

地月L2点中继星长阴影影响研究

梁伟光, 刘磊, 刘勇, 马传令

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘要: 地月L2点中继星环绕地月L2点飞行时, 会经历由地球或月球遮挡太阳而产生的阴影, 部分阴影时长较长, 中继星进入长阴影, 严重时威胁卫星平台安全。基于月球背面软着陆探测工程目标和中继星绕飞地月L2点halo轨道特性, 分析长阴影的分布特征, 以及阴影时长与轨道相位、振幅、构型等因素的关系, 进而对长阴影的规避方法和适用范围进行探讨。研究结果为地月L2点中继星长阴影问题提供了分析方法和应对方案。

关键词: 长阴影; 中继星; 地月L2点; 规避; 调相

中图分类号: P125.1, P173.3, V412.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2019)01-0052-05

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.01.008

引用格式: 梁伟光, 刘磊, 刘勇, 等. 地月L2点中继星长阴影影响研究[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 52-56.

Reference format: LIANG W G, LIU L, LIU Y, et al. Long shadow of relay satellite around Earth-Moon L2 libration point[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 52-56.

引言

月球自转与绕地球公转周期相同, 使得在月球背面进行着陆探测时, 探测器无法直接与地球测控站通信。地月系L2平动点(下文简称“L2点”)位于地球至月球连线的延长线上, 即月球背面的“正上空”, 且与地球、月球的位置相对固定。航天器在地月系L2点附近可以环绕L2点飞行, 对月球背面持续可见。因而在地月系L2点布设中继卫星, 建立“地球-中继星-月球背面”的中继通信链路, 能够有效支持月球背面着陆探测。

中继星在以地月L2点halo轨道为工程使命轨道长期飞行时^[1], 存在进入阴影的可能。部分阴影长达数小时, 中继星进入长阴影后会因长时间无法通过太阳能供电而超指标消耗电能, 对卫星平台的安全和寿命造成威胁。对于长阴影, 可以通过halo轨道调相进行规避。目前尚未见公开文献对地月L2点附近的阴影情况开展专题分析。本文结合月球背面软着陆探测任务特点, 对中继星halo轨道长阴影规避调相策略进行了分析和设计。

1 halo轨道长阴影

1.1 halo轨道

对于这类有两个大天体和一个航天器组成的系统, 忽略航天器对大天体运动的影响, 称为限制性三体问题。如果该问题中两个大天体绕共同质心作圆周

运动, 称为圆型限制性三体问题。halo轨道的概念就是在圆型限制性三体问题的模型下计算得出的。

会合坐标系(又称质心旋转坐标系)^[2]是研究三体问题时普遍采用的坐标系。会合坐标系o-xyz的定义为: 坐标系随两个主天体一起绕质心o旋转, xy平面为两个主天体相对运动的平面, x轴方向由大天体指小天体, y轴方向为小天体绕质心旋转的切线方向, z轴方向按右手系定义。

根据牛顿万有引力定律, 航天器在两个主天体的引力作用下的运动方程为

$$\begin{cases} \bar{F}_{P_1} = -\frac{GM_1M_3}{R_1^2} \frac{\bar{R}_1}{R_1} \\ \bar{F}_{P_2} = -\frac{GM_2M_3}{R_2^2} \frac{\bar{R}_2}{R_2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, G 为万有引力常数。对式(1)进行无量纲化和量级归一化处理, 可以得到会合坐标系中的圆型限制性三体问题动力学模型如下

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\dot{y} = \frac{\partial \Omega}{\partial x} \\ \ddot{y} + 2\dot{x} = \frac{\partial \Omega}{\partial y} \\ \ddot{z} = \frac{\partial \Omega}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Ω 为等效势能函数

$$\Omega = \frac{(x^2 + y^2)}{2} + \frac{1 - \mu}{r_1} + \frac{\mu}{r_2} \quad (3)$$

μ 为小天体的质量占比

$$\mu = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \quad (4)$$

三体问题基本方程 (2) 存在5个特解，对应的空间中的位置称为平动点，由于这5个特解最早由拉格朗日发现，因此平动点又被称为拉格朗日点，用L1~L5表示。其中，L2点位于大天体至小天体的质心连线延长线上，属于共线平动点，是三体问题中的鞍型不稳定平衡点，航天器在L2点附近飞行时受到较小扰动即会呈近似指数型远离L2点。

