

# 日本 SELENE 月球探测计划和卫星间 多普勒跟踪的数学模型

平劲松<sup>1,2</sup> 河野裕介<sup>1,2</sup> 河野宣之<sup>2,3</sup>  
花田英夫<sup>3</sup> 松本晃治<sup>3</sup> RISE Group<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学天文系 北京 100875)

(2. 日本综合研究大学院大学数理学系 东京 181-8588)

(3. 日本国立天文台地球自转研究分部 岩手县水泽 023-0861)

## 摘 要

日本月球探测计划 (SELENE) 定于 2004 年夏季利用 HIIa 火箭发射一组共 3 颗绕月人造卫星。他们是主卫星、跟踪中继卫星和空间 VLBI 电波源。其主要科学目标之一是利用对绕月卫星的多普勒跟踪数据精确测定月球重力场, 研究月球的起源与演化。SELENE 计划中实现这个科学目标的关键技术是引入中继卫星, 目的在于当处于低轨道的主卫星飞行到月球背面地面观测站无法观测时, 采用卫星间跟踪方法 (SST), 建立地面站与主卫星之间的联系, 以得到月球背面重力场的直接测量数据。介绍了几种典型的四程卫星间多普勒跟踪模式和相应的数学模型, 并针对 SELENE 计划中采用的特殊四程多普勒跟踪模式建立了卫星相对观测站速度与跟踪信号多普勒频移之间的转换关系。提出了利用 GEODYN II 定轨分析软件处理 SELENE 多普勒跟踪数据的流程。

**关键词** 月球探查 — 人造卫星 — 四程多普勒跟踪

**分类号**: P184.57

## 1 SELENE 月球探测计划

为了进一步推动月球科学研究的发展和未来月球探测技术手段的进步, 一个名为 SELENE (Selenological and Engineering Explorer) 的绕月飞行太空计划正作为一项空间联合项目由日本文部科学省下属的两家太空研究机构宇宙空间研究所和宇宙开发事业团联合着手准备, 日本国立天文台也参与了主要的技术开发与科学研究。该计划的太空飞船将由一个飞行在高度为 100km 左右的月球极轨道上的主卫星和另外两个飞行在相同轨道面

不同的椭圆轨道上的子卫星(中继卫星和人工 VLBI 电波源)组成。该项计划的科学目标是研究月球的起源与演化、实地测量月球环境以及在月球轨道处探测日地等离子体环境。为实现这些目标, SELENE 搭载的科学探查仪器将对月面形状和月球表面化学组成照相成图、测量月球重力场和磁场、观测月球和日地空间环境。这些科学仪器的总载荷为 270kg。计划已经被采纳并定于 2004 年由 HIIa 火箭发射升空<sup>[1~6]</sup>。

### 1.1 科学目标与技术手段

作为太阳系家族中距离地球最近又为人类所熟悉的成员,月球一直在唤起人类的好奇心和科学家的研究兴趣。20 世纪 50 年代以来,月球一次又一次地被无人和载人太空飞船造访探测过。特别是阿波罗(Apollo)和露娜(Luna)太空计划对月球的为数众多的新发现给月球科学研究领域带来了举世瞩目的进步和发展(<http://pds-geophys.wustl.edu/pds/>)。从另一个角度来看,与太阳系其他行星成员相比,尽管对月球的研究要广泛得多,然而到目前为止,月球科学中关于起源和演化的最基本的问题依然还是未解之谜。由于这个问题还直接关系到地球和其他类地行星的起源和演化,对月球的研究在行星科学中也显得尤其重要。

月球科学中有几个方面的研究很重要。关于月球起源的主要理论模型普遍认为月球形成于地球的邻近区域。如果确实如此,来自月球的引力就会对地球的动力学演化和热学演化产生显著影响。因而,澄清月球演化的早期阶段对了解地球的起源和演化具有特殊意义。对类地行星而言,一般认为壳层分化开始于星体形成后不久。对月球而言,由于体积小的缘故,在它诞生后数百万年内分化就完成了,壳层结构从那时起就被很好地保存下来。对月球的研究将促进对类地行星壳层分化过程和演化过程的了解。另外,月球表面 40 亿 yr 前陨星撞击遗迹仍然保留着并受到明显侵蚀,这将为太阳系早期陨星环境研究提供有用信息。

