论文

深空探测器的VLBI逆相位参考定位

聂振华^{1,2}, 张波^{2*}, 乔书波¹, 丁敏杰^{1,2}

1. 解放军信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450001;

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 联系人, E-mail: zb@shao.ac.cn

收稿日期: 2017-01-17; 接受日期: 2017-03-24; 网络出版日期: 2017-06-15

国家自然科学基金(编号: U1431115, U1331205, 11673051)、上海市自然科学基金(编号: 15ZR1446900)和中国科学院百人计划项目资助

摘要 深空探测器的VLBI相位参考定位一般是以河外源为参考源, 深空探测器为目标源, 通过对河外源的观测数据进行条纹拟合, 获得延迟和延迟率, 用以改正这些效应对深空探测器的VLBI观测相位数据的影响, 由于两者角距较近, 主要误差源如传播介质延迟的影响通过对两者相位的差分得以基本消除, 通过成图后可以获得两者的高精度相对位置. 然而, 这种传统的VLBI正相位参考定位方法对河外源的强度有较高的要求, 即观测数据必须有足够高的信噪比来确保可靠的条纹拟合结果. 通常深空探测器射电信号的流量密度远高于河外源, 为此本文提出逆相位参考定位方法, 即以行星探测器作为参考源, 对相位校准后的河外源进行成图, 来实现高精度的相对定位. 本文基于实测的VLBI观测资料, 验证了该方法的可行性; 并通过模拟资料表明, 在河外源较弱的情况下, 逆相位参考可以获得更高精度的相对定位结果.

关键词 行星探测器, VLBI相位参考定位, VLBI逆相位参考定位, 模拟弱源

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br

1 引言

甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术采用高稳定度原子钟作为独立本振系统, 其基线长度原则上不受限制, 而角分辨率与基线长度成正比, 因而能够获得极高的角分辨率^[1], 自20世纪70年代被用于航天器的精密定轨以来, 在深空探测领域发挥了重要的作用^[2-4].

深空探测器在天球上的位置变化很快, 为了快速测定它的精确角位置, 通常采用差分VLBI方法, 即对

探测器与其附近位置精确已知的河外致密射电源进行交替或同时观测, 通过获得两者差分VLBI观测量来实现相对定位. 当差分观测量为群延迟时, 比如使用探测器上的DOR (Differential One-Way Range)信号进行差分VLBI测量时, 就称为 Δ DOR技术^[5].

当观测量是差分相位时, 则可采用相延迟拟合与相位参考成图两种方式来实现相对定位^[6].

VLBI相位参考是天文观测中对弱源成图以及实施高精度相对定位的一种常用方法. 相比相延迟拟合方法要求两颗源都需要足够强以实现条纹拟合, 相位

引用格式: 聂振华, 张波, 乔书波, 等. 深空探测器的VLBI逆相位参考定位. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 129502
Nie Z H, Zhang B, Qiao S B, et al. Positioning of spacecraft with VLBI inverse phase reference (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 129502, doi: 10.1360/SSPMA2017-00050

参考成图则仅要求其中一颗可做条纹拟合即可. 其基本原理是基于VLBI观测到的干涉条纹的相位包含了传播介质(电离层和对流层)和信号接收电子设备等造成的延迟效应, 以及射电源、台站位置和钟差不准确等所导致的系统差. 当两颗射电源角距很近时, 通过对两颗源进行同时或者交替观测时, 这些影响因素基本相同. 对其中强源的观测相位数据进行条纹拟合可以获得对这些效应的改正, 从而也可应用到弱源^[7]. 两者的差分相位基本消除了共同的误差源, 但保留了两者的相对位置信息, 因而可实现高精度的相对定位.

