

月球南极中继通信轨道仿真分析

熊亮, 张磊

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 月球南极地区是未来月球探测的热点地区, 但其通信条件受限, 要想实现月球南极地区的科学考察任务, 需要采用月球中继通信的方式实现对月球南极地区科学考察任务的测控通信支持。对月球南极中继通信任务的需求、特点和约束条件进行了分析论述, 并给出了月球南极中继通信可供选择的几种方案, 椭圆环月轨道、平动点轨道, 分析了几种方案的优点和缺点, 进一步提出了双星方案, 这一方案经过仿真分析可有效地提高对月球南极通信的连续覆盖能力, 仿真结果表明, 两颗卫星可实现对月球南极可见互补, 及其对月面和月球附近飞行器的实时覆盖, 可为未来“探月四期”月球南极探测工程通信实施提供参考。

关键词: 月球南极; 中继通信; 约束条件

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)03-0264-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191108006

引用格式: 熊亮, 张磊. 月球南极中继通信轨道仿真分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 264-270.

Reference format: XIONG L, ZHANG L. The simulation analysis of lunar antarctic relay communication orbit[J].

Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 264-270.

引言

随着深空技术的不断发展, 人类对月球探测活动不断深入, 月球探测的范围已开始从“正面”向“月球背面”及其“两极”发展, 探测的周期也正从“短期”向“长期”发展; 同时, 月球科考站、载人探月、驻人月球基地建设等被列为了许多国家和航天组织的探月计划。随着月球探测内容越来越丰富, 探测活动也越来越复杂, 对测控通信的覆盖率、传输速率等要求也随之提高。但月球距离地球较远, 空间损耗较大, 仅仅依靠建立在地球上的测控站已经无法满足未来月球探测的复杂需求, 建立月球中继通信系统是满足未来月球探测需求的必然途径。

月球南极地形复杂, 蕴藏着多种金属矿物, 在月球南极地区的永久阴影地区可能存在水冰和其他潜在的宝贵资源, 因此月球南极具有很高的科学探测价值。月球南极存在周期约为半年的极昼极夜现象, 特定区域光照时间年占比最大可达80%, 充足的光照时间, 对于建立起一个可相对长期工作的月球基地至关重要。月球南极地形复杂, 与地球建立直接通信困难, 实现月球南极科学考察技术难度高, 也具有重要的工程意义^[1-3]。

2019年1月11日, “嫦娥4号”着陆器与“玉兔2号”巡

视器正常工作, 在“鹊桥”中继星支持下顺利完成互拍, 地面接收图像清晰完好, 中外科学载荷工作正常, 探测数据有效下传, 搭载科学实验项目顺利开展, 达到工程既定目标, 实现了人类首次月球背面中继通信。此次任务的成功实施是月球中继通信任务的实践, 对后续月球中继通信任务设计提供了宝贵经验。

本文针对月球南极地理特点, 分析了月球南极中继通信任务的需求, 参考“嫦娥4号”的“鹊桥”中继星中继通信方案, 对月球南极中继通信的任务特点和约束条件进行了梳理, 并提出了解决的方案, 并对这些方案进行了仿真分析, 可为工程应用提供技术基础。

1 月球南极地理特点

月球是人类肉眼所能看见的距离地球最近的天体, 月球的直径大约是地球的四分之一, 月球也是地球唯一的天然卫星, 月球表面存在大量的撞击坑, 撞击坑是由陨石撞击天体形成的凹坑, 与月海、高地等组成了典型月貌特征。“嫦娥工程”已经完成了月面的勘测任务, 带回来大量的月表图片, 并且绘制了全月三维立体地图, 有助于今后对月球的进一步研究。

月球与地球的平均距离约为38.44万km, 自转周期为27.32 d, 月球轨道与黄道的平均倾角为4°, 月球赤道与黄道的平均倾角为1°。因为月球白道面与月球赤

道面夹角的存在，使得在1个月球公转周期内，当地球运行至月球北半球区域时，南极地区与地球的连线会受到月球本体的遮挡；当地球运行至月球南半球区域时，南极地区与地球可见，所以月球南极点附近周期性连续14 d对地可见，再连续14 d对地不可见^[4]。

