

# 面阵式极轨卫星对月观测快速预报模型

蒋承洲<sup>1,2</sup>, 刘建波<sup>1</sup>, 杨进<sup>1\*</sup>, 马勇<sup>1</sup>, 姚武韬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院中国遥感卫星地面站, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 对月辐射定标是遥感卫星上定标重要的手段之一,而对月辐射定标的首个关键问题是选取合适的观测时机。提出了一种适用于面阵相机的对月观测快速预报模型,首先通过固定时间步长确定时间窗口的分布范围,随后选取月球在卫星视场方向上的投影圆上的若干等距离的散点,精确判断月球与卫星视场的几何关系,并采用斐波那契搜索法快速计算月球进入、离开相机视场的时间窗口。仿真实验结果表明,所提模型与传统的跟踪传播算法相比,计算量降低,时间性能提高,预报结果更准确。所提方法与 Satellite Tool Kit(STK)方法在可视性计算准确度上的平均偏差为亚秒级。

**关键词** 遥感; 极轨卫星; 对月观测; 时间窗口; 轨道计算

中图分类号 V474

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2228002

## Rapid Forecast Model of Moon Observation by Polar-Orbiting Satellite Equipped with Area-Array Cameras

Jiang Chengzhou<sup>1,2</sup>, Liu Jianbo<sup>1</sup>, Yang Jin<sup>1\*</sup>, Ma Yong<sup>1</sup>, Yao Wutao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>China Remote Sensing Satellite Ground Station, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Lunar calibration is one of the important ways of satellite reflective solar bands on-orbit calibration. The most critical step in lunar calibration is to select the timing of observation. A rapid lunar observation forecast model is proposed, which is suitable for area-array cameras. The model first determines the distribution range of the time window by a fixed time step, and then selects several iso-distance scattering points on the projection circle of the moon in the direction of the satellite field of view, which is used to accurately determine the relationship between the moon and the satellite field of view. Subsequently, it uses the Fibonacci sequence search method to quickly calculate the time window of the moon entering and leaving the camera field of view. The simulation experiments show that the proposed model can improve the computational efficiency, reduce the computation cost, and make the prediction more accurate if compared with the conventional track propagation methods. The average deviation of visibility calculation accuracy between the proposed method and the Satellite Tool Kit (STK) method is in the sub-second scale.

**Key words** remote sensing; polar-orbiting satellites; moon observation; time window; orbit calculation

**OCIS codes** 280.4788; 010.0280; 120.0280

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-01-15; 录用日期: 2021-01-21

基金项目: 中国科学院战略先导科技专项 A 类(XDA19010400)

通信作者: \*yangjin@aircas.ac.cn

# 1 引言

月球依靠反射太阳而发光,其表面具有很高的光度稳定性,是理想的定标参考源<sup>[1]</sup>。对月定标作为天上定标的重要手段之一,有着无需在天上安装额外装置、不受地面物理因素影响<sup>[2]</sup>、不需要地面配套设施等优势,可以增加定标频次,提高定标效率。

对月定标最先需要解决的问题是选取合适的观测时机,预报对月观测的时间窗口<sup>[3-4]</sup>。以 Terra<sup>[5]</sup>、Aqua<sup>[4-5]</sup>、SeaWiFS<sup>[6]</sup>、风云三号<sup>[7]</sup> 等为代表的极轨卫星通过 JPL(Jet Propulsion Laboratory)星历和卫星轨道参数计算出日、月、卫星的位置及速度矢量,判断卫星质心到月球质心的连线矢量在卫星轨道运行方向上的投影,当投影距离小于某一阈值,且观测几何满足对月观测几何约束时,则视该时刻为卫星对月成像的时间窗口。该方法将卫星视场简化为射线,将月球简化为点目标,计算卫星星下视场中心正对月球质心的时间点<sup>[5, 8]</sup>,适用于摆扫式卫星和视场角较小的推扫式卫星,但是不能计算月球进入和离开卫星视场的精确时间。朱军等<sup>[9]</sup>在时间点预报的基础上,通过 Satellite Tool Kit(STK)方法精确计算了月球进入、离开视场的时间窗口,成功完成了一颗低轨高分辨率卫星的时间窗口预报和对月定标工作。此类方法也是目前大部分宽视场推扫式极轨卫星选取时间窗口的常规方法。STK 的可视性分析采用了跟踪传播算法<sup>[10]</sup>,使用极小的时间步长预报每个时刻月球、卫星视场的几何关系,得出卫星观测的时间窗口。该方法精度较高,但在对月观测的需求场景中,需要借助其他工具调用 STK 功能模块或通过较复杂的软件操作添加对月观测特定的几何约束,且计算量较大,耗时较长,不宜作为通用方法在更多的宽视场高分辨率极轨卫星对月定标