在VLBI相位参考测量中, 对参考源的选取有两点要求: (1) 参考源离目标源的角距尽可能近(一般 $<5^\circ$, 观测频率越高, 要求角距越近); (2) 参考源流量密度强且结构简单(近似点源). 然而, 在传统的VLBI相位参考对深空探测器进行定位时, 通常难以在足够近的角距内找到合适的河外参考源. 通常深空探测器的流量密度远高于河外射电源, 与传统相位参考(为方便比较称之为正相位参考)方法不同, 本文提出逆相位参考方法, 即以深空探测器为参考源, 以河外源为目标源, 来实现两者的相对角位置测量.

相位参考处理方法主要是针对相位中的误差进行修正, 包括相位随频率的变化误差和相位随时间的变化误差两大类: (1) 频率项, 即相位随频率的变化误差, 主要来自于大气和电离层的延迟改正, 这部分可通过类测地观测, 以及GPS观测得到的电离层模型加以改正; (2) 时间项, 即相位随时间的变化误差: 通过对较强的卫星信号求解, 可以求出比较精确的延迟率, 从而改正这部分的误差. 因而在频率项改正基本完成的基础上, 可以采用卫星信号的观测数据来校准时间项, 最终实现两者的相对角位置定位.

本文以甚长基线阵列(Very Long Baseline Array, VLBA)^[8,9]对土星探测器CASSINI精确定位的观测数据为例, 进行VLBI逆相位参考处理的数据处理, 并与

正相位参考处理的结果进行比较, 验证该方法的可行性.

此外, 由于采取深空探测器作为相位参考源, 理论上可以放宽对河外射电源的要求, 我们基于已有的实测数据模拟弱的河外源, 比较了正逆两种相位参考的结果, 证明了逆相位参考方法对更弱的河外源的可行性及优势.

2 观测情况

本文采用的数据来自美国VLBA对土星探测器CASSINI在8.4 GHz (X波段)的多历元相位参考观测数据, 其中CASSINI的先验位置精度在数个mas^[10]. 每个历元为4h的长度, 表1列出这些观测历元的基本信息. VLBA为美国的VLBI天文专属观测网, 由10个25m射电望远镜组成, 台站分布涵盖美国本土, 还包括位于维尔京群岛和夏威夷岛的两个台站. 基线长度为236.6–8631.6km, 观测频率覆盖450MHz–86GHz, 为目前国际上最先进的VLBI观测网之一.

各历元均采用交替观测模式, 即在CASSINI及其附近河外源(表2)按每隔2–3 min的方式交替观测. 为了改正对流层延迟, 在相位参考的前后加了两段约0.5h的类测地VLBI观测, 即以类似测地观测的频率设置观测一组位置精确已知且比较强的河外射电源, 用以求解每段观测平均时刻的对流层天顶延迟, 通过内插到相位参考观测时刻, 用以改正对流层延迟的影响. 此外, 为了改正VLBI接收信号的电子设备延迟以及带通效应, 在整个观测实验的前中后段观测了几颗强源.

观测频率设置时采用右极化, 4路中频(Intermediate Frequency, IF)信号涵盖462MHz的范围, 以改善群延迟的测定. 每个中频的带宽为8MHz, 中心频率约为8.428, 8.500, 8.790和8.890GHz. 由于CASSINI信号频率范围相对较窄, 仅在第1路中频信号中, 为获取较高的谱分

表1 观测实验及所使用的VLBA天线信息

Table 1 Observation programs and the participated VLBA antennas

观测实验	观测日期	VLBA天线
BJ061B	2007年3月1日	SC, HN, NL, FD, LA, PT, KP, OV, BR, MK
BJ061C	2007年6月7日	SC, HN, NL, FD, LA, PT, KP, OV, BR, MK
BJ061F	2008年8月1日	SC, HN, NL, FD, LA, PT, KP, OV, BR, MK
BJ061G	2008年11月11日	HN, NL, FD, LA, PT, KP, OV, BR, MK

表 2 观测实验和相位参考源信息

Table 2 Observation programs and the phase reference sources

观测实验	日期	参考源	角距 (deg)	流量密度 (Jy)
BJ061B	2007年3月	J0931+1414	<2	0.15
BJ061C	2007年6月	J0931+1414	<2	0.15
BJ061F	2008年8月	J1025+1253	<3	0.23
BJ061G	2008年11月	J1127+0555	<0.5	0.10

分辨率, 每路中频分为256个通道^[10].

