

文章编号: 1000-8349(2012)04-518-9

# 基于卫星 DOR 信号的 VLBI 相时延 解算方法研究

陈冠磊, 郑 鑫, 陈 明, 刘庆会, 戴志强, 吴亚军, 赵融冰

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** VLBI 技术是深空探测中主要的测角手段, 其对与视线垂直方向上卫星的轨道和位置变化有很高的灵敏度。基于 DOR 信号的 VLBI 观测量一般是群时延, 其精度一般为纳秒量级, 在约 2000 km 的基线长度上, 月球探测器的位置测量误差达近百米, 对深空探测器来说位置测量误差会更大。为了提高卫星测定轨定位精度, 研究了含微小偏倚量的 VLBI 相时延的解算算法, 并利用嫦娥二号  $\Delta$ DOR 观测数据对连续观测和间断观测时的算法进行了验证。结果表明: 两种观测模式下皆可。经过比较, 相时延的随机误差大幅降低。

**关键词:** VLBI; 深空探测; 相时延;  $\Delta$ DOR; 带宽综合

**中图分类号:** P184

**文献标识码:** A

## 1 引 言

月球是地球的天然卫星, 距地球的平均距离约  $3.8 \times 10^5$  km。月球探测是人类进行太阳系空间探测的开端。从 20 世纪 50 年代末开始, 美国和前苏联就已经对月球进行了多次探测并取得一系列令人瞩目的成果。根据总体规划, 近期我国的不载人月球探测分为“绕、落、回”三个发展阶段<sup>[1]</sup>。2007 年 10 月 24 日我国成功发射了“嫦娥一号”探月卫星, 实现了首次绕月飞行。2010 年 10 月 1 日成功发射“嫦娥二号”探月卫星。该卫星已完成月球表面成像、获取极区表面数据, 为探月二期工程中的月球软着陆<sup>[2]</sup>进行了必要的准备。为了完成各个阶段的月球探测或深空探测任务, 探测器的精密测定轨必不可少。

甚长基线干涉 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 测量技术是进行深空探测并精密测定轨的重要手段之一, 其对与视线垂直方向的探测器轨道变化较为敏感。VLBI 测量

收稿日期: 2012-03-31; 修回日期: 2012-05-09

资助项目: 中国科学院百人计划; 国家自然科学基金 (11273049, 11073048); 863 计划 (2012AA121603); 空间毫米波 VLBI 阵列背景型号 (XDA04060705); 中国科学院射电天文重点实验室; 上海市空间导航与定位技术重点实验室; 上海天文台行星科学实验室

技术的加入, 可以极大地提高深空探测器测定轨的精度。美国 NASA、欧洲 ESA 以及我国已经把 VLBI 技术广泛应用于月球探测器和深空探测器的精密测定轨<sup>[3]</sup>。

目前 VLBI 的观测量一般是群时延, 由于电力及可用频段带宽等条件的限制, 群时延的测量误差一般在纳秒量级<sup>[4,5]</sup>。在约 2000 km 的基线长度上, 1 ns 的测量误差对应到月球轨道上的位置测量误差约为 60 m。对更远距离的深空探测, 轨道测量误差会随着距离的增大而不断增大, 必须减小 VLBI 时延的测量误差才能保证更精确的定轨定位。

为了减小 VLBI 时延测量误差, 针对两个卫星的同波束 VLBI 观测, 我们在前期的研究中提出了一种提高同波束 VLBI 差分时延测量精度的方法, 即解算出含微小偏倚量的 VLBI 差分相时延作为观测量<sup>[6]</sup>。针对单颗卫星发送 DOR 信号的情况, 我们研究了 VLBI 相时延的解算算法并在本文予以报告。单颗卫星发送 DOR 信号时, VLBI 相时延的整周模糊度解算困难, 相对于真实值含有偏倚量。但群时延不含有整周模糊度, 因此可用群时延对相时延进行偏倚量修正, 修正后的相时延仅含有较小的偏倚量并将设法在后续的定轨定位解算中一并求解。

