论 文

VLBI 相时延及其在深空探测器测定轨中的应用

吴亚军^{①②*}, 刘庆会^{①*}, 陈冠磊^{①②}, 李培佳^{①②}, 郑鑫^{①②}, 周伟莉^①,
张秀忠^①, 朱人杰^{①②}

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030

② 中国科学院大学, 北京 100049

* 通信作者. E-mail: wuyajun@shao.ac.cn, liuqh@shao.ac.cn

收稿日期: 2013-03-29; 接受日期: 2013-07-12

空间毫米波 VLBI 阵列背景型号计划 (批准号: XDA04060705)、中国科学院百人计划、国家自然科学基金(批准号: 11273049, 11073048) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA121603) 资助项目

摘要 甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术是深空探测器测定轨的方法之一, 也是行星无线电科学研究的重要手段. VLBI 相时延通过解算相关相位的整周模糊度解算出探测器的 VLBI 时延观测量, 可有效地降低相位随机误差的影响, 从而提高时延测量的精度. 本文论述了解算相位整周模糊度的条件和方法, 给出相时延的解算方法, 并分析比较了相时延与群时延的随机误差水平. 以嫦娥二号 (CE2) 卫星飞往拉格朗日 L2 点的探测任务为例, 求解了两个月内 10 次 VLBI 观测的相时延并分析了数据质量. 相时延和群时延分别联合测速测距数据的定轨结果表明, 在 150 万公里的距离上相时延用于探测器的定轨是可行的.

关键词 甚长基线干涉测量 相时延 相位整周模糊度 相位连接 深空探测

1 引言

甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术是上世纪 60 年代发展起来的高精度射电天文方法, 它利用多架射电望远镜同时观测同一目标源, 对接收到的信号进行干涉从而得到目标源的空间位置信息. 该技术广泛地应用于天体物理、天体测量、空间大地测量等领域. 由于其超高的空间角位置测量能力, VLBI 技术也作为深空探测器的测量手段之一, 与测速、测距一起为探测器提供测定轨结果. 目前美国宇航局 (NASA) 和欧空局 (ESA) 都将 VLBI 技术作为常规测定轨手段之一 [1,2].

近年来我国的深空探测活动开展迅速, 探月一期工程已顺利完成, 二期和三期工程正在准备中, 火星、金星等行星探测也在深入论证 [3,4]. 在这些深空探测活动中 VLBI 分系统作为测控系统的重要组成部分之一, 提供时延、时延率和测角数据, 用来计算探测器的精密轨道. 在嫦娥一号 (CE1) 和二号 (CE2) 任务中, 卫星发射约 1 MHz 带宽的信标, 上海、北京、昆明和新疆的 4 架射电望远镜同时接收该信号, 并将记录的数据发送到上海天文台 VLBI 中心进行相关处理得到 VLBI 群时延和相时延率, 以此确定卫星的轨道参数 [5]. 群时延的测量精度与基线的信噪比和观测带宽相关, 信噪比越高、观测

引用格式: 吴亚军, 刘庆会, 陈冠磊, 等. VLBI 相时延及其在深空探测器测定轨中的应用. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 221-230, doi: 10.1360/112013-110

带宽越宽, 则群时延误差越小. 目前我国 VLBI 系统对月球卫星观测的群时延测量误差为数纳秒 (ns), 投影到地月距离上定轨误差为百米量级 [6].

随着探测器走向更遥远的深空, 地面站接收信号的信噪比急剧下降, 而且有效带宽变窄, 群时延的随机误差也随之增大, 严重影响 VLBI 测定轨能力. VLBI 相时延通过无整周模糊度的相位除以观测频率求出, 其随机噪声大大降低. 本文分析相位模糊度的解算条件与方法, 给出相时延的解算方法. 以 CE2 飞往拉格朗日 L2 点为例, 群时延的随机误差为 10 ns 左右, 而相时延的随机误差只有数十皮秒 (ps). 分析表明, 相时延的拟合残差主要由对流层扰动引起. 相时延和群时延分别联合测速测距数据定轨结果表明, 在 150 万公里的距离上 VLBI 相时延用于探测器的测定轨是可行的. 随着探测器距离越远, 随机噪声的影响将会更大, 相时延的优势会更加明显.

