

太阳系人造天体 VLBI 观测

平劲松^{1,2} 钱志瀚¹

(1. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2. 北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要

简单介绍了 VLBI 技术用于太阳系人造天体观测的进展状况, 并对这一研究方向的天文研究课题作了展望。

关键词 航天器 — 技术: 干涉

1 引 言

无线电波段的甚长基线干涉测量技术 (VLBI) 具有很高的测量精度, 自从 60 年代诞生以来已经被广泛地应用于天文、测地及航天等许多研究领域^[1,2]。在航天领域, 各种人造航天器跟踪与导航观测的传统方法是雷达测距和多普勒测速技术, 它们可以直接测量航天器相对观测者的视向距离 ρ 和视向速度 $\rho^{[3,4]}$ 。高精度的多普勒长弧观测资料还可以精确地确定航天器的经纬坐标 (α, δ) 。可是测距和多普勒方法由于应答信号两次以上传输耗时颇多, 不利于对航天器的实时跟踪观测; 另外当 $\delta \rightarrow 0$ 时所构造的关于 δ 的观测误差方程不收敛, 无法精确地测得它; 而且当航天器飞抵大行星附近时, 来自大行星的引力加速度将破坏多普勒测速精度, 进而破坏导航^[5,6]。为突破传统无线电导航观测方法的限制, 研究者们提出把 VLBI 技术用于导航观测, 并在具体观测中实现为双差单向测距 (Delta Differential Oneway Ranging, DDOR) 和双差单向多普勒测速 (Delta Differentia Oneway Doppler, DDOD) 两种较差 VLBI(DVLBI) 观测技术, 相对河外射电源对各种人造天体进行跟踪和导航观测^[7,8]。

当目标航天器与河外参考射电源角距很近时, 利用较差 VLBI 方法轮流观测这两个源, 可以在很大程度上消除来自仪器和信号传播介质的误差影响, 这样测得的目标航天器的位置和速度分量具有很高的精度^[2,9]。对不同航天器的跟踪观测数据还可以进一步用于天文学研究, 如建立太阳系动力学参考架与河外源射电天球参考架的联接; 检测月球在轨道上运动的变化和月球轨道面的变化, 并研究两者的起因; 检验广义相对论引力理论; 测量太阳引力场 J_2 项; 探测行星大气的运动等^[2,10,11,12]。

2 较差射电干涉测量方法与模型

应用射电干涉技术进行的太阳系人造天体定轨导航技术主要包括宽带 VLBI 技术^[13,14]和窄带 VLBI 技术^[15,16]两种基本方法。另外还有一些在这两种技术基础上发展起来的其他特殊方法和手段。

2.1 宽带 VLBI 技术^[14,17]

航天器宽带 VLBI 观测几何模型如图 1 所示^[14]。与河外源 (Extragalactic Radio Source, EGRS) 不同, 航天器 (Spacecraft, S/C) 发出的信号一般是频率固定的脉冲或正弦波信号。信号到达两站的时间延迟是由信号的波长和两台站同时测到的同一信号的相位差定义。尽管对航天器的观测是由 VLBI 设备完成的, 但由于航天器信号的相干特性, 不必对航天器观测数据做相关处理, 直接把它记录信号与一个标准信号进行比对, 就能得到航天器信号延迟观测量。这种观测相当于雷达单向测距, 故称较差单向测距 (Differential Oneway Ranging, DOR)。

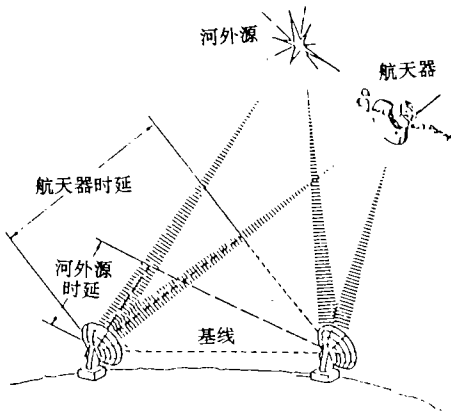


图 1 宽带较差 VLBI 跟踪观测示意图

中解算出。这种方法又称双差单向测距 (DDOR), 观测模型为:

$$\Delta\tau = \tau_{S/C} - \tau_{EGRS} = (1/c)\mathbf{B} \cdot \Delta\mathbf{S} \quad (1)$$

$$\Delta\mathbf{S} = \mathbf{S}_{S/C} - \mathbf{S}_{EGRS} \quad (2)$$

其中 c 为真空中光速, \mathbf{B} 为基线矢量, \mathbf{S} 为源位置矢量。

2.2 窄带 VLBI 技术^[15,18,19]