地球同月球南极通信也受地形影响较大。月球南极地形崎岖，附近遍布环形山和撞击坑，著名的沙克尔顿环形山和艾特肯盆地在此。艾特肯盆地深约13 km，宽约2 575 km，地形高低起伏。选择不同的着陆点，会受到附近地形起伏不同的影响，对地球可见仰角和时长都会产生影响。因此，需要充分考虑服务区地形特点，并结合任务要求，制定相应的解决方案。

2 需求分析

通过对世界各国月球探测任务分析，月球南极中继通信的任务需求主要有以下2个方面。

1) 实现高覆盖率

因为月球自身的运动特性，地面无法实现对月球南极地区的全面测控覆盖，所以需要能够提供能够在月球南极着陆区工作的探测器更高性能、连续的中继通信服务，通信覆盖率的大小对通信链路的建立是至关重要的。

2) 实现高数据传输速率

月球南极探测任务具有多样性和复杂性特点，探测过程中的各类数据、图像的数据量巨大，服务对象多，同时还存在高速的数据交互需求，因此需要具备高速率的数据上行和下行传输能力，并能够传输实时遥控指令、遥测数据、科学探测数据、图像数据、高速上注数据等，为月球探测活动提供最大程度的支持与保障。

3 “鹊桥”中继星方案

“嫦娥4号”中继星“鹊桥”运行在地月L2平动点轨道上，实现了人类历史上首次降落在月球背面探测器与地球上的地面站之间的前向/返向的实时和延时中继通信，其在轨工作原理如图1所示。

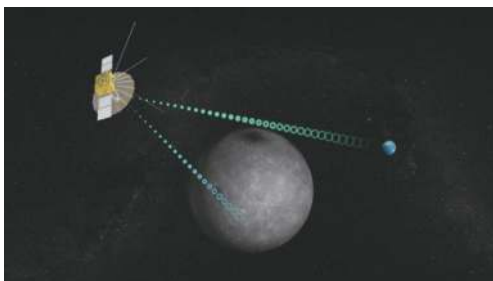


图 1 “嫦娥4号”中继星在轨工作图
Fig. 1 Orbit working drawing of Chang'E-4 relay satellite

3.1 着陆区情况

“嫦娥4号”探测器着陆点位置是月球背面东经177.6°、南纬45.6°，位于月球背面艾特肯盆地的冯·卡门撞击坑内，“鹊桥”中继星传回了世界第一张近距离拍摄的月背影像图，揭开了古老月背的神秘面纱。成功地完成了地月通信任务，着陆区域如图2所示，开启了人类月球探测新篇章。

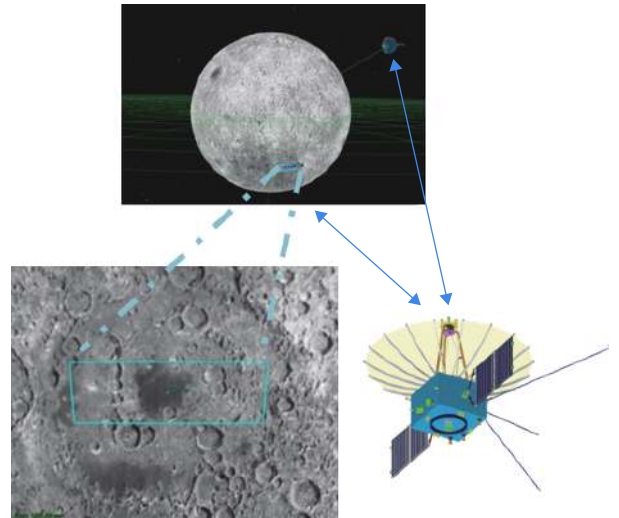


图 2 着陆区域示意图
Fig. 2 The diagram of landing zone

3.2 中继星轨道

“鹊桥”中继星实施轨道捕获控制，进入环绕距月球约6.5万km的地月拉格朗日L2点的Halo使命轨道。采用振幅约1.2万km的南向Halo轨道，轨道周期约14 d，采用该种轨道，可以实现对着陆区的全时可见。同时在对着陆区可见的状态下，还可以避开月掩区域，实现全时对地球可见，使中继星具备地月双向实时通信条件，中继星运行轨道如图3所示。“鹊桥”中继星将在Halo轨道做拟周期运动，通过定期轨控保持轨道的稳定性，实现了对“嫦娥4号”着陆器和巡视器的中继通信覆盖^[5-6]。

