

用于“萤火 1 号”火星轨道器的开环电测技术*

平劲松[†] 尚 堃 张素君 简念川 王明远 鄢建国 孙 靖
史 弦 黄 倩 戴春丽 韩婷婷 冯礼和 严豪健 王广利

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要 中国首个火星探测器“萤火 1 号”计划于 2011 年和俄罗斯的火卫一采样探测器一道发射升空。“萤火 1 号”将探测火星的空间环境,并验证深空导航测控与通信技术.与常规的火星探测任务不同,该探测器的轨道与位置测量主要利用天文甚长基线干涉测量技术、开环跟踪测量技术、差分单程测距测速技术、同波束干涉测量技术以及单程多普勒(Doppler)测速技术.

关键词 火星探测,“萤火 1 号”,开环技术,甚长基线干涉测量技术(VLBI)

Open loop tracking for Yinghuo-1 Mars Orbiter

PING Jin-Song[†] SHANG Kun ZHANG Su-Jun JIAN Nian-Chuan
WANG Ming-Yuan YAN Jian-Guo SUN Jing SHI Xian HUANG Qian
DAI Chun-Li HAN Ting-Ting FUNG Lee-Wo YAN Hao-Jian WANG Guang-Li
(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract The 1st Chinese Mars Probe, Yinghuo-1, is planned to be launched in 2011, together with the Russian Phobos-Grunt landing mission. It will explore the space weather of Mars, and test the deep space communication and navigation equipment. Different from common deep space missions, astronomical Very Long Baseline Interferometry (VLBI), open loop tracking like DOR/DOD, seam beam VLBI and one-way Doppler measurements, will be used to determine the spacecraft orbit and position.

Keywords Mars exploration, Yinghuo-1, open loop, VLBI

1 “萤火 1 号”(YH-1)与火卫一着陆器(FGSC)联合火星探测简介

月球和行星探测的主要科学目标是揭示月球和行星的起源,探索它们从诞生时到现在的演化过程,以及探测在其他行星类天体上存在生命的可能性.自从新千年开始,火星探测已经吸引了国际空间机构的注意,并且引发了一轮新的对月球和行星探测的竞赛与合作.作为这一轮如火如荼的月球与空间探测的新的加入者,中国在 2007 年发射了第一颗月球探测器,并取得了令人瞩目的新成果.紧接其后,一个中俄火星联合探测计划开始实施:“萤火 1 号”

(YH-1)和火卫一着陆器(Phobos-Grunt Spacecraft, FGSC),已经得到中俄双方的认可^[1,2],并得到国际社会的支持.

2007 年,在中俄两国国家元首见证下,中俄两国国家航天局签署了《关于联合探测火星及火卫一合作的协议》,在政府层面上正式对中俄联合火星探

* 中俄火星联合探测计划“YH-1”项目;国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA12A209,2008AA12A210)、国家自然科学基金(批准号:10973031)资助项目;中国科学院重要方向项目(批准号:KJCX2-YW-T13-2)

2009-08-04 收到初稿,2009-09-17 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: pjs@shao. ac. cn

