

2007–2020 中国探月工程 VLBI 测量数据集

ISSN 2096-2223

CN 11-6035/N

陈中^{1,2,3,4*}, 郑为民^{1,2,3,4}, 陈肖^{1,4}, 薛岩松^{1,4}

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030
2. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 中国科学院上海天文台, 上海 200030
3. 中国科学院上海天文台射电天文重点实验室, 南京 210033
4. 国家基础学科公共科学数据中心, 北京 100190

摘要: 中国探月工程“绕、落、回”历次任务对探测器的飞行轨道测量和着陆点位置测量有很高的精度要求, 综合测距、测速和甚长基线干涉测量 (VLBI) 方法可快速获得探测器的高精度测量结果。基于“嫦娥1号”至“嫦娥5号”任务中国 VLBI 网实测获得的 VLBI 数据, 建立了“2007–2020 中国探月工程 VLBI 测量数据集”。本数据集时间跨度为 2007–2020 年, 除实时任务数据外, 还包含了各个拓展试验任务和长管任务的测量数据集。这些数据具有重要意义, 已服务于多个嫦娥任务 VLBI 新技术方法验证与系统性能评估, 支持了多次 VLBI 测轨任务的圆满完成, 对我国后续各项探月工程和行星探测, 以及空间天文相关课题的研究, 也具有较高的参考价值。

关键词: 探月工程; VLBI; 测量数据集; 数据库

文献 DOI:

10.11922/11-6035.csd.2021.0068.zh

数据 DOI:

10.11922/sciencedb.j00001.00298

文献分类: 空间天文

收稿日期: 2021-10-11

开放同评: 2021-11-29

录用日期: 2022-02-16

发表日期: 2022-03-30

数据集基本信息简介

数据集名称	2007–2020 年中国探月工程 VLBI 测量数据集
数据通信作者	陈中 (zhchen@shao.ac.cn)
数据作者	陈中、郑为民、陈肖、薛岩松
数据时间范围	2007–2020年
测量的飞行弧段	地月转移轨道、环月轨道、月面降落段、月面探测段、月面起飞段、月地转移轨道
时延测量精度	嫦娥1号: 6.2 ns; 嫦娥2号: 4.9 ns; 嫦娥3号: 0.8 ns; 嫦娥4号中继星: 1.2 ns; 嫦娥4号着陆器: 0.7 ns; 嫦娥5T1: 1.4 ns; 嫦娥5号: 0.4 ns
数据量	嫦娥1号: 1.8 TB; 嫦娥2号: 2.5 TB; 嫦娥3号: 6.8 TB; 嫦娥4号: 5.6 TB; 嫦娥5号再入返回试验器: 1.8 TB; 嫦娥5号: 2.5 TB
数据格式	*.vex, *.tab, *.dat, *.sbi, etc
数据服务系统网址	https://www.vlbi.csdn.cn/
基金项目	国家基础科学公共科学数据中心“射电天文与深空探测数据库”(NBSDC-DB-11), 自然科学基金委天文联合基金(11973011, U1931135)。

* 论文通信作者

陈中: zhchen@shao.ac.cn

数据集组成	本数据集共包括5529511个数据文件，其中：(1) 嫦娥1号274680个数据文件；(2) 嫦娥2号222066个数据文件；(3) 嫦娥3号：866296个数据文件；(4) 嫦娥4号：1875784个数据文件；(5) 嫦娥5号再入返回试验器：414901个数据文件；(6) 嫦娥5号：1875784个数据文件。
-------	--

引言

甚长基线干涉测量（Very Long Baseline Interferometry, VLBI）技术是源自于 20 世纪 60 年代的一项重要射电天文技术，其利用分布距离遥远的多个射电望远镜同步观测，组合为一架虚拟的巨型综合孔径射电望远镜，是空间角分辨率最高的一种天文观测手段，在天体物理和天体测量科学研究方面发挥了重要的作用。该技术应用到空间探测器测量领域，可提供高精度的角位置及变化信息。