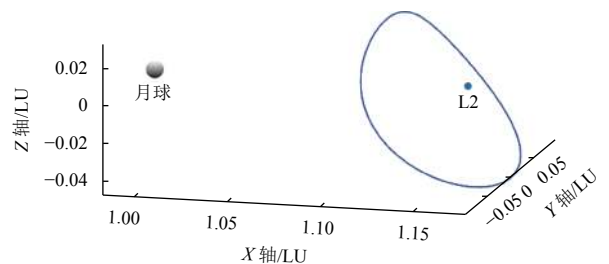


图 3 轨道形状示意图
Fig. 3 The diagram of the orbit

3.3 信道状况

“鹊桥”中继星采用的Halo轨道实现了中继星对着陆区和对地球的同时可见,该轨道存在与月球距离较远的点,中继星与月球间的距离在4.9~7.9万km之间。无线电信号在传播的过程中,信号能量会随着距离的增加发生大幅度下降,受长距离的影响信号幅度会产生很大的衰减,采用X频段中继链路时,空间距离带来的信号衰减可达近210 dB。

因为着陆区的探测器发射功率受限,再加上长距离链路衰减影响,中继星接收到的信号微弱,所以为了能良好地接收到月面探测器发生的信号,“鹊桥”中继星配备了4.2 m大口径展开天线,才得以保证信道满足任务需求^[7]。

3.4 频率选择

“嫦娥4号”中继星“鹊桥”采用了对月X频段,对地S频段的频分工作体制,采用这种方式很好地解决了频率隔离、大小信号干扰问题,同时使得卫星的通信、测控系统更便于设计,对电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)试验及整星在轨测试,中继通信系统的功能和性能正常,验证了设计的正确性。

3.5 小结

通过以上分析可见,“嫦娥4号”中继星所采用的方案,实现了对月球背面着陆区的高覆盖性,但由于选择的轨道距离月球较远,自由空间损耗较大,链路的通信能力受到了一定影响^[8]。

4 任务约束条件分析

在月球南极地区开展探测工作,要实现良好的月球中继通信,中继通信系统需要考虑的主要因素包括:飞行轨道对月球南极的可见性;与着陆区之间的通信链路情况。

4.1 轨道类型

满足对月球背面和地球同时可见的较好轨道包括地月L2点的平动点轨道和环月轨道两大类。不同的轨道类型可以选择的轨道有多种,地月L2点的平动点轨道主要有环月轨道主要有圆轨道、大椭圆轨道等;地月L2点Halo轨道、Lissajous轨道等。

根据月球南极任务需求,月球极区水冰探测及月球资源原位利用等其他科学探测,对可以选择的轨道的基本情况进行了比较,如表1所示。根据表1中的对比分析可以看出,考虑对月球南极的中继通信支持时长,椭圆环月轨道和平动点Halo轨道是两类轨道中较好的选择。

表1 轨道基本情况对比表

Table 1 The comparison of the orbit feature

轨道类型	可选轨道	轨道特点
环月轨道	极地圆轨道	轨道较稳定,对月球南极可见时间较短
	倾斜圆轨道	纬度覆盖范围较大,对月球南极可见时间较短
平动点轨道	椭圆轨道	轨道稳定,对月球南极可见时间较长
	Halo轨道	轨道周期和重复性较好,对月球南极可见时间较长
	Lissajous轨道	轨道不重复,周期性较差,对月球南极可见时间较长