对航天器的窄带 VLBI 观测实质上是两个不同台站在单一信号频率波段上所做的同步较差单向多普勒测速观测 (Differential Oneway Doppler), 简称 DOD。从观测模型的形式看它是宽带 VLBI 延迟观测量的时间导数, 是对航天器速度的直接测量。实际上它的观测数据是单频信号相位延迟或延迟率。同样地, 为了得到航天器在空间高精度的速度分量, 也需要 VLBI 基线对目标航天器和一个邻近的河外源进行同步较差观测, 从较差延迟率观测量 $\Delta\tau'$ 中解算出航天器的空间速度分量。这种观测又称双差单向多普勒测速 (DDOD)。把 (1)、(2) 两式对时间求导数, 并假设河外射电源自行速度为零, 那么

$$\Delta\tau' = (1/c)\mathbf{B}' \cdot \Delta\mathbf{S} + (1/c)\mathbf{B} \cdot \mathbf{S}'_{S/C} \quad (3)$$

其中 B' 为基线变化率, $S'_{s/c}$ 为航天器运动速度。用 DDOD 方法测得航天器的速度精度为 $1\mu\text{as} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 特殊的 DVLBI 技术方法

2.3.1 双航天器 DVLBI 技术^[20,21] 和同束 VLBI 技术^[22,23,24]

较差观测的参考源可以由另外一个近角距航天器充当。这种观测在两个航天器飞抵同一目标或者在航天器向目标行星释放探测器时, 以及相对某行星的人造卫星观测该行星上的着陆设备时实现。此时的观测方程为:

$$\Delta\tau = (1/c)(\rho_2^2 - \rho_1^2) - (1/c)(\rho_2^1 - \rho_1^1) \quad (4)$$

$$\Delta\tau' = (1/c)(\rho_2'^2 - \rho_1'^2) - (1/c)(\rho_2'^1 - \rho_1'^1) \quad (5)$$

其中 ρ 和 ρ' 分别表示航天器相对观测站的位置与速度, 上下标分别对应于不同的飞船和观测站。这种技术称为双航天器 DVLBI 技术。在实际观测中参考源和航天器的角距很小, 它们常常会同时落在观测天线的主瓣方向束内, 可以方便地对它们进行小角距的同束较差 VLBI 观测, 可以观测得到高精度的相位延迟量, 几乎可以完全从较差观测量中消除传播误差, 定位精度更高。

2.3.2 局部天球参考架 VLBI 技术^[25]

由于钟速、地球自转参数、大气延迟等误差因素的影响, DDOR 的导航定位精度被限制在 3—20mas。为了在更高的精度上实现 DVLBI 技术对航天器的导航观测或对太阳系动力学的观测研究, JPL 的一个研究小组提出并实现了一种多参考源较差 VLBI 技术。该 VLBI 技术在很大的天区范围内对航天器和这一局部河外源射电天球参考架内多个射电参考源进行较差 VLBI 观测, 源间角距最大可达几十度。可以通过参数化方程从观测量中最大限度地消除以上误差因素的影响。应用此方法可以以 0.2—0.5mas 的精度测定航天器在局部射电天球参考架中的相对位置, 观测方程误差可简单地写成:

$$\Delta\tau^i = \Delta\tau_g^i + \Delta\tau_{\text{clock}} + \Delta\tau_{\text{rate}} + \Delta\tau_{\text{eop1}} + \Delta\tau_{\text{eop2}} + \Delta\tau_{\text{atm1}} + \Delta\tau_{\text{atm2}} \quad (6)$$

式中下标 g, clock, rate, eop1, eop2, atm1, atm2 分别对应于几何延迟、两站钟差和钟速差、EOP 参数误差以及两站大气延迟效应在观测量中的改正值部分, 上标 i 在这里代表 S/C 或 EGRS。对于目前选自射电天球参考架的河外参考源而言, 可以认为其几何延迟改正值 $\Delta\tau_g^{\text{EGRS}} \cong 0$ 。那么在一组观测中, 只要观测 6 个不同的河外源, 就可以解出 6 个误差因素的改正值, 进而从航天器高精度的几何延迟量 $\Delta\tau_g^{\text{S/C}}$ 中解得航天器位置。

2.4 连线干涉测量技术 CEI^[26]