我们利用嫦娥二号  $\Delta$ DOR (Delta Differential One-way Range) 观测数据, 分别对连续观测和间断观测两种情况下的含微小偏倚量的 VLBI 相时延解算算法进行了验证, 结果表明: 两种观测模式下含微小偏倚量相时延的解算皆可行。经过比较, 相时延的随机误差大幅降低, 剩余的系统误差也有望在后续的定轨定位解算中一并求解。

## 2 带宽综合群时延和含微小偏倚量的 VLBI 相时延解算原理

群时延和相时延都是 VLBI 的观测量, 它们需要通过对获取的卫星信号进行相关处理得到。通过相关处理解算出残余时延值, 加入时延预测值后可得到 VLBI 时延的解算结果并用于卫星的定轨定位。下面给出群时延和相时延的解算方法。

### 2.1 带宽综合群时延解算方法

DOR 信号在深空探测中经常使用, 其频谱中含有一个主载波和两对侧音信号。对于谱线中仅具有几个频点的信号来说, 需要用带宽综合的方法来计算群时延。为了说明这种方法, 图 1 将嫦娥二号进行  $\Delta$ DOR 试验所搭载的 X 频段<sup>[7]</sup>信标源给出。从图中可以看出, X 波段 DOR 信号被 6 个通道接收。其中通道 3 和 4 同时接收了载波信号和 DOR 第一侧音信号 ( $\pm$ DOR1), 它们主要是为了计算通道内群时延; 通道 5、6、7、8 则分别接收 DOR2 下边带 ( $-$ DOR2)、载波、DOR1 上边带 (DOR1)、DOR2 上边带 (DOR2) 信号, 提取出它们的相位并进行带宽综合计算, 可得到带宽综合群时延值。由于频带带宽的增大, 带宽综合群时延的测量误差远小于单通道的群时延测量误差。

带宽综合计算群时延的方法中, 首先需要用射电源观测得到的通道初相和通道初始时延, 进行通道间相位改正和频差 (射电源观测中心频率和进行带宽综合卫星信号频点频率的差) 所引起相位误差的修正。其次需获取卫星观测时的群时延初值  $\tau_{ini}$ , 用来约束需要进行带宽综合的频点信号的模糊度调整量;  $\tau_{ini}$  可由通道内具有一定带宽的信号得到, 例如对载

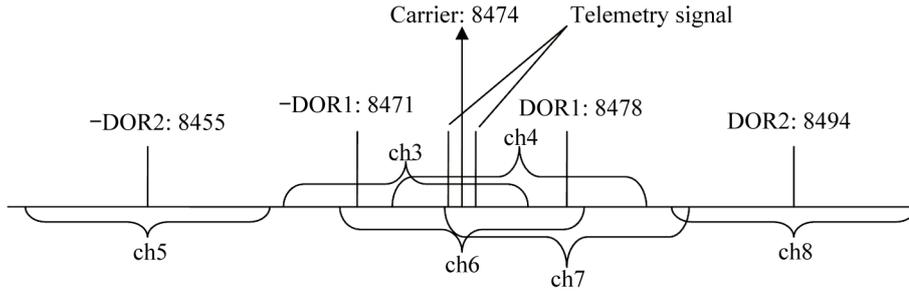


图 1 嫦娥二号  $\Delta$ DOR 试验中 DOR 信号的谱线和对应的接收通道

波与距其 65 kHz 的一对遥测信号的相关相位进行线性拟合, 或者对载波与其周围的一些混频、倍频信号的相关相位进行线性拟合可得到  $\tau_{ini}$ 。然后, 由卫星观测时的群时延初值  $\tau_{ini}$  和载波相位来外推 DOR1 点频信号的预测相位值, DOR1 信号相位的实际计算值和预测值做差后取整得到整周模糊度, 进而得到 DOR1 点频信号无整周模糊度的相位改正值。利用得到的 DOR1 点频信号相位改正值和载波相位进行线性拟合计算就可以得到群时延  $\tau_{Carr+DOR1}$ ; 使用同样的方法用载波信号相位、DOR1 信号相位改正值和  $\tau_{Carr+DOR1}$  外推出 DOR2 点频信号的无整周模糊度的相位改正值, 得到群时延  $\tau_{Carr+DOR2}$ ; 同理, 用以上频点信号改正后的相位值和  $\tau_{Carr+DOR2}$  外推出 -DOR2 点频信号的无模糊度的相位改正值; 最后, 用 -DOR2, DOR1, DOR2 三个点频信号的相位改正值和载波相位值在频率轴上进行最小二乘线性拟合即可得出带宽综合残余群时延  $\tau_{res\_DOR}$ 。 $\tau_{res\_DOR}$  加上时延预测值  $\tau_p$  就是带宽综合群时延  $\tau_{DOR}$ ,

