. 天津职业技术师范大学 自动化与电气工程学院, 天津 300222;

2. 中国电子科技集团有限公司 第五十四研究所 航天系统与应用专业部, 石家庄 050081;

3. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

4. 中国民航大学 计算机科学与技术学院, 天津 300300)

摘要: 针对在轨卫星数量增加和任务复杂化导致的传统可见性计算方法实时性不足问题, 对卫星可见性快速获取方法进行了研究; 提出了一种基于多级网格的卫星可见性计算方法, 采用空间四叉树结构对地球表面进行多级网格划分, 设计了基于区域空间变换的卫星覆盖区域计算技术, 并通过自底向上递归填充方式构建四叉树可见性网格; 经过实验验证, 该方法在计算 100 颗卫星对 10 000 个目标的可见性时仅需 14.79 s, 相比于系统工具套件 (STK) 的 23.08 h, 显著提升了计算效率, 证明了该方法在计算效率上的优越性。

关键词: 观测卫星; 点目标; 可见性; 实时计算; 地球二维表面; 四叉树网格; 区域空间变换; 系统工具套件

Rapid Acquisition Method for Satellite Visibility Based on Quad-Tree Grid

ZENG Fanlin¹, SONG Qinglong¹, WANG Gang², ZHU Guangxi²,
ZHANG Chao², WANG Ping³, HOU Jinyi⁴

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of
Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. Department of Aerospace Information Applications, The 54th Research Institution of CETC,
Shijiazhuang 050081, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

4. School of Computer Science and Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the real-time performance limitations of traditional visibility calculation methods caused by the increasing number of in-orbit satellites and complex missions, research on the satellite visibility rapid acquisition method is conducted. A multi-level grid-based satellite visibility calculation method is proposed, which utilizes a spatial quad-tree structure to divide the Earth's surface into multi-level grids, presents a multi-level network-based satellite visibility calculation method, and employs a bottom-up recursive filling approach to construct a quad-tree visibility grid. Experimental results demonstrate that the proposed method takes only 14.79 seconds to compute the visibility of 100 satellites for 10,000 targets, significantly improving computational efficiency compared to 23.08 hours required by the System Tool Kit (STK), thereby confirming its superior computational efficiency.

Keywords: observation satellite; point target; visibility; real-time computation; two-dimensional surface of the earth; quad-tree grid; regional spatial transformation; STK

收稿日期:2025-07-15; 修回日期:2025-08-03。

基金项目:天津市教委科研计划项目(2021KJ049)。

作者简介:曾凡琳(1985-),女,博士,副教授。

王 萍(1955-),女,硕士,教授。

通讯作者:朱光熙(1994-),男,硕士,工程师。

引用格式:曾凡琳,宋庆龙,王 港,等.基于四叉树网格的卫星可见性快速获取方法[J].计算机测量与控制,2026,34(6):223-228,296.

0 引言

卫星可见性指卫星与地面目标之间的视线可达性,即卫星是否能够覆盖某一特定区域或目标^[1]。在卫星通信、遥感^[2]、地球观测等领域,获取卫星可见性是进行卫星任务规划的首要条件,直接影响到卫星任务的安排与资源调度。随着卫星数量的不断增加,以及测量任务需求数目与复杂性的提升,如何高效、准确地获取卫星与目标的可见性信息,成为卫星资源管理和任务调度中的重要挑战^[3-4]。