4.2 轨道分析

4.2.1 椭圆环月轨道

选择南向的椭圆环月冻结轨道作为目标轨道进行分析,该轨道具有良好的轨道稳定性,同时对月球南极和地球均有较长时间可见,环月冻结轨道如图4所示。



图4 环月冻结轨道示意图

Fig. 4 The diagram of the frozen orbit

Folta采用历元白道坐标系下的轨道根数推导了椭圆环月轨道的冻结条件。历元白道坐标系的x轴指向白道相对月赤道的升交点,z轴指向白道动量矩方向,y轴按右手则由x轴、z轴确定。

地球对月球卫星的三体摄动加速度 f_3 为

$$f_3 = \frac{1}{32} n_3^2 a^2 \left[(1+3\cos 2i)(2+3e^2) + 30e^2 \sin^2 i \cos 2\omega \right] \quad (1)$$

其中: n_3 为月球绕地球公转角速度; a 、 e 、 i 、 ω 分别为月球卫星轨道半长轴、偏心率、倾角、近月点幅角。

当月球卫星轨道高度大于750 km时,地球三体摄动影响大于月球非球形摄动,其平均效果如式(2)和式(3)所示

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{15}{8} \frac{n_3^2}{n} e (1-e^2)^{\frac{1}{2}} \sin^2 i \sin 2\omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{3}{16} \frac{n_3^2}{n} \frac{1}{(1-e^2)^{\frac{1}{2}}} \times \left[(3+2e^2+5\cos 2i) + 5(1-2e^2-\cos 2i) \cos 2\omega \right] \quad (3)$$

其中： n 为月球卫星轨道角速度。

根据冻结轨道特性，即 $\frac{\partial e}{\partial t} = 0$ 、 $\frac{\partial \omega}{\partial t} = 0$ ，则月球椭圆轨道的冻结条件为

$$e = \left(1 - \frac{5}{3} \cos^2 i\right)^{\frac{1}{2}}, \text{ 且 } \omega = 90^\circ \text{ 或 } 270^\circ$$

选择的轨道参数为近月点300 km，远月点9 000 km，对该轨道进行月球南极覆盖性仿真分析，图5中给出了一个月中对月球南极的可见性分析结果，通过对该轨道对月球南极覆盖性分析，结果表明：椭圆环月轨道可以实现对月球着陆区周期性重访。

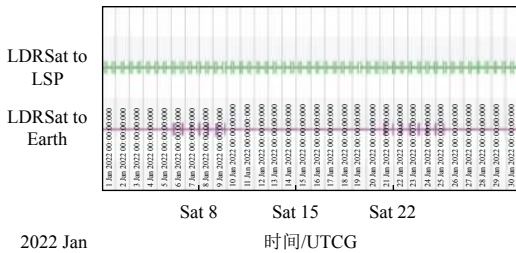


图 5 环月轨道对月球南极的可见性分析图
Fig. 5 The visibility analysis of lunar orbit

环月轨道受月球遮挡的情况下，卫星进入月球遮挡区域时，无法进行对地球的通信，如图6所示。由于月影的存在，会对中继通信上下行工作模式带来一些影响，当探测目标在月背赤道附近会带来很大的影响。中继通信服务目标位于南极地区，再考虑通信仰角要求，月球遮挡造成中继星不能对月对地同时可见的影响较小。