3 数据处理

对于VLBI相位参考相对定位, 数据处理的首要任务是要消除如下几个因素对观测相位的影响: 射电源(主要指坐标和结构)、传播介质(主要指电离层和对流层)以及观测台站(主要指位置). 在进行相位参考成图之前, 为了确保相位参考成图的质量, 我们需要对以上3方面造成的影响进行校准处理.

数据处理采用天文图像处理系统(AIPS, 详见网站(www.aips.nrao.edu/aipsdoc.html))教程)软件按照图1所示的流程对各历元的数据进行处理. 主要包括以下几个步骤: 数据导入、初始相位校准、电离层改正、对流层改正、振幅改正、条纹拟合^[11]和最后的相位参考成图操作. 逆相位参考处理的步骤同正相位参考处理的基本一致, 主要区别是条纹拟合和相位参考成图的两项操作中, 将河外源换为深空探测器.

3.1 导入数据

观测数据可从网站(<https://archive.nrao.edu/archive/advquery.js>)下载得到, 然后用AIPS中的FITLD任务进行数据导入, IMHEAD命令进行数据的头文件信息查看. 可由此查看此次观测的天线、观测代码和观测日期, 也可查看此次观测当中的偏振个数(Stokes)、观测的中频个数(IF)以及通道个数(Channel). 此处的观测为4个IF, 每个IF有256个通道. 另外, 还用PRTAN和LISTR任务分别进行了天线信息和观测的详细情况的查看. 通过对这些基本信息的查看, 确保观测数据完整和准确.

3.2 初始相位校准

VLBI的观测台站和射电源的位置分别在地球参

图 1 数据处理流程图

Figure 1 Data processing flow chart.

考架和天球参考架中描述, 两个参考架的转换需要采用精确的地球定向参数. VLBI的观测资料在相关处理时所用的地球定向参数通常难以采用最新的实测数据, 而存在一定的误差, 需要进行相应的改正.

射电望远镜在跟踪观测射电源时, 其星位角也在发生变化, 对观测相位造成一定的影响. 此外, 相位参考时, 射电源的初始位置也需要满足一定的要求, 因为位置偏差的二阶项会导致额外的位置偏差并使得成图的质量变低, 从而影响相对定位的精度^[12]. 这些效应可在AIPS中通过相应的任务加以改正^[13].

3.3 电离层改正

受电离层折射的影响, 信号在穿过电离层时, 其

传播速度通常会发生改变, 传播路径也会发生弯曲, 从而使得两台站接收到信号的时延产生时延差. 我们需要对电离层延迟进行改正, 以使得最终测得的时延值更加精确. 电离层延迟的公式如下所示:

$$\Delta\rho_{\text{ion}} = \frac{40.28}{f^2} \times \text{TEC},$$

即电离层延迟与总电子含量TEC (Total Electron Content)以及观测频率有关. 可通过IGS (International GNSS Service)提供的相应观测日期的全球TEC分布图数据, 再通过AIPS软件中的TECOR任务对下载的数据进行处理, 以实现电离层延迟的改正.