任务中推广使用。此外,吴荣华等<sup>[11]</sup>使用卫星实时 GPS(Global Positioning System)数据和姿态数据计算月球在仪器坐标系下的位置,提取了冷空视窗观测数据中的月球数据<sup>[11]</sup>。此方法精度更高,漏报和错报更少,但只适用于摆扫式卫星,且该方法是用来提取 MERSI(Medium Resolution Spectral Imager)冷空视窗已观测数据中的月球数据<sup>[11]</sup>,不适用于面阵相机的月球观测时间窗口的预报。因此,需要研究一种针对面阵式极轨卫星的高精度对月观测快速预报模型,以提高实际的工作效率。

本文针对搭载面阵相机的极轨卫星设计了一种对月观测快速预报模型。该模型考虑了月球在卫星视场中的实际尺寸,可以精确判断月球是否在卫星面阵视场中。利用大步长的时间间隔定位时间窗口的分布,再利用斐波那契搜索法精确定位月球进入、离开卫星视场的时间窗口边界,相比跟踪传播算法,大大提高了计算效率。

## 2 关键方法

面阵式极轨卫星在对月定标时间窗口的过程中,要确定日、月、地、卫星的位置、速度及相互间的几何关系<sup>[4]</sup>。各天体位置和几何关系在不同时间点都不相同,当所有天体位置和几何关系满足对月定标几何约束,且月球位于卫星面阵视场内时,才能进一步计算月球进入和离开视场的具体时间。本文在此节中将月球观测时间窗口计算过程中的关键问题进行讨论。

### 2.1 时间系统和坐标系

对月定标时间窗口预报任务的时间跨度常以月或年计算,为了方便计算,要进行公历日期( $Y$  代表年, $M$  代表月, $D$  代表日)和儒略历( $JD, J_{JD}$ )的转换,两个时间系统的转换关系为

$$J_{JD} = \text{INT} [365.25 \times (Y + 4716)] + \text{INT} [30.6001 \times (M + 1)] + D - 1524.5, \quad (1)$$

式中:INT( $\cdot$ )表示取整。

计算时间窗口需要确定 J2000 坐标系下天体与卫星的位置及速度矢量,而计算卫星对月成像机动

角度需要将 J2000 惯性系转换为卫星轨道坐标系(图 1),J2000 坐标系与卫星轨道坐标系之间的转换关系为

$$\mathbf{M}_{JS} = \begin{bmatrix} -\cos \omega \sin \psi - \sin \omega \cos \theta \cos \psi & \cos \omega \cos \theta \cos \psi - \sin \omega \sin \psi & \cos \psi \sin \theta \\ -\sin \omega \sin \theta & \cos \omega \sin \theta & -\cos \theta \\ \sin \omega \cos \theta \sin \psi - \cos \omega \cos \psi & -\sin \omega \cos \psi - \cos \omega \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \sin \psi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}_{JS}$  为 J2000 坐标系与卫星轨道坐标系的转换矩阵; $\omega, \psi, \theta$  分别为  $X, Y, Z$  坐标轴的旋转角度。