在L2点附近存在周期绕飞轨道：当会合坐标系下轨道平面 (xy面) 振动频率与垂直 (z向) 振动频率相等时，航天器环绕L2点的轨道呈单圈闭合形式，这便是halo轨道^[3]，又称晕轨道。

由于真实力学环境下存在非圆形轨道、非限制性引力，以及多体摄动影响，无法严格满足“平面振动频率与垂直振动频率相等”，因此理论上的halo轨道实际是不存在的，但是在理论halo轨道附近小幅振动的拟halo轨道是存在的，且可以采用halo轨道模型对其进行工程近似分析。

由于L2点附近的鞍型不稳定性，halo轨道需实施必要的轨道控制，才能够保持长期绕飞L2点。

本文针对地月L2点中继星halo轨道的相位定义为：halo轨道在xy面的投影中，用“中继星位置-L2点-中继星此前最近一次由+y向-y穿越xz面的点”的角度表示，以从+z向-z看顺时针旋转方向为正方向，范围为[0°, 360°)。

1.2 地月阴影

中继星在halo轨道飞行时，存在进入阴影的可能。阴影包含地影和月影，如图1所示。

根据太阳、地球、月球的形状位置参数，算得在地月L2点平面 (经过L2点且垂直地月连线的平面) 的地月阴影投影半径如表1所示。

其中，本影为太阳被全部遮挡，半影为太阳被部分遮挡，如图2所示。

相较万千米级别的中继轨道包络振幅，阴影半径已低一个数量级，即阴影轨迹在中继轨道包络投影范围内呈窄带状分布。为此，针对地月L2点附近地月本影的分析，设计了阴影分布的“t-y-z”方法，即在会合坐标系下忽略阴影带在x向的变化，取而代之为时间t，与坐标y、坐标z共同建立三维坐标，将阴影在此坐标系下的分布绘制出，如图3所示。

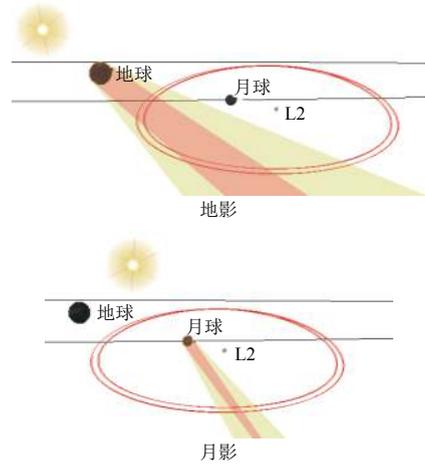


图 1 地月阴影示意图
Fig. 1 Earth/Moon shadow

表 1 地月L2点yz面地月阴影投影半径
Table 1 The Earth/Moon shadow projection radius of the yz plane at Earth Moon L2 libration point

遮挡天体	全影半径/km	半影半径/km
地球	4 310	8 483
月球	1 442	2 036

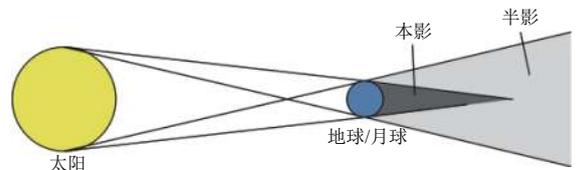


图 2 本影/半影示意图
Fig. 2 Umbra/penumbra

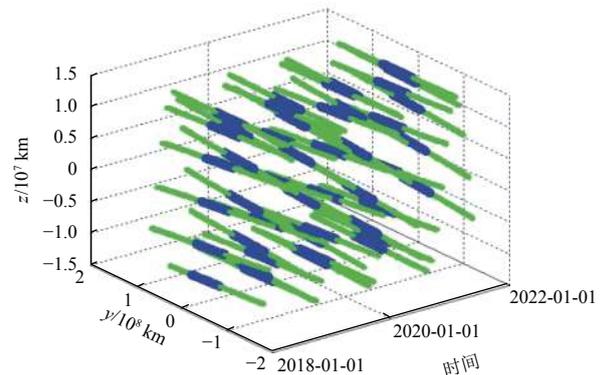


图 3 地月在L2点yz面本影分布图 (蓝色为地影，绿色为月影)
Fig. 3 Earth/Moon umbra scattergram in Earth Moon L2 libration point yz plane (blue-Earth, green-Moon)