近年来,随着遥感卫星与目标数量的急剧增长,卫星对目标可见性计算的效率与精度问题已成为研究的重点挑战。现有研究方法根据技术路线可分为三类:第一类是基于几何关系分析的方法,该方法通过精确建模卫星视场与地面目标的几何关系进行计算。例如,文献[5]通过分析卫星视场角与地面点的几何约束,结合粗筛和二分搜索技术显著提高了计算精度;文献[6]构建北斗卫星四星三站的仿真场景,生成高精度可见弧段与波束角数据,此类方法虽然精度高,但计算复杂度随场景复杂度呈指数增长,难以满足实时性需求;第二类是基于插值与数值优化的方法,其通过函数逼近技术提升计算效率,如文献[7]采用自适应 Hermite 插值与区间收缩策略并结合观测锥几何关系快速筛除非相交时段,文献[8-9]利用视函数解析法分别解决小偏心率轨道和任意轨道卫星的可见性计算,这类方法效率优势显著,但在多约束复杂场景下精度易受插值误差影响;第三类是基于坐标变换与阵列建模的方法,其通过空间映射降低计算维度,如文献[10]提出共形阵列布阵模型和多坐标系转换技术来优化卫星相对阵面的可见性计算,文献[11]则通过半解析法推导区域目标可见性判断条件,这类方法对特定场景(如阵列天线)效果显著,但泛化能力受限。

尽管上述方法在各自的适用场景下均取得了一定成效,但在应对当前大规模卫星星座与海量地面目标的实时可见性计算需求时,现有方法仍存在两类瓶颈:首先,基于几何分析的方法虽然计算精度较高,但其计算复杂度随着场景复杂度的增加而急剧上升,在动态扩展应用场景时存在明显的性能瓶颈;其次,基于插值和坐标变换的方法虽然在计算效率上有所提升,但在处理跨场景、多约束条件下的计算任务时,难以同时兼顾计算精度与效率的平衡。

为满足实时计算需求,一种解决方案是采用空间换时间的算法设计策略。通过预计算卫星与目标的可见性关系,并将其存储在基于网格的空间索引数据结构中,通过查表机制快速获取卫星对目标的可见性信息。

在地理信息领域,网格作为一种高效的地理信息存

储方法,已被广泛应用于多个研究方向。文献[12]提出了基于地球空间剖分网格(GSOT, geographic spatial orthogonal tessellation)的数据组织方法,解决了跨部门数据整合难题。文献[13]开发了基于 GSOT 的全球离散网格系统的索引与检索方法,通过 3 次扩展和四叉剖分构建多层次网格体系,实现了高效的空间数据管理和跨库检索。在卫星资源管理领域,文献[14]提出了基于 GSOT 多尺度网格的卫星资源组织模型,通过将卫星瞬时地面覆盖映射至基础层级网格并进行多尺度聚合,显著提升了卫星资源分析与查询效率。文献[15]利用四维空域时空网格组合和管理具有时空属性的空中交管数据,将数据提取性能提升 80%。然而,据我们所知,目前尚未研究将网格技术应用于卫星一目标可见性信息的存储与计算领域。

本研究针对卫星一目标可见性实时计算需求,设计了一种多级多尺度空间网格结构,并结合参考区域变换算法实现卫星覆盖区域的快速计算与网格填充。整个方法包括提前计算、预先存储和实时查询 3 个阶段。在提前计算阶段,通过轨道外推算法计算卫星轨道数据,精确计算卫星工作覆盖范围区域;在预先存储阶段,构建了具有多层级、可扩展特性的四叉树网格结构,用于存储预计算的覆盖结果;在实时查询阶段,充分利用四叉树网格的高效索引特性,实现卫星可见性数据的快速检索。

本研究的创新性体现在以下两个方面:1) 将四叉树结构引入卫星可见性计算领域,解决了传统方法难以兼顾存储效率与查询速度的问题;2) 基于参考区域变换的新型计算方法,相比传统几何分析法显著提升了计算效率。这一系列创新为大规模卫星星座的实时任务规划提供了重要的技术支撑。