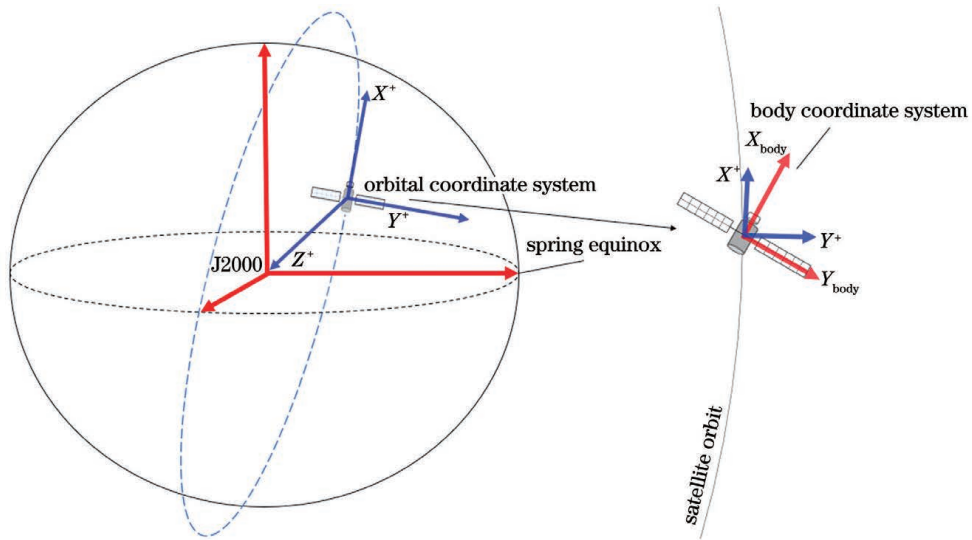


图 1 坐标系示意图

Fig. 1 Schematic of coordinate system

### 2.2 几何约束条件

计算极轨卫星对月观测的时间窗口需要满足两个基本的几何约束条件。

#### 2.2.1 地球夜侧观测

为避免太阳直射,卫星应在地球夜晚一侧进行观测动作<sup>[3]</sup>,图 2 显示了太阳光照射的近似几何结构。考虑到云层对太阳光的折射,引入暮光角(图 2 中用  $\alpha$  表示)来描述这种效应<sup>[5]</sup>。

设  $t$  时刻太阳相对于地球中心的位置矢量为  $r_{Sun}(t)$ ,  $R$  为地球半径,  $r_M$  为地球到卫星的矢量,  $s$  的定义如图 2 所示。则卫星位于地球夜晚侧的条件为

$$s = r_{Sun}(t)r_M/r_{Sun}(t) < 0, \quad (3)$$

$$R - |s| \tan \alpha > \sqrt{r_M^2 - s^2}. \quad (4)$$

#### 2.2.2 日-月-传感器相位角

日-月-传感器相位角  $\varphi$  (简称月相角) 是月球质

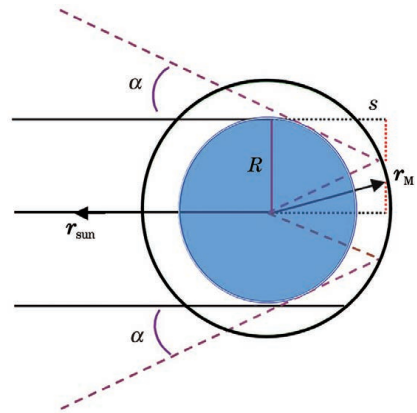


图 2 地球夜侧示意图

Fig. 2 Schematic of night side of earth

心到太阳质心的矢量与月球质心到传感器质心的矢量间的夹角,对月观测活动应在合适的月相角范围内进行,它可以表示为

$$\varphi = \arccos \left[ \frac{(r_{Sun} - r_{Moon}) \cdot (r_M - r_{Moon})}{|r_{Sun} - r_{Moon}| |r_M - r_{Moon}|} \right], \quad (5)$$