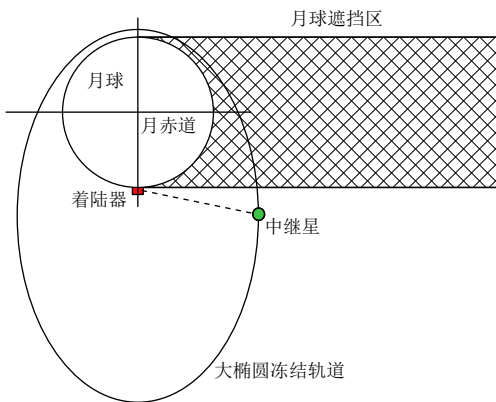


图 6 月球遮挡示意图
Fig. 6 The diagram of Moon shelter

4.2.2 平动点轨道

选择南簇平动点Halo轨道作为目标轨道进行分析，该轨道具有良好的轨道周期性和重复性，同时对月球南极有较长时间可见，而且对地球全时可见，如图7所示。



图 7 Halo轨道示意图
Fig. 7 The diagram of the Halo orbit

在地月圆型限制性三体问题中，建立质心旋转坐标系，在该坐标系下，卫星的无量纲运动方程为

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\dot{y} - x = -\frac{(1-\mu)(x+\mu)}{r_{ep}^3} - \frac{\mu[x-(1-\mu)]}{r_{mp}^3} \\ \ddot{y} + 2\dot{x} - y = -\frac{(1-\mu)y}{r_{ep}^3} - \frac{\mu y}{r_{mp}^3} \\ \ddot{z} = -\frac{(1-\mu)z}{r_{ep}^3} - \frac{\mu z}{r_{mp}^3} \\ \mu = \frac{m_M}{m_E + m_M} \end{cases} \quad (4)$$

其中： m_E 、 m_M 分别为地球、月球的质量； r_{ep} 为地球到卫星的距离， $r_{ep} = \|\mathbf{r}_{ep}\|$ ； r_{mp} 为月球到卫星的距离， $r_{mp} = \|\mathbf{r}_{mp}\|$ 。

上述方程存在5个特解，对应5个拉格朗日点，在其中3个共线拉格朗日点附近存在周期解，称为Halo轨道，根据其三阶解析解可大致确定Halo轨道的形态。月球L2南簇Halo的轨道参数选择Z向振幅为1.8万km，对该轨道对月球南极的覆盖性分析，图8中给出了一个月中对月球南极的可见性分析结果。该轨道可以实现对月球着陆区的长时间连续可见，但同时会有长时间的不可见时段，这是由于该轨道运行周期长，当卫星运行在北部弧顶区域时，对月球南极的视线受到了月球球体的遮挡^[7-8]。

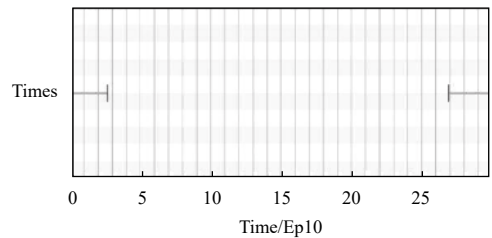


图 8 平动点轨道对月球南极的可见性分析图
Fig. 8 The visibility analysis of Halo orbit

需要说明的是，“嫦娥4号”的着陆点属于月球高纬度地区，虽靠近月球南极区域，但在该着陆区域对Halo轨道不会受到月球球体遮挡，因此可以实现对着陆区的全时可见。

4.3 信道链路分析

月球探测任务需要向地面传输大量的探测试验数据，包括：测量数据、图像数据、遥测数据、控制数据等，同时地面还需要向处在月球南极探测区的各类探测器发送高速的指令数据、注入数据。因此，良好

的通信信道是实现各类数据上通下达的重要保证。针对两类分析的轨道,以X频段8 GHz信号计算,对链路情况进行了分析比较,结果如表2所示。

表2 链路情况对比表
Table 2 The comparison of the link

轨道	最大距离/km	链路损耗值/dB
环月冻结轨道	9 000	189
平动点Halo轨道	80 000	208

从表2中的分析数据可以看到,平动点Halo轨道信道链路衰减比环月冻结轨道信道链路衰减多近20 dB,选择环月冻结轨道可以获得更好的通信链路条件,从而实现更大容量的对月中继通信能力。

4.4 频率选择分析

在月球南极地区中继通信任务可以借鉴“嫦娥4号”中继星“鹊桥”思路,采用对月对地不同频段的频分工作体制,考虑在月球南极地区中继通信任务对通信容量要求大为提升,提出以下建议:①对月采用X频段工作,对地测控采用S频段,对地数传采用Ka频段;②考虑到月面服务对象较多,对月通信体制可以采用频分或码分方式;③通信速率建议采用低速和高速两种方式,以支持不同工作模式和任务需求。