一些短基线射电干涉测量系统, 基线长度 10—100km 之间, 各天线之间用光纤连接, 只用同一个原子钟控制观测。这类系统的优点是可以做到实时观测; 而且由于基线短, 天线指向基本一样, 传播误差对每面天线基本相同, 可以方便地从观测量中消除; 同时天线的共同观测时间大大地增多, 改善了观测条件; 信号的相位可以被稳定连续地记录, 利用相位观测量可以得到与 VLBI 精度相当的观测结果。

同无线电测距和多普勒技术相比, DVLBI 技术具有很大优势^[13,14]: (1) DDOR 和 DDOD 只观测下行单向信号, 无需对上行信号进行传播效应的改正, 也不必对信号往返过程中台站的时间模型和频率漂移进行校准; (2) DDOR 和 DDOD 观测只需几分钟就可得到具有足够信噪

比的观测信号,大大缩短了观测周期;(3) DDOR 得到的飞行器的空间位置具有更高的精度;(4) 利用 DDOR 和 DDOD 对航天器定轨更简单有效,由两条近似正交的 VLBI 基线同步进行 DDOR 和 DDOD 观测可以得到航天器在天球面上的两维投影位置和速度分量^[16,17,18]。VLBI 技术的上述优点使得它在宇航导航领域得到普遍重视。多数行星探测器的无线导航观测是由以上多种技术联合完成,以得到航天器在空间的 6 个独立的状态参数。

3 DVLBI 测量误差的来源

影响 DVLBI 观测精度的误差主要有三种:(1) 与观测台站有关的因素;(2) 与航天器本身有关的因素;(3) 太阳系历表和参考架的误差。第一种来源起因于观测台站在惯性系中不够精确的位置、未被校准的传播介质效应、记录误差因素等。第二种误差起因于未确切已知的作用于航天器上的力因素。第三种则起因于两类参考架的精度和连接误差^[11,27]。

与观测者有关的误差来源^[5,11,14,15,24,25]在 VLBI 导航观测信号中很显著,包括三类:(1) 台站在空间的位置误差;(2) 信噪比;(3) 观测中对真实信息的干扰和破坏的误差。

观测者在空间的位置误差主要来自 VLBI 基线矢量和地球定向参数 EOP 的不确定程度。在 VLBI 发展初期,由于观测精度的限制,这部分误差对航天器位置测量的影响很大。现在大部分 VLBI 基线的测量精度都好于 1cm; VLBI 技术测定 EOP 也具有很高的精度,这部分误差对现今的 VLBI 导航观测影响不大。各类传播效应和仪器误差将干扰甚至破坏观测信息。这些干扰包括地球中性大气、电离层大气、行星际等离子体、仪器延迟、钟频稳定性等^[27,28,29,30,31]。新近提出的几种大气延迟模型可以有效地拟合中性大气的影响^[32,33,34]。在 VLBI 观测中通常采用 S/X 双频观测技术,这种观测方法在目前观测精度上几乎可以完全消除电离层和部分消除日冕和太阳风的影响。

与航天器有关的误差来自于作用于航天器上的非引力力,包括航天器自身产生的力效应和它与周围环境之间的相互作用。这两类作用中最具典型的是气体渗漏、太阳辐射压。详细的讨论参阅文献^[11,15,27]。

太阳系历表和射电参考架的误差也将影响到 DVLBI 定位和导航观测^[27,35]。通常航天器的先验轨道和设计飞行轨道以及行星历表,都是在太阳系动力学参考架中定义的,而 VLBI 观测是在射电天球参考架中实现的,这两类参考架各自的指向误差和它们之间的连接误差,都会影响到导航观测中对航天器的位置测定。现今的 IERS 射电参考架的精度好于 1mas。利用 1979 年以来的 VLBI 和 LLR 的 EOP 资料, Folker 等人在 3mas 精度上间接得到了 DE200 历表相对 IERS 河外射电源天球参考架的三个欧拉角^[36]。使得太阳系动力学参考架和河外源射电天球参考架在 3mas 精度上实现了统一。参考架的误差将在几个 mas 量级上影响太阳系人造天体的 VLBI 观测。

4 人造天体的 DVLBI 观测及天文意义

各类人造天体中, VLBI 技术已被用于人造地球卫星、月球探测器、行星际探测及星际探测器的跟踪与导航的观测。许多这种观测是由美国航空航天局(NASA)的深空网(Deep Space Network, DSN)独立完成的,也有少数观测是由全球 VLBI 台站合作完成的。这类观测不仅可

以对航天器精密定轨, 而且对太阳系天文学研究具有很重要的意义。其中最典型的贡献就是为建立高精度的太阳系行星历表参考架提供精确可靠的观测数据, 以及建立历表参考架与射电源天球参考架的精密联接^[12,37-41]。