通过“t-y-z”方法可以清晰地看出，地影分布粗短，月影分布细长，即相较而言，地影空间影响范围更大，月影时间影响范围更大。

1.3 长阴影

地影和月影每月均会自东向西扫过halo轨道区域,当中继星与阴影运动方向一致时,会长时间陷入阴影。经分析可知:

- 1) 地影平均时长2 h左右,3年内无法完全避免,即地影与halo轨道相位无关。
- 2) 月影与halo轨道相位有关。
- 3) 存在3年内无月影的相位,该类相位占少数,且由于轨道测控误差的长期累积,难以精确设计和预报长期无月影的相位。
- 4) 中继星使命轨道存在恶劣月影。由于黄白交角

最大为 $5^{\circ}19''^{[4]}$,月影在地月L2点附近的最大 z 向幅值为0.6万km。地月L2点中继星的 z 向振幅通常大于该值,因此不存在严格的同向恶劣月影,而仅存在斜向恶劣月影,月影本影最长时可达6 h以上,且由于使命轨道的周期近似为朔望月的一半,恶劣月影出现的前后数月也会存在较长的月影。

中继星在使命轨道长期飞行时,随着测控误差积累,会产生相位偏移,从而存在进入长阴影区域(图3)的可能。以此为背景,针对任务标称halo轨道构型,即 z 向振幅约1.3万km的南向halo轨道^[1],通过相位遍历,算得一例因相位偏移而导致的长阴影情况,如表2所示。

表2 中继星halo轨道长阴影算例(以连续圈首次半影开始为相对日起点)

Table 2 Relay satellite halo orbit long shadow examples (start of first penumbra in continue circles is initial point of relative day)

半影开始/相对日	本影开始/相对日	本影结束/相对日	半影结束/相对日	本影时长/h	包含半影时长/h
0.000	—	—	0.124	—	2.98
27.289	—	—	27.456	—	4.00
56.822	56.877	57.108	57.171	5.55	8.38
86.214	86.265	86.517	86.575	6.06	8.67
115.494	115.550	115.741	115.804	4.59	7.44
146.985	147.044	147.096	147.155	1.26	4.06

2 halo轨道调相

以表2为代表的长阴影会严重威胁中继星平台安全,因此有必要针对长阴影设计应急规避轨道控制策略。由于月影分布的离散性,以调相为主要控制目标,可以实现对月影的有效规避。

2.1 工程约束

halo轨道调相包含多种方式,考虑到月球背面着陆探测器对中继通信服务的需求,以尽可能不影响中继通信服务作为目标,对调相过程制定以下约束:

- 1) 尽可能在月球背面上空实施。
- 2) 尽可能在月夜内完成。

2.2 调相策略

基于上述工程约束方面的考虑,选取了halo轨道内直接调相、月球借力调相、飞经地月L1点调相3种方式。

halo轨道内直接调相,采用双脉冲控制实现:第一次脉冲控制使得中继星飞离原有halo轨道,并在原有halo轨道振幅范围内与新的halo轨道交会,在交会点实施第2次脉冲控制,使得中继星能够在新的halo轨道上尽可能长时间的持续飞行。

月球借力调相采用不稳定/稳定流形(图4)实

现:在以原有halo轨道为起始的不稳定流形中找到飞经月球附近后进入地月L2点稳定流形,能够再次飞回地月L2点附近的轨道族,并在其中优选调相效果满足阴影规避的轨道。

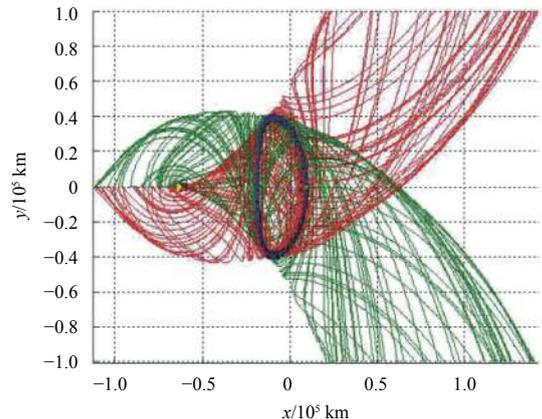


图4 基于地月L2点halo轨道的不稳定流形(绿色)和稳定流形(红色)
Fig. 4 Unstable manifold (green) and stable manifold (red) based on Earth-Moon L2 libration point halo orbit