$$\tau_{DOR} = \tau_p + \tau_{res\_DOR} \quad (1)$$

对于信号中可提供更多频点的情况, 同样可依此方法进行计算。

## 2.2 含微小偏倚量的 VLBI 相时延解算方法

相时延的计算方法为频点相位与对应频点频率的比值。为了获得高信噪比的信号来保证时延精度, 这里提取载波的相关相位来进行计算。探测器的载波相关相位  $\phi_{sat}$  为:

$$\phi_{sat} = 2\pi f_{sat}(\tau_{res\_sat} + \tau_{atm} - \tau_{ion} + \tau_{inst}) - 2\pi N + \phi_0 \quad (2)$$

其中  $f_{sat}$  为对应频点的信号频率,  $\tau_{res\_sat}$  为信号残余相时延,  $\tau_{atm}$ ,  $\tau_{ion}$ ,  $\tau_{inst}$  分别为大气、电离层和观测装置引起的时延,  $N$  为整周模糊度,  $\phi_0$  为卫星信号进入接收装置后引起的初相。

由式 (2) 可得到残余相时延  $\tau_{res\_sat}$  为:

$$\tau_{res\_sat} = \frac{\phi_{sat} + 2\pi N - \phi_0}{2\pi f_{sat}} - (\tau_{atm} - \tau_{ion} + \tau_{inst}) \quad (3)$$

其中最后一项  $(\tau_{atm} - \tau_{ion} + \tau_{inst})$  为大气、电离层和观测装置的时延, 其与初相  $\phi_0$  可利用强射电源观测结果和 GPS 技术予以修正。由于模糊度  $N$  是未知的, 导致残余相时延含有偏倚量。

$\Delta$ DOR 试验中带宽综合残余群时延比较容易得到。在轨道预报精度足够的情况下, 残余群时延中无整周模糊度<sup>[8]</sup>, 在真值附近变化; 因此可用已知的带宽综合残余群时延值对残余相时延的偏倚量进行估计, 并对残余相时延进行改正。具体的过程是: 首先将已进行观测时段内全部有效的  $\tau_{\text{res\_sat}}$  值与  $\tau_{\text{res\_DOR}}$  值对应做差后求得其均值  $E\{(\tau_{\text{res\_sat}} - \tau_{\text{res\_DOR}})\}$ , 以此均值作为残余相时延的偏倚量的估计值; 然后计算  $\tau_{\text{res\_sat}}$  与此均值的差值, 即整体移动  $\tau_{\text{res\_sat}}$  条纹到  $\tau_{\text{res\_DOR}}$  条纹中间,

$$\tau_{\text{res\_sat\_corr}} = \tau_{\text{res\_sat}} - E\{(\tau_{\text{res\_sat}} - \tau_{\text{res\_DOR}})\} , \quad (4)$$

$\tau_{\text{res\_sat\_corr}}$  即含微小偏倚量的 VLBI 残余相时延。而剩余的微小偏倚量将有望在后面的定轨定位中一并求解。

这里对残余相时延的偏倚量的修正并不采用直接调节 X 波段时延整周数的方法, 原因是残余群时延曲线中间对于真值也含有未知的微小系统偏差, 直接调节 X 波段时延整周数将残余相时延调节到残余群时延中间也会与真值产生偏差。

$\tau_{\text{res\_sat\_corr}}$  加上时延预测值  $\tau_p$  即为卫星的含微小偏倚量的相时延  $\tau_{\text{sat\_corr}}$ ,

$$\begin{aligned} \tau_{\text{sat\_corr}} &= \tau_p + \tau_{\text{res\_sat\_corr}} = \tau_p + \tau_{\text{res\_sat}} - E\{(\tau_{\text{res\_sat}} - \tau_{\text{res\_DOR}})\} \\ &= \tau_p + \frac{\phi_{\text{sat}} + 2\pi N - \phi_0}{2\pi f_{\text{sat}}} - (\tau_{\text{atm}} - \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{inst}}) - E\{(\tau_{\text{res\_sat}} - \tau_{\text{res\_DOR}})\} . \end{aligned} \quad (5)$$