4.1 人造地球卫星的 VLBI 观测^[42-48]

利用 VLBI 技术可以观测同步轨道卫星和大椭圆地球卫星。1969 年 10 月 13 日由三个地面 VLBI 台站首次对 TACSAT 通讯卫星实施了 DVLBI 技术定轨观测, 全部观测数据都由干涉处理得到。当时的 VLBI 技术还只是一个雏形, 7 小时连续观测的定轨精度为 50m。目前同步轨道卫星的高精度定轨有两方面的意义: (1) 提高卫星—卫星动态导航的精度; (2) 提高时钟同步和同步卫星定位导航精度。许多低轨卫星的定轨与导航可由地面站、导航数据传递卫星 (TDRS)、GPS 导航系统共同完成。如对 SEASAT 和 TOPEX 卫星高精度动态定轨, 要求 TDRS 卫星的轨道具有几十厘米到几米的定轨精度。无线电测距和多普勒方法的定轨精度为几十米, 离定轨精度要求相去甚远。而利用 DVLBI 技术, 对同步轨道卫星的定轨精度可达几十厘米到几米, 基本满足了低轨卫星的动态导航的要求。除 TDRS 卫星外, 用 VLBI 技术进行过定轨观测的同步轨道卫星还有 TDAS、ODSRS、DSCSII。其中 ODSRS 是星际导航平台, 对它的精确定轨具有特殊的意义。一些大椭圆地球卫星, 如 AMPTE/IRM, 发射信号的带宽也是数十 MHz, 而且它们在远地点附近的角速度也不大。对它们的跟踪与导航观测分析表明, 包括 DDOR 和 DDOD 在内的技术方法定轨精度要比多普勒方法好一个量级。

4.2 月球探测器的 VLBI 观测^[49,50,52-54,61]

阿波罗登月计划中, 12, 14, 15, 16, 17 次登月的月面实验舱 (Apollo Lunar Surface Experiment Package, ALSEP) 在月面上安放了五个无线电发射器向地球发射频带较宽的无线电波, 以供利用射电技术进行测月观测。尽管由于能源和技术原因使得这些无线电发射器的寿命只有两年左右, 但在它们有效的工作时间内, 利用各种地面射电技术对它们的观测仍取得了许多很有价值的结果。

典型的月球探测 VLBI 观测有三种类型:

(1) 对两个以上的月面发射器进行相对定位观测; (2) 相对河外源观测一个或多个的月面发射器精确位置; (3) 对绕月飞行器的精确定轨观测。NASA 的 DSN 曾用 VLBI 技术对月球车相对登月舱的运动进行了跟踪观测, 当时测定的月球车位置精度为 1m, 对应用 VLBI 技术跟踪观测人造天体的方法作了初步探索和验证。

在射电参考架中测量月面发射器的位置, 不仅可以研究月亮在轨道面内的运动, 还可以对月球轨道面的空间运动作精确的探测。这种观测类型最为直接的结果就是利用 VLBI 技术观测多个 ALSEP, 并与激光测月的数据共同解算, 得到激光反射器和 ALSEP 的月面坐标, 建立月历表与河外源射电参考架的联系。包含在这两类运动中的各种因素, 如月球形状参数或月

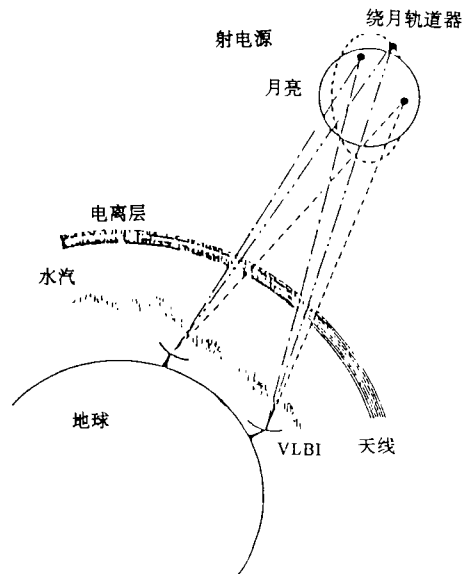


图 2 VLBI 观测月球探测器的几何原理^[54]