月球起源的假说主要有四种模型:裂变、捕获、双星共生和大冲突共生。为了进一步探明月球起源问题,要求将来对月球矿物质组成、内部结构和磁场的探测要更加细致入微。构成行星体的矿物质的化学成分代表该行星诞生时期在太阳系中所处的位置。有了月球矿物质的化学成分的精确信息,就可以确认月球是在哪里和如何诞生的。就已经探测得到的月球矿物质的化学成分数据而言,虽然还有许多不确定的因素,但可肯定月球惰性元素的丰度比宇宙标准丰度相对要高。另一方面,从氧的同位素的角度来看,月球与地球的关联更紧密,而与其他大行星和陨星大不相同。如果能够得到更可靠的月球矿物质的化学成分数据来与地球的数据进行比较,地月之间的关系就会更清晰。月球内部结构和状态的信息也给了它的起源模型一些约束。如果假设月球是由原始陨星共生而产生,那么月核的半径必须大于 360km 才能解释月岩中的金属丰度。另一方面,如果月球是由和地幔相同的物质产生的,月核的半径必须小于 280km。月球内部结构的信息可以通过对月球重力场的精确测量来得到。对月球磁场的整体成图可以用 30~40 亿 yr 前发生的变化来检验发电机理论。一旦能够得到偶极磁场的证据,就可以给出月球初始阶段结构和热学状态的一个确定约束。

月面形状研究简单地涉及其正面月海和背面的高地。有迹象表明背面月亮厚度超过 100km, 远比正面 60km 的典型月亮要厚得多。而在其他大行星上也存在全球一致的

整体分化,这可能与不同的演化过程有关。对月球重力场、元素丰度、矿物质组成和地理特征的整体观测将全面揭示正面和背面的差异,给出月球演化模型更强的约束。月球形成历史上还有一个悬而未决的问题是所谓“岩浆海洋”阶段假说。这一假说认为含有丰富低密度铝元素的岩浆矿流四处飘浮从而形成月壳。分化过程所形成的月壳特征结构可以通过对矿物质组成和化学成分的仔细观测来证认。月面构造反映了内部热学演化史。地月距离在早期的变化可能会引起月球内部张力进而导致一些地理特征的产生,诸如地堑和褶皱山脊等。利用成像设备和雷达观测月球表面和亚表面的结构将从月壳结构史的角度给出月球演化史一个更好的解释。

除了月球科学中涉及到起源和演化的所谓“月球本体的科学”以外,近来“月球上的科学”和“来自月球的科学”,特别是将来月球环境的科学开发与运用的重要性也已经被认识到。一个潜在的应用就是利用月球极区的低噪声和低温环境建造月面天文台。从月球来观测日地环境也将会提供有价值的科学成果。为月基科学设备的设置做准备,月面遥感观测的结果要求地理学测量给出候选站址的更精确月面图。而月面环境,特别是涉及高能辐射的方面,对将来月球开发与运用以及相关科学研究至关重要。

世纪之交,利用先进的观测技术挑战月球起源演化研究的新一轮国际热潮正在兴起。美国的绕月轨道卫星“月球探测器(Lunar Prospector)”太空科学计划于1998~1999年对月面化学成分、月球磁场、月球重力场进行了探测(<http://pds-geophys.wustl.edu/pds/lunar-prospector>)。欧洲月球空间计划斯玛特-1(SMART-1),一个太空遥感探测计划已被采纳并定于2002年发射升空(<http://sci.esa.int/smart-1>)。日本月球探测器伦纳-A(Lunar-A),一个穿透者太空计划已定于2003年发射升空(<http://www.isas.ac.jp/e/enterp/missions/index.html>)。同时美俄都在进行新的月球空间计划的研究。

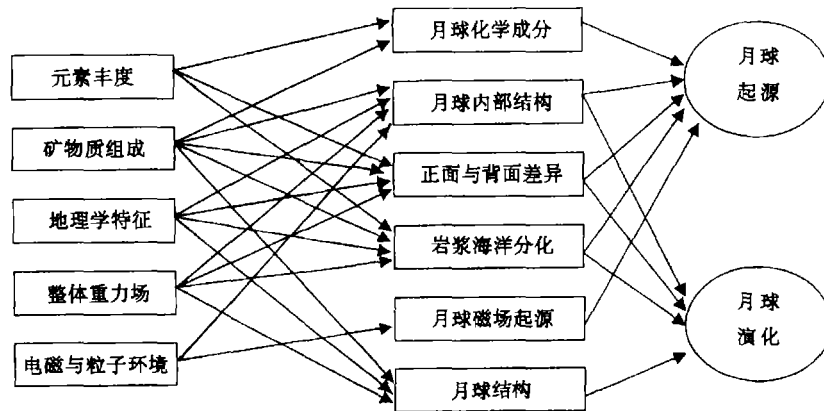


图1 SELENE 计划中的月球科学研究

凭借对月球全球矿物质组成和化学成分的成图观测,凭借包括亚表面雷达深度测量在内的月面地理成图观测以及对月球重力场和磁场的测量,SELENE 太空计划将主要致力于研究月球的起源与演化。其中元素丰度由萤光 X 射线分光计和  $\gamma$  射线分光计承担; $\alpha$  粒子分光计用来探测来自氦和钋的辐射;矿物学特性由高空间分辨率多波段频谱成像仪