1 基于四叉树网格的卫星可见性计算方法

1.1 基于四叉树网格的卫星可见性计算方法概述

本研究提出的卫星一目标可见性计算流程如图 1 所示,其核心包含以下 4 个关键步骤:1) 构建地球二维平面四叉树网格结构,该步骤以精度为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格的全球地理空间数据为输入,采用 GSOT 剖分规则,通过四叉树编码(层级 16~20)建立多层次空间网格体系;2) 基于卫星轨道参数进行轨道外推计算,该步骤以卫星轨道根数及任务时间范围为输入,通过简化常摄动理论第 4 版(SGP4, simplified general perturbations 4)轨道模型外推,输出包含位置、速度向量的高精度轨道星历时间;3) 卫星覆盖网格计算与填充阶段,该步骤综合轨道星历数据和卫星载荷参数(侧摆角及视场角),采用参考区域变换算法将三维覆盖锥投影至二维平面,通过射线追踪确定覆盖边界,并以自底向上方式完成四叉树网格数据填充,最终生成时间戳标记的覆

盖网格区块; 4) 在实际应用阶段, 系统以目标点坐标 (经纬度)、查询时间及所需分辨率等级为输入, 通过自顶向下遍历四叉树索引, 根据查询精度要求动态选择网格层级, 最终输出包含可见性判定结果、可见时间窗口及观测侧摆角在内的完整查询结果。

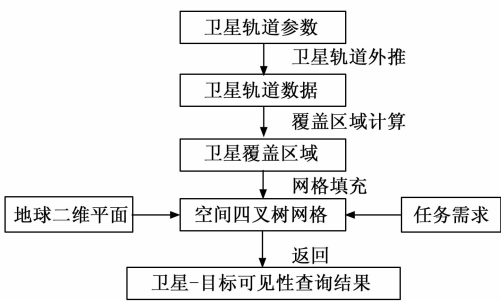
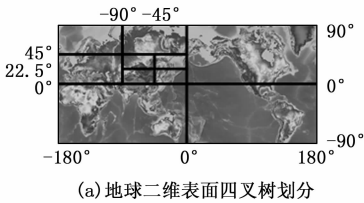


图 1 系统流程图

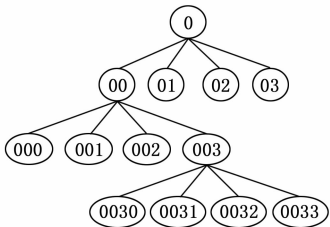
1.2 地球二维平面四叉树网格构建

本文设计采用四叉树网格体系覆盖卫星服务的地球二维表面, 该四叉树结构具有多层级和可扩展的特点, 能够确保数据填充与查询的高效性。四叉树网格体系基于现有的地球经纬度坐标系统构建。通过四叉树的分层结构, 将地球表面划分为不同层次的网格。

图 2 (a) 展示了四叉树网格体系的构建过程。四叉树网格的根节点 N_1^1 对应整个地球的二维表面: $N_1^1 = \{P_1^1(0, 0), L_1 = 360, W_1 = 180\}$, 其中 $P_1^1(0, 0)$ 为根节点区域的中心点经纬度坐标, $L_1 = 360$ 和 $W_1 = 180$ 分别代表根节点区域的经度范围 ($-180 \sim 180^\circ$) 和纬度范围 ($-90 \sim 90^\circ$)。



(a) 地球二维表面四叉树划分



(b) 四叉树网格体系及编码

图 2 地球二维平面四叉树划分示意图

为了构建四叉树结构, 需要对二维平面根节点 N_1^1 进行递归划分, 每次将平面等分为 4 个子区域, 区域的拆分过程可以描述为:

$$N_i^j = N_{4i-3}^{j+1} \cup N_{4i-2}^{j+1} \cup N_{4i-1}^{j+1} \cup N_{4i}^{j+1} \quad (1)$$