4.5 比较分析

从前面的轨道分析和信道链路分析可以得出以下分析结果。

1) 椭圆环月冻结轨道具有较好的重访周期性,平动点Halo轨道具有较长的连续可见性,但椭圆环月冻结轨道不能实现长时间的连续覆盖,只能实现长期的“间断”通信,对科学探测任务有一定约束要求,而平动点Halo轨道虽然有很长的连续可见时间,但同时存在长期不可见弧段情况,会给中继通信任务带来长期中断影响,只能实现“长通长断”的通信方式,对科学探测任务和工程实施带来的约束较大。

2) 椭圆环月冻结轨道具有较小的链路衰减,相比平动点Halo轨道,在同等通信设备条件下,可以带来更高的通信容量和速率。

根据上面的分析,采用椭圆环月冻结轨道是实现月球南极中继通信的较优方案,既满足了高容量高速率的通信需求,又兼顾了与月球南极的长期可见性,对月面任务设计影响较小,是较好的工程方案选择。

5 双星方案分析

根据前一节的分析,可以看到选择椭圆环月冻结轨道有很多优点,可以较好地满足月球南极区域中继通信任务,通信容量较高,但是此方案存在不能全时

覆盖月球南极的情况,如果对月球南极有全时覆盖需求,则需要增加卫星数量来实现对月球的全覆盖。

椭圆环月冻结轨道方案不能实现对月球南极区域的全时覆盖,主要是受轨道影响,当卫星运行至轨道北面区域时,月球南极受到月球本体遮挡,不能与卫星直视,因此采用增加一颗该轨道卫星的方法,可以有效提高对月球南极的连续覆盖能力,如图9所示。

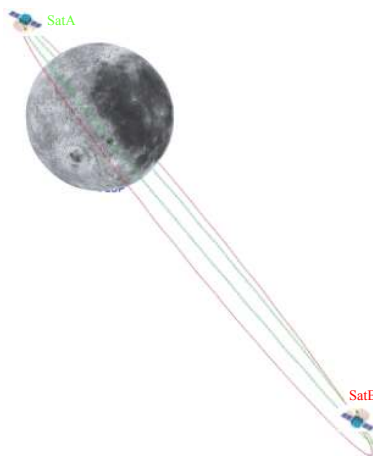


图9 双星环月冻结轨道示意图

Fig. 9 The diagram of lunar orbit with double satellite

同样选择轨道参数为近月点300 km,远月点9 000 km的椭圆环月冻结轨道,在180°相位处增加一颗卫星,进行该轨道下双星对月球南极覆盖性分析,仿真结果如图10所示。

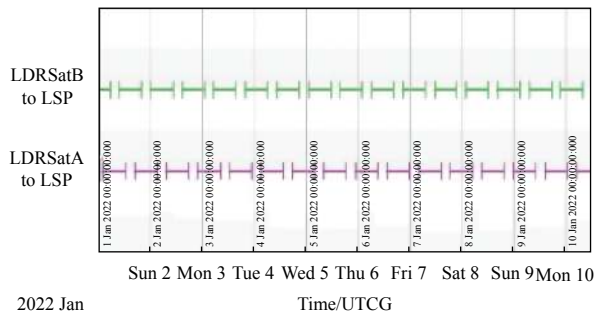


图10 双星对月球南极的独立可见性分析图

Fig. 10 The independent visibility analysis of every satellite

图11给出了双星对月球南极的联合可见性分析,从图11中的分析数据可以看出,由于两颗卫星相差180°,两颗卫星对月球南极的可见性刚好交错,实现对月球南极地区的可视互补,采用该方案还可以规避卫星在月球遮挡区对月对地不同时可见的问题,实现无缝隙的地月双向通信。此外,双星方案还可以实现对月面和月球附近飞行器的实时覆盖,满足未来月球飞行器的中继通信服务需求,可为未来“探月四期”月球南极探测通信提供参考。