记录完成; 矿物质成分可以被工作在可见光和近红外波段的连续谱分析仪和一台频谱剖面层析仪证认; 月面形状数据由一架高分辨率照相机和激光高度计观测得到; 亚表面结构的探测由雷达深度测量仪实现; 对卫星的多普勒跟踪, 特别是当处于低轨道的主卫星飞行到月球背面时, 通过中继卫星间接跟踪主卫星, 可以用于重力测量和测地学研究; 月面磁场数据由磁力计和电子探测计提供; 搭载于中继卫星和 VLBI 人工电波源为地面站高精度较差 VLBI 观测提供了可能。虽然 SELENE 只是运用了常规重力测量和分光计观测方法, 当今最新的技术尽可能地被引入仪器开发之中以期获得最大的科学回报。该太空计划中还包含了对月球环境和日地间环境的观测。对月球环境的研究包括测量高能粒子、电磁场和等离子体。在日地间环境的观测方面, 主卫星搭载了用于观测地球等离子体动态结构和极光的成像仪器。另外还搭载了高灵敏度电磁波接收机以期探测来自木星和土星的辐射。图 1 汇总了 SELENE 中的月球科学研究目标。

### 1.2 任务概述<sup>[3~6]</sup>

SELENE 太空计划要项已列入表 1 中。图 2 给出了该计划的剖面图。宇宙飞船将用 H-IIa 火箭发射升空, 计划于发射后 5d 内到达月球轨道。飞船被月球俘获后进入一个远月点高度为 15 000km、近月点高度为 100km 的大椭圆轨道。在经过 6 次变轨之后, 远月点高度降低到 100km。在轨道变换过程中, 中继卫星被释放在远月点高度为 2400km 的椭

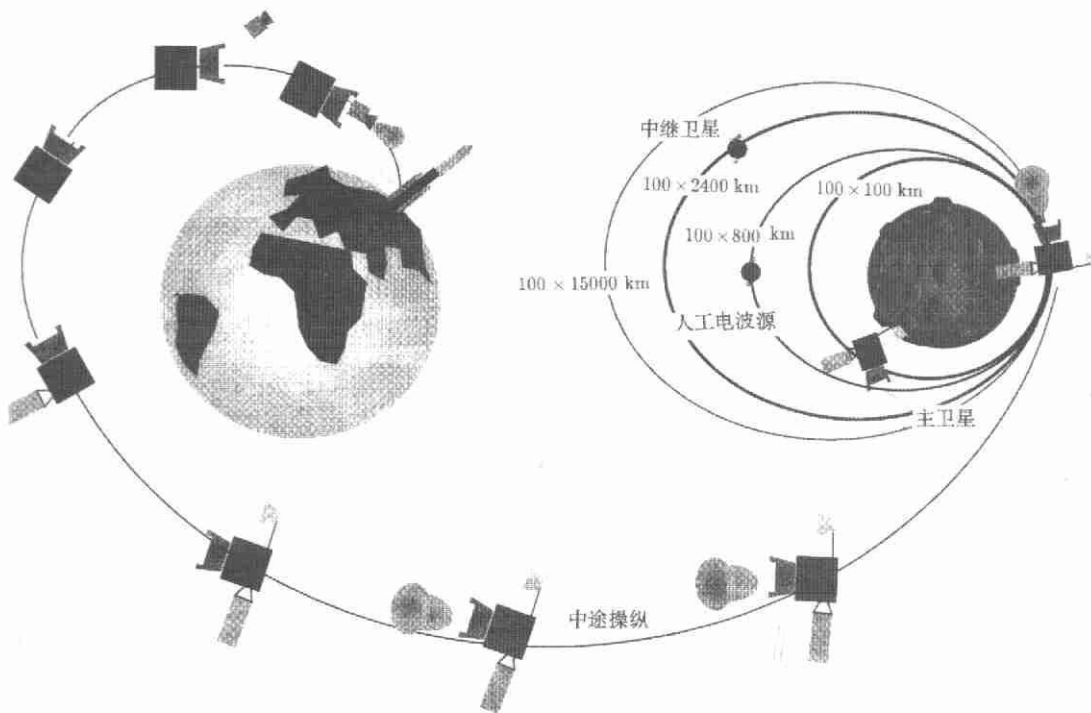


图 2 SELENE 计划发射入轨剖面图

圆轨道上, 而人工 VLBI 电波源被释放在远月点高度为 800km 的椭圆轨道上。到达预定轨道后, 主卫星将立即展开雷达测深计天线和磁力计天线开始探测作业。月面遥感观测

以及月球和日地空间环境观测将持续 1yr。如果到时主卫星的剩余燃料还足以继续维持和调控卫星轨道,观测作业就会被拓展到额外可选择的观测任务上。额外作业将把主卫星轨道高度降至 50~70km,以期得到更高分辨率的观测结果。

卫星轨道周期约 2~4h。主卫星相邻两圈在月球赤道上的投影距离约为 35km。如果轨道扰动可以忽略,一个月后卫星将返回初始轨道。通过对轨道飞行区域作适当调整,就可以得到赤道区域分辨率好于 35km 的月球整体图像。为了维持轨道高度,1yr 内将对主卫星进行 4 次操纵动作。