我国于 2004 年正式立项开展月球探测工程，按照“绕、落、回”三步走战略实施无人月球探测任务^[1-2]。历经 16 年努力，先后完成了探月工程一期“嫦娥 1 号”（2007 年）、探月工程二期“嫦娥 2 号”（2010 年）和“嫦娥 3 号”（2013 年）、探月工程三期“嫦娥 5 号”月地高速再入返回试验（2014 年）和“嫦娥 5 号”（2020 年）、以及“嫦娥 4 号”（中继星和探测器，2018 年）共 6 次任务，最终按照预定计划，圆满完成了探月工程绕落回三步骤战略。

在我国开展探月工程项目中，对“嫦娥”系列月球探测器的高精度测轨和定位是确保任务完成的重要条件。测控系统采用 S/X 波段统一测控系统（Unified S-Band/X-Band, USB/UXB）+VLBI 测角的测量体制实现协作测量。利用中国 VLBI 网（Chinese VLBI Network, CVN）开展月球探测器实时跟踪观测，探月工程测控系统 VLBI 测轨分系统，获得的 VLBI 高精度测量数据和定轨定位数据，对历次无人月球探测任务的圆满完成发挥了重要作用^[3-5]。

VLBI 测轨分系统主要任务和功能为指挥调度 VLBI 观测站开展对月球探测器的实时同步观测，并利用 4 站 1 中心广域网星型拓扑结构专线连接，实时发送宽带原始观测数据到 VLBI 中心，进行实时双路数据流并行干涉处理，获得 VLBI 时延和时延率数据。同时，VLBI 中心综合利用 VLBI 测量数据与我国深空网测量获得的测距测速数据，对“嫦娥”系列月球探测器进行高精度轨道和位置的快速计算，并发送至北京航天飞行控制中心。

本文介绍了探月工程 VLBI 测量数据资源情况、数据产品的组织与定义、产品的标准规范和共享使用规定等，为用户使用数据资源提供指引和参考。

1 数据采集和处理方法

中国 VLBI 网由 5 个射电望远镜观测站和 1 个 VLBI 中心组成：观测站包括上海天马站（65 m）、上海佘山站（25 m）、北京密云站（50 m）、云南昆明站（40 m）和新疆乌鲁木齐南山站（26 m）；VLBI 中心为位于上海市松江区的 VLBI 深空探测指挥控制与数据处理中心^[6]。5 个观测站具有较好的东西和南北方向的基线分布，如图 1 所示。



图1 中国 VLBI 网组成示意图 (审图号: GS(2022)934 号)

Figure 1 Chinese VLBI network sketch map

VLBI 观测站主要由大口径天线和 VLBI 终端等专用设备组成。天线负责汇聚无线电信号, 天线上的 S/X 致冷接收机接收标校天体射电源信号和月球探测器 VLBI 信标信号, 并将其低噪声放大和锁相变频到适合 VLBI 数字化采集终端接口电平要求的中频信号。数字化终端将射电望远镜射频接收机输出的中频信号转换到基带, 并以二进制的形式记录在磁介质上快速到数据处理中心, 或者利用 e-VLBI 数据传输系统经高速广域通信网直接传送到 VLBI 中心进行后续的数据处理^[7]。

VLBI 中心收到观测站的原始观测数据后, 采用 FX 型相关处理机进行处理。观测站的两路信号

进入相关处理机后, 首先按频率通道进行解码; 然后根据预先计算的时延模型进行整数比特时延补偿; 经过条纹旋转及快速傅里叶变换, 信号从时域变换至频域, 随后完成分数比特时延补偿; 最终两路信号进行共轭相乘及累加积分, 得到目标源的可见度函数^[8]。软件相关处理机为采用高性能计算集群和并行计算技术实现的处理机, 硬件相关处理机为基于现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 芯片实现的处理机, 两者在 VLBI 中心数据处理流水线系统中互为备份关系。