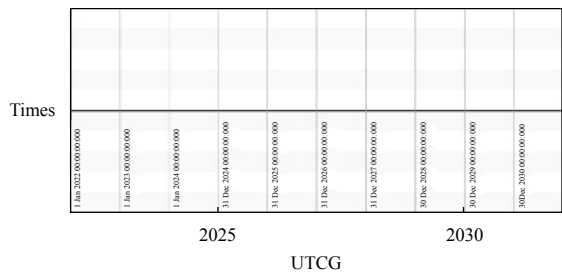


图 11 双星对月球南极的联合可见性分析图

Fig. 11 The alliance visibility analysis of double satellite

6 结 论

本文对月球南极中继通信的主要需求进行了分析，对“嫦娥4号”中继星的方案进行了梳理，对影响任务的约束条件，从轨道、信道和频率体制多个方面对月球南极中继通信任务进行了分析，提出了双星方案，并针对更高的需求进行了方案分析，仿真结果表明此方案可以满足月球飞行器的中继通信服务需求。

参 考 文 献

[1] 于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 307-314.
 YU D Y, WU X Y, WU W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 307-314.

[2] 张立华, 吴伟仁. 月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J]. 深空探测学报, 2018, 5(6): 497-505, 568.
 ZHANG L H, WU W R. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space

Exploration, 2018, 5(6): 497-505, 568.

[3] SEAN O'KEEFE. The vision for space exploration[R]. USA: NASA, 2004.

[4] 李飞, 张焯, 吴学英, 等. 月球南极着陆区关键特性分析[J]. 航天器工程, 2015, 24(1): 104-107.
 LI F, ZHANG H, WU X Y, et al. Analysis of key characteristic of Lunar south pole for landing[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(1): 104-107.

[5] 周文艳, 黄昊, 刘德成, 等. 嫦娥二号卫星日地L2点扩展任务轨道设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(6): 609-613.

[6] 梁伟光, 周文艳, 周建亮, 等. 地月L2点轨道长期维持过程研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十二届学术年会. 哈尔滨: 中国宇航学会, 2015.

[7] 张立华, 熊亮, 王鹏, 等. “嫦娥4号”中继星任务分析与系统设计[J]. 深空探测学报, 2018, 5(6): 515-523.
 ZHANG L H, XIONG L, WANG P, et al. The mission analysis and system design of Chang'e-4 lunar relay communication satellite[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 515-523.

[8] 徐进, 张爱兵, 贺一峰, 等. “嫦娥4号”中继星中继通信方案研究与分析[J]. 深空探测学报, 2018, 5(6): 506-514.
 XU J, ZHANG A B, HE Y F, et al. Research and analysis for relay communication system of Chang'e-4 lunar relay satellite[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 506-514.

作者简介:

熊亮(1976-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 飞行器总体设计。
 通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号, 航天东方红卫星有限公司 (100094)
 电话: (010)68745088

张磊(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 飞行器总体设计。
 通讯地址: 北京市海淀区友谊路104号, 航天东方红卫星有限公司 (100094)
 电话: (010)68745088

The Simulation Analysis of Lunar Antarctic Relay Communication Orbit

XIONG Liang, ZHANG Lei

(DFH Satellite CO. Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Lunar Antarctic is hot spot area of Lunar Exploration in the future and the communication is limited in south pole region. The Lunar relay communication needs to be designed to fulfill the science exploration mission. The requirements, characteristics and constraints of the relay communication mission of the lunar south are analyzed and the options for the communication orbit are put forward, including the elliptical orbit around the lunar and the translational point orbit. The advantages and disadvantages of the optional orbits are analyzed, The dual-satellite scheme is further proposed. This scheme can effectively improve the continuous coverage of the lunar south pole communication. The simulation results show that the two satellites can realize the visible complementarity of the lunar south pole, and reach real-time coverage of the lunar surface and the aircraft near the moon. It will provide reference for the implementation of the fourth phase lunar pole south exploration in the future.

Keywords: lunar antarctic; relay communication; constraint condition

Highlights:

- The requirements, characteristics and constraints of the Lunar Antarctic Relay Communication mission are analyzed.
- The optional orbits of relay communication are proposed, and the advantages and disadvantages are compared for these orbits.
- It will provide reference for the implementation of the fourth phase lunar exploration in the future.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]