表 1 SELENE 系 统 概 要

概 要	
发射	H-IIa 火箭于 2004 年在种子岛发射
系统	主卫星 (2 × 2 × 4.2m), 中继卫星和人工电波源 (1m 直径 × 0.65m)
轨道	直接进入月球转移轨道; 100km 圆轨道 (主卫星), 100km × 2400km 椭圆轨道 (中继卫星), 100km × 800km 椭圆轨道 (人工电波源); 轨道倾角均为 90°
任务周期	1 yr+ 数月可选择性观测
姿态控制系统	主卫星: 3 轴稳定, 2 个恒星传感器, 2 个 IMU, 4 个太阳传感器 中继卫星 / 人工电波源: 自转稳定
推进器系统	主卫星: 500N × 1, 20N × 12, 1N × 8
供电系统	主卫星: 3.5kW 镱砷太阳能电池板, 3 个 50 V 镍氢电池 (50AH) 中继卫星 / 人工电波源: 70W 高效硅太阳能电池, 26 V 镍镁氢电池 (13AH)
通信系统	主卫星: S/X 波段, 高增益天线 (S/X), 2 个各向同性天线, 10Mbps(X 下行), 40 或 20kbps(S 下行), 1kbps(上行); 中继卫星 / 人工电波源: 128bps
卫星数据记录仪	主卫星: 10Gbytes
重量	发射总重量 / 卫星系统 (净重) 2885kg/1660kg 科学仪器有效载荷 270kg(近似) 中继卫星 / 人工电波源 40kg/40kg

## 2 卫星跟踪定轨

研究月球的起源与演化是 SELENE 计划的主要科学目标之一。利用对绕月卫星的多普勒跟踪数据精确测定卫星轨道及其变化进而反演月球重力场, 以及利用搭载在轨道精确已知的主卫星上的激光高度计观测数据精确测定月面形状, 是实现这个科学目标的有效技术手段。对绕月卫星的跟踪和精密定轨是实现卫星测控和达到最终科学目标的基本而关键的环节。SELENE 计划中卫星跟踪定轨方法列在表 2 中。除了常规双程测距测速跟踪 (RARR) 以外, SELENE 计划中还引入了较差 VLBI 技术<sup>[1,2,6,7]</sup>跟踪中继卫星和人工电波源以提高定轨精度。引入中继卫星的目的有两个: 当低轨道的主卫星飞行到月球

背面处于地面观测站无法观测的状况时, 采用四程卫星间跟踪方法 (SST) 建立地面站与主卫星之间的联系, 可以得到月球背面重力场的直接测量数据<sup>[8~10]</sup>。这一点是与以往月球探测计划的最大不同。另外, 同时利用高低轨卫星的轨道变化数据反演月球重力场所得到的重力场球谐函数由低到高的各阶系数都有很高的精度<sup>[10]</sup>。较差 VLBI 技术在 SELENE 计划中除了提高卫星定轨精度以外, 还有一个重要的科学目的是为了探测验证月球大气的稀薄电离层<sup>[11]</sup>。

## 2.1 四程卫星间跟踪模式

利用多普勒效应测量卫星相对观测站的距离变化率或卫星视向速度进而确定宇宙飞船的飞行轨道是深空探测中常规跟踪观测方法。根据跟踪任务和目标的不同, 卫星多普勒测量可以分为积分多普勒和微分多普勒方法, 即平均距离变化率和瞬时距离变化率的测量。根据跟踪路径的数目, 多普勒测量还分为单程、双程和多程测量模式。双程和多程距离变化率的测量是带光时解的测距和多普勒测速原理的结合。它们与单程测量的区别在于被测卫星不主动向观测站或中继平台发射测量信号, 而是先由观测站或中继平台向被测卫星发射固定频率的测量信号, 该信号被卫星接收锁定后经过变频再立即转发给观测站或中继平台, 由观测站或中继平台接收记录返回的信号, 测量信号的多普勒频移。发射和接收以及中继转发信号的观测站或中继平台可以是同一个, 也可以完全不同。为了克服地球大气层的影响和掩蔽效应对跟踪观测的限制, 多程多普勒测量模式已经被不少空间和太空计划所采用<sup>[8,12]</sup>。基于同样的原因, SELENE 计划中采用了信号中继卫星方案来实现对主卫星的不间断的观测<sup>[3~6]</sup>。

表 2 SELENE 计划中卫星跟踪定轨方法一览

	入轨前	入轨后
主卫星	双程测距测速	双程测距测速, 四程多普勒
中继卫星	双程测距测速	双程测距测速, 较差 VLBI
人工电波源	双程测距测速	较差 VLBI