3.4 对流层延迟改正

利用VLBI进行相位参考观测时, 为了获得更高的相对天体测量精度, 必须获得更精确的大气延迟改正, 在此情况下, 常用的方法是在相位参考观测时, 穿插类测地VLBI观测. 所谓类测地VLBI观测, 即采用与常规测地观测类似的频率设置模式观测处于不同方位和俯角的多颗位置精确已知的河外射电源. 为获得更高精度的群延迟, 而采用多个中频的频率跨度达数百MHz以实现带宽综合来提供群延迟的测量精度, 获得更可靠的对流层延迟改正. 其基本原理是在经过3.2节的初始相位校准和3.3节的电离层改正之后, 类测地观测获得的残余群延迟主要来自对流层和钟差, 对流层延迟可以模型化为天顶延迟和主要与高度角有关的映射函数^[14]的乘积, 从而可通过最小二乘法拟合求解得到. AIPS里面的CLCOR任务可读取拟合结果, 以实现对流层延迟的改正.

3.5 手动相位校准

为了提高时延和时延率的测定精度, 通常采用多个IF组成较宽的带宽, 每个IF的中心频率都不一样, 对电子设备的响应不同, 因而造成各个IF的延迟及延迟率也不同. 因此, 需要通过观测一颗较强且位置精确已知的源(即校准源)来将这些影响去除. 具体而言, 手动相位改正是针对已经选好的校准源在选好的时段下进行条纹拟合操作, 得到各个IF之间时延和时延率的差异, 并将得到的解运用到其他源的数据上, 以补齐上述差异. 用于校准各个IF相位差的校准源, 通常要求很强而且位置精确已知. 为了保证手动相位校准

的成功, 需要观测至少三次手动相位校准源. 实际数据处理中选择每条基线都能获得成功的条纹拟合结果, 且信噪比较高的那次观测做最终的手动相位校准.

3.6 条纹拟合

正相位参考处理时, 进行完上述各项改正之后, 对作为参考源的河外源进行条纹拟合, 求解多波段群延迟和延迟率. 对于干涉仪成图而言, 条纹拟合的目的主要是消除相位随时间以及频率的变化, 从而可在时间和频率域积分以便提高信噪比. 当台站和位置以及EOP等几何参数都比较准确时, 延迟效应则主要来自于传播介质. 然而, 通过前述方法对传播介质的改正, 可将残余效应显著减小. 因而在选取深空探测器作为参考源实施逆相位参考条纹拟合时, 可仅求解延迟率. 深空探测器的射电信号通常都是集中在某个或某几个频段(见图2), 而非河外射电源的连续谱. 因而在条纹拟合时, 我们仅选取其中信号非常强的通道作为参考通道(见表3), 对该通道进行条纹拟合, 求解延迟率.

由图2中的图形情况可知, 逆相位参考处理时选择的通道范围及IMAGR成图时所选择的最强通道的情况如表3所示.

图2 (网络版彩图)4个历元的CASSINI在KP-PT基线上的互相关谱. (a)–(d)分别表示VLBA观测实验BJ061B, BJ061C, BJ061F和BJ061G. 窄的振幅谱峰为航天器载波和次载波信号, 而较宽的谱峰为遥测信号的调制

Figure 2 (Color online) CASSINI cross power spectra of baseline KP-PT at four epochs. (a)–(d) denote the VLBA programs BJ061B, BJ061C, BJ061F and BJ061G, respectively. The narrow amplitude peaks are the carrier and subcarriers of the spacecraft signal and the broad peaks are created by telemetry modulation.

表 3 逆相位参考过程中, 各观测实验数据处理时所选择的通道范围及最强通道情况

Table 3 The selected channel range and the strongest channel at 4 epochs in inverse phase referencing producing

观测实验	Bchan	Echan	最强通道
BJ061B	150	200	176
BJ061C	150	200	185
BJ061F	150	200	183
BJ061G	170	190	180

3.7 相位参考

相位参考的过程实际就是将参考源条纹拟合的结果来校准目标源的相位. 当使用AIPS进行数据处理的时候, 并不改变数据本身, 而是生成对数据进行校准的信息, 并存储在相应的表里. 其中, 最重要的两个表是SN表和CL表, 数据校准的整个过程实际上可看作CL表建立和更新的过程. CL表是校准表, 通过AIPS里的相关任务可将数据校准的信息存储在CL表内, SN表内存储的是一些解(比如条纹拟合)的信息, CL表可通过选择使用SN表里面的解来进行版本的升级和更新, 这样就使得CL表里面不仅有着校准的信息还有着拟合的解的信息. 通过将校准源的相位改正信息存储在新建的SN表内, 再对所有源通过CLCAL任务将SN表里的信息应用到CL表内, 以实现将校准源的相位改正信息用到目标源上的目的.