式中:  $r_{Moon}$  为地球质心到月球质心的矢量。

卫星对月定标的载荷成像时机一般选取月球被照亮面积与月球总面积的比值大于 50% 的情况<sup>[9]</sup>。同时,为了避免反冲效应(月球表面在  $0^\circ$  月相角附近的辐照度表现出一个强烈的后向散射增强效应),应尽量避免在  $0^\circ$  月相角附近定标。

### 2.3 面阵视场对月球的可视性计算

计算面阵视场对月球可见性需要以卫星星下点与月球质心可视性计算为基础,即先把卫星视场简化为射线,月球简化为质点,根据 JPL 星历和卫星

的轨道参数计算每个时刻的地球质心、月球质心的位置和速度矢量,从而很容易计算出月球对卫星视场可视的时间点。在此基础上,需要考虑卫星视场覆盖范围和月球在卫星视场中的实际大小,并以此构建面阵视场对整个月球可见性分析的方法。

#### 2.3.1 卫星对月球质心的可视性计算

设卫星传感器相对于地球中心在  $t$  时刻的位置矢量和速度矢量分别为  $r_m(t)$  和  $v_m(t)$ ,  $e_x(t)$ ,  $e_y(t)$ ,  $e_z(t)$  分别为  $t$  时刻沿  $X, Y, Z$  轴正方向的单位向量。在描述几何关系之前,定义卫星坐标系:沿

轨道运行方向为  $X^+$  ( $X$  轴正方向), 天底方向为  $Z^+$  ( $Z$  轴正方向), 垂直于轨道运行方向并指向外太空的方向为  $Y^+$  ( $Y$  轴正方向)。面阵相机的可视区域可以抽象为一个规则的矩形, 是卫星滚动和俯仰机动范围内相机的可视区域<sup>[10]</sup> (如图 3 所示), 因此当卫星-月面点矢量  $\gamma$  在卫星  $XOZ$  平面内的投影  $\gamma_{XOZ}$  小于垂直于卫星运动方向等效视场角的一半且  $\gamma$  在卫星  $YOZ$  平面内的投影  $\gamma_{YOZ}$  小于卫星运动方向等效视场角的一半时, 卫星才对此月面点可见 (如图 4 所示), 即

$$\theta_{XOZ} = \arccos \frac{\gamma_{XOZ} \cdot e_z}{|\gamma_{XOZ}|} < \theta_Y, \quad (6)$$

$$\theta_{YOZ} = \arccos \frac{\gamma_{YOZ} \cdot e_x}{|\gamma_{YOZ}|} < \theta_X, \quad (7)$$

式中:  $\theta_{XOZ}$  为月面点-卫星质心与  $XOZ$  平面的夹角;  $\theta_{YOZ}$  为月面点-卫星质心与  $YOZ$  平面的夹角;  $\theta_Y$  为沿  $Y$  轴方向的卫星视场半角;  $\theta_X$  为沿  $X$  轴方向的卫星视场半角。