无论采用何种方法何种模式, 卫星多普勒测量是为了得到被测卫星相对参考观测站的某种速度变化率, 从而求解卫星的轨道。对于单程和双程多普勒测量而言, 信号多普勒频移与速度变化率观测量之间的转换关系比较简单。而在多程多普勒测量模式中, 由于信号被多次变频和转发, 有时甚至是与另一个参考信号混频后再变频转发, 使得最终观测记录到的信号多普勒频移与速度变化率观测量之间的转换关系变得特别复杂。信号多普勒频移与速度变化率观测量之间的转换关系是多程多普勒测量数据处理的基本和关键步骤之一。如果不能确切地给出这一转换关系, 就无法从多普勒频移观测量求解被测卫星的轨道。为此作者根据 SELENE 计划数据后处理软件的需要, 针对 SELENE 所采用的四程卫星间跟踪模式, 仔细考证比对并建立了这一转换关系。

SELENE 所采用的四程卫星间多普勒跟踪模式由图 3 表示。与此相关的中继卫星通信频率在表 3 中给出。图 4 给出了该跟踪模式在惯性空间中的时序图。白田测控站 64m 天线于  $t_0$  时刻发出固定频率信号  $S_3$ , 该信号被中继卫星上的信号转发器于  $t_1$  时刻接收锁定后变频为  $S_5$  再于  $t_2$  时刻转发给主卫星, 低轨道主卫星于  $t_3$  时刻接收锁定这一信

号, 而后变频为  $S_6$  再于  $t_4$  时刻转发给中继卫星, 中继卫星于  $t_5 (= t_c)$  时刻同时接收到从主卫星返回的信号  $S_6$  和比  $t_0$  时刻稍迟的  $t_v$  时刻从白田测控站发出的  $S_3$  信号, 中继卫星上的信号转发器把后到达的  $S_3$  信号变频并与  $S_6$  混频成为  $X_2$  再于  $t_6$  时刻转发给白田测控站, 白田测控站于  $t_7$  时刻接收到  $X_2$ <sup>[3]</sup>。接收到的  $X_2$  中不仅包含自身信号的多普勒频移, 还包含有两路  $S_3$  信号、 $S_5$  和  $S_6$  信号的多普勒频移以及相关的变频信息。如果中继卫星上也搭载有高增益天线, 另一种可能的选择是不与  $S_3$  信号混频而是把  $S_6$  变频后直接转发给白田测控站, 这种模式相对简单得多。但硬件的增加又将会需要更多的开发研制和发射费用, 这是太空计划普遍面对的问题和困难。

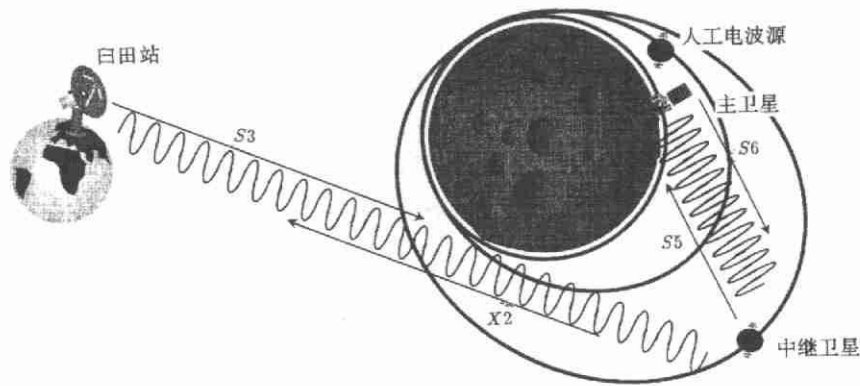


图 3 SELENE 计划中四程卫星间多普勒跟踪模式示意图

表 3 SELENE 计划中中继卫星通信频率一览

路径及跟踪模式	白 → 中	中 → 白	中 → 主	主 → 中	中 → 白
	双程		四程		
信号频率 MHz	2081.466	2260.415	2241.579	2051.614	8456.125
(代号)	(S3)	(S4)	(S5)	(S6)	(X2)

注:  $S_4 = S_3 \times 240/221$ ,  $S_5 = S_3 \times 238/221$ ,  $S_6 = S_5 \times 270/295$ ,  $X_2 = S_6 + S_3 \times 680/221$ ,

白 — 白田测控站, 中 — 中继卫星, 主 — 主卫星。

四程卫星间多普勒跟踪的另一个典型模式是美国航空航天局 (NASA) 的 SST 模式。与 SELENE 模式的区别在于: (1) NASA 深空跟踪站同时向中继卫星发射两路上行载波信号。其中一路是测距测速信号, 另一路是用于中继卫星锁相的标准信号。它们的作用分别相当于上述 SELENE 计划中白田测控站先后于  $t_0$  时刻和  $t_v$  时刻发出的固定频率信号  $S_3$  的功能。(2) 为了确保中继卫星转发信号的稳定性, 锁相标准信号两次与经过变频的四程测距测速信号混频。其中一次是在中继卫星把测距测速信号接力转发给被测卫星时, 另一次是在中继卫星把测距测速信号接力转发给测控站时。除了这些区别, 它们的共同点在于都不是简单的四程卫星间多普勒跟踪。由于技术上的原因, 它们都混合简单