式中, N_i^j 代表第 j 层编号为 i 的区域, N_{4i-3}^{j+1} 、 N_{4i-2}^{j+1} 、

N_{4i-1}^{j+1} 及 N_{4i}^{j+1} 为 N_i^j 的拆分子区域。

当 N_i^j 拆分为 4 个子区域之后, 子区域的信息计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{4i-3}^{j+1}(\theta, \gamma) = P_i^j\left(\theta - \frac{L_j}{4}, \gamma + \frac{W_j}{4}\right) \\ P_{4i-2}^{j+1}(\theta, \gamma) = P_i^j\left(\theta + \frac{L_j}{4}, \gamma + \frac{W_j}{4}\right) \\ P_{4i-1}^{j+1}(\theta, \gamma) = P_i^j\left(\theta - \frac{L_j}{4}, \gamma - \frac{W_j}{4}\right) \\ P_{4i}^{j+1}(\theta, \gamma) = P_i^j\left(\theta + \frac{L_j}{4}, \gamma - \frac{W_j}{4}\right) \\ L_{j+1} = \frac{L_j}{2} \\ W_{j+1} = \frac{W_j}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_i^j(\theta, \gamma)$ 表示深度为 j 的第 i 个网格中心点经纬度坐标为 (θ, γ) , L_j 为区域的经度范围, W_j 为区域的纬度范围。

四叉树网格划分的最大深度 D 由所需要的网格最小分辨率 A (单位 $^\circ$) 确定, 计算公式如下:

$$D = \left\lceil \log_2 \frac{180^\circ}{A} \right\rceil \quad (3)$$

式中, $\lceil * \rceil$ 为向上取整运算符号。

当四叉树构建完毕之后, 对网格进行编码, 从根节点开始, 4 个子区域节点按照左上、右上、左下、右下的顺序使用 0~3 的数字进行递归编码, 如图 2 (b) 所示。根据网格节点的编码值, 可以快速确定节点之间的邻接关系以及父子节点关系。

1.3 卫星覆盖信息计算及网格存储

1.3.1 卫星轨道外推计算

卫星轨道的参数通常以开普勒双行元 (TLE, two-line element) 形式表示。其中包括半长轴 a 、离心率 e 、轨道倾角 i 、近心点辐角 ω 、升交点赤经 Ω 和真近点角 φ 等。

根据已有的卫星轨道数据和观测信息, 利用卫星的运动学微分方程^[9]进行轨道外推, 可以预测卫星在未来一段时间内的轨道状态。基于二体问题和万有引力定律可以得到简化的卫星运动方程^[16]:

$$\left| \ddot{\vec{a}} = - \frac{G(M+m)}{r^3} \vec{r} + \vec{f} \right| \quad (4)$$

式中, $\vec{a}$ 为卫星加速度矢量, $\vec{r}$ 为卫星位置矢量, r 为地心距 (卫星位置矢量 $\vec{r}$ 的模), G 为万有引力常数, M 为地球质量, m 为卫星质量, $\vec{f}$ 为各种总摄动力作用下的摄动总加速度。

在上述卫星运动方程的基础上, 通过迭代法计算卫星在时刻 t 的位置 (x_t, y_t, z_t) 和速度 $(\dot{x}_t, \dot{y}_t, \dot{z}_t)$, 另外还包括卫星在 t 时刻的高度 h_t 、相对地球的经度变化率 v_{lon}^t 、纬度变化率 v_{lat}^t 、高度变化率 v_{alt}^t 、星下点经

纬度 lon_i 、 lat_i 以及该点的地球半径 r_i 等。具体的迭代过程如下：

- 1) 根据轨道参数的真近点角 φ 获得卫星在初始时刻的位置 $X_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 和速度 $V_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ；
- 2) 根据以下的迭代公式计算时刻 k 的位置和速度值：

$$\begin{cases} V_{k+1} = V_k + \frac{1}{2}(a_k + a_{k+1})\Delta t \\ X_{k+1} = X_k + \frac{1}{2}(V_k + V_{k+1})\Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中的加速度计算见公式 (4)。

整个更新迭代过程在设定的时间范围内 (t_{start} , t_{end}) 以 $\Delta t = 1 \text{ min}$ 为步长进行迭代计算。当计算时间达到设定的终止时间 t_{end} 时, 迭代过程自动终止。

1.3.2 卫星覆盖范围计算

卫星的覆盖范围是以卫星的星下点轨迹为中心的条带区域, 如图 3 所示。卫星各个时刻的对地覆盖区域可由卫星高度、星载传感器的视场角和机动角度范围确定。对于卫星覆盖区域中所有网格, 都需要计算卫星到网格的可见性, 计算该网格的偏转角和可见时间等。