经过软、硬件相关处理机输出的河外射电源和探测器观测数据的相关处理结果, 分别再进行后处理, 计算单通道、双通道或多通道总的群时延和时延率观测值及其误差。利用射电源数据和传播介质误差修正软件提供的误差修正值来标校测量系统, 得到探测器时延和时延率测量结果^[5]。

同波束 VLBI, 即利用射电望远镜的主波束同时观测角距很小的两个 (或多个) 探测器, 通过相关处理后得到每个探测器信号的相关相位并在测站和探测器间进行两次差分, 从而除去太阳等离子体、地球大气和电离层及观测装置内部时延的绝大部分影响, 得到高精度的差分时延观测量^[9]。

联合定轨采用符合精度要求的力学模型, 以 VLBI 和测距测速数据为基础, 利用这些含有误差的观测值和数学模型通过数学方法迭代或滤波计算得到探测器状态及有关参数 (与轨道有关的一些几何和物理参数, 比如系统差、光压系数、大气阻尼系数和经验性的摄动力等) 的最佳估值^[4]。

联合定位基于 VLBI 的时延、时延率数据以及 USB/UXB 测距测速数据, 实现高精度探测器实时单点定位和准实时联合统计定位。在非轨道机动阶段, 轨道根数通常是相对稳定的, 通过对一段时间内所有测量数据的动力学轨道拟合和参数化定轨计算, 进而获得高精度轨道参数。在轨道机动阶段, 基于探测器与地面测站网的相对几何关系不受探测器具体的受力情况影响, 综合 VLBI 时延、时延率以及测距测速观测量数据实时解算探测器的位置和速度参数, 进而获取 6 个瞬时轨道根数^[10]。

传播介质误差修正配置项为各个数据处理单元提供精确的扣除无线电信标信号在穿过地球中性大气和电离层时产生的时延误差。中性大气时延修正可以通过模型和全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 观测数据计算天顶时延, 然后采用映射函数投影到探测器观测方向, 获取斜路径方向的中性大气时延量。在电离层时延消除方面, 主要在观测网处理策略方面开展优化, 采用中国区域 GNSS 网加密的处理策略, 构建了全球电离层时延精修正模型^[11]。

台站监管软件实时监视 VLBI 各观测站设备的工作参数和运行状态, 包括天线、VLBI 终端及原子钟、接收机等设备, 并在上海 VLBI 中心实现对所属各观测站重要设备状态的可视化实时显示^[3]。

运管数据通信负责对 VLBI 中心 2 路并行数据处理系统输出的最终数据结果进行遴选, 然后把工程任务要求的数据产品经专用通信网络发送到北京航天飞行控制中心^[3]。

VLBI 测轨分系统观测数据处理流程如图 2 所示。

其中, 观测纲要配置项负责制定观测站和数据处理所需的参数文件, e-VLBI 实时宽带数据交换配置项负责多台站数据实时传输到 VLBI 中心并分发到 2 路并行的数据处理流水线, 台站监管配置项负责远程监控 VLBI 观测台站主要设备的各类状态信息并可视化呈现, 运管数据通信配置项负责对北京中心总部之间的数据与指令双向交换。

2 数据样本描述

探月工程 VLBI 测轨分系统向测控系统和北京中心提供的数据产品主要是时延、时延率和角位置。此处, 主要针对观测纲要、软件相关处理机、后处理和定轨配置项输出的数据文件接口, 依据为《VLBI 测轨分系统接口说明》。