飞经地月L1点调相也采用不稳定/稳定流形(图4)实现:在以原有halo轨道为起始的不稳定流形中找到飞越月球后,能够绕飞地月L1点的轨道,在L1点附近

实施小脉冲控制，使中继星再次飞越月球后，飞回L2点附近，并实现绕飞。

3种调相实施后，均能有效缩短阴影时长甚至消除阴影。3种调相效果如表3所示。

表 3 中继星halo轨道长阴影调相算例

Table 3 Relay satellite halo orbit long shadow phasing examples

调相途径	速度增量/ ($m \cdot s^{-1}$)	调相 幅度/ $(^\circ)$	转移 时长/d	调相后 轨道	优点	缺点	适用情况	示图
halo轨道内	20~80	0~5	9~17	拟halo	地月L2点附近1个halo轨道周期内快速调相；调相后无月掩 ^[5] ；控制精度要求较低。	调相幅度小；速度增量较大。	推进剂充足；调相需求紧迫；中继通信需求较强。	图 5
月球借力1次	1	约90	9	Lissajous	调相幅度大；速度增量小；转移时间短，便于月夜期间实施。	控制精度要求高；调相后有月掩。	推进剂约束强；可以接受远期的月掩影响。	图 6
飞经地月L1点1次	1	约60	18	拟halo	调相幅度大；调相后无月掩；转移时间较短，便于月夜期间实施。	控制精度要求高；需增加中途修正。	推进剂约束强；可以接受远离地月L2点的转移。	图 7