3.8 成图

当上述的校准过程完成之后, 参考源和目标源的相位信息主要包括源结构及其相对参考源设定位置为图像中心的相对位置信息. 由于CASSINI的信号仅集中在某一频段, 在成图时仅选取其中的一段(见表3). 通过AIPS中IMAGR任务对参考源和目标源进行成图, 然后通过JMFIT任务对亮度分布图进行二维高斯拟合可获得峰值相对于图像中心的位置, 并由此获得两源

的相对位置.

4 实验结果与分析

4.1 逆相位参考可行性的验证

为验证我们数据处理方法的正确性, 首先对所有数据进行了正相位参考资料处理, 并将结果与由其他作者独立处理并已经发表的结果^[10]进行比较, 如表4所示, 其中文献[10]给出位置偏差值之外, 还给出了对这些偏差值误差的估计, 该误差包含了残余大气延迟造成的系统差和河外参考源本身的位置误差. 两种方法结果的差值基本在误差范围内, 表明我们的数据处理方法是可靠的.

以观测实验BJ061G为例, 图3和4分别表示此历元经过相位参考处理后和逆相位参考处理后的成图情况. 根据图3和4的成图结果, 我们可以分别获得CASSINI与河外源相对于图像中心的位置. 表5列出了逆相位参考与正相位参考处理得到的相对位置结果的比较. 正和逆相位参考时分别以河外源和CASSINI为位置参考点, 因而两种方法获得的结果在数值上符号相反. 结合表中的数据可知, 正逆两种相位参考方法得到相对位置结果在其联合误差范围内, 因而是相符合的, 由此验证了逆相位参考的可行性.

4.2 逆相位参考的优势

由于逆相位参考时, 仅需要对CASSINI进行条纹拟合, 因而对河外源的强度要求可以放低. 理论上, 在河外源非常弱以至于条纹拟合不能获得很高成功率的情况下, 正相位参考难以获得较好的结果, 而逆相位参考则可以获得较好的结果. 为此, 我们选取了BJ061G的数据进行验证. 由表2可知, BJ061G的河外源具有最小的流量密度, 该历元的参考源强度最弱. 通过表5的比较, 发现正逆相位参考的结果没有明显差异, 而且从实

表 4 本文与文献[10]得到的CASSINI位置偏差的结果对比

Table 4 Comparison of CASSINI position offsets relative to the reference sources between ref. [10] and this work

历元	文献[10] E-W偏差 (mas)	文献[10] N-S偏差 (mas)	本文E-W偏差 (mas)	本文N-S偏差 (mas)
BJ061B	-2.1±0.2	1.3±0.4	-1.8	1.2
BJ061C	3.8±0.2	-0.4±0.4	3.9	-0.4
BJ061F	0.6±0.2	0.0±0.4	0.7	0.0
BJ061G	0.3±0.2	0.9±0.4	0.4	0.8

图3 VLBA观测实验BJ061G正相位参考(以J1127+0555为相位参考源)的成图结果. (a) 探测器CASSINI的成图; (b) 河外源J1127+0555的成图结果. 源名字和恢复波束分别在图形的左上角和左下角. 右下角表示的是源的亮度峰值. 图中等值线最外层为10 mJy, 由外向内按照每1.0 mJy线性递增

Figure 3 Phase-referenced images from the VLBA program BJ061G with J1127+0555 served as phase reference. (a) and (b) are images for CASSINI and J1127+0555, respectively. Source names are in the upper left corner and restoring beams are in the lower left corner of each panel. Source peaks are in the lower right corner of each panel. In both cases, contour levels are spaced linearly at 1.0 mJy increments, starting at 10 mJy.