2 深空探测器 VLBI 群时延

将两架射电望远镜组成一条基线同时观测同一目标源, 将信号采集、记录, 传送给 VLBI 相关处理机作相关处理, 得到这条基线的互相关幅度和相位. 幅度反映了目标源发射信号的强弱, 影响相位的计算误差. 从相位中解算出基线的时延, 可以反演出目标源的角位置. 在深空探测中通常采用差分 VLBI 的观测方式, 即交替观测射电源和探测器, 通过位置精确已知的河外射电源, 标校观测系统的时延, 同时利用 GPS 或其他设备 (如水汽辐射计) 校正地球对流层和电离层的传播时延.

基线的相关相位是时间 t 和频率 f 的函数 $\varphi(t, f)$, 其中包含目标源的位置信息、观测装置的影响、两台站时频的差异、传播介质 (对流层和电离层) 的影响以及测量的随机误差效应, 其表达式如下 [7]:

$$\varphi(t, f) = 2\pi f (\tau(t) + \tau_{\text{inst}}(t) + \tau_{\text{clk}}(t) + \tau_{\text{atm}}(t)) - \frac{k\Delta D(t)}{f} + 2\pi N(t) + \sigma(t), \quad (1)$$

$\tau(t)$ 是目标源到达两台站的残余几何时延差; $\tau_{\text{inst}}(t)$ 是两台站观测装置内部时延差; $\tau_{\text{clk}}(t)$ 是两台站时频系统的差异; $\tau_{\text{atm}}(t)$ 为两台站地球对流层造成的时延差异; $\frac{k\Delta D(t)}{f}$ 为地球电离层对两台站相位的影响差, 其中 k 为常数, $\Delta D(t)$ 为电磁波穿过两观测站的路径上电离层电子浓度总含量 (total electron content, TEC) 之差; $N(t)$ 为相位求解中存在的 2π 模糊度; 另外观测装置的热噪声导致相位误差 $\sigma(t)$. 在深空探测中通过观测射电源和解算 GPS 或水汽辐射计的数据, 可以将观测系统、时频系统、地球对流层和电离层等影响的大部分消除. 随着技术的进步, 这些部分的校正误差将逐步减小. 为了求解 $\tau(t)$, 还需要解算模糊度 $N(t)$, 并降低随机噪声 $\sigma(t)$.

通常采用一定带宽的连续谱信号或者一定间隔的数个点频信号来求解相位的模糊度, 以两频点 f_1 、 f_2 为例:

$$\varphi(t, f_1) = 2\pi f_1 (\tau(t) + \tau_{\text{inst}}(t) + \tau_{\text{clk}}(t) + \tau_{\text{atm}}(t)) - \frac{k\Delta D(t)}{f_1} + 2\pi N_1(t) + \sigma_1(t), \quad (2)$$

$$\varphi(t, f_2) = 2\pi f_2 (\tau(t) + \tau_{\text{inst}}(t) + \tau_{\text{clk}}(t) + \tau_{\text{atm}}(t)) - \frac{k\Delta D(t)}{f_2} + 2\pi N_2(t) + \sigma_2(t), \quad (3)$$

因此,

$$\tau_{\text{group}}(t) = \frac{\varphi(t, f_2) - \varphi(t, f_1)}{2\pi(f_2 - f_1)} - \frac{k\Delta D(t)}{2\pi f_1 f_2} - \tau_{\text{inst}}(t) - \tau_{\text{clk}}(t) - \tau_{\text{atm}}(t) - \frac{N_2(t) - N_1(t)}{(f_2 - f_1)} + \frac{\sigma_{12}(t)}{2\pi(f_2 - f_1)}, \quad (4)$$

如果为连续谱信号, 通道内相位的周跳数 $N_2(t) - N_1(t)$ 可以精确计算; 如果为两点频信号, 在相关处理时给予一定精度的时延模型可以使两频点的残余相位没有 2π 的跳变, 即 $N_2(t) - N_1(t) = 0$, 这一点容易做到. 因此残余群时延可以无模糊的求解出, 其随机误差为 $\frac{\sigma_{12}(t)}{2\pi(f_2 - f_1)}$. 如果相位测量误差为 1 度, 信号带宽为 2 MHz, 那么残余群时延的随机误差约为 1.39 ns.