球引力场球谐函数,描述月球物理天平动的参数以及地月系质量等,也有了初步的 DVLBI 观测结果。由于技术上的不成熟以及各种误差因素的影响,20 多年前的 VLBI 测月精度受到很大限制。后来由于没有实施新的月球探测计划,这类观测研究一度终止。90 年代日本启动了一个旨在研究月球内部构造、月面热辐射流量以及研究月球演化的月球探测研究计划,并且已经研制出了绕月飞行器和新型的硬着陆月面无线电发射装置,计划在 2002 年发射。花田英夫的分析表明,利用现有的 VLBI 技术手段通过观测绕月飞行器和月面无线电发射装置之间的相对位置,可以在 10^{-5} 精度上测定月球的物理天平动,以及在 10^{-4} — 10^{-6} 精度上测定月球引力场调和函数的二阶项,比当初 ALSEP 的同类 DVLBI 观测精度提高 2 个量级。这类观测还可以测定引力常数的变化、验证等效原理、测定地月潮汐对月球运动加速作用、精确地探测月球的固体潮等。

4.3 行星际探测器的 VLBI 观测

VLBI 技术用于行星际的观测并不多,尽管如此,这些少量的观测已经取得了惊人的结果,其中最典型的就建立了太阳系动力学参考架与射电地球参考架的联系^[11,12,37,38,40,55,56]。

两个旅行者号飞船飞掠土星、土卫六、天王星和海王星时,由于观测目标的赤纬很低,对它们的导航用到了 DVLBI 技术,并取得较满意的结果。这些观测为以后的同类观测提供了实测依据。特别是文献 [14] 给出的 DDOR 模型成了这类行星际导航观测的标准模型^[57,58,59]。

伽里略飞船是一颗经过专门设计的以宽带 DVLBI 技术为主要导航方法的行星际人造天体,其信号发射带宽达 40MHz。经过 6 年的飞行,它于 1995 年 11 月飞抵环绕木星飞行的轨道,并向木星成功地释放了一系列探测器和绕行卫星。观测时用到了 S/X 双频 DVLBI 观测资料,飞船在空间的观测位置精度好于 10mas。当它返回地球附近时,研究者用 CEI 技术对它进行定轨观测,精度为 20mas^[60-64]。

20 多年来,美国和前苏联发射了一系列绕大行星飞行的轨道探测器和着陆设备。这些探测器包括海盗^[65,66]、火卫 2^[67]、麦哲伦^[68,69,70]、尤里西斯^[71]、伽里略飞船^[63,64]等。一些特殊的 DVLBI 技术在对它们的定轨与导航观测之中得以应用和检验。

表 1 1979 年以来用于建立太阳系动力学参考架的行星际航天器 VLBI 观测

航天器	观测年代	行星	观测量	RMSE	参考文献
海盗着陆器	1980—1981	火星	地心距	12km	74
旅行者 1 号	1979	木星	赤经, 赤纬	0".01, 0".05	14, 74
			地心距	3km	14
火卫 2 飞船	1989	火星	赤经, 赤纬	0".01—0".1	73, 76
			地心距	0.5km	75
尤里西斯飞船	1992	木星	赤经, 赤纬	0".003, 0".006	71
			地心距	3km	71
麦哲伦	1990—1994	金星	赤经, 赤纬	0".003—0".1	77, 78, 79, 80

海盗系列两艘飞船提供了双航天器 SBVLBI 导航观测机会^[20,65]; 麦哲伦金星飞船飞临金星时,对它的定轨和导航观测用到 X 波段较差多普勒技术、S/X 双频 DDOD 观测技术以及 CEI 技术,观测精度比只用多普勒技术要好 3—5 倍^[70,72,73]。用 DVLBI 方法观测这些飞行器在射电参考架中精确地测得了大行星的位置,如 1976 年 7 月到 1982 年 11 月间通过对海盗—火星着陆器的 VLBI 观测,相对地球为火星定轨精度达到 0.1—0.3mas,对建立高精度的太阳系动力学参考架有重要意义^[12,74]。俄罗斯的一个航天与射电天文研究小组通过多年

来对这些探测器所做的一系列 DVLBI 观测, 在十几个 mas 精度上建立了动力学参考架与射电参考架的联系^[37]。JPL 综合了最近的太阳系天体雷达观测、行星际探测器 DVLBI 观测以及月球激光测距观测等各类观测资料, 并选用了这些新的数据类型以及改进后的数据处理方法和小行星摄动模型, 以 J2000.0 历元时刻 IERS 河外射电源天球参考架基本点圈为坐标起算位置, 在 mas 精度上提出了 DE403/LE403 历表, 并把 DE/LE 历表与射电天球参考架的连接精度提高到了 3mas, 与其他方法得到的结果很相符。这些最新的研究结果充分体现了 DVLBI 导航技术的优势。表 1 中列出了这些航天器 VLBI 观测的情况^[20,65,67,74]。