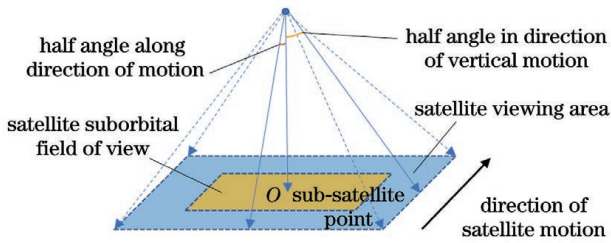


图 3 卫星可视区域

Fig. 3 Satellite viewing area

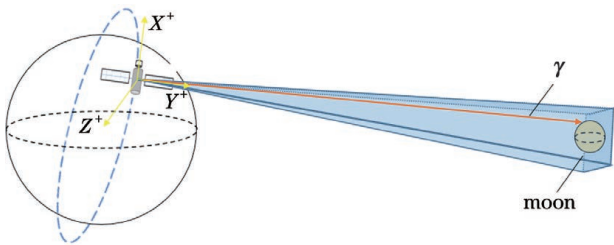


图 4 卫星对月观测示意图

Fig. 4 Schematic of satellite observation of moon

### 2.3.2 卫星对完整月球表面的可视性计算

由于月球在极轨卫星视场中的角度约为  $0.5^\circ$ , 因此在计算精确时间窗口时不能将月球简化为一个质点, 可将月球视为一个区域目标。本文将月球近似为直径为 1738 km 的球体, 在卫星  $XOZ$  上的投影简化为一个圆形, 并在圆上选取了等间隔的若干个离散点 (图 5), 在上文对月球质心可见性计算的基础上, 判断卫星视场对每个月面离散点的可视性, 找出月球进入和离开卫星视场的时间窗口边界。

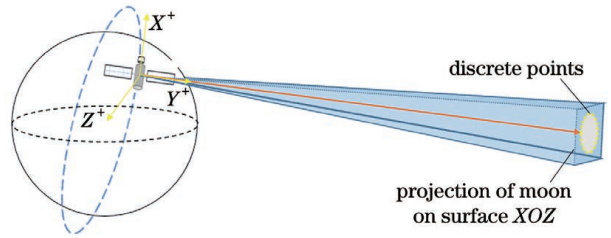


图 5 离散点卫星观测原理图

Fig. 5 Principle diagram of satellite observation of discrete points

## 3 模型设计与实现

在计算面阵相机对月观测时间窗口时, 不能简单地对月球上一点进行可视性分析。传统的跟踪传播算法计算卫星视场对月可视性时, 将月球视为区域目标, 将区域目标划分成若干网格, 计算卫星视场对网格节点的可视性, 判断卫星视场对整个区域目标的可视性<sup>[10]</sup>。本文将月球目标抽象为卫星视场平面上的投影圆, 选取圆上若干离散点代表月球的轮廓, 在保证精度的情况下提高了计算效率。

本文模型使用大步长判断时间窗口的分布, 并采用斐波那契搜索法精确计算窗口边界, 进而计算面阵式极轨卫星对月球的可视性, 减少了计算量, 主要步骤如下。

1) 确定任务的起始时刻  $t_0$  和终止时刻  $t_1$ , 将公历时间转换为儒略历时间, 确定任务的总时长。使用既定步长 ( $t'$ ) 将任务的总时长划分为  $(t_1 - t_0) / t'$  个子时间段, 作为大步长判断时间窗口分布的任务执行次数。

2) 根据 JPL 星历和卫星轨道参数计算每个子时间段的起始时刻  $t_{i0}$  和终止时刻  $t_{i1}$  处太阳、地球、月球、卫星的位置和速度, 并计算月球在卫星矩形视场所在平面的投影圆, 等间距选取 100 个圆上离散点, 若月球投影圆中有离散点在第  $i$  个子时间段中某个时间点落入卫星视场, 则这个时间段视为待精确时间窗口。

3) 若第  $i$  个时间段中的起始时刻  $t_{i0}$  与结束时刻  $t_{i1}$ , 月球投影圆上所有离散点都不在视场中, 计算两个时刻卫星-月球投影圆所有离散点矢量在卫星运动方向上的投影, 若存在两个投影矢量的乘积为负, 则时间窗口位于两个时刻内; 若  $t_{i0}$  时刻有离散点位于卫星视场中, 且  $t_{i1}$  时刻没有离散点位于卫星视场中, 则此时间段中存在月球离开卫星视场的时间窗口边界; 若  $t_{i1}$  时刻有离散点位于卫星视场中, 且  $t_{i0}$  时刻没有离散点位于卫星视场中, 则此时