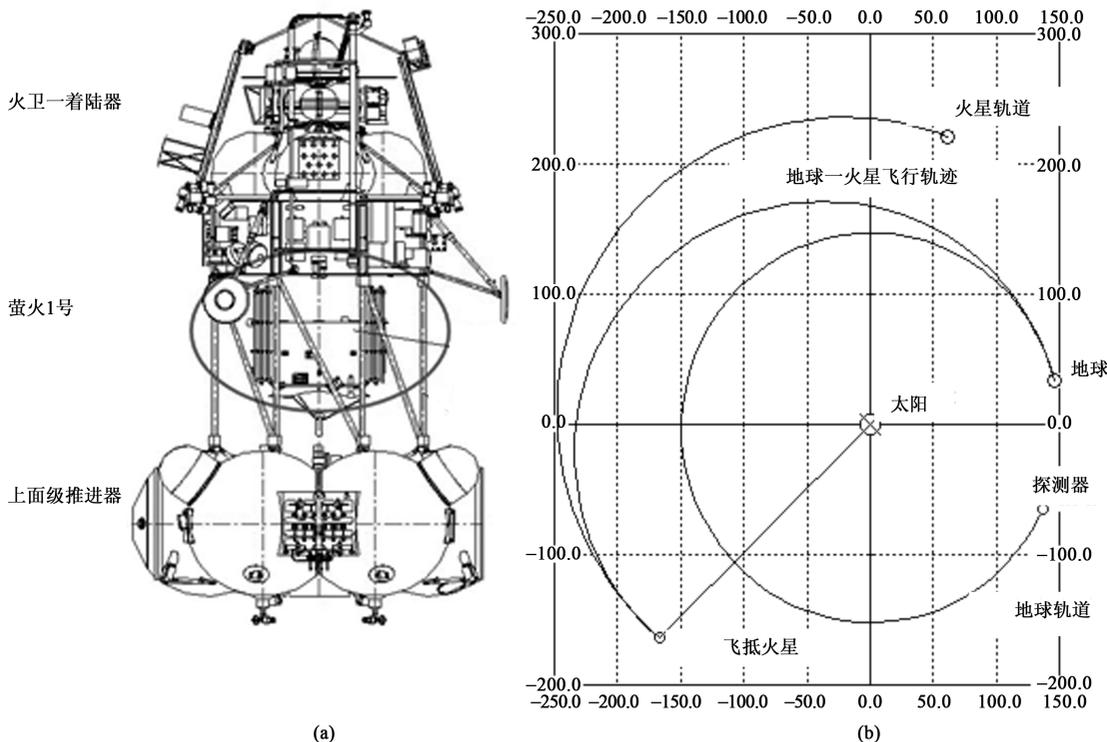


图 1 “萤火 1 号”(YH-1)和火星一着陆器(FGSC)位于发射状态(a)与联合探测期发射升空后飞行轨迹在黄道面的投影, 纵横坐标单位为百万公里(b)

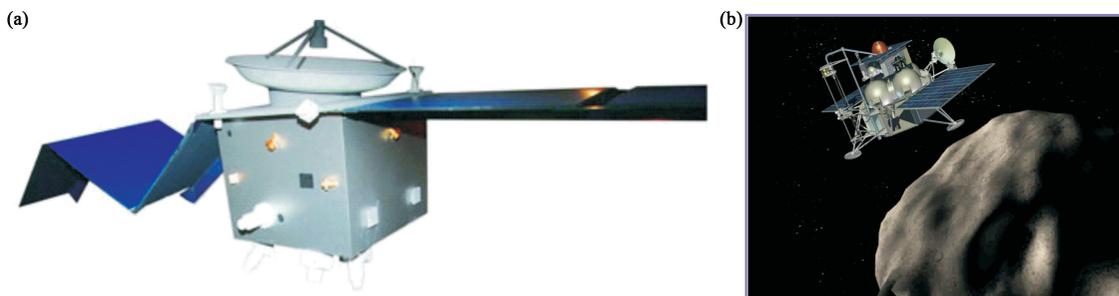


图 2 YH-1 探测器的外观(a)与 FGSC 探测器着陆火星一的示意图(b)

测立项. 俄罗斯火星一探测器名为福布斯—土壤 (Phobos-Grunt). 中国火星探测器取名为“萤火 1 号”(YH-1), 是一颗进入环绕火星轨道对火星的空间环境进行深入探测研究的深空探测器. 图 1 给出了 YH-1 和 FGSC 位于发射状态的装配示意图, 图 2 是 YH-1 外观的艺术图示.

俄方的拉瓦奇金工业联合体和俄罗斯科学院的空间研究所承担了 FGSC 探测器的研制工作. 上海航天技术研究院和中国科学院空间研究中心承担了 YH-1 探测器的研制和研发. 中俄双方的研发机构还将共同协调负责卫星的联合发射和探测任务.

联合探测计划中的两个探测器将于 2011 年由俄罗斯联盟二型火箭在哈萨克斯坦的拜坎努尔发射场

一起发射. 经过约 10 个月的飞行将抵达火星附近. 进入火星轨道后, PGSC 探测器和 YH-1 探测器分离. YH-1 的任务轨道近火星点为 700—1000km, 远火星点为 74000—80000km, 倾角为 $0 \pm 5^\circ$, 轨道周期 76.8 小时. 经过一段时间的调整, YH-1 探测器将自主地对火星的空间环境进行探测, 并与福布斯探测器联合完成了对火星环境的掩星探测, 研究火星电离层的变化特性、大气层的物理特性等. 根据任务总体方案的要求, YH-1 探测器的测控和数传将通过与俄罗斯合作的方式实现. 中国科学院的甚长基线干涉测量技术 (VLBI) 天文测量系统经过适应性改造后, 将承担对 YH-1 探测器的测轨任务.