### 3 带宽综合群时延和含微小偏倚量 VLBI 相时延计算实例与分析

我们利用嫦娥二号  $\Delta$ DOR 试验观测数据对带宽综合群时延和含微小偏倚量的 VLBI 相时延进行了分析。嫦娥二号  $\Delta$ DOR 观测中, 首先对强射电源进行 30 min 左右的观测, 用于改正观测装置带来的时延误差和为卫星观测时的带宽综合提供各通道的初始相位; 然后再进行卫星与附近弱射电源之间各 5 min 的交替观测; 最后对强射电源再进行 30 min 左右的观测, 用于事后处理以获得更精确的观测结果。

图 2 显示了 2011 年 4 月 3 日这天某 5min 连续弧段三条基线含微小偏倚量的 VLBI 残余相时延与带宽综合残余群时延, 以及三条基线的残余群时延和残余相时延的闭合情况。含微小偏倚量的残余相时延的求解是按前述方法得到的。带宽综合残余群时延积分时间为 5 s, 而残余相时延积分时间为 1 s。从图 2(a)—2(c) 可以看出带宽综合残余群时延波动范围最大约为 2 ns, 而残余相时延的波动为皮秒量级。同时, 对三条基线的残余群时延和含微小偏倚量的残余相时延进行闭合分析, 如图 2(d) 所示, 残余群时延的闭合时延误差波动约为 1.5 ns, 而残余相时延的闭合结果中虽然有约 71.6 ps 的系统性偏差, 但其波动仅约为几个 ps。残余相时延闭合的系统性偏差是由各条基线上相时延的微小偏倚量的估算误差以及接收信号未对应到同一波前<sup>[9]</sup>引起的, 该系统误差随观测时间长短和观测弧段不同而变化。图 3 给出了不同观测弧段的带宽综合残余群时延和残余相时延闭合时延误差。由图 3 可以看出, 每个时间段闭合结果的系统差都会不同, 图 3(a)—(d) 四个时间段的闭合相时延系统误差分别约为