1985—1986 年哈雷彗星回归期间, 各国发射了许多探测飞船。高精度的 DDOR 和 DDOD 技术是它们的主要导航手段^[10,11,38,81,82,83,84]。特别是当前苏联的织女 1、2 号彗星探测飞船 1984 年掠过金星时, 全球 20 个 VLBI 台站共同参与了被它们释放到金星赤道上空大气中的两个高空探测气球的观测, 测定它们的三维位置和速度, 首次探测到金星赤道带季风^[85]。

河外源被大行星遮掩时会导致电磁波的偏折, 用 VLBI 方法观测这一现象可以检验引力理论。最近的两次事件是 1988 年 3 月底到 4 月初致密射电源 P020+113 邻近木星, 以及 1988 年 7 月 19 日射电源 P0507+17 邻近金星。对前者利用局部天球参考架 VLBI 技术方法精确地检测到了偏折的时变曲线, 结果与预报值很相符。对后者的观测尽管没有探测到引力偏折, 但在研究金星相对射电参考架的运动方面得到很有价值的结果^[86,87,88]。准确地预报遮掩事件发生的时刻和观测条件是这类观测的前提。研究者们比较了 DE200 历表给出的大行星和致密射电源的空间位置, 对从现在到 2050 年之间的遮掩事件做出了相互符合的预报^[89,90]。

对恒星探测器的定轨只是在它飞邻太阳时才有很高的精度要求。此时若能在 $10\text{--}12\text{km}\cdot\text{s}^{-2}$ 精度上确切地已知它的非引力加速作用, 那么就可以通过地面无线电技术和 DVLBI 技术测定太阳引力场 J_2 项、检验引力理论以及测定相对论参数^[11,12,38]。

5 今后工作的展望

在过去 VLBI 蓬勃发展的 15 年中, 严重制约 VLBI 应用于太阳系动力学研究的主要因素是行星际空间探测计划的匮乏。世纪之交的几年中, 一些国家的宇航探测计划将付诸实施, 其中包括日本的月球探测计划。利用 VLBI 技术进行行星际导航观测研究将变得活跃, 可望扩展以下方面的工作^[12,38,54] :

(1) 近距离天体发出的射电信号为球面波, 目前航天器的 DVLBI 观测模型中没有完备地考虑该效应。为了适应近距源观测要求, 应建立完善的高精度的 DVLBI 观测理论模型, 改进 VLBI 技术用于近距源观测的不足, Fukushima 最近提出了一个高精度的用于月球探测器 VLBI 观测的模型^[91], 本文作者也已得到了一个类似的模型, 有关内容另文讨论。

(2) 研究有效地消除电磁波传播误差效应特别是消除大气延迟的合理方法。在这方面, 本文作者与他人合作提出了 UNSW931 大气延迟模型^[34]。

(3) 应用 DVLBI 技术方法对航天器进行实时精密定轨和导航观测^[92]。

(4) 继续进行与参考架连接有关的太阳系 VLBI 观测。

(5) 鉴于以往的这类观测在天文领域主要实现了对月球和一些大行星的精密定轨; 实现了太阳系动力学参考架与射电参考架的连接以及少量行星大气的测速研究, 今后这类观测的天文研究重点将着眼于地球同步轨道卫星的精密定轨、月球引力场的观测、月球天平动和月

球固体潮的观测研究、引力常数的变化检测、引力理论的检测、太阳引力场球谐函数的测定等。

我国目前正在大力发展航天事业。预计在 2000 年前后将可能实施月球探测计划。国内 VLBI 网和科研领域应当与航天领域合作, 建立自己的 VLBI 跟踪和导航体系, 开展 VLBI 在地月系的研究工作。一方面可以在以上 1、2、5 诸方面开展理论研究, 并对地球同步卫星 VLBI 精密定轨和 VLBI 测月进行预研究; 另一方面, 在实测领域实现同步轨道卫星的 VLBI 精密定轨, 还可以通过与国外的 VLBI 观测台站的联测, 共同对月球进行 VLBI 探测研究。