际的数据处理中河外源仍可以获得很好的条纹拟合结果, 表明该源没有弱到可以验证逆相位参考的程度. 为此, 我们将依据原有的观测数据, 根据VLBI条纹拟合的成功率与所用的通道数有关, 通过人为选取较少通道的做法来实现模拟弱的河外源. 具体而言, 对河外源4个IF每隔128选取1个通道, 对河外源条纹拟合的成功率由原来的99.6%下降至31.9%, 然后对此数据进行了正逆两种相位参考的处理. 成图情况可见图5和6.

表6和7分别列出了BJ061G模拟弱源前后图的统计参数. 表8表示模拟弱源处理后的相位参考与逆相位参考之间JMFIT拟合结果的对比情况.

从表6和7的图中参数的对比情况可以看出, 信噪比有了明显降低, 这说明已经成功地通过选取较少通道的方法实现了模拟弱源; 再结合表4和8中对应历元

图4 VLBA观测实验BJ061G逆相位参考(以CASSINI为相位参考源)的成图结果. (a) 探测器CASSINI的成图; (b) 河外源J1127+0555的成图结果. 源名字和恢复波束分别在图形的左上角和左下角. 右下角表示的是源的亮度峰值. 图中等值线最外层为10 mJy, 由外向内按照每1.0 mJy线性递增

Figure 4 Inverse phase-referenced images from the VLBA program BJ061G with CASSINI served as phase reference. (a) and (b) are images for CASSINI and J1127+0555, respectively. Source names are in the upper left corner and restoring beams are in the lower left corner of each panel. Source peaks are in the lower right corner of each panel. In both cases, contour levels are spaced linearly at 1.0 mJy increments, starting at 10 mJy.

的数据对比情况可以得出, 逆相位参考处理在河外源很弱的情况下仍可以求出其与行星探测器CASSINI之间的相对位置, 且比弱源情况下的正相位参考结果更接近河外源较强时的正相位参考结果, 由此证明了逆相位参考处理在河外源很弱的情况下的可行性及其优势.

5 总结

本文运用VLBI相位参考成图的理论, 针对深空探测器是先验位置满足一定精度要求的强源这一特性, 提出了利用深空探测器作为参考源的逆相位参考定位方法. 该方法可降低探测器附近河外源强度的要求.

以VLBA观测CASSINI探测器的实测数据为例, 对比了正相位参考与逆相位参考的结果, 验证了深空探

表5 4个历元正逆相位参考分别得到的参考源和目标源相对于图像中心的位置偏差

Table 5 The position offset of the reference and target sources relative to the image center at 4 epochs

观测实验	参考源	E-W偏差 (mas)	N-S偏差 (mas)	目标源	E-W偏差 (mas)	N-S偏差 (mas)
BJ061B	J0931+1414	-0.006±0.004	0.012±0.007	CASSINI	-1.828±0.011	1.247±0.023
	CASSINI	0.000±0.007	-0.005±0.014	J0931+1414	1.851±0.027	-1.200±0.056
BJ061C	J0931+1414	-0.008±0.003	-0.021±0.006	CASSINI	3.948±0.005	-0.364±0.012
	CASSINI	-0.003±0.004	0.008±0.009	J0931+1414	-3.969±0.017	0.375±0.036
BJ061F	J1025+1253	0.016±0.003	-0.015±0.007	CASSINI	0.688±0.016	0.046±0.033
	CASSINI	0.002±0.006	-0.002±0.014	J1025+1253	-0.763±0.023	-0.040±0.048
BJ061G	J1127+0555	-0.007±0.006	0.006±0.009	CASSINI	0.387±0.010	0.778±0.023
	CASSINI	0.000±0.009	-0.015±0.022	J1127+0555	-0.378±0.020	-0.786±0.046