四程多普勒测量和双程多普勒测量。NASA 哥达德飞行中心的 GEODYN II 软件中考虑到这个问题, 并且就其 SST 模式引入了信号多普勒频移与速度变化率观测量之间的转换关系。

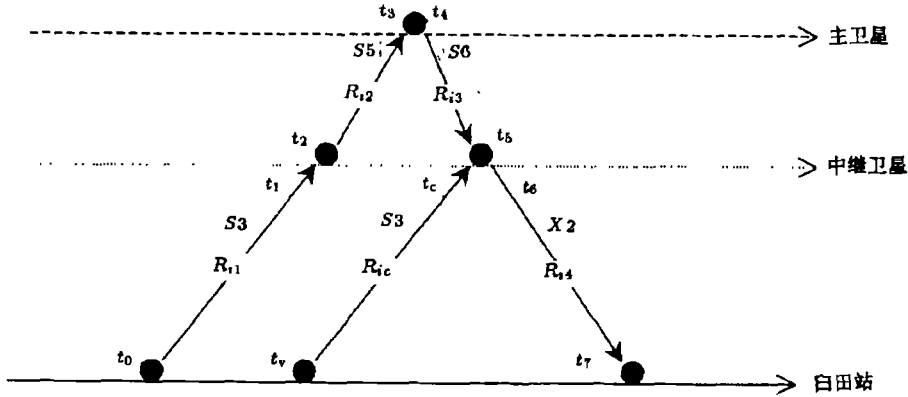


图 4 SELENE 四程卫星间多普勒跟踪模式在惯性空间中的时序图

## 2.2 SELENE 四程卫星间速度变化率观测量

SELENE 计划中的各种多普勒跟踪观测和激光高度计观测数据的分析处理, 以及 VLBI 观测数据的后处理都将使用 GEODYN II 软件包来完成<sup>[9,10]</sup>。GEODYN II 是 GEODYN 的第二代, 但已经完全被重新改版设计<sup>[12]</sup>。GEODYN II 的功能强大齐全。它可以应用于卫星定轨、测地学参数估计、跟踪仪器校准、卫星轨道预报以及其他许多使用到各种跟踪数据的空间大地测量和深空探测研究方向。它的版权所有者和主要用户是 NASA/GSFC。SELENE 计划的承担机构以月球科学国际合作研究的方式获得 GEODYN II 的使用权和根据 SELENE 计划的需求对软件进行更新的权利。

参照 GEODYN II 的相关定义和方法, 可以给出 SELENE 所采用的四程卫星间多普勒频移观测量与速度变化率之间的转换关系。根据图 4 给出的 SELENE 四程卫星间多普勒跟踪模式, 观测站和卫星、卫星之间的距离可以定义成:

$$R_{i1} = |\rho_{\text{tkng}}(t_{i1}) - \rho_{\text{sta}}(t_{i0})|; \quad R_{02} = |\rho_{\text{tked}}(t_{i3}) - \rho_{\text{tkng}}(t_{i2})|; \quad R_{03} = |\rho_{\text{tkng}}(t_{05}) - \rho_{\text{tked}}(t_{04})|;$$

$$R_{i4} = |\rho_{\text{sta}}(t_{i7}) - \rho_{\text{tkng}}(t_{i6})|; \quad R_{ic} = |\rho_{\text{tkng}}(t_{ic}) - \rho_{\text{sta}}(t_{iv})|.$$

其中  $\rho_{\text{tkng}}(t_{ix})$ ,  $\rho_{\text{tked}}(t_{ix})$  和  $\rho_{\text{sta}}(t_{ix})$  分别表示惯性参系中中继卫星、被测主卫星和观测站在  $t_{ix}$  时刻的位置矢量。下标  $i = 0$  或  $1$  分别表示数据采样的起始和终止。下标  $1 \sim 7$ 、 $c$ 、 $v$  表示信号的收发, 与图 4 中的标注和说明一致。各时刻  $t_{ix}(x = 1 \sim 6)$  以  $t_{i7}$  为参考基准, 由向后光线中点跟踪的方法得到。卫星转发器收发同一信号的时间延迟根据其数量级大小考虑计入或忽略。不同卫星的情况可以参考仪器性能指标来决定。