参 考 文 献

- [1] Burke B F. *Physics Today*, 1969, 22: 54
- [2] Counselman III C C. *Proc. IEEE*, 1973, 61(9): 1225
- [3] Curkendall DW, McReynolds S R. *J. Spacecraft and Rockets*, 1969, 6(5): 520
- [4] Ondrasik V J, Rourke K H. *AIAA/AAS paper No. AIAA71-399*, 1971
- [5] Ondrasik V J *et al.* *AIAA/AAS paper No. AIAA74-831*, 1974
- [6] Poole S R. *AIAA/AAS paper No. A79-47211*, 1979
- [7] Salzberg I M. *Proc. IEEE*, 1973, 61(9): 1233
- [8] Melbourne W G. *Sci. American*, 1976, 234: 58
- [9] Curkendall D W. *AIAA/AAS paper No. AIAA78-1395*, 1978
- [10] Jordan J F, Wood L J. *J. Astron. Sci.*, 1984, 32(1): 17
- [11] Hildebrand C E *et al.* In: *Biraud F et al eds. Very long baseline interferometry techniques*, Toulouse, 1982, Toulouse: Cepadues, 1983: 55
- [12] Eubanks T M. In: *Dynamic, ephemerides and astrometry in the solar system*, *Proc. of IAU symp. 172*, *Book of abstract*, Paris, 1995: 42
- [13] Christensen C S *et al.* *AIAA/AAS paper No. AIAA80-1648*, 1980
- [14] Border J S *et al.* *AIAA/AAS paper No. AIAA82-1471*, 1982
- [15] Kahn R D, Border J S. *AIAA/AAS paper No. AIAA88-0572*, 1988
- [16] Thurman S W, Estefan J A. *AIAA/AAS paper No. AAS93-163*, 1993
- [17] Edwards C D. *AIAA/AAS paper No. AIAA88-4287*, 1988
- [18] Thurman S W. *AIAA/AAS paper No. AIAA90-2909*, 1990
- [19] Giorgini J D *et al.* *AIAA/AAS paper No. A/AA92-4521*, 1992
- [20] Ananda M P *et al.* In: *Proc. IEEE, position location and navigation symp.*, Atlantic City, N.J., 1980, [s.l.]: [s.n.], 1981: 397
- [21] Folkner W M, Border J S. *AIAA/AAS paper No. AIAA90-2906*, 1990
- [22] Border J S *et al.* *AIAA/AAS paper No. AAS91-191*, 1991
- [23] Folkner W M, Border J S. *AIAA/AAS paper No. AIAA92-4519*, 1992
- [24] Nandi S *et al.* *AIAA/AAS paper No. AAS93-168*, 1993
- [25] Treuhaft R N. *AIAA/AAS paper No. AIAA88-4288*, 1988
- [26] Edwards C D. *AIAA/AAS paper No. AIAA90-2903*, 1990
- [27] Jordan J F *et al.* *AIAA/AAS paper No. AIAA70-1077*, 1970
- [28] Kahn R D, Border J S. *AIAA/AAS paper No. AIAA88-0572*, 1988
- [29] Edwards C D. *JPL, TDA Progress Report, 42-97*, 1989, Pasadena, CA
- [30] Treuhaft R N, Lanyi G E. *Radio Sci.*, 1987, 22: 251
- [31] Elgered G. *J.G.R.*, 1991, 96: 6541
- [32] Herring T A. In: *Proceeding of refraction of transatmospheric signals in geodesy*, [s.l.]: *Netherlands Geodetic Commission Series No. 36*, 1992
- [33] Niell A. In: *Sasao T et al. VLBI technology progress and future observational possibilities*, Kyoto, 1993, Kyoto: 1994: [s.n.], 229