图 5 模拟弱源处理后, VLBA观测实验BJ061G正相位参考(以J1127+0555为相位参考源)的成图结果. (a) 探测器CASSINI的成图; (b) 河外源J1127+0555的成图结果. 源名字和恢复波束分别在图形的左上角和左下角. 右下角表示的是源的亮度峰值. 图中等值线最外层为10 mJy, 由外向内按照每1.0 mJy线性递增

Figure 5 Phase-referenced images from the VLBA program BJ061G with J1127+0555 served as phase reference after the processing of simulated weak source. (a) and (b) are images for CASSINI and J1127+0555, respectively. Source names are in the upper left corner and restoring beams are in the lower left corner of each panel. Source peaks are in the lower right corner of each panel. In both cases, contour levels are spaced linearly at 1.0 mJy increments, starting at 10 mJy.

图 6 模拟弱源处理后, VLBA观测实验BJ061G逆相位参考(以CASSINI为相位参考源)的成图结果. (a) 探测器CASSINI的成图; (b) 河外源J1127+0555的成图结果. 源名字和恢复波束分别在图形的左上角和左下角. 右下角表示的是源的亮度峰值. 图中等值线最外层为10 mJy, 由外向内按照每1.0 mJy线性递增

Figure 6 Inverse phase-referenced images from the VLBA program BJ061G with CASSINI served as phase reference after the processing of simulated weak source. (a) and (b) are images for CASSINI and J1127+0555, respectively. Source names are in the upper left corner and restoring beams are in the lower left corner of each panel. Source peaks are in the lower right corner of each panel. In both cases, contour levels are spaced linearly at 1.0 mJy increments, starting at 10 mJy.

表 6 河外源弱源模拟前BJ061G图的统计参数

Table 6 Statistic parameters of the phase referenced images from BJ061G without simulated weak continuum source

源	Peak 值 (mJy)	RMS 噪声 (mJy)	信 噪 比
相位参考源 (J1127+0555)	0.2671	0.0033	80.9
目标源 (CASSINI)	7.9737	0.1691	47.2
相位参考源 (CASSINI)	8.6368	0.1805	47.8
目标源 (J1127+0555)	0.0906	0.0031	29.2

表 7 河外源弱源模拟后BJ061G图的统计参数

Table 7 Statistic parameters of the phase referenced images from BJ061G with simulated weak continuum source

源	Peak 值 (mJy)	RMS 噪声 (mJy)	信 噪 比
相位参考源 (J1127+0555)	0.1450	0.0039	37.2
目标源 (CASSINI)	2.1158	0.1703	12.4
相位参考源 (CASSINI)	8.1570	0.1680	48.6
目标源 (J1127+0555)	0.0844	0.0034	24.8

表 8 模拟弱源处理后的相位参考与逆相位参考之间的JMFIT拟合结果对比

Table 8 Comparison of JMFIT results between two phase reference methods with simulated weak continuum source

源	E-W 偏差 (mas)	N-S 偏差 (mas)
相位参考源 (J1127+0555)	-0.012±0.018	-0.027±0.033
目标源 (CASSINI)	0.302±0.047	1.166±0.101
相位参考源 (CASSINI)	0.003±0.009	-0.017±0.022
目标源 (J1127+0555)	-0.300±0.025	-0.839±0.058

测器的VLBI逆相位参考定位的可行性. 另外, 通过模拟弱源的操作, 我们验证了逆相位参考在河外源非常弱的情况下的可行性, 并且得到了比相位参考处理更

好的结果, 表明逆相位参考定位在河外源很弱的情况下的优势. 该方法在后续深空探测器的VLBI定位中具有实用意义.