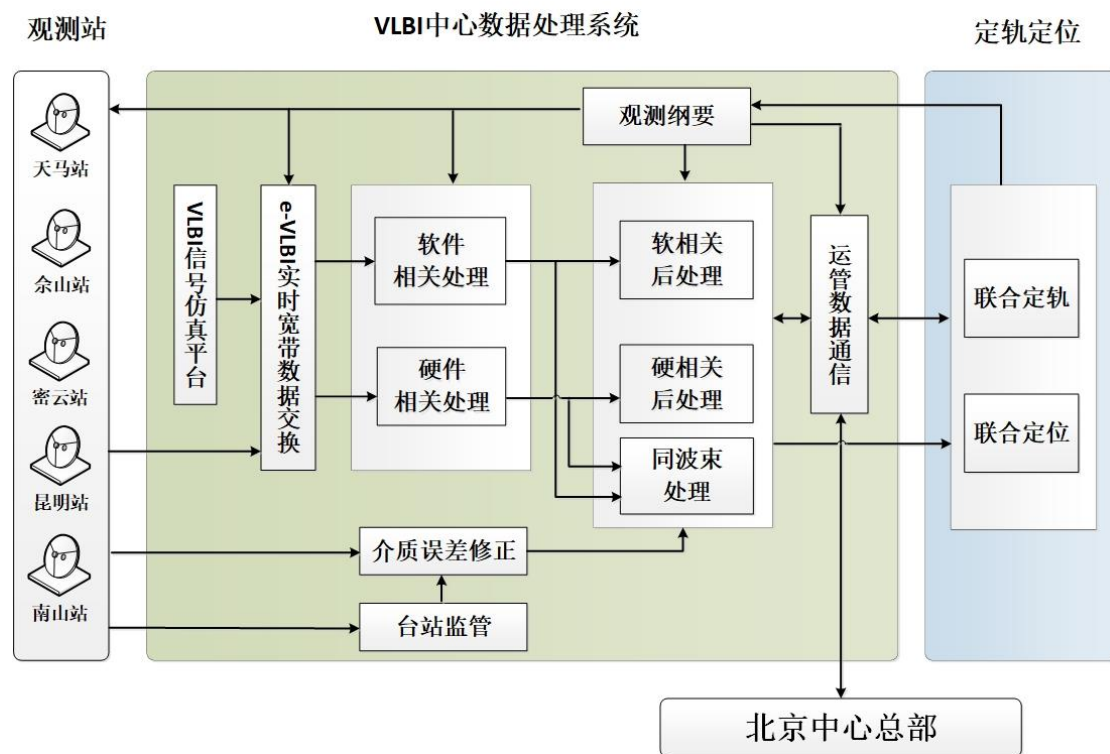


图2 VLBI 测轨分系统工作流程示意图

Figure 2 VLBI orbit determination subsystem workflow diagram

2.1 观测纲要数据文件

(1) 观测纲要文件

观测纲要文件为 ASCII 格式文本文件，格式符合《VEX File Definition/Example》^[12]。

文件名前缀由不超过 6 个的字符组成，全部用小写字母标识，符合 vex 文件定义；后缀为.vex。

(2) 相关处理机运行控制参数文件

相关处理机工作 (job) 文件是 VLBI 相关处理机的输入文件，包含了干涉测量模型、相关处理参数等与所要处理的观测实验有关的所有必要参数。

job 文件与观测纲要同名，但后缀为 job，即<观测纲要名>_<版本号>.job 的形式，全部为小写字母，例如：

- <观测纲要名>_ver1.0.job: 1.0 版本，天文观测用；
- <观测纲要名>_ver1.1.job: 1.1 版本，天文观测用；
- <观测纲要名>_ver1.2.job: 1.2 版本，天文观测用；
- <观测纲要名>_cvn1.0.job: 1.0 版本，CE-1、CE-2、CE-3 任务用；
- <观测纲要名>_cvn1.1.job: 1.1 版本，DOR 试验任务用；
- <观测纲要名>_cvn1.2.job: 1.2 版本，CE-5 任务用。

文件格式说明：job 文件为文本文件。文件的第一行定义文件的格式版本，例如：

Table_rev = 1.0; (1.0 版本) ;

Table_rev = 1.1; (1.1 版本) ;

Table_rev = 1.2; (1.2 版本)。

第一行后面由不同内容的表组成, 每个表的开始标志为“\$<表名>”, 单独占一行, 例如\$MASTER。
空行或“*”开头的行是注释行。同一行的不同参数之间以空格分开。

各表字段的简要说明如表 1 所示。

表 1 观测纲要数据子集相关处理机运行控制参数文件表字段名含义说明

Table 1 Schedule data subset correlator control parameter file table field name description