3 VLBI 相时延

对式 (2) 的相位 $\varphi(t, f_1)$, 如果解出相位的整周模糊度 $N_1(t)$, 此时得到的时延称之为相时延, 其随机误差为 $\frac{\sigma}{2\pi f}$.

$$\tau_{\text{phase}}(t) = \frac{\varphi(t, f_1)}{2\pi f_1} + \frac{k\Delta D(t)}{2\pi f_1^2} - \tau_{\text{inst}}(t) - \tau_{\text{clk}}(t) - \tau_{\text{atm}}(t) - \frac{N_1(t)}{f_1} + \frac{\sigma_1(t)}{2\pi f_1}. \quad (5)$$

残余相时延和残余群时延都是目标源和两观测站的位置引起的几何时延的一种测量结果, 两者理论上应该是相同的, 考虑到观测的随机噪声影响, 两者具有相同的期望值, 意味着两者之差的时间平均等于 0, 即 $\langle \tau_{\text{group}}(t) - \tau_{\text{phase}}(t) \rangle = 0$.

实际上不可能在连续时间上得到群时延和相时延, 只能通过一定时间的积分在离散点上得到取值, 假设积分周期为 T , 则 $\langle \tau_{\text{group}}(nT) - \tau_{\text{phase}}(nT) \rangle = 0$, 即

$$\left\langle \frac{\varphi(nT, f_1)}{2\pi f_1} + \frac{k\Delta D(nT)}{2\pi f_1^2} - \tau_{\text{inst}}(nT) - \tau_{\text{clk}}(nT) - \tau_{\text{atm}}(nT) - \frac{N_1(nT)}{f_1} + \frac{\sigma_1(nT)}{2\pi f_1} - \tau_{\text{group}}(nT) \right\rangle = 0. \quad (6)$$

为了求解 $N_1(T)$ 需要保证其在整个时段内保持一个恒定的值, 意味着在任意两个连续的时间点上 $\varphi(nT, f_1), \varphi((n+1)T, f_1)$ 不存在 2π 的相位模糊, 即必须满足条件

$$|\varphi(nT, f_1) - \varphi((n+1)T, f_1)| \leq \pi, \quad (7)$$

即等效的残余时延率

$$|\tau'| \leq \frac{1}{2f_1 T}, \quad (8)$$

这里包含了探测器的残余几何时延率以及观测系统、地球对流层和电离层的残余时延率影响. 以 S 波段 2.2 GHz 的频率为例, 10 秒积分的情况下, 残余时延率的绝对值应小于 22.7 ps/s.

一般而言, 通过长时间监测钟差钟速, 观测系统的时延率误差小于 1 ps/s; 在天线仰角较高时电离层和对流层的时延率一般小于 1 ps/s, 通过建立模型, 在相关处理时将对流层的时延率大部分扣除; 因此只要探测器的残余几何时延率小于 20 ps/s, 即可满足无模糊的相时延解算条件. 以平均 2000 km 的基线, 距离 40 万公里的探测器为例, 1 ps/s 的时延率不确定度对应着 6 cm/s 的视线垂直方向的速度误差, 20 ps/s 意味着探测器的视线垂直方向速度小于 1.2 m/s, 在探测器巡航段这一条件通常是满足的.