间段中存在月球进入卫星视场的时间窗口边界,记录所有的待精确时间窗口。

4) 判断所有满足上述条件的子时间段是否满足以下几何约束,并记录所有满足约束条件的子时间段:

a) 卫星是否位于地影区且不受暮光角影响的区域;

b) 当前时刻的月相角是否在设定范围内;

c) 卫星的机动姿态是否在最大机动能力范围内。

5) 利用斐波那契搜索法计算所有待精确时间窗口中月球进入或离开卫星视场的时间点:

a) 若某个月球进入卫星视场的边界点位于第  $i$  个子时间段  $(t_{i0}, t_{i1})$  中,计算  $t = 0.618 \times (t_{i1} - t_{i0})$  时刻是否可见,若可见,将  $t$  赋值给  $t_{i0}$ ,不可见则赋值给  $t_{i1}$ 。

b) 重复执行 a) 步骤,直到  $t_{i1} - t_{i0}$  达到设定的最小分辨率,某个月球进入卫星视场的边界点  $t = 0.618 \times (t_{i1} - t_{i0})$ ,求解月球离开卫星视场的边界点的思路相同。

6) 记录每个时间窗口开始时间、卫星星下点正

对月球质心、结束时间三个 UTC(Universal Time Coordinate)时间,并记录每个时间点处的月相角、太阳和卫星的月面经纬度、日月距离、月球-卫星距离和卫星机动姿态<sup>[12]</sup>,为后续定标工作提供数据支撑。

### 4 实验验证

本文用 python 编程语言实现了上述模型,并在一台计算机(Intel Core i7-8750H, 16 GB 内存, Windows 10 操作系统)上进行了以下实验。

实验研究对象为中国科学院即将发射的 CASEarth(Chinese Academy of Sciences Earth)卫星,该卫星搭载的高分辨率城镇微光成像仪(Glimmer Imager for Urbanization, GIU)由两架幅宽为 150 km 的面阵相机(图 6)拼接而成,计划采用对月定标的方式监测仪器探元的响应度稳定性<sup>[13]</sup>。轨道参数如表 1 所示,其中 RAAN(Right Ascension of Ascending Node)是升交点赤经。高分辨率城镇微光成像仪参数如表 2 所示,其中 GSD(Ground Sampling Distance)是卫星的星下点分辨率。

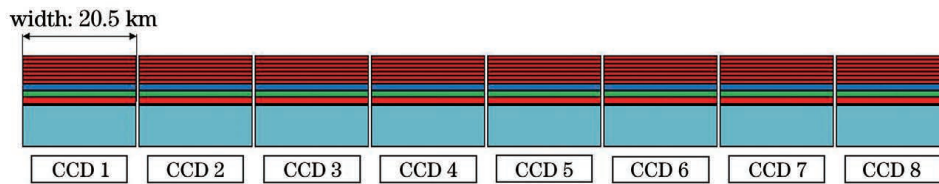


图 6 相机焦平面结构

Fig. 6 Focal plane structure of camera

表 1 CASEarth 卫星的轨道参数

Table 1 Orbital parameters of CASEarth satellite

Parameter	Value
Orbit epoch(UTC)	20210304T02:51:10.000
Length of semi-major axis /km	6883.4975420659866359
Eccentricity	0.0000000000000003
Inclination /( $^{\circ}$ )	97.5229616750798271
RAAN /( $^{\circ}$ )	124.3333217298075368
Argument of perigee /( $^{\circ}$ )	171.7663989014852177
Mean anomaly /( $^{\circ}$ )	0

表 2 GIU 的参数

Table 2 Parameters of GIU

Parameter	Value
Focal length /mm	555.5
Field angle /( $^{\circ}$ ) $\times$ ( $^{\circ}$ )	34.4 $\times$ 2.3
GSD /m	10
Width /km	300

实验通过本文模型预报了某时间跨度的 CASEarth 卫星对月观测的时间窗口,并与 STK 的结果进行对比。实验开始时间为 2021 年 1 月 3 日(UTC),结束时间为 2021 年 3 月 3 日(UTC),模型计算出的时间窗口如表 3 所示,STK 的计算结果如表 4 所示。