表字段名	含义说明
\$MASTER	主控制表
\$STATION	观测站列表
\$SOURCE	观测目标列表
\$SATELLITE	探测器信标列表 (仅当探测器观测实验才出现)
\$CLOCK	钟参数表
\$CUSTOM	相关参数表
\$FREQUENCY	频率表
\$FORMAT	格式表
\$MODEL	模型表

(3) 观测纲要摘要文件

文件名定义为<观测纲要名>.sum, 即观测纲要名加.sum 后缀。

格式说明: 前 3 行为文件头说明, 从文件的第 4 行开始, 每行的参数依次为:

①SCAN 编号, 4 位整数;

②射电源名称, 字符串, 12 个字符, 左对齐;

③开始时间, 年月日时分秒 (UTC), 格式为 “YYYY-MM-DD HH:MM:SS”;

④结束时间, 年月日时分秒 (UTC), 格式为 “YYYY-MM-DD HH:MM:SS”;

⑤参加该 SCAN 的台站名称, 字符串, 通常不超过 8 个字符 (国内一般 4 个站, 佘山站和天马站二选一, 以天马站为主, 佘山站为天马站备份站), 最大不超过 20 个字符 (如果有其他国外站参加), 每站占 2 个字符, “Sh”表示上海佘山站, “Bj”表示北京密云站, “Km”表示云南昆明站, “Ur”表示新疆乌鲁木齐南山站, “Tm”表示上海天马站。

列①~⑤之间采用空格分隔。

2.2 VLBI 时延后处理数据文件

(1) 探测器时延文件

文件命名规则为“d_”+信号标识+“.dat”。文件连续存放。不同基线数据放在一个文件中。

信号标识码的定义:

① S1: 试验器 S1 信号时延;

② S2: 试验器 S2 信号时延;

③ X1: 试验器 X1 信号时延;

④ X2: 试验器 X2 信号时延;

⑤ X0: 试验器 X 波段带宽综合时延。

时延文件为 ASCII 格式，每行包含一条测量数据，使用空格分隔数据内容，共包括 15 列内容，如表 2 所示。

表 2 后处理数据子集探测器时延文件格式说明

Table 2 Post-processing data subset prober delay file format description

列	定义说明
1	年，观测历元，UTC。四位整数
2	月，两位整数
3	日，两位整数
4	时，两位整数
5	分，两位整数
6	秒，D12.6
7	台站 1 的数字标识。基线参考台站。定义：1-佘山 25 m 站，2-密云站，3-昆明站，4-乌鲁木齐站，5-天马 65 m 站
8	台站 2 的数字标识。台站数字标识定义同上
9	已包含设备修正和介质修正（11、12、13）
10	时延测量形式误差，单位：ns。D10.3，表示为 Fortran 格式有效数字位数，整数部分占 16 个字符，小数部分 6 个字符
11	设备时延修正，单位：ns。D16.3
12	电离层时延修正，单位：ns。D10.3
13	中性大气时延修正，单位：ns。D10.3
14	试验器残余时延，单位：ns。D13.3
15	参考频率，单位：MHz。D8.2

（2）探测器时延率文件

文件命名规则为“r_”+信号标识+“.dat”。文件连续存放。不同基线数据放在一个文件中。信号标识码的定义与时延文件一致。

时延率文件为 ASCII 格式，每行包含一条测量数据，使用空格分隔数据内容，共包括 15 列内容，如表 3 所示。

表 3 后处理数据子集探测器时延率文件格式说明

Table 3 Post-processing data subset prober delay rate file format description

列	定义说明
1	年，观测历元，UTC。四位整数
2	月，两位整数
3	日，两位整数
4	时，两位整数

列	定义说明
5	分，两位整数
6	秒。D12.6
7	台站 1 的数字标识。基线参考台站。定义：1-佘山 25 米站，2-密云站，3-昆明站，4-乌鲁木齐站，5-天马 65 m 站
8	台站 2 的数字标识。台站数字标识定义同上
9	时延率观测值，单位：ps/s。D16.3。已包含设备修正和介质修正（11、12、13）
10	时延率测量形式误差，单位：ps/s。D10.3
11	设备时延率修正，单位：ps/s。D16.3
12	电离层时延率修正，单位：ps/s。D10.3
13	中性大气时延率修正，单位：ps/s。D10.3
14	试验器残余时延率，单位：ps/s。D13.3
15	参考频率，单位：MHz。D8.2