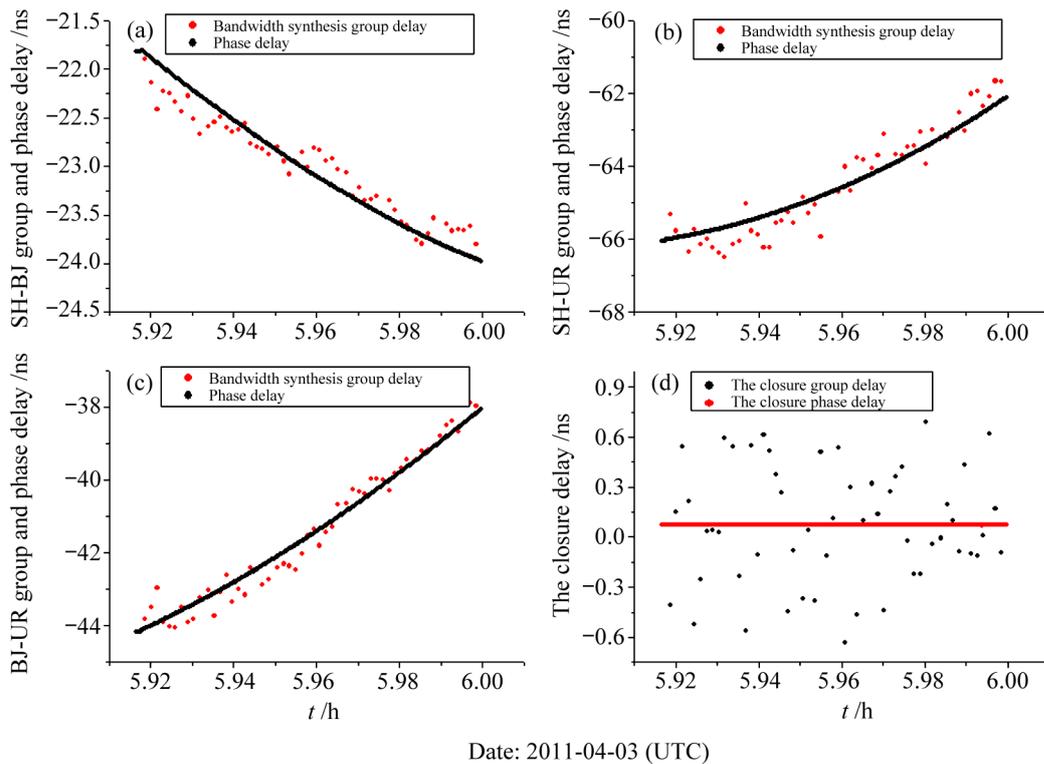


图 2 含微小偏倚量的 VLBI 残余相时延与带宽综合残余群时延的比较及闭合相时延  
 (a)—(c) 上海—北京基线、上海—乌鲁木齐基线和北京—乌鲁木齐基线的含微小偏倚量的残余相时延和带宽综合残余群时延；(d) 三条基线的残余群时延和残余相时延的闭合情况比较。

0.07 ns, 0.14 ns, 0.07 ns, -0.01 ns, 但都小于残余群时延闭合时延误差, 在 0.2 ns 以内甚至更小, 可反映出含微小偏倚量残余相时延解算的准确性。

对于连续观测弧段可实时解算含微小偏倚量的残余相时延, 具体处理方法如下: 首先选取一小段处理结果 (例如前 10 点), 将解算出的含较大偏倚量的残余相时延倚靠在带宽综合残余群时延中间, 使得残余相时延仅含有微小偏倚量, 然后仅需将残余相时延接续即可。在卫星 VLBI 观测出现间断的情况下, 也可解算出含微小偏倚量的残余相时延, 如图 4 所示。

由图 4(a) 可看出即使在观测间断的情况下, 仍然可解算出含微小偏倚量的残余相时延。具体解算方法如下。首先, 用前一段连续观测且经过强射电源观测结果修正后的残余相时延作为基准, 将后一段的残余相时延在一定范围内以极小的步阶上下移动, 并与前一段的残余相时延进行 9 次多项式拟合, 在拟合残差达到最小时, 即实现了前后两段残余相时延的接续。这种处理方法的基本依据为: 相时延本来是连续的, 而由大气电离层及卫星轨道变化引起的相时延变化量在 10 多分钟的时段内可被 9 次多项式拟合去除; 只有在间断的相时延被拟合后连接最接近连续时, 剩余的残余量仅由随机相位误差引起, 其拟合残差才能达到最小<sup>[10]</sup>。重复使用上述方法即可实现多次观测间断时含微小偏倚量的残余相时延的接续。然后, 将所