综上所述, 在满足式 (8) 的情况下, 一个观测弧段内所有积分点的相位可以连续衔接, 而没有整周相位模糊. 此时整个观测弧段内相位的模糊度是保持不变的, 可以通过式 (6) 求解.

$$N_1 = \frac{\varphi(nT, f_1)}{2\pi} + \frac{k\Delta D(nT)}{2\pi f_1} - \tau_{\text{inst}}(nT) - \tau_{\text{clk}}(nT) - \tau_{\text{atm}}(nT) - \tau_{\text{group}}(nT) + \frac{\sigma_1(nT)}{2\pi f_1}, \quad (9)$$

对该弧段内所有时刻点求平均降低随机噪声项的影响, 即

$$N_1 = \left\lceil \sum_n \left(\frac{\varphi(nT, \varphi f_1)}{2\pi} + \frac{k\Delta D(nT)}{2\pi f_1} - \tau_{\text{inst}}(nT) - \tau_{\text{clk}}(nT) - \tau_{\text{atm}}(nT) - \tau_{\text{group}}(nT) \right) \right\rceil, \quad (10)$$

式中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取最接近的整数.

在解决了相位模糊度之后, 就可以得到相时延,

$$\tau_{\text{phase}}(nT) = \frac{\varphi(nT, f_1)}{2\pi f_1} + \frac{k\Delta D(nT)}{2\pi f_1^2} - \tau_{\text{inst}}(nT) - \tau_{\text{clk}}(nT) - \tau_{\text{atm}}(nT) - \frac{N_1}{f_1}, \quad (11)$$

求得的相时延中包含了随机噪声项 $\frac{\sigma_1}{2\pi f_1}$. 以 2.2 GHz 的观测频率为例, 1 度的相位误差带来的相时延随机误差为 1.26 ps, 与 2 MHz 带宽的群时延相比, 降低了 1000 倍.

4 应用及结果分析

以嫦娥二号卫星 (CE2) 在拉格朗日 L2 点 VLBI 观测为例, 利用相时延对其做定轨, 并将残差与群时延的结果相比较. 在 2011 年 8 月 15 日的观测中, 上海佘山 25 米望远镜、昆明 40 米望远镜和新疆南山 25 米望远镜同时观测 CE2, 以 2 MHz 基带带宽做记录, 卫星发射信号的带宽约为 0.8 MHz, 数据存储 in 硬盘事后传送到上海 VLBI 中心作相关处理. 在这次实验中首先观测约 1 个小时的射电源, 然后 7.5 小时的 CE2 卫星, 最后 1 小时的射电源. 利用两个弧段的射电源观测校正观测系统本身的时延以及各观测站时频系统的变化, 利用精密解算的 GPS 数据校正地球对流层和电离层的时延.

图 1 给出了射电源 DA193 的观测结果, 积分时间约为 59 秒. (a) 是射电源频谱, 其中包含的两个点频是相位校正信号; (b) 是上海和新疆这条基线上射电源信号的互相关相位; (c) 给出了上海 — 新疆基线上两段射电源的残余时延及线性拟合的结果, 反映了观测系统以及时频系统的变化情况. 本次观测中观测系统的残余时延约为 -5 ns, 在 9 小时内变化约 1 ns, 拟合后的残差均方根值为 6.6 ns.

卫星发射的信标位于 2234.5 MHz, 带宽数百 KHz. 接收信号的频谱如图 2 所示. 由于距离较远, 地面接收的信号带宽约为 150 KHz. 利用这一带宽的信号可以求解群时延和相时延. 每个积分点采用 10.49 秒, 可以计算其残余时延率约在 5 ps/s 以下. 由上述计算可知 10 秒的积分对于相时延的解算来说是可行的. 利用本文第 2 节和第 3 节介绍的方法解算群时延以及相时延, 图 3 给出了 3 条基线的结果. 图中可以看出, 群时延的随机误差达 ± 10 ns, 而相时延随机误差为数十 ps.