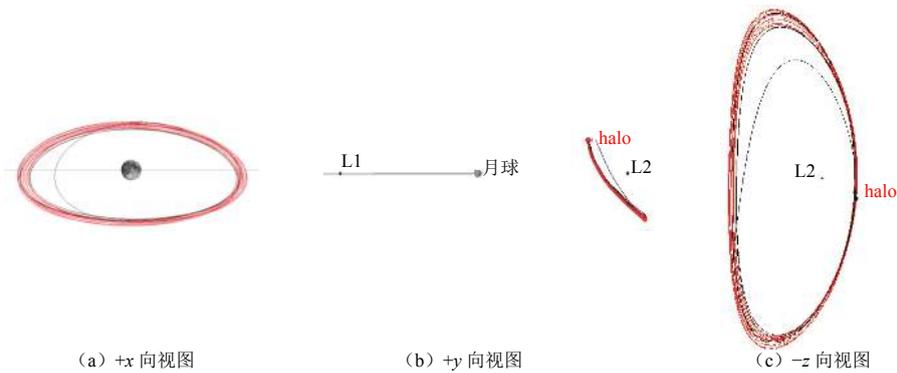


图 5 halo轨道内调相

Fig. 5 Phasing in halo orbit envelope

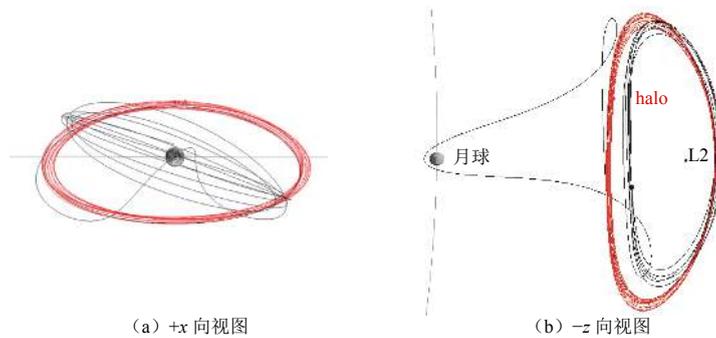


图 6 月球借力转向

Fig. 6 Moon gravity assist

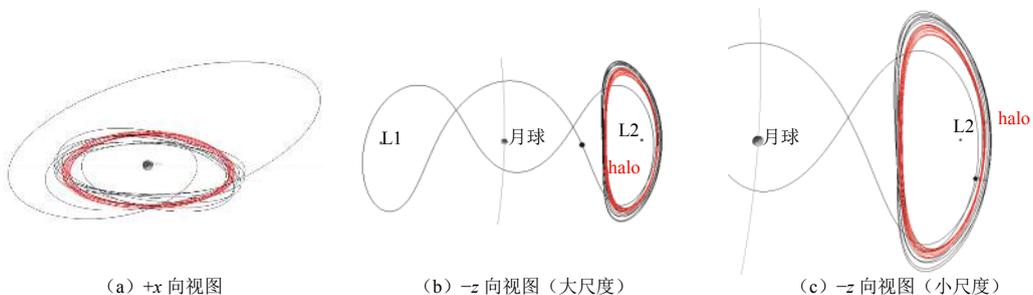


图 7 绕L1点一圈

Fig. 7 One circle around Earth-Moon L1 libration point

调相后的拟halo轨道如图8所示,虽然拟halo轨道的回归品质变差,但是仍没有进入月掩带,因此可以保持持续的无月掩的地月持续中继通信^[5]。

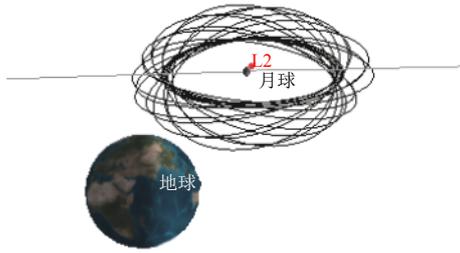


图8 调相后的拟halo轨道
Fig. 8 Quasi-halo orbit after phasing

3 结 论

由地月L2点中继星长阴影分布分析及规避调相控制效果可知:

1) 中继星长期运行时:地影普遍存在,难以避免,但时长较短,对中继星威胁较小;月影可以通过轨道设计加以避免,但存在较长月影,对卫星平台存在安全威胁。

2) halo轨道内直接调相、月球借力调相、飞经地月L1点调相3种方法均能有效规避长阴影。

3) 调相后的轨道难以完全复原。若非有威胁的长阴影,尽可能不采用调相规避。

4) 3种调相方法各有特点,适用于不同情况下的长阴影规避。

5) 3种调相方法均具有工程可实施性,具体需结合月影应急规避需求,选择合适的调相方法。

参 考 文 献

- [1] 高珊,周文艳,梁伟光,等. 地月拉格朗日L2点中继星轨道分析与设计[J]. 深空探测学报,2017,4(2): 122-129.
GAO S, ZHOU W Y, LIANG W G, et al. Trajectory analysis and design for relay satellite at Lagrange L2 point of Earth-Moon system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 122-129.
- [2] 刘林,侯锡云. 深空探测器轨道力学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [3] FARQUHAR R W. The control and use of libration point satellites [D]. Stanford: Astronautical Sciences, 1968.
- [4] THOMAS M A. Geology of the Moon [M]. USA: Princeton University Press, 1972.
- [5] 梁伟光,周文艳,周建亮. 地月系L2平动点卫星月掩规避问题分析[J]. 航天器工程,2015,24(1): 44-49.
LIANG W G, ZHOU W Y, ZHOU J L. Analysis of lunar occultation Avoidance of satellite around L2 libration point in the Earth-Moon system[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(1): 44-49.

作者简介:

梁伟光(1982-),男,工程师,博士,主要研究方向:深空轨道设计、三体动力学、轨道控制。

通信地址:北京市5130信箱105分箱(100094)

电话:(010)66363140

E-mail: lwgustc@163.com

Long Shadow of Relay Satellite Around Earth-Moon L2 Libration Point

LIANG Weiguang, LIU Lei, LIU Yong, MA Chuanling

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: During the flight of relay satellite around Earth-Moon L2 libration point, there will be shadows caused by Earth and Moon. Some of the shadow durations are very long. Satellite platform security would be threatened when relay satellite in the long shadow period. Based on the engineering objective of lunar far side soft landing exploration and the halo orbit features of the relay satellite around the Earth-Moon L2 libration point, long shadows characteristics are analyzed, such as the distributions, and the correlations of shadow durations to halo orbit phase, amplitude, and configuration. Long shadow avoidance strategies and applicable scopes are discussed. Research results provide analysis method and solutions to long shadows of relay satellite around Earth-Moon L2 libration point.

Key words: long shadow; relay satellite; Earth-Moon L2 libration point; avoidance; phasing

High lights:

- Analysis methods orbit long shadow around Earth-Moon L2 libration point were designed.
- Characteristics of orbit long shadow around Earth-Moon L2 libration point were summarized.
- Avoidance strategies of long shadow of relay satellite around Earth-Moon L2 libration point were designed for Earth-Moon relay communication.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]