- [34] Yan Haojian, Ping Jingsong. A. J., 1995, 110: 934
- [35] Finger M F, Folker W M. AIAA/AAS paper No. AIAA90-2905, 1990
- [36] Folker W M et al. Astron. Astrophys., 1994, 287: 279
- [37] Shaugyina N V. In: Dynamic, ephemerides and astrometry in the solar system, Proc. of IAU symp. No. 172, Book of abstract, Paris, 1995: 54
- [38] Blume W H. AIAA/AAS paper No. AIAA84-0455, 1984
- [39] Counselman III C C et al. Science, July 1979, 205: 85
- [40] Miller J K, Nicholson F T. J. Astron. Sci., 1984, 32(1): 63
- [41] McElrath T P, Bhat R S. AIAA/AAS paper No. AIAA88-4234, 1988
- [42] Preston R A et al. Science, 1972, 178: 407
- [43] Frauenholz R B, Ellis J. AIAA/AAS pager No. AAS83-421, 1983
- [44] Yunck T P, Wu S C. AIAA/AAS paper No. AIAA82-1446, 1982
- [45] Frauenholz R B. AIAA/AAS paper No. AAS85-358, 1985
- [46] Donivan F F, Border J S. AIAA/AAS paper No. AIAA84-2051, 1984
- [47] Culp R D, Wang T H. AIAA/AAS paper No. AIAA85-1919, 1985
- [48] Liebrecht P. AIAA/AAS paper No. AAS85-429, 1985
- [49] Counselman III C C et al. The Moon, 1973, 8: 484
- [50] King R W et al. J.G.R., 1976, 81(35): 6251
- [51] Counselman III C C et al. Science, 1973, 181: 772
- [52] Slade M A et al. The Moon, 1977, 17: 133
- [53] Ooe M, Hanada H. J. Phys. Earth, 1992, 40: 525
- [54] Hanada H et al. J. Geomag. Geoelectr., 1993, 45: 1405
- [55] Ellis J, McElrath T P. JPL TDA Progress Report 42-93, 1988, Pasadena, CA
- [56] Moultrie B et al. AIAA/AAS paper No. AIAA84-2048, 1984
- [57] Cesarone R J. AIAA/AAS paper No. AIAA80-1701, 1980
- [58] Taylor T H et al. AIAA/AAS paper No. AIAA82-1473, 1982
- [59] Moultrie B et al. AIAA/AAS paper No. AIAA84-2048, 1984
- [60] Doody D F. Sky and Telescope, 1995, 90(6): 30
- [61] Miller L J et al. AIAA/AAS paper No. AIAA83-0102, 1983
- [62] Miller J K, Nicholson F T. J. Astron. Sci., 1984, 32(1): 63
- [63] Thurman S W. JPL TDA Progress Report 42-100, 1990, Pasadena, CA
- [64] Folkner W M. JPL TDA Progress Report 42-102, 1991, Pasadena, CA
- [65] Chao C C et al. AIAA/AAS paper No. AIAA76-0834, 1976
- [66] Standish E M. Astron. Astrophys., 1990, 233: 252
- [67] Linfield R, Ulvestad J. JPL TDA Progress Report 42-92, 1987, Pasadena, CA
- [68] Konopliv A, Wood L J. AIAA/AAS paper No. AIAA90-2907, 1990
- [69] Thurman S W, Badilla G. JPL TDA Progress Report 42-100, 1990, Pasadena, CA
- [70] Engelhardt D B et al. JPL TDA Progress Report 42-101, 1991, Pasadena, CA
- [71] Folkner W M, McElrath T P. AIAA/AAS paper No. AAS93-167, 1993
- [72] Ryne M S. AIAA/AAS paper No. AIAA92-4520, 1992
- [73] Kroger P M et al. AIAA/AAS paper No. AAS93-165, 1993
- [74] Standish E M et al. JPL IOM 314. 10-127, 1995 DE403, Pasadena, CA
- [75] Berthias J P. JPL IOM 314.6-1129, 1990, Pasadena, CA
- [76] Hildebrand C E et al. JPL TDA Progress Report 42-119, 1994, Pasadena, CA
- [77] Folkner W M. JPL IOM 335. 1-92-25, 1992, Pasadena, CA
- [78] Folkner W M. JPL IOM 335. 1-93-22, 1993, Pasadena, CA
- [79] Folkner W M. JPL IOM 335. 1-94-06, 1994, Pasadena, CA
- [80] Folkner W M. JPL IOM 335.1-94-14, 1994, Pasadena, CA
- [81] Jones J B et al. AIAA/AAS paper No. AIAA80-0114, 1980
- [82] Wood L J, Krinik A C. AIAA/AAS paper No. AIAA80-1684, 1980

- [83] Wood L J *et al.* AIAA/AAS paper No. AIAA83-0196, 1983
[84] Efron L *et al.* AIAA/AAS paper No. AIAA84-1981, 1984
[85] Sagdeyev R Z *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1992, 254: 387
[86] Linfield R. JPL TDA Progress Report 42-109, 1992, Pasadena, CA
[87] Treuhft R N, Lowe E T. A. J., 1991, 102. 1897
[88] Linfield R. JPL TDA Progress Report 42-103, 1992, Pasadena, CA
[89] Christensen C S, Thurman S W. JPL TDA Progress Report 42-97, 1989, Pasadena, CA
[90] Fu Yanning, Xia Yifei. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1985, 110: 47
[91] Fukushima T. *Astron. Astrophys.*, 1994, 291: 320
[92] Qian Zhihan. In: *Dynamic, ephemerides and astrometry in the solar system*, Proc. of IAU symp. No. 172, Book of abstract, Paris, 1995: 77

(责任编辑 刘金铭)

Observation of Spacecrafts by VLBI in the Solar System

Ping Jingsong^{1,2} Qian Zhihan¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academic of Sciences, Shanghai 200030*)

(2. *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Abstract

The progress of observing artificial objects by VLBI in the solar system has been overviewed in this paper. The research directions have also been foreseen in this field.

Key words space vehicles—techniques: interferometric