在多站的 VLBI 联测中闭合时延作为评价观测性能的一种方法, 可以检验数据处理方法是否正确. 它利用同一波前原理, 即同一波前到达 3 个观测站, VLBI 测量任意两站的时间差, 这样 3 条基线的时间差应满足闭合的关系. 而在实际中由于测量的随机误差以及解算方法的误差, 使得实际的闭合结果有偏离, 偏离越大说明观测精度越差 [8,9]. 对上述群时延和相时延分析其闭合情况, 上海 — 昆明基线时延加上昆明 — 新疆基线的时延减去上海 — 新疆基线的时延, 理论上结果为 0, 实际结果如图 4. 由于存在较大的随机误差, 群时延闭合误差均方根值为 2.94 ns, 而相时延闭合为 (-54 ± 1) ps. 由于在利用射电源校正观测系统初始相位时, 射电源的观测精度不高, 导致 CE2 的相时延中包含了一个微小偏移, 在本例中表现为 -54 ps.

图 1 (网络版彩图) 射电源观测情况

Figure 1 (Color online) The results of quasar observation. (a) The spectrum of Shanghai station; (b) the phase of spectrum between Shanghai and Xinjiang; (c) the residual delays and its fitting of quasar's observation between Shanghai and Xinjiang

图 2 (网络版彩图) 上海新疆基线上 CE2 信号互相关谱

Figure 2 (Color online) Cross correlation of CE2 between Shanghai and Xinjiang. (a) The amplitude spectrum; (b) the phase spectrum

由上述结果可见, 相时延的随机噪声远远小于群时延, 更能反映出卫星的运动情况以及其他因素的影响, 如第 3 节所述相时延中包含的卫星轨道、地球对流层、电离层、观测系统以及随机噪声等因素. 在 L2 点卫星位于大范围的动态平衡状态, 在数小时的观测中其轨道可以用多项式描述. 本次观测在夜间进行, 电离层的变化较小, 而且通过 GPS 技术将其大部分扣除. 通过前后射电源的观测校正, 观测系统内部时延的影响也较小. 对上述相时延用 9 次多项式拟合, 做进一步的分析. 相时延及拟合残差如图 5, 3 条基线的结果分别如图 5 所示. 每条基线上给出了相时延及其 9 次拟合的情况, 并且给出了二者的差异. 残差中包含了不能被拟合的成分, 比如随机误差、对流层抖动等, 均在 ± 0.2 ns 以内.

将拟合后的相时延残差转换为相位 $\phi(t)$, 计算其 Allan 方差 $\sigma(\tau)$ 、构造函数 $D(\tau)$ 以及频谱均方根 $G(f)$, 可以分析残差的性质, 计算方法如下^[9,10], Allan 方差中 f_1 为实际观测频率.

图 3 (网络版彩图) 3 条基线 CE2 群时延和相时延

Figure 3 (Color online) The group delay and phase delay of CE2 of 3 baselines. (a) Shanghai-Xinjiang; (b) Shanghai-Kunming; (c) Kunming-Xinjiang

图 4 (网络版彩图) CE2 的闭合时延

Figure 4 (Color online) Delay closure of CE2

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi f_1 \tau} \langle [\phi(t+2\tau) - 2\phi(t+\tau) + \phi(t)]^2 \rangle^{1/2}, \quad (12)$$

$$D(\tau) = [\phi(t+\tau) - \phi(t)]^2, \quad (13)$$

图 5 3 条基线的残余相时延及其拟合残差

Figure 5 The residual delays and its fitting of 3 baselines. (a) Shanghai-Xinjiang; (b) Shanghai-Kunming; (c) Kunming-Xinjiang