3 数据质量控制和评估

探月工程 VLBI 测量数据的数据质量控制由各个数据处理软件配置项在程序中进行控制和记录。对于数值处于明显不合理的范围进行剔除，对于正常误差范围内的数据予以保留。在观测与处理过程中，各个配置项输出的数据产品还包括了数据日志信息，对数据的连续性、数据文件的完整性、数据断点和缺失等进行详细的记录，可作为数据使用时的参考依据。在运行管理配置项，还对正式输出的工程测量数据进行遴选，作为 VLBI 测轨分系统规范化的最终数据产品。数据质量控制由 VLBI 测轨分系统各软件配置项所制定的经分系统评审通过的软件工程化系列文档进行详细规定和约束。

对于 VLBI 测量数据精度的评估，采用对各个观测试验所采用的观测频段对应的时延、时延率、定轨和定位结果进行综合统计分析得到^[13]。

4 数据价值

探月工程历次任务 VLBI 测量数据是我国射电天文观测网服务于国家月球与深空探测重大专项过程中积累的独一无二的重要数据集。数据集是综合了多个类型的基础科学数据和航天工程测量数据的数据产品，其突出的特点是在探月工程中经过实际应用检验的可信数据集。历次“嫦娥”型号任务 VLBI 时延与时延率数据精度统计如表 4 所示。

表 4 历次“嫦娥”型号任务 VLBI 时延与时延率数据精度统计

Table 4 Data precision statistics of previous Chang'E mission VLBI delay and delay rate

型号任务	观测波段	时延 (ns)	时延率
CE-1	S 波段	6.2	0.7
CE-2	S 波段	4.9	0.6
CE-3	X 波段	0.8	0.9

型号任务	观测波段	时延 (ns)	时延率
CE-4ZJ	S 波段	1.2	1.1
CE-4	X 波段	0.7	0.7
CE-5T1	X/S 波段	1.4/3.4	0.7/1.1
CE-5	X 波段	0.4	0.4

利用前期型号任务的数据集，为下一次月球与深空探测任务的可行性论证、关键设备研发和技术攻关、系统性能测试验证和联调联试及系统合练等顺利开展，奠定了坚实的数据资源基础。例如，在 CE-4 任务准备阶段中，使用了 CE-2 和 CE-5T1 的 S 波段测量数据；在 CE-5 任务准备阶段中，使用了 CE-3 和 CE-5T1 的 X 波段测量数据。有了这些历史测量数据集，为系统研发测试提供了极大的帮助，加快速度减少难度，并增强了 VLBI 系统的可靠性。

利用 VLBI 测量数据，为我国后续的无人月球探测工程、载人探月工程、包括火星采样返回、小行星探测、木星探测等行星探测工程、乃至太阳系边缘探测工程等，提供第一手数据资料和研究基础。同时，利用 VLBI 测量数据及其他探测数据，还可以开展月球重力场和太阳风与星际介质等行星科学研究，通过数据挖掘和利用，具有更广阔的潜在科研价值。

5 数据可用性声明

上海天文台 VLBI 中心同时也是国家基础学科公共科学数据中心“射电天文与深空探测数据库” (<https://www.vlbi.csdb.cn/>) 的运行依托部门，负责系统运维和数据资源服务。用户可通过上海市空间导航与定位技术重点实验室，依据《探月工程 VLBI 测量数据管理办法》(2014) 提出数据申请。