表 3 所提模型的计算结果

Table 3 Calculation result by proposed model

Access	Start time (UTC)	Stop time (UTC)
1	20210104T02:35:10.922	20210104T 02:35:46.017
2	202101-20T02:46:43.241	20210120T 02:47:12.709
3	20210120T04:20:50.955	20210120T04:21:20.026
4	20210120T16:53:51.004	20210120T16:54:18.879
5	20210204T23:45:51.232	20210204T23:46:22.544
6	20210205T07:37:58.120	20210205T07:38:29.997
7	20210205T09:12:25.631	20210205T09:12:57.702

表 4 STK 的结果

Table 4 Results by STK

Access	Start time (UTC)	Stop time(UTC)
1	20210104T02:35:11.136	20210104T02:35:46.715
2	20210120T02:46:42.909	20210120T02:47:12.199
3	20210120T04:20:51.654	20210120T04:21:20.716
4	20210120T16:53:50.408	20210120T16:54:18.298
5	20210204T23:45:50.727	20210204T23:46:21.764
6	20210205T07:37:57.810	20210205T07:38:29.670
7	20210205T09:12:25.307	20210205T09:12:57.319

以 STK 传感器对月可视性分析结果为标准值,采用绝对误差  $\Delta$  和相对误差  $\delta$  作为分析结果精度的指标<sup>[14]</sup>。

绝对误差  $\Delta$  的计算公式为

$$\Delta = \frac{\sum_{i'}^N |t_{i',\text{true}} - t_{i'}|}{N}, \quad (8)$$

相对误差  $\delta$  的计算公式为

$$\delta = \frac{\sum_{i'}^N |t_{i',\text{true}} - t_{i'}|}{\sum_{i'}^N |t_{i',\text{s,ture}} - t_{i',\text{e,ture}}|}, \quad (9)$$

式中: $N$  为时间窗口的个数; $t_{i',\text{true}}$ 、 $t_{i',\text{s,ture}}$  和  $t_{i',\text{e,ture}}$  分别为第  $i'$  个时间窗口星下点对准月球质心、时间窗口开始和结束时刻 UTC 时的真实值; $t_{i'}$  为本文模型计算第  $i'$  个实际安装口星下点对准月球质心的 UTC 时刻。绝对误差反映了计算所得时间窗口与实际时间窗口在数值上的绝对差别。相对误差反映了误差相比于时间窗口的大小<sup>[14]</sup>。本文方法的绝对误差为 0.5459 s,相对误差为 0.0018。由上述分析可知,本模型的绝对误差为亚秒级误差,卫星对月成像时间约为 30 s,因此完全可以满足面阵式极轨卫星对月观察时间窗口的精度要求。

分别采用本文模型和跟踪传播方法预报了 CASEarth 卫星在 3、6、12 个月三个不同时间跨度下对月观测时间窗口预报所需的时间,本文模型的时间步长设置为 60 s,精确搜索时间窗口边界的时间分辨率设为 0.001 s,传统的跟踪传播方法的时间分辨率设为 0.1 s。两个模型的时间性能对比如表 5 所示。

表 5 时间性能对比

Table 5 Time performance comparison

Time span / month	Proposed method /s	Track propagation method /s
3	23.22	145.07
6	45.72	287.67
12	95.77	570.14

由表 5 可以看出,与跟踪传播算法相比,本文模型的时间性能具有很大优势,相同任务下本文模型的平均计算时间是跟踪传播算法的 16.22%,在保证预报精度的同时具有较高的时间性能和计算效率。