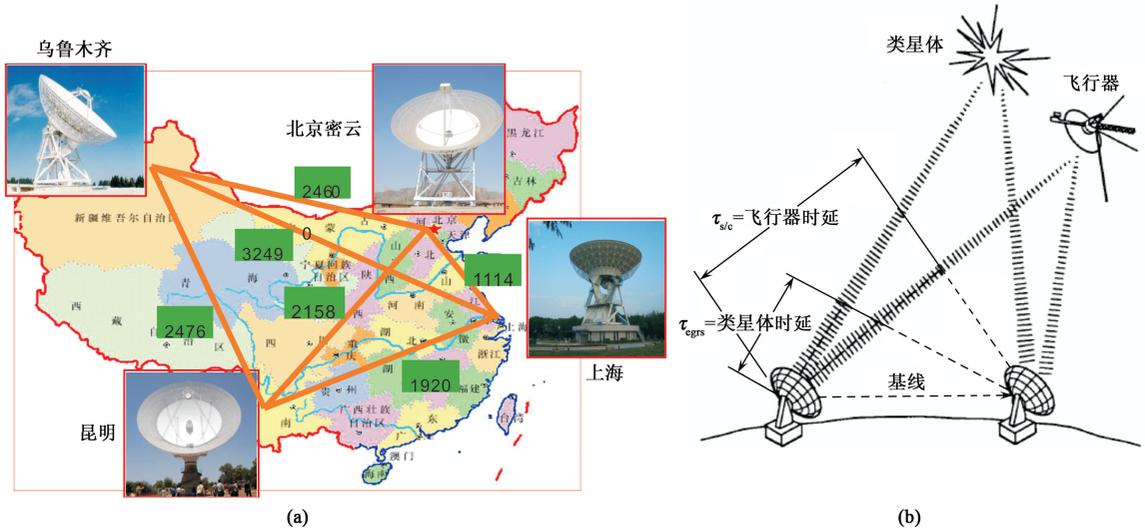


图3 (a)中国的VLBI网分布,数字单位为公里;(b)火星探测器VLBI测量原理

YH-1 卫星将集中探测火星的空间环境以及太阳风与火星大气的相互作用. FGSC 是一个大胆的采样返回探测计划,将首次实现对火卫一的采样并携带回地球. 预定采集土壤样本 0.1—0.2kg. YH-1 与 FGSC 还将同时对火星空间环境的两个区域实施探测,它们携带的功能类似的等离子体探测包将同步获取火星共轭区域的环境参数. 两颗探测器还将在超高频(UHF)频段基于超稳定晶体振荡器,实施卫星-卫星之间的无线电测量. 这样就可以在火星大气遮掩无线电信号时,通过记录无线电信号的变化,反演火星大气和电离层的特性参数. YH-1 探测器基本技术参数包括:

- (1)总质量为 110—115kg;
- (2)总功率为 150W (平均)、180W(瞬间);
- (3)数据通信:0.9m 高增益天线(HGA),码率 80bps—8kbps;
- (4)X 波段接收机和发射机,非转发模式;
- (5)3 轴稳定卫星,可展开太阳帆板,无轨道机动.

表 1 列出了 YH-1 计划的 6 类有效载荷,它们将开展的主要探测目标包括:

- (1)探测火星的空间磁场、电离层和粒子分布及其变化规律;
- (2)探测火星大气离子的逃逸率;
- (3)探测火星地形、地貌和沙尘暴;
- (4)探测火星赤道区重力场.

2 “萤火1号”中的开环测轨技术

考虑到我国的深空测控网还处于建设阶段,目前在国内还没有能够满足对地球和火星之间 2—3

表 1 YH-1 探测器的有效载荷

| 载荷名称 | | 探测目标 |
|-----------|---------|---|
| 等离子体探测包 | 电子分析器 | 电子、质子、行星离子 能谱、离子证认 |
| | 质子分析器 | 电子能量范围:10eV—20 keV 质子能量范围:10eV—20 keV |
| | 行星离子分析器 | 等离子体能量范围:10eV—20 keV, 2π 立体角度 |
| UHF 掩星接收机 | | 电离层掩星探测 |
| 光学成像仪 | | 沙尘暴和火星表面成像 |
| 磁强计(A/B) | | 磁场: 探头 A 为 ±65000 nT, 8nT 分辨率; 探头 B 为 ±256 nT, 0.01 分辨率 |