$$G(f) = |F(\phi(t))|, \quad (14)$$

随机相位噪声的 Allan 方差与时间间隔 τ 成倒数关系. 根据 Kolmogorov 扰动理论, 对流层相位抖动的 Allan 方差 $\sigma(\tau)$ 与 $\tau^{-2/3}$ 成正比 [8]. 图 6(a) 给出了 3 条基线残余相位的 Allan 方差以及和对流层、随机噪声的比较. 在 100 秒到 2000 秒的时间间隔内相时延的 Allan 方差比随机噪声更平缓, 与对流层趋势接近. 图 6(b) 中 3 条基线上残余相位的构造函数与对流层的比较, 在数百秒时间尺度上有很大的相似性. 频谱均方根是残余相位 Fourier 变换的平均值, 对流层的频谱均方根与频率 $f^{-3/4}$ 成正比, 理想情况与实际情况的比较结果如图 6(c) 所示. 本次观测中数据点较少, 统计特性有些离散; 残余相位的积分时间为 10 秒, 更小时间尺度的统计特性无法得到; 同时经过拟合后大时间尺度的变化趋势被去掉, 因此图 6(a), (b) 中在时间间隔很大时 Allan 方差和构造函数都与理论情况有偏差; 而在图 6(c) 中表现为频率较低时与理论情况相差较大. 从上述分析可以看出, 残余相时延的抖动主要为对流层的影响, 这一点与预计相符合.

以上分析了 CE2 相时延的特点, 其随机噪声在 ps 量级, 可以用于进一步分析时延残差的成分. 分别用相时延和群时延数据并结合测速测距数据, 对 CE2 进行弧长 20 天的联合定轨并进行弧段重叠分析, 定轨分析区间为 2011 年 6 月 20 日至 8 月 26 日. VLBI 的观测时间及弧段重叠定轨的时间段如图 7 所示, 时间起点为 6 月 20 日, 红色为 VLBI 观测时间, 蓝色依次为 29 次交叉重叠时间段. 相时延 -

图 6 3 条基线上相位拟合残差的 (a) Allan 方差及与理想随机噪声的比较; (b) 构造函数及与对流层特性的比较; (c) 频谱均方根与对流层特性

Figure 6 The comparisons between (a) the Allan variances of residual phases and random noises; (b) the temporal function of residual phase and atmospheric turbulence; (c) the square roots of power spectrum of residual phase and atmospheric turbulence

图 7 VLBI 观测及交叉重叠定轨的时间

Figure 7 The time of VLBI observations and the time for orbiting of overlap

图 8 相时延测速测距联合定轨与群时延测速测距联合定轨精度比较

Figure 8 The comparison between orbit precision of phase delay with Doppler/ranging and orbit precision of group delay with Doppler/ranging

测速测距联合定轨误差与群时延 - 测速测距联合定轨误差的结果如图 8 所示. 在 29 个弧段的定轨中, 有 24 个弧段相时延的误差小于群时延, 最好时比群时延误差小 0.9 km; 有 5 天相时延误差略大于群时延, 最坏时比群时延大 0.3 km. 主要原因是从第 29 天到 45 天没有 VLBI 观测, 包含这个时间段的定轨结果误差都较大, 轨道主要是测速测距的贡献. 定轨结果表明在 150 万公里的距离上相时延是可以用于定轨的.

5 结论

本文介绍了深空探测 VLBI 相时延的求解方法, 以 CE2 的观测数据为例, 分析了相时延的特点, 并结合多普勒数据作测定轨分析. 结果表明, 在 150 万公里的距离上 CE2 相时延的随机噪声为 10 ps 量级, 并可清晰分辨出残余相时延主要是对流层的影响. 通过相时延和群时延分别联合测速测距定轨分析, 结果表明相时延是有效的. 随着我国探测器走向更遥远的深空, 地面接收的信号会越来越弱, VLBI 群时延测量的随机噪声快速放大. 同时随着水汽辐射计的应用, 对流层的影响可以校正得更加准确. 观测频率由 S 波段 (2.2 GHz) 移到 X 波段 (8.4 GHz), 电离层的影响降至原来的 1/15, 因此随机噪声将会成为制约 VLBI 测量精度的关键因素之一. 而相时延可以有效的解决这一问题, 在深空探测器的测定轨和行星科学研究中将会有广泛的应用前景.