与地面跟踪站有关的信号频率和卫星转发信号的变频因子定义:  $f_b$  为用于卫星跟踪和卫星锁相信号  $S3$  的固定频率;  $f_{L0}$  为跟踪站信号接收系统的本振信号频率;  $f_B$  为  $f_b$  的偏差;  $K_{\text{tg}1} = S4/S3 = 240/221$ ;  $K_{\text{tg}2} = S5/S3 = 238/221$ ;  $K_{\text{tg}3} = 680/221$ ;



$$K_{td} = S6/S5 = 270/295。$$

对于积分多普勒记录模式, 在采样积分时间  $T(t_{17} - t_{07})$  内得到的多普勒计数值为  $N$ , 利用向后光线跟踪计算方法, 经过复杂的推导可以得到四程卫星间速度变化率观测测量  $R'_{OBS}$  与  $N$  之间的如下关系:

$$R'_{OBS} = -\frac{C}{2f_X} \left[ \frac{N}{T} - f_B \right] = \frac{\Delta R_{4way} + \frac{f_Y}{f_X} \Delta R_{2way}}{2T}$$

其中

$$f_X = K_{td} K_{tg2} f_b; \quad f_Y = K_{tg3} f_b;$$

$$\Delta R_{4way} = (R_{14} + R_{13} + R_{12} + R_{11}) - (R_{04} + R_{03} + R_{02} + R_{01});$$

$$\Delta R_{2way} = (R_{14} + R_{1c}) - (R_{04} + R_{0c}).$$

对于不同模式的四程卫星间多普勒跟踪测量可以作类似的数学推导。其中对简单的四程卫星间多普勒跟踪和 NASA 采用的模式推导表明, 它们的结果具有一样的形式, 差别仅仅在于参数的  $f_X$  和  $f_Y$  不同。简单模式中  $f_Y = 0$ 。

在 NASA 模式中定义:  $f_b$  为跟踪站产生的用于中继卫星锁相的信号频率;  $f_{RR}$  为跟踪站产生的用于测距的信号频率;  $f_{LO}$  为跟踪站信号接收系统的本振信号频率;  $f_B$  为  $f_b$  的偏差;  $f_{fd} = f_{RR} - (k - 77/4)f_b / (k + 1.5)$  为中继卫星发往被测卫星的测距信号频率;  $f_{rt} = (n/m)f_{fd}$  为被测卫星发往中继卫星的测距信号频率;  $f_{dl} = f_{rt} + (j - 21)f_b / (k + 1.5)$  为中继卫星发往观测站的测距信号频率;  $j$  和  $k$  是中继卫星转发器频率放大倍数;  $n/m$  是被测卫星转发器变频因子。基于上述定义, 文献 [12] 给出了 GEODYN II 中使用的参数:

$$f_Y = \frac{j - 21}{k + 1.5} f_b, \quad f_X = \frac{n}{m} \left[ f_{RR} - \frac{k - \frac{77}{4}}{k + 1.5} f_b \right]$$

### 2.3 SELENE 四程多普勒观测数据的分析流程

用来分析处理 SELENE 多普勒观测数据的软件包除了 GEODYN II 以外, 宇宙空间研究所现有的定轨软件也将用于 SELENE 计划中诸卫星的实时或准实时定轨。由于上述四程多普勒观测模式与所采用的解算软件中的默认模式不完全一样; 另外由于采用自转稳定方式进行姿态控制的中继卫星和人工电波源收发信号时信号相位受到卫星自转、倾斜、自由章动以及搭载天线相位方向图的时变影响, 从而给多普勒观测带来额外误差<sup>[13]</sup>。在应用现成软件进行数据分析之前要对原始数据作特殊的预处理, 并且还要把与观测模式有关的参数和经过预处理的数据同时送入软件包, 才能得到合理的分析解算结果。根据这个思路, 以 GEODYN II 软件为例, 在图 5 中建议了一种 SELENE 四程多普勒观测数据的分析流程。对于其他的四程多普勒观测, 只要已知具体的跟踪模式, 参数  $f_X$  和  $f_Y$  就可以被唯一确定, 相应的多普勒计数观测数据也能够利用 GEODYN II 软件包来分析处理。