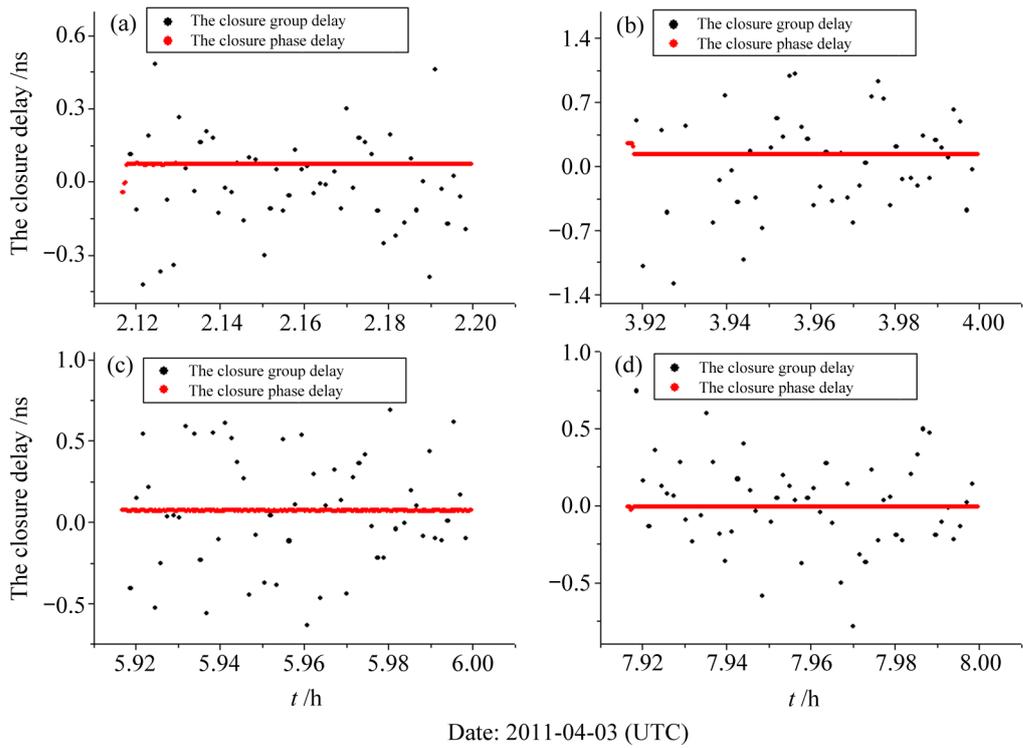


图 3 不同观测时间段带宽综合残余群时延和含微小偏倚量残余相时延闭合结果

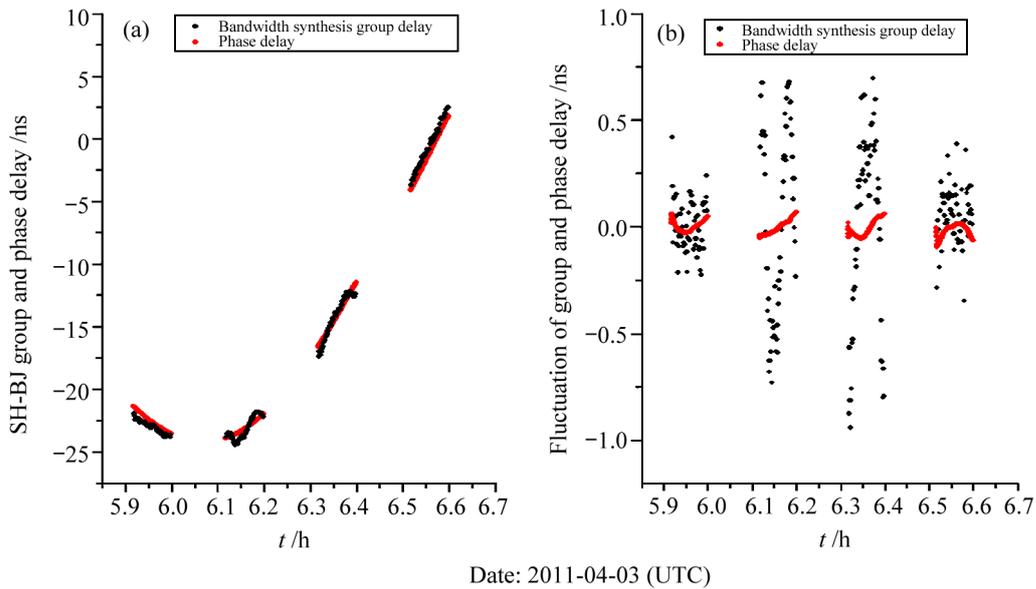


图 4 VLBI 观测间断情况下残余相时延的解算以及群时延和相时延的波动情况

(a) 在观测间断时含微小偏倚量的 VLBI 残余相时延及带宽综合残余群时延; (b) 残余群时延和残余相时延 9 次多项式拟合后的残差。

有观测弧段的残余群时延与残余相时延对应相减求均值，并以此均值为基准来修正残余相时延中较大的偏倚量。VLBI 观测中断情况下相时延连续的实时性较差，因为需将后一段的残余相时延整体与前一段残余相时延进行接续。图 4(b) 给出了带宽综合残余群时延和残余相时延 9 次多项式拟合后的残差，从图中可以看出群时延的波动范围约 2 ns，而相时延的波动在皮秒量级。