参考文献

- 1 Thornton C L, Border J S. Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation. John Wiley & Sons, Inc, 2003
- 2 James N, Abello R, Lanucara M, et al. Implementation of an ESA delta-DOR capability. ACTA Astronaut, 2009, 64: 1041–1049
- 3 Ouyang Z Y. Scientific Objectives of Chinese Lunar Exploration Project and Development Strategy. Adv Rarth Sci, 2004, 19: 351–358 [欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. 地球科学进展, 2004, 19: 351–358]
- 4 Wu W R, Ma X, Ning X L. Autonomous navigation method with high accuracy for cruise phase of Mars probe. Sci Sin Inform, 2012, 42: 936–948 [吴伟仁, 马辛, 宁晓琳. 火星探测器转移轨道的自主导航方法. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 936–948]
- 5 Hong X Y. VLBI techniques and application in the Chang'e lunar orbiter. Chin J Nat, 2007, 29: 297–299 [洪晓喻. VLBI 技术的发展和嫦娥工程中的应用. 自然杂志, 2007, 29: 297–299]

- 6 Wu W R, Huang L, Jie D G. Design and experiment of X-band TT&C system for the project of CE-2. *Sci Sin Inform*, 2012, 41: 1171–1183 [吴伟仁, 黄磊, 节德刚. 嫦娥二号工程 X 频段测控通信系统设计与试验. *中国科学: 信息科学*, 2012, 41: 1171–1183]
- 7 Kikuchi F. Differential Phase Delay Estimation by Same Beam VLBI Method. Doctor of Philosophy. Department of Astrophysical Science, School of Physical Science, The Graduate University for Advanced Studies, 2006. 14–18
- 8 Chen M, Liu Q H. Calculation and analysis of same beam VLBI differential phase delay closure of lunar satellite. *Process Astron*, 2010, 28: 415–423 [陈明, 刘庆会. 探月卫星同波束 VLBI 差分相位时延闭合计算与分析. *天文学进展*, 2010, 28: 415–423]
- 9 Thompson A R, Moran J M, Swenson J G W. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, 2001
- 10 Liu Q H, Nishio M, Yamamura K, et al. Statistical characteristics of atmospheric phase fluctuations observed by a VLBI system using a beacon wave from a geostationary satellite. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2005, 53: 1519–1527

VLBI phase delay and its application in orbit determination of spacecraft

WU YaJun^{1,2*}, LIU QingHui^{1*}, CHEN GuanLei^{1,2}, LI PeiJia^{1,2}, ZHENG Xin^{1,2}, ZHOU WeiLi¹, ZHANG XiuZhong¹ & ZHU RenJie^{1,2}

1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

*E-mail: wuyajun@shao.ac.cn, liuqh@shao.ac.cn

Abstract As one of the key technologies for orbit determination, very long baseline interferometry (VLBI) will play an important role in deep space explorations. The traditional group delay of VLBI is affected by the signal to noise ratio (SNR). As the spacecraft going to outer space, the random error of group delay increases quickly because of the SNR getting worse and worse. In this paper, we introduce the phase delay whose random error is much smaller than that of group delay at the same SNR. We deduce the conditions and method to determine the phase ambiguity, and then give the formula of calculating phase delay. The phase delay is used to determine the orbit of Chang'e 2 (CE2) satellite with Doppler/ranging data when it flies to the Sun-Earth Lagrangian point L2 which is 1 500 000 km away from the Earth. It proves that the phase delay is useful for orbit determination.

Keywords very long baseline interferometry(VLBI), phase delay, phase ambiguity, phase connection, deep space exploration

WU YaJun was born in 1984. He received his B.E. degree in Tianjin University of China in 2006, and M.E. degree in Shanghai Astronomical Observatory in 2009. Currently he is an engineer of Shanghai Astronomical Observatory. His research interests include VLBI techniques and radio telescope.

LIU QingHui received his B.E. degree in Electronic Engineering from the East China Engineering Institute of China in 1988, and M.E. and Ph.D. degrees in Systematic Control Engineering from Kagoshima University, Japan, in 2000 and 2003. From 2003 to 2009, he was a researcher at the RISE Project Office of the National Astronomical Observatory of Japan. Since 2009, He has been a professor at the Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences. His research interests are in electronic measurements, radio telescope, VLBI techniques, and lunar and planetary sciences.