上海天文台科研处负责数据申请的审批和服务。射电天文与深空探测数据库服务平台提供本数据集数据资源的查询和检索服务。

致 谢

本文的完成得到了探月工程测控系统 VLBI 测轨分系统的大力支持，以及国家基础学科公共科学数据中心的帮助，在此表示衷心的感谢。

数据作者分工职责

陈中（1979—），男，浙江省温岭市人，博士，高级工程师，研究方向为天文技术与方法。主要承担工作：射电天文与深空探测数据库的总体技术与运行考核，专题数据建设与用户服务等，本数据库的数据服务专员。

郑为民（1970—），男，浙江省杭州市人，博士，研究员，研究方向为天文技术与方法。主要承担工作：射电天文与深空探测数据库的项目负责人。

陈肖（1961—），女，上海市人，学士，正高级工程师，研究方向为计算机工程技术。主要承担工作：射电天文与深空探测数据库的体系平台。

薛岩松（1981—），男，黑龙江省虎林市人，博士，高级工程师，研究方向为地球科学与信息系统。主要承担工作：射电天文与深空探测数据库的开发与维护，本数据库技术服务专员。

参考文献

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351–358. DOI:10.3321/j.issn: 1001-8166.2004.03.001. [OUYANG Z Y. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 351–358. DOI:10.3321/j.issn: 1001-8166.2004.03.001.]
- [2] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405–416. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.05.001. [WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405–416. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.05.001.]
- [3] 洪晓瑜, 张秀忠, 郑为民, 等. VLBI 技术研究进展及在中国探月工程的应用[J]. 深空探测学报, 2020, 7(4): 321–331. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200030. [HONG X Y, ZHANG X Z, ZHENG W M, et al. Research progress of VLBI technology and application to China lunar exploration project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 321–331. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200030.]
- [4] 黄勇, 李培佳, 胡小工. VLBI 月球定轨和月面定位技术及其应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 340–346. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200022. [HUANG Y, LI P J, HU X G. Contribution of VLBI for the orbit determination to Chinese lunar exploration project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 340–346. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200022.]
- [5] 王广利, 洪晓瑜, 刘庆会, 等. “嫦娥 4 号”高精度 VLBI 测轨技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 332–339. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200026. [WANG G L, HONG X Y, LIU Q H, et al. High-precision VLBI orbit measurement technology in the Chang'E-4 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 332–339. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200026.]
- [6] 陈中, 郑为民. 中国 VLBI 网和 e-VLB 技术在探月与深空探测工程中的应用与展望[M]. 中国科学院等. 中国科研信息化蓝皮书 2020. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [7] 陈中, 郑为民, 陈肖. 中国 e-VLBI 网的建立及应用[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2015(1): 136–147. [CHEN Z, ZHENG W M, CHEN X. E-VLBI applications in Chinese VLBI network[J]. Annals of Shanghai Observatory Academica Sinica, 2015(1): 136–147.]
- [8] 郑为民, 张娟, 徐志骏, 等. 实时 VLBI 处理机技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 354–361. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200027. [ZHENG W M, ZHANG J, XU Z J, et al. Real-time correlator technologies of VLBI[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 354–361. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200027.]
- [9] 吴伟仁, 刘庆会, 黄勇, 等. “嫦娥 3 号”月面探测器同波束干涉测量系统的设计与实现[J]. 深空探测学报, 2015, 2(1): 34–42. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.01.005. [WU W R, LIU Q H, HUANG Y, et al. Design and realization of same-beam interferometry measurement of CE-3[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(1): 34–42. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.01.005.]
- [10] 郭丽, 张宇, 李金岭, 等. 基于 VLBI 的高精度定位[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(6): 605–611. DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200021. [GUO L, ZHANG Y, LI J L, et al. The high precise positioning reduction based on VLBI[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(6): 605–

611. DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200021.]
- [11] 周伟莉, 宋淑丽, 李培佳, 等. 基于 GNSS 加密网的 VLBI 电离层时延修正方法[J]. 深空探测学报, 2020, 7(4): 362–370. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200056. [ZHOU W L, SONG S L, LI P J, et al. Ionospheric TEC correction for VLBI based on GNSS density network[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 362–370. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200056.]
- [12] VEX File Definition/Example[EB/OL]. (2002-01-30.) <https://vlbi.org/wp-content/uploads/2019/03/vex-definition-15b1.pdf>.
- [13] 黄勇, 李培佳, 胡小工. VLBI 月球定轨和月面定位技术及其应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 340–346. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200022. [HUANG Y, LI P J, HU X G. Contribution of VLBI for the orbit determination to Chinese lunar exploration project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 340–346. DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200022.]