在图 4(a) 中残余群时延和残余相时延有所偏差，其原因可能是由于大气和电离层的影响未完全消除，并且未考虑电离层对群时延和相时延的不同影响。在以后的探月及其它深空探测同波束 VLBI 观测中，差分相时延整体靠向差分群时延的效果可能更好，因为大气和电离层经过时延差分后影响会更小。本文重点研究相时延解算方法问题，对时延误差因素未作全面考虑。

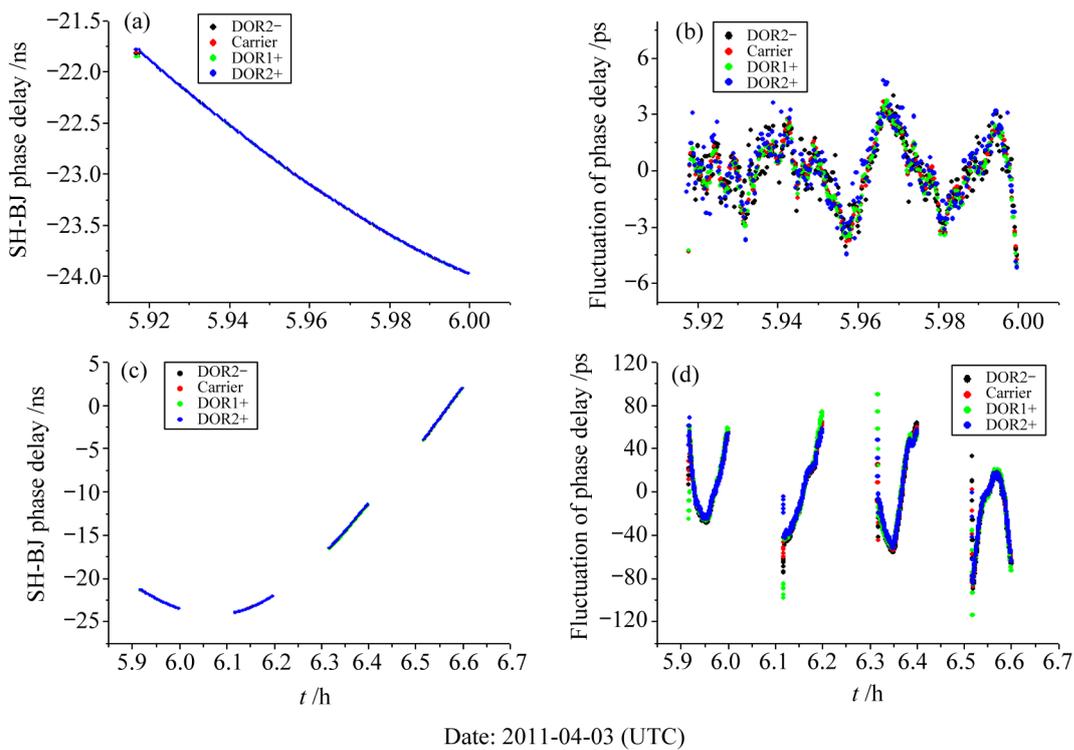


图 5 DOR 各侧音信号与载波信号相时延及抖动情况比较

(a) 连续观测情况下 DOR 各侧音信号与载波信号相时延比较及 (b) 9 次多项式拟合后的残差比较；(c) 间断观测情况下 DOR 各侧音信号与载波信号相时延比较及 (d) 9 次多项式拟合后的残差比较。

为了进一步研究相时延解算的准确性，同时也解算了信噪比较低的 DOR 侧音信号的残余相时延，并与载波残余相时延进行比较，如图 5 所示。由图 5(a) 和 (c) 中可以看出，各个频点的信号相时延趋势一致并几乎重合，也可以反映相时延解算的准确性。图 5(b) 和 (d) 反映出 9 次多项式拟合后残差的抖动情况。其中长周期的幅度较大的抖动主要由大气、电离层引起，此时信号的信噪比不占主导地位；对幅度较小的随机抖动来说，信噪比较低的侧音信

号相时延的抖动大于载波信号相时延的抖动, 符合相时延抖动大小依赖于信噪比大小的理论——信噪比越大, 相位测量值精度越高, 相时延抖动越小。另外, 图 5(b) 和 (d) 显示 VLBI 连续观测时, 残余相时延的抖动仅为数皮秒; 间断观测时, 残余相时延的抖动为几十皮秒。导致间断情况下残余相时延抖动增加的原因是它们的拟合时间间隔区别较大, 而对于较长时间的观测数据, 9 次多项式拟合无法完全去除大气电离层和轨道变化引起的长周期成分。