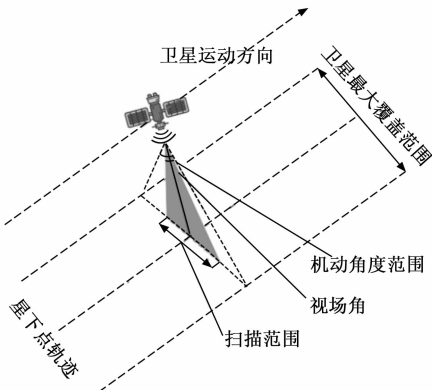


图 3 卫星星下点及覆盖范围

为了能够快速计算大片覆盖区域中所有网格的可见性信息, 本文提出了一种基于空间区域变换的可见性计算方法。首先计算卫星参考覆盖范围边界 (假设卫星轨道倾角为 0° 时的覆盖范围边界) 中所有网格的可见性, 然后通过空间坐标变换至卫星真实轨道平面, 求得卫星真实覆盖范围内网格的可见性。具体步骤如下：

1) 卫星参考覆盖范围计算。卫星参考覆盖范围是指假设卫星轨道倾角为 0° (即卫星轨道与赤道平面重合, 见图 4) 时的覆盖范围。在某一时刻, 卫星参考覆盖范围的上下边界点的大地经纬度坐标可以通过以下公式计算得出：

$$\begin{cases} \gamma_1 = \arcsin \frac{(r_t + h_t) \sin \beta_s}{r} - \beta_s \\ \gamma_2 = - \left[\arcsin \frac{(r_t + h_t) \sin \beta_s}{r} - \beta_s \right] \\ \theta_1 = \theta_2 = lon_t \end{cases} \quad (6)$$

式中, (θ_1, γ_1) 和 (θ_2, γ_2) 分别为参考覆盖范围上下边界点的经纬度坐标, h_t 、 lon_t 和 r_t 分别为时刻 t 的卫星高度、星下点经度、星下点对应地球半径, β_s 为卫星最大机动角度范围。

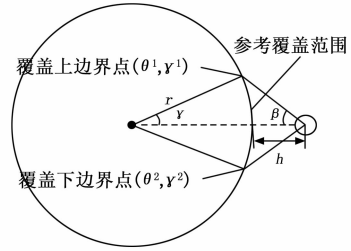


图 4 卫星参考覆盖范围

在卫星参考覆盖范围内, 进一步计算所有最高分布率的网格 $P(\theta, \gamma)$ 可见性信息, 包括卫星访问时间 t_p 和访问时刻的偏转角 α_p 。计算公式为：

$$t_p = (2\pi * n_t + \theta - \theta_0) / \omega_s \quad (7)$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{r \sin \gamma}{\sqrt{(r \cos \gamma - r - h_t)^2 + r^2 \sin^2 \gamma}} \quad (8)$$

式中, n_t 为 t 时刻卫星的圈次, θ_0 为卫星初始时刻的经度, ω_s 为卫星的转动角速度, γ 为变换后网格中心点纬度, h_t 为卫星访问该网格时卫星高度, r 为地球半径。

2) 卫星真实覆盖范围计算。卫星参考覆盖范围的所有网格经过三维空间变换, 转换成卫星真实覆盖范围内的网格。令网格 $P(\theta, \gamma)$ 的大地经纬度坐标为 (r, γ, θ) , 转换到地心直角坐标系下坐标为 (x, y, z) , 在地心直角坐标系下, 通过三维旋转公式进行变换：

$$(x', y', z') = (x, y, z) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \sin i \\ 0 & -\sin i & \cos i \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, i 为轨道倾角, 得到对应真实网格的地心直角坐标 (x', y', z') , 然后再将该坐标转换到大地经纬度坐标下, 得到该网格的坐标 (r', γ', θ') 。