亿公里距离上的上行控制和通信能力. 为了简化设计,在 YH-1 卫星上,只配置 X 波段发射机和接收机,没有配置通常闭环测量用到的锁相转发器. 为了解决跟踪测轨的难题和关键技术,在探测器上安装了超稳定晶体振荡器,以提供高稳定的频率源,这样就可以使用单程开环测量和地面甚长基线干涉测量技术,来接收卫星发射的下行无线电信号. 地面台站可以获取单程多普勒和差分多普勒的单程差分测速(DOD)信息. 任务系统将使用多普勒和 DOD 开展探测器的定位和定轨工作.

2.1 中国的甚长基线干涉测量技术(VLBI)网

中国的 VLBI 网在天文测量和月球行星探测领域都扮演着关键的角色. 这个网的 4 个地面测站分别位于北京、上海、昆明和乌鲁木齐,见图3. 其中乌鲁木齐和上海的 25m 天线系统分别于 1987 和 1993 年建

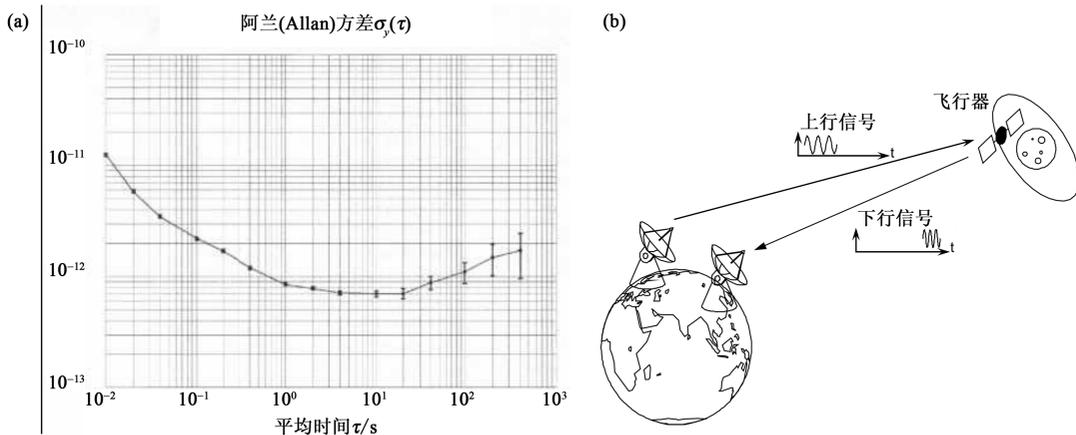


图 4 (a)星载 USO 的一个阿兰方差分布,(横坐标单位为秒,纵坐标无量纲);(b)开环三程测量原理示意图

设完成,北京 50m 天线系统和昆明 40m 天线系统建成于 2006 年。

中国 VLBI 网可以在 L/S/C/X/Ku 5 个波段开展无线电观测. 其中 S/X 双频系统覆盖了国际电信联盟(ITU)公布的卫星通信频段,在进行测地观测以外,还可以对月球和行星探测器进行观测. 从 1995 年开始,这个网已经参与了许多次深空探测器的国内和国际联测. 例如,该网成功地支持了卡西尼-惠更斯、Planet-B、SMART-1、MGS、双星的科学和工程测量. 在对最近两个月球探测器 SELENE 和嫦娥-1 的测量任务中,该网还实现了实时跟踪和精密测轨. 特别是该网采用同波速观测技术,并结合统一 S 波段测距、测速观测,已经大大地提高了对月球重力场的探测精度。

图 3 还给出了探测器 VLBI 观测^[3]的测量原理. 在实际应用中,VLBI 系统通常交替地观测探测器和附近的一个自然射电源 QUASAR,把两个目标的观测相减构成差分 VLBI 观测,即 δ -VLBI 观测. 这样可以利用后者来标定和校正 VLBI 测量系统,消除仪器设备中的噪声和偏差,获得干净的探测器 VLBI 观测量^[4]. 在实际应用中,还可以采用一个已知轨道或位置的邻近探测器作为目标探测器的参考,当它们同时发出的信号落在观测天线的主方向瓣中时,同时对它们进行观测,构成差分观测量,可以最大限度地消除来自观测仪器和信号传输路径上的介质的影响. 后者称为同波束观测. 定义探测器和 QUASAR 的 VLBI 几何延迟量为 $\tau_{s/c,g}$ 和 $\tau_{q,g}$, 实际观测延迟为 $\tau_{s/c,o}$ 和 $\tau_{q,o}$, 那么 $\tau_{s/c,g}$ 就可以通过下面的式子得到:

$$\tau_{s/c,g} = \tau_{s/c,o} - (\tau_{q,o} - \tau_{q,g}). \quad (1)$$

VLBI 台站和数据解析中心通过光纤互联网相互连接. 在 SELENE 任务中,观测数据采用互联网传输控制协议和网际协议(TCP/IP),发送到日本国立天文台;而在嫦娥-1 任务中,VLBI 观测数据则采用实时数据流,被送往上海的 VLBI 数据处理中心进行实时相关处理. 在 YH-1 任务中,还将有 2—3 个俄罗斯或者欧洲台站加入进来. VLBI 中心还将利用观测数据估算和预报探测器的轨道信息,发送给用户。

除了采用通常的 δ -VLBI 方法以外,本次联合探测在 YH-1 和 FGSC 探测器上都使用了超稳定晶体振荡器(USO),并且都采用 X 波段下行通信模式. 两个探测器上使用的 USO 在 0.1—1000s 尺度上的稳定度可以达到 $1-2 \times 10^{-12}$ s/s. 图 4 显示了一个同批次的 USO 的短稳特性. 在 YH-1 上,X 波段的信号还通过 90° 的相位调制以发出两个测音信号用于差分单程测距(DOR)观测. 另外,YH-1 和 FGSC 将分别在相邻的频点 8424MHz 和 8425 MHz 上发射供地面 VLBI 测量用的点频信号,这样就可以类似于 SELENE 计划,开展同波束 VLBI 观测^[5,6].

为了确保中俄联合火星探测计划的测控任务的顺利完成,双方的工作组共同规范了统一的时间与参考架协议,并推荐给联合探测计划的各分系统和关联的子系统参照使用,包括研制和制造、发射、遥测、控制以及科学应用等. 这个规范还定义了一些专用的时间尺度和参考架系统,并建议了不同尺度和参考架之间的转换关系和模式^[7].

在联合探测计划中,使用 δ -VLBI 和同波束观测,不仅可以测量探测器的轨道,而且还可以通过开展行星无线电科学试验,带来很多额外的科学产出. 这些可能的额外的科学产出包括:

- (1) 优化太阳系的一些基础参数, 如天文常数, 火星和火卫的历表;
- (2) 通过实际观测评估火卫一的轨道演化和轨道寿命;
- (3) 探测火卫一内部的物质分布和密度;
- (4) 进一步评估主带大型小行星的质量上限;
- (5) 优化万有引力常数;
- (6) 优化历表参考架与河外射电源定义的惯性参考架的连接状况。

2.2 单程多普勒跟踪技术

为了推进我国月球和行星探测研究工作的发展, 我国的卫星测控系统正在启动一项对测控网站的升级改造计划。升级改造后的地面站系统可以满足 YH-1 这样的深空探测器的测控跟踪需求。包括俄罗斯和欧洲航天局在内的多个国际航天机构的地面测控系统也将参与对 YH-1 探测计划的测控, 它们还将联合国内的地面接收视系统共同接收科学探测数据。另外, 为了简化对探测器的设计, 在 YH-1 上没有安装传统 TT&C 的锁相转发器^[8], 而是采用了收发分离的 X 波段开环通信测控模式。

上述通信方式可以同时解决测轨中的跟踪问题, 采用基于星载 USO 的星一地链路单程多普勒测量技术, 同时联合 VLBI 差分测量技术, 可以获得 YH-1 的多普勒和差分单程多普勒观测量数据, 这些极具挑战性的开环观技术可以用于对 YH-1 探测器的定轨和位置测量。这项技术构成了 YH-1 探测器测轨任务的关键技术。

采用软件无线电技术, 我们已经开发了 3 种单程多普勒测量原理样机^[9-11]: 一类软件接收机可以通过后处理方式从多比特 VLBI 观测记录中提取多普勒信息; 另一类是基于 DSP 的数字多普勒计数手段, 它可以实时地从 VLBI 的视频输出信号中提取多普勒信号。除了上述原理设备以外, 我们还在研制全状态的工程设备, 以便用于从中频信号中提取数字多普勒, 以满足任务需求。