## 5 结 论

提出了一种面阵式相机对月观测时间窗口的快速预报模型。该模型对比现有方法具有两个优势:一是提高了宽视场面阵式极轨卫星的时间窗口准确性,在判断卫星对月可视性时,不是简单地将卫星视场简化为射线,将月球简化为点,而是根据卫星真实视场角度建模,将月球视为区域目标,精准判断月球球体进入和离开面阵视场的时间,得出准确的时间窗口;二是提高了计算时间窗口的时间效率,对比传统跟踪传播算法,所提方法先利用较大步长判断月球进入视场的大致时间段,而后使用斐波那契搜索法确定边界,大大提高了时间性能,同时该方法采用开源框架开发,摆脱了对商业软件的依赖。改进了对月定标时间窗口预报模型,建立了面阵式相机对月观测时间窗口的快速预报模型,下一步将对面阵式极轨卫星对月定标中观测几何误差修正模型开展进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Gao H, Bai Z G, Lu C L, et al. Attitude maneuver compensation method on lunar imaging for optical remote sensing satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(4): 5-12.  
高涵,白照广,陆春玲,等. 光学遥感卫星对月定标时姿态机动补偿方法[J]. 航天器工程, 2016, 25(4): 5-12.
- [2] Xu W W, Zhang L M, Li X, et al. On-orbit radiometric calibration of high-resolution optical satellite camera based on wide dynamic targets[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1028004.  
徐伟伟,张黎明,李鑫,等. 基于宽动态目标的高分辨率光学卫星相机在轨辐射定标[J]. 光学学报,

- 2019, 39(10): 1028004.
- [3] Xiong X X, Chen H D. Using lunar observations to assess terra MODIS thermal emissive bands calibration[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7807: 78070I.
- [4] Xiong X X, Geng X, Angal A, et al. Using the Moon to track MODIS reflective solar bands calibration stability[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8176: 817611.
- [5] Sun J Q, Xiong X X, Barnes W L, et al. MODIS reflective solar bands on-orbit lunar calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 2383-2393.
- [6] Eplee R E, Jr, Barnes R A, Patt F S, et al. SeaWiFS lunar calibration methodology after six years on orbit[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5542: 1-13.
- [7] Niu M H, Chen F C. Methods of on-orbit calibration of satellite radiometer reflective solar bands using the moon[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(2): 337-341.  
牛明慧, 陈福春. 基于月球反射的遥感仪器在轨定标方法[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(2): 337-341.
- [8] Li Z F, Wang S R, Huang Y, et al. High-precision and short-time solar forecasting by spaceborne solar irradiance spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712007.  
李占峰, 王淑荣, 黄煜, 等. 星载太阳辐照度光谱仪短时高精度太阳预报[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712007.
- [9] Zhu J, Li Y C, Bai Z G, et al. Lunar calibration method through attitude maneuver of low-earth-orbit and high-resolution remote sensing satellites [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 1913-1923.  
朱军, 李永昌, 白照广, 等. 低轨高分辨率遥感卫星姿态机动对月定标方法[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1913-1923.
- [10] E Z B, Li J F. Fast simulation algorithm for area target visibility using remote sensing satellites [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(9): 699-704.  
鄂智博, 李俊峰. 遥感卫星对区域目标可见性的快速计算方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(9): 699-704.
- [11] Wu R H, Zhang P, Yang Z D, et al. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 278-289.  
吴荣华, 张鹏, 杨忠东, 等. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 278-289.
- [12] Lu R R, Sun H B, Fu S F, et al. Point cloud registration based satellite motion parameter identification method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141503.  
鲁荣荣, 孙海波, 付双飞, 等. 一种基于点云配准的卫星运动参数辨识方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141503.
- [13] Hu Z Y, Zhou X D, Tang Y J, et al. Measurement and resolution method for intra-pixel response of front-illuminated CMOS sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0910002.  
胡璋悦, 周晓东, 唐玉俊, 等. 一种前照式 CMOS 探测器像元内响应测量和解算方法[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0910002.
- [14] Zhang W, Wang SB, Cheng C Q, et al. An efficient method for time window of satellite access area target based on subdivision grids [J]. Geomatics World, 2018, 25(6): 5-11.  
张玮, 王守斌, 程承旗, 等. 一种基于网格的卫星访问区域目标的时间窗口快速计算方法[J]. 地理信息世界, 2018, 25(6): 5-11.