3) 卫星覆盖范围四叉树网格填充。经过步骤 1) 和 2), 利用参考覆盖区域中的网格对真实覆盖区域中的网格进行了填充, 然而在填充过程中可能会存在遗漏的网格, 需要通过插值进行填补。

图 5 展示了如何对真实覆盖区域中的网格进行插值填充。令卫星覆盖区域的上下边界点集为 $\{p_i\}_s$ 和 $\{q_i\}_s$, 同一时刻的上下边界点一一对应, 形成一条卫星对地覆盖扫描线。

第一步：取卫星相邻时刻上下边界采样点 q_{t1} 、 p_{t1} 、 q_{t2} 、 p_{t2} (t_1 、 t_2 为相邻采样时刻), 对 q_{t1} 、 q_{t2} 卫星数据进行线性插值, 设置插值时间间隔 Δt , 以 t_1 、 t_2 卫星数据线性插值获取中间未采样时刻 t_i 的卫星信息, 线性插值公式如下：

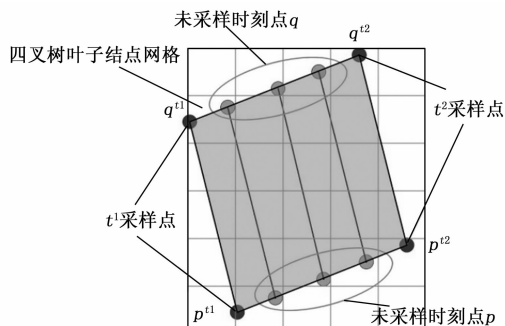


图5 覆盖区域网格存储

$$\begin{cases} t_i = t_1 + k\Delta t \left(k = 1, 2, 3, \dots, \frac{t_2 - t_1}{\Delta t} \right) \\ \text{lon}_{t_i} = \text{lon}_{t_1} + \frac{v_{\text{lon}}^{t_2} - v_{\text{lon}}^{t_1}}{t_2 - t_1} (t_i - t_1) \\ \text{lat}_{t_i} = \text{lat}_{t_1} + \frac{v_{\text{lat}}^{t_2} - v_{\text{lat}}^{t_1}}{t_2 - t_1} (t_i - t_1) \\ h_{t_i} = h_{t_1} + \frac{v_{\text{alt}}^{t_2} - v_{\text{alt}}^{t_1}}{t_2 - t_1} (t_i - t_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中, Δt 为插值时间间隔, t_1 、 t_2 为相邻采样时刻, $v_{\text{lon}}^{t_1}$ 、 $v_{\text{lon}}^{t_2}$ 、 $v_{\text{lat}}^{t_1}$ 、 $v_{\text{lat}}^{t_2}$ 、 $v_{\text{alt}}^{t_1}$ 、 $v_{\text{alt}}^{t_2}$ 分别为 t_1 、 t_2 时卫星相对地球经度、纬度、高度变化速率。

第二步: 依次查询采样时刻以及中间插值未采样时刻上下边界连线穿过的网格, 对于非边界点所在网格直接确定该网格为全覆盖, 并填入卫星访问时间、卫星高度、速度、星下点经纬度、最大机动角度等信息;

第三步: 对于边界点所在网格, 标记为该时刻网格对卫星部分可见, 并记录卫星覆盖信息数据以及边界点经纬度;

4) 自叶节点向上, 对一个节点 N_i^j , 其 4 个子节点记为 N_{4i-3}^{j+1} 、 N_{4i-2}^{j+1} 、 N_{4i-1}^{j+1} 以及 N_{4i}^{j+1} , 若某一卫星 s 对 4 个子节点均可见, 则认为节点 N_i^j 也可见, 根据公式 (6) 和公式 (7) 计算节点 N_i^j 的可见性信息。

1.4 基于四叉树网格结构的卫星-目标可见性查询

图6展示了如何利用四叉树网络结构快速查询目标点的可见性。查询过程从四叉树网格的根节点开始遍历, 具体步骤如下:

查询的输入为目标点的经纬度坐标和需求的分辨率要求 (例如 500 m)。

1) 将根节点设为当前的查询网格。

根节点的初始边界为经度 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 和纬度 $[-90^\circ, 90^\circ]$, 此时网格边长约为 20 000 km。

2) 若当前查询的网格无子网格, 则转至 6)。

3) 若当前查询网格的尺寸小于目标需求的分辨率, 则转至 6); 否则, 继续执行步骤 4)。

4) 找出当前网格的 4 个子网格, 并计算子网格的

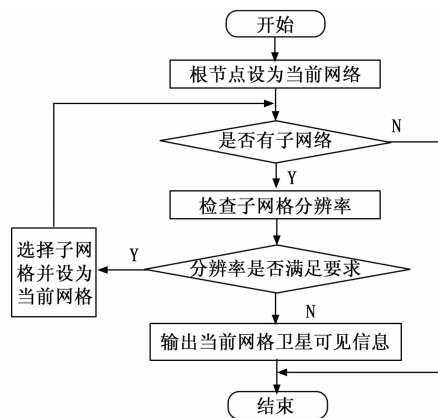


图6 可见性递归查询流程图

边长, 子网格的边长为父网格边长的一半。

5) 根据目标的经纬度, 确定目标所在的子网格, 并将该子网格设为新的当前查询网格, 随后转至 2)。

6) 从当前查询网格中提取所有记录的卫星可见性信息, 包括卫星观测该网格的开始时间、结束时间、观测偏转角以及卫星的载荷类型等, 并将所有可见性信息列表返回。

7) 查询过程结束。

通过上述步骤, 系统能够高效地定位并返回目标点的可见性信息。

需要说明的是, 该方法最终获得的是满足分辨率要求的网格可见性。由于目标点位于网格内部, 可将网格的可见性作为目标的可见性结果。然而, 受网格尺寸影响, 目标的可见性信息可能存在一定误差。本方法通过牺牲部分计算精度, 换取了可见性查询的高效性。

2 实验结果分析

2.1 实验测试平台

本实验测试平台采用 ThinkPad P1 工作站, 搭载高性能英特尔酷睿 i7 处理器、16 GB 内存及专业级英伟达 GTX A2000 显卡。存储方面配备 1 TB 固态硬盘, 确保高速数据读写效率。操作系统为 Windows 10, 编程语言采用 Python 3.8。

2.2 实验设置

卫星覆盖数据采样阶段, 共使用 200 颗低轨对地观测卫星的轨道根数进行轨道外推, 外推时间设置为 2024-01-01T00:00:00-2024-01-02T00:00:00, 卫星覆盖数据采样步长设置为 5 s。

实验中使用的 200 颗卫星构成了一个卫星星座, 卫星星座的参数涵盖了轨道高度、轨道倾角、载荷类型等。卫星星座应同时配备光学、电、合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 3 种不同类型的载荷。每个轨道面由多组光学、电、SAR 卫星组成, 其中每组内的光学、电、SAR 三种卫星采用前后跟飞的方式。

通过调整升交点赤经来实现轨道扩展（按照升交点赤经的间隔进行轨道扩展），从而形成多个轨道面。轨道面中卫星数量及轨道面个数均可设置，如图 7 所示。

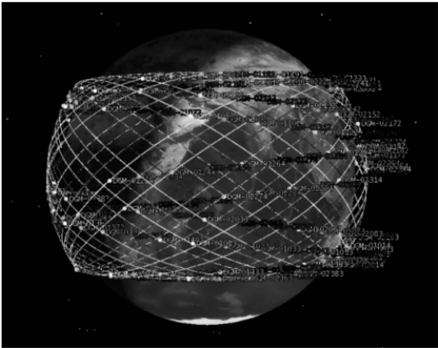


图 7 卫星星座示意图

在实验中，采用随机生成的方式生成点目标。点目标的属性包括经纬度、优先级、载荷类型和工作模式等。可以通过地图模板的方法限制目标生成的区域范围。具体而言，在二维平面世界地图上设置“蒙板”区域，限制点目标或区域目标的生成位置。实验场景中可选择特定区域（如西藏自治区、台湾区域等）作为目标生成范围。如图 8 所示。