上述针对深空探测中 VLBI 相时延, 尤其是嫦娥二号卫星连续和间断两种观测模式的相时延进行解算方法的研究, 对时延解算中误差因素并未完全考虑, 比如未考虑大气电离层时延改正以及电离层对群时延和相时延影响相反等因素。今后将考虑这些影响并有望进一步提高相时延解算精度。

含微小偏倚量的 VLBI 相时延的测量误差含系统误差和随机误差, 主要体现在系统误差。解算方法中并不能准确保证每个观测弧段系统误差的大小, 导致各观测弧段闭合相时延误差各不相同; 但相时延的时延测量误差小于带宽综合群时延的时延测量误差。为使相时延的系统误差更小, 需进行进一步的深入研究。

## 4 结 论

前面给出了含微小偏倚量的 VLBI 相时延的解算算法, 并利用嫦娥二号  $\Delta$ DOR 观测数据进行了验证。结果表明, 连续观测和间断观测两种模式下, 含微小偏倚量的 VLBI 相时延的解算方法皆可行; 和带宽综合群时延相比, 相时延的时延测量误差能够降低, 具体表现为: 相时延的随机误差大幅降低, 体现出相时延观测的优势。

### 致谢

本文使用的数据是由上海天文台 VLBI 中心提供的, 在此感谢 VLBI 中心全体同仁。作者特别感谢钱志瀚研究员、蒋栋荣研究员、张秀忠研究员、王广利研究员和郑为民研究员在 VLBI 观测及处理中的工作对本文的帮助。

### 参考文献:

- [1] 欧阳自远. 地球科学进展, 2004, 19: 355
- [2] 吴伟仁, 王大轶, 李骥等. 中国科学: 信息科学, 2011, 41: 1054
- [3] Thornton C L, Border J S. Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation. New York: John Wiley. 2003: 47
- [4] 刘庆会, 史弦, 菊池东彦等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2009, 39: 1410
- [5] 刘庆会, 陈明, 熊蔚明等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2010, 40: 253
- [6] CHEN M, LIU Q H, WU Y J, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2011, 54: 2284
- [7] 吴伟仁, 黄磊, 节德刚等. 中国科学: 信息科学, 2011, 41: 1171
- [8] Rogers A E E. Radio Sci, 1970, 5: 1239
- [9] 陈明, 刘庆会. 天文学进展. 2012, 28: 415

[10] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Radio Sci, 2010, 45

## Method of Calculating VLBI Phase Delay Based on DOR Signal of a Satellite

CHEN Guan-lei, ZHENG Xin, CHEN Ming, LIU Qing-hui,  
DAI Zhi-qiang, WU Ya-jun, ZHAO Rong-bing

*(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of sciences, Shanghai 200030, China)*

**Abstract:** In deep space exploration, the VLBI technique is a precise method for the angular measurement, which can give the plane-of-sky position information. The group delay of DOR signal can usually be obtained with an accuracy of nanosecond in the VLBI observation. The accuracy of group delay can bring an orbital error of lunar probe about a hundred meters for a baseline of about 2000 kilometers. Especially in the further deep space exploration, the orbital error will be much larger. A method to calculate the small biased phase delay of VLBI is proposed in this paper in order to improve the accuracy of the orbit and position determination. The small biased phase delay is acquired by using the phase delay with ambiguity approaching the middle of bandwidth synthesis group delay of DOR signal. The method both in continuous and discontinuous observation is feasible, proved by processing the data from CE-2 satellite  $\Delta$  DOR experiments. The relationship between the group delay and phase delay is discussed. Both of the closure group delay and the closure phase delay of three baselines of SH-BJ, SH-UR and BJ-UR are calculated, and the errors of them are analyzed. The phases of the carrier and the DOR tones are compared to prove the validity of the method. The phase delay's error, especially the random error, can be reduced. The system error will be acquired hopefully during the further processing of orbital determination.

**Key words:** VLBI; deep space exploration; phase delay;  $\Delta$ DOR; bandwidth synthesis