为了验证上述开环多普勒技术, 我们在嫦娥-1 的长管任务阶段, 利用 3 程的方式(见图 4)开展了测试观测。在 3 程测量模式中, 一个测控站如青岛站或喀什站向嫦娥-1 卫星发射上行信号, 利用 VLBI 台站接收卫星转发回来的无线电信号。上行测站的铷原子钟和 VLBI 站的稳定特性以及它们之间的频率偏差决定了测量的精度。利用设置在上海和乌鲁木齐站的新研制的软件多普勒原理设备, 我们获得了 1s 采样的 3mm/s 精度的嫦娥-1 探测器的 3 程多

普勒测速数据。利用乌鲁木齐和上海两个站的数据差分, 可以得到 1mm/s 精度的差分多普勒观测量。这表明, 在 3mm/s 精度的 3 程观测量中的主要噪声误差来源于上行站频率标准的不稳定。在火星探测中, 这类开环数据还可以用于对火星大气的星一地掩星探测^[11,12]以及其他的行星无线电科学研究。

上述测量精度表明, 研制的设备从原理上可以满足对 YH-1 测轨的设计要求。我们还用同样的设备联合 ESOC, 对欧洲航天局的火星快车探测器进行了观测, 用于验证 2 亿公里距离的测量能力, 取得了满意的效果^[13]。基于上述验证试验取得的技术参数, 还开展了对 YH-1 探测器的定轨仿真分析工作。结果表明, 采用单程测量技术对自由飞行的火星探测器连续观测 3 圈共 10 天, 可以达到 YH-1 探测器对轨道测量精度的工程需求。

3 结束语

中国将在 2011 年通过与俄罗斯的合作发射第一个火星探测器 YH-1。该计划将主要用于探测火星空间环境, 包括对空间天气和太阳风—火星大气耦合作用的探测。通过与 FGSC 的联合探测, 还将研究火星系统的动力学特征。

为了在现有条件下顺利实施上述探测计划, 采用了简化的开环测控模式。在卫星上搭载了 USO, 并使用成熟的天文 VLBI 系统的大型天线网络, 借助于新研发的软件无线电数字多普勒技术设备, 测量卫星发射无线电信号的单程多普勒和差分多普勒。这类技术的成功研制和使用, 将有利于未来深空探测技术的发展。

参考文献

- [1] http://www.russianspaceweb.com/phobos_grunt.html
- [2] 王劲东, 赵华, 周斌等. 物理, 2009, 38: 785 [Wang J D, Zhao H, Zhou B *et al.* Wuli (Physics), 2009, 38: 785 (in Chinese)]
- [3] Sovers O J, Fanselow J L. Rev. Mod. Phys., 1998, 70: 1393
- [4] 平劲松. 用于太阳系行星探测的甚长基线干涉测量技术(博士学位论文). 上海: 中国科学院上海天文台, 1996
- [5] Kikuchi F, Liu Qi H, Hanada H *et al.* Radio Science, 2008, 44: 1; doi:10.1029/2008 RS003997, 2009
- [6] 刘庆会, 史弦, 王伟华等. 物理, 2009, 38: 712 [Liu Q H, Shi X, Wang W H *et al.* Wuli (Physics), 2009, 38: 712 (in Chinese)]
- [7] Li J, Yan J. YH-1 Mars Exploration Project Resolutions on Time Scales and Reference Systems (Proposal). Shanghai Astronomical Observatory, CAS; Beijing Aerospace Control Center, March, 2009

- [8] Catherine L T. Radiometric Tracking Techniques for Deep Space Navigation, Deep Space Communication and Navigation Series, 2002 (descanso. jpl. nasa. gov/Monograph/seriesl/Descansol_all. pdf)
- [9] www2. nict. go. jp/w/w114/stsi/K5/VSSP/install_cor_e. html
- [10] Ping J, Frank W, Yusuke K. Journal of Planetary Geodesy, 2001, 36:15
- [11] 张素君, 简念川, 尚堃等. 中国科技成果, 2009, 12:18
- [12] 张素君, 平劲松, 洪振杰等. 物理, 2009, 38:722[Zhang S J, Ping J S, Hong Z J *et al.* Wuli (Physics), 2009, 38:722 (in Chinese)]
- [13] 尚堃, 简念川, 张素君等. 物理, 2009, 38:799[Shang K, Jian N C, Zhang S J *et al.* Wuli (Physics), 2009, 38:799(in Chinese)]