参考文献

- 1 Qian Z H, Li J L. Applications of Very Long Baseline Interferometry in Deep Space Probes (in Chinese). Beijing: Science and Technology of China Press, 2012 [钱志翰, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2012]
- 2 Pradel N, Charlot P, Lestrade J F. Astrometric accuracy of phase-referenced observations with the VLBA and EVN. *Astron Astrophys*, 2006, 452: 1099–1106
- 3 Duvé D A, Molera Calvés G, Pogrebenko S V, et al. Spacecraft VLBI and Doppler tracking: Algorithms and implementation. *Astron Astrophys*, 2012, 541: A43, arXiv: [1203.4408](#)
- 4 Huang Y, Chang S, Li P, et al. Orbit determination of Chang'E-3 and positioning of the lander and the rover. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3858–3867
- 5 Lanyi G, Bagri D S, Border J S. Angular position determination of spacecraft by radio interferometry. *Proc IEEE*, 2007, 95: 2193–2201
- 6 Eduardo R. High precision differential astrometry. arXiv: [astro-ph/0308265](#)
- 7 Chun M S, Sung E C, Moon H K, et al. Spectroscopic studies of emission line galaxies. *Symp-Int Astron Union*, 1994, 159: 442–443
- 8 Muhleman D O, Berge G L, Rudy D J, et al. Precise position measurements of Jupiter, Saturn and Uranus systems with the Very Large Array. In: *Fundamental Astronomy and Solar System Dynamics*. Berlin: Springer, 1985
- 9 Muhleman D O, Berge G L, Rudy D J, et al. Precise VLA positions and flux-density measurements of the Jupiter system. *Astron J*, 1986, 92: 1428–1435
- 10 Jones D L, Fomalont E, Dhawan V, et al. Very long baseline array astrometric observations of the CASSINI spacecraft at saturn. *Astron J*, 2011, 141: 29, arXiv: [1012.0264](#)
- 11 Cotton W D. Fringe fitting. In: *Proceedings of Very Long Baseline Interferometry and the VLBA and Astronomical Society of the Pacific Conference*. Socorro, 1993
- 12 Reid M J, Honma M. Microarcsecond radio astrometry. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 339–372, arXiv: [1312.2871](#)
- 13 Jones D, Fomalont E, Dhawan V, et al. VLBA observations of CASSINI to improve the saturn ephemeris. In: *Proceedings of National Radio Science Meeting*. American Astronomical Society, 2009
- 14 Chao C C. The Troposphere Calibration Model for Mariner Mars 1971. Technical Report, Jet Propulsion Lab. 1974

Positioning of spacecraft with VLBI inverse phase reference

NIE ZhenHua^{1,2}, ZHANG Bo^{2*}, QIAO ShuBo¹ & DING MinJie^{1,2}

¹ *Geographic Spatial Information Academy, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;*

² *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*

For positioning of spacecraft with VLBI phase-reference, an extragalactic radio source was usually served as phase reference. After fringe fitting on the radio source, the solutions including delays and rates mainly from the propagation media were adapted to calibrate the observed phase of the spacecraft. The common phase errors of the nearby source pair were significantly reduced in their differential phases, allowing accurate relative position measurement. However, this traditional phase-reference method requires strong and nearby extragalactic radio source, which is hard to fulfill due to the lack of strong calibrators on the sky. Since the radio flux density from the spacecraft is much stronger than that of the extragalactic radio source, it is possible to use the spacecraft as phase reference. In this paper, we investigated the feasibility and advantages of this so called inverse phase reference method, based on real VLBI observations. We compared the data analysis results using the two phase reference methods, it proved that the inverse phase reference is capable to measure accurate relative positions, and could achieve better results than the traditional methods, especially when the extragalactic radio source was weak.

planetary probe, VLBI phase reference, VLBI inverse phase reference, simulation of weak source

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br

doi: [10.1360/SSPMA2017-00050](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00050)