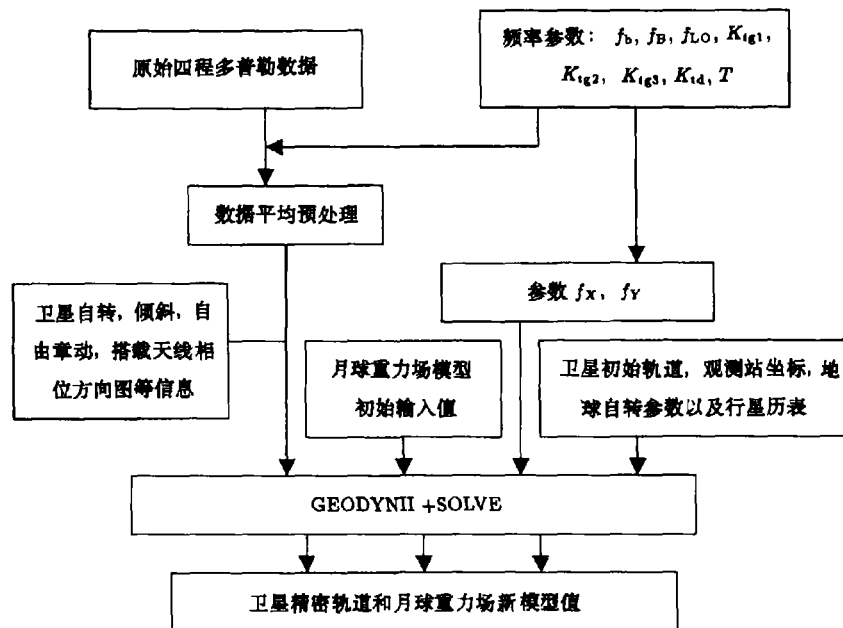


图5 SELENE 四程多普勒观测数据的分析流程

假设 SELENE 四程多普勒跟踪是一种简单的模式, 松本晃治等人在对 GEODYN II 做了相关改动后, 模拟了诸卫星的多普勒跟踪和 VLBI 观测, 并利用模拟观测数据对月球重力场解算精度进行了评估。结果表明, 各种观测技术的综合应用, 特别是四程多普勒跟踪技术的引入, 将大大改进对月球背面引力场的精密测定。由于包括上海佘山 25m 和乌鲁木齐南山 25m VLBI 站在内的数个亚欧 VLBI 站将加盟 SELENE 卫星入轨后的跟踪观测, 预计观测结果将进一步改善。同时, 考虑到 SELENE 四程多普勒跟踪实际模式数学模型的建立, SELENE 技术开发和研究者对跟踪观测正在进行重新模拟和评估。

## 参 考 文 献

- 1 Hanada H, Ooe M, Kawaguchi N et al. J. Geomag. Geoelectr., 1993, 45: 1405
- 2 Nobuyuki K, Masashi O. In: Geodetic and Dynamical Study of the Moon and Planets, Project RISE (Research In SELEnodesy), Astron. Her., 1997, 90(7): 302
- 3 RISE lunar orbiter developing group. The Designation Report on RISE Mission Concept, National Astronomical Observatory of Japan, 1999: 1
- 4 SELENE Project Team: Scientific Research In SELENE Mission, Institute of Space and Astronautical Sciences of Japan, 2000: 1 (Japanese)
- 5 Iwata T, Takahashi M, Namiki N et al. J. Geod. Soc. Japan, 2001, 47(1): 558
- 6 Namiki N, Hanada H, Tsubokawa T et al. Adv. Space Res., 1999, 23: 1817
- 7 平劲松, 钱志瀚. 天文学进展, 1997, 15(1): 3
- 8 Lambect K. Section 6.2.7 of "Geophysical Geodesy, The Slow Deformations of the Earth", Oxford: Oxford University Press, 1988: 284
- 9 Heki K, Matsumoto K, Floberghagen R. Adv. Space Res., 1999, 23: 1821

- 10 Matsumoto K, Heki K, Rowlands D D. *Adv. Space Rds.*, 1999, 23: 1809
- 11 Noguchi K, Imamura T, Oyama K I. *ISAS Report No.687*, 2000, Kanagawa, Japan: ISAS, 2000: 1
- 12 Paavlis D E, Luo S, Dahiroc P et al. *GEODYN II, Operations Manual, Vol.1*, Space Geodesy Branch, Greenbelt, Maryland: GSFC of NASA, 1998: 74
- 13 Ping J, Kono Y, Kawano N et al. *J. Geod. Soc. Japan*, 2001, 47(1): 576

## SELENE Mission: Mathematical Model for SST Doppler Measurements

Ping J<sup>1,2</sup> Kono Y<sup>1,2</sup> Kawano N<sup>2,3</sup>

Hansda H<sup>3</sup> Matsumoto K<sup>3</sup> RISE Group<sup>3</sup>

(1. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

(2. Department of Astronomy Science, the Graduate University for Advanced Studies, Tokyo, 181-8588, Japan)

(3. Division of Earth Rotation, NAO, Hoshigaoka Machi, Mizusawa-shi, 023-0861, Japan)

### Abstract

Japanese lunar exploration mission, SELENE, has been planned to be launched into space by using H II-a rocket in the Summer of 2004. This mission is composed of 3 subsatellites, a main lunar orbiter, a relay satellite and a free flying VLBI radio source. One of its main scientific objectives is the estimation of high order and degree spherical harmonic coefficients for the lunar gravity field. Different tracking methods will be employed in SELENE. The key tracking method is 4 way Satellite-to-Satellite Tracking (SST) technique. By this way, the tracking data can be obtained through the relay satellite when the low altitude main orbiter is flying at the far-side of the Moon and can not be "seen" from the Earth. To success the historical tracking data, a complete coverage of Doppler tracking from an orbiter at sufficiently low altitude with high tracking accuracy can be obtained. The 4 way SST has various configurations. For SELENE, The SST tracking mode is introduced here, the mathematical relation between range rate and 4 way Doppler count number is established, and a data processing stream frame by using GEODYN II is suggested.

**Key words** Lunar exploration—Satellite-Satellite Tracking(SST)—4 way Doppler—SELENE