论文引用格式

陈中, 郑为民, 陈肖, 等. 2007–2020 中国探月工程 VLBI 测量数据集[J/OL]. 中国科学数据, 2022, 7(1). (2022-02-09). DOI: 10.11922/11-6035.csd.2021.0068.zh.

数据引用格式

陈中, 郑为民, 陈肖, 等. 2007–2020 中国探月工程 VLBI 测量数据集[DS/OL]. 射电天文与深空探测数据库. <https://www.vlbi.csd.cn/>.

A VLBI measurement dataset of China Lunar Exploration

Program 2007 – 2020

CHEN Zhong^{1,2,3,4*}, ZHENG Weimin^{1,2,3,4}, CHEN Xiao^{1,4}, XUE Yansong^{1,4}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 200030, P.R. China
2. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030, P.R. China
3. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Science, Nanjing 210033, P.R. China
4. National Basic Science Data Center, Beijing 100190, P.R. China

*Email: zhchen@shao.ac.cn

Abstract: China Lunar Exploration Program’s (CLEP) “Orbiting, Landing, Returning” missions require high accuracy of orbit and landing position measurement. Combined with range and range rate data with Very Long Baseline Interferometry (VLBI) method, the high accuracy probes orbit could be quickly obtained. The “CLEP VLBI measurement dataset 2007–2020” was created based on the data collected during the missions of CLEP Chang’e-1 to Chang’e-5 that Chinese VLBI network participated in. The dataset covers the data from 2007 to 2020. Besides the real-time mission data, it also includes other VLBI data of extensive

experiments and the long-term operation observations. The dataset is significant and can provide VLBI performance assessments and validations of multiple Chang'e missions. More importantly, it has supported all the VLBI orbit tracking tasks for CLEP. It also has irreplaceable important value for CLEP and other planetary exploration projects in the near future, as well as for space astronomy research.

Keywords: CLEP; VLBI; measurement data set; database

Dataset Profile

Title	A VLBI measurement dataset of China Lunar Exploration Program 2007–2020
Data corresponding author	CHEN Zhong(zhchen@shao.ac.cn)
Data authors	CHEN Zhong, ZHENG Weimin, CHEN Xiao, XUE Yansong
Time range	2007–2020
Measured flight arcs	Earth-Moon transfer trajectory, Lunar orbiting trajectory, Lunar soft landing phase, Moon surface exploration phase, Moon surface take-off phase, Moon-Earth transfer trajectory
Accuracy of Time Delay Measurement	CE-1: 6.2ns, CE-2: 4.9ns, CE-3: 0.8ns, CE-4ZJ: 1.2ns, CE-4: 0.7ns, CE-5T1: 1.4ns, CE-5: 0.4ns.
Data volume	CE-1: 1.8 TB, CE-2: 2.5 TB, CE-3: 6.8 TB, CE-4: 5.6 TB, CE-5T1: 1.8 TB, CE-5: 2.5 TB.
Data format	*.vex, *.tab, *.dat, *.sbi, etc.
Data service system	< https://www.vlbi.csdb.cn/ >
Sources of funding	National Basic Science Data Center” Radio Astronomy and Deep Space Exploration Database” (NBSDC-DB-11); National Natural Science Foundation of China-Joint Foundation for Astronomy of Chinese Academy of Sciences (11973011, U1931135).
Dataset composition	The dataset contains in total 5529511 files, among which: (1) CE-1: 274680 files, (2) CE-2: 222066 files, (3) CE-3: 866296 files, (4) CE-4: 1875784 files, (5) CE-5T1: 414901 files, (6) CE-5: 1875784 files.