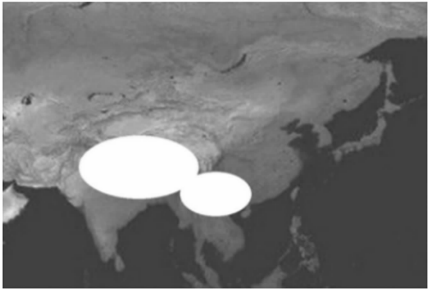


图 8 点目标生成区域蒙板

二叉树网格划分等级设置为 12 层（网格大小对应赤道附近分辨率为 10 km 左右）。覆盖网格数据采用数据库存储，存储空间占用约 80.35 GB。

在实验过程中将本文提出的方法与系统工具套件（STK, systems tool kit）进行对比。STK 是由美国分析图形公司开发的先进卫星系统分析与仿真工具包，广泛应用于航天任务设计、卫星轨道分析等领域^[17-20]。STK 工具包同样提供了卫星可见性计算的功能。

2.3 结果对比分析

2.3.1 时间效率对比

分别实验了不同卫星与目标数量下，本研究所提出的方法与 STK 工具包的可见性数据获取速度的对比，数据获取效率对比见表 1。

由表 1 可见，本研究所提出方法在获取可见性数据的时间效率上远优于使用 STK 的可见性获取方法，而

表 1 可见性数据获取效率对比

卫星-目标/个	可见性数据获取效率/s	
	二叉树网格	STK
10~1 000	2.610	857.145
20~2 000	4.014	2 428.434
50~5 000	8.618	19 427.518
100~10 000	14.794	75 710.423

且随着查询卫星与目标的数据量的不断扩大，其优势愈发明显，具体表现在 100 颗卫星与 10 000 个目标的可见性获取速度及时间效率上，本研究所提出的二叉树网格检索方法只需要 14.79 s 即可获取所有可见信息，而 STK 工具包则需要近 23.08 h。由此可见，本研究所介绍的使用二叉树网格检索的可见性数据获取方法在时间效率上有着巨大优势，尤其是在大规模卫星群与目标的可见性数据获取上优势愈发明显。

2.3.2 可见性时间窗误差分析

从获取到的可见性数据中，选取部分卫星与部分目标的可见性数据进行访问时间的误差分析（以 2023 年 5 月 1 日为例）。本研究所提出的二叉树网格可见性检索方法中，卫星轨道采样时间步长设置为 5 s；同时，选用精确轨道确定数据（POD, precise orbit determination）计算的目标访问时间作为标准，分析各个方法之间的访问时间误差，结果见表 2。

表 2 可见性时间窗口误差对比分析

方法	起始时间	结束时间	时间窗/s	误差/s
STK	3:59:12	4:00:39	87	0
二叉树网格	3:59:14	4:00:37	83	-4
POD	3:59:12	4:00:39	87	0

由表 2 可以看出，STK 与 POD 所获取的访问时间几乎一样，其时间窗口的误差在毫秒级，而本文所提出的使用二叉树网格存储覆盖范围，由于采样步长以及未采样时刻的插值数据所带来的影响，访问时间窗口有着 3 s 的误差。因此，本文所提出的可进行获取方法，在访问数据精确性上仍有一定误差，卫星对地面的访问性计算仍需要使用更精确的方法，但是此误差对本文后续的任务规划研究几乎无影响，若需实际应用，则应该寻求更精确的访问性计算方法，以降低时间上的误差。

3 结束语

针对大规模卫星任务可见性分析计算效率低下的问题，本文提出了一种基于二叉树网格的卫星可见性快速分析方法，构建地球二维表面二叉树网格，预先存储网格可见性数据，设计查询算法实时获取目标可见性数据。实验结果表明，构建二叉树网格需要 80.35 GB 的存

（下转第 296 页）