

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.01.04

# 地球卫星 VLBI 观测研究进展

孙 焱<sup>1,2</sup>, 张 波<sup>1</sup>, 舒逢春<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 随着地球卫星在资源、导航定位、授时、跟踪以及数据中继等经济和军事领域的作用不断增强, 传统的测距测速技术已无法满足对卫星定位精度的实际需求。由于 VLBI 技术具有高精度角分辨率的特点, 人们尝试将其应用于人造地球卫星的观测。针对卫星 VLBI 观测方面, 首先介绍了卫星 VLBI 观测技术的基本原理及其与传统河外射电源 VLBI 观测的差异, 然后介绍了中外学者应用 VLBI 技术进行地球卫星观测的研究进展及相关成果, 最后对以往近地卫星 VLBI 观测研究存在的问题进行总结, 并讨论了目前以及将来可能的解决方案。

**关 键 词:** 甚长基线干涉测量; 地球卫星; 差分 VLBI

**中图分类号:** P164      **文献标识码:** A

## 1 引 言

人造地球卫星的常规跟踪定位技术基于雷达测距和多普勒测速技术。这两种技术可以直接测量卫星的径向距离和速度, 但是对横向方向位置及速度不敏感。随着地球卫星在资源、导航定位、授时、跟踪及数据中继等经济和军事领域的作用增强, 以及对卫星定位精度要求越来越高, 常规的测距测速技术已经无法满足实际需求。为了解决传统测量技术精度低的问题, 中外学者对卫星测量新技术进行一系列理论和实验研究。

甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术自 20 世纪 60 年代诞生以来, 被广泛应用于天文、测地及航天等多个研究领域。在天文和测地领域, VLBI 技术是目前世界上精度最高的一种空间测量技术。在航天领域, VLBI 技术应用最早可以追溯到 20 世纪 70 年代, 主要被用于各种人造天体的追踪定位<sup>[1]</sup>, 如旅行者系列飞船<sup>[2]</sup>、伽利略飞船、海盗号飞船<sup>[3]</sup>、火星全球勘探者和火星奥德赛 (Mars Odyssey) 探测器等的导航。与传统测量技术相比, VLBI 技术具有高精度、高分辨率和多用途的特点; 只需要接受下行信号, 不需要关注上行信号, 观测很短时间便可得到高信噪比的观测量; 利用两条基线同时观测,

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-05-07

资助项目: 国家自然科学基金 (11673051); 中国科学院百人计划项目

通讯作者: 孙焱, suny@shao.ac.cn

通过观测时延和时延率就可以解算卫星的位置及速度。同时 VLBI 技术对于垂直于视线方向的位置变化有很高的敏感度,解决了传统测量技术精度低的问题。正是由于 VLBI 技术有着这些常规测量技术无法替代的技术优势,因此,它在人造卫星观测定位方面具有非常广泛的应用前景。

本文第 2 章主要介绍卫星 VLBI 观测基本原理,以及卫星 VLBI 观测与常规 VLBI 观测的差异;第 3 章主要介绍目前卫星 VLBI 观测研究进展。最后总结了目前卫星 VLBI 观测研究存在的问题,并对将来的研究内容提出一些设想。

## 2 卫星 VLBI 观测介绍

### 2.1 VLBI 观测基本原理

VLBI 的基本观测量是时延,一般时延可以描述为:

$$\tau = \tau_g + \tau_{\text{err}} , \quad (1)$$

其中,  $\tau$  为 VLBI 观测时延,  $\tau_g$  为仅由射电源与台站位置差异引起的射电源信号到达两台站的时间差,即几何时延,  $\tau_{\text{err}}$  为包括电离层、中性大气、钟差和仪器误差等各种系统误差以及 VLBI 测量的随机误差对时延的贡献<sup>[4]</sup>。

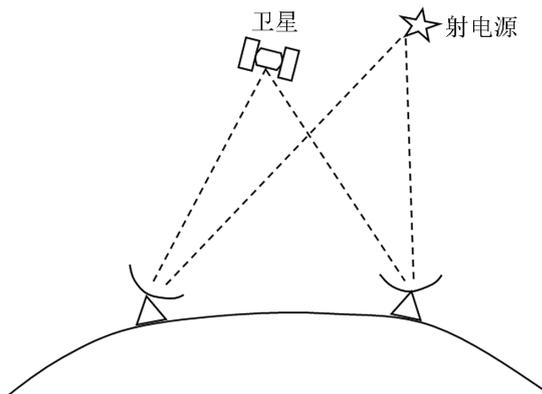


图 1 卫星差分 VLBI 观测示意图

对于卫星 VLBI 观测一般采用的是差分 VLBI 观测,如图 1 所示。所谓差分 VLBI 观测<sup>[5]</sup>就是利用 VLBI 技术,通过同时或交替跟踪多个射电源,来获取射电源间的精确角距。如包含目标源(卫星)和参考源(河外射电源)的一组射电源,由于目标和参考源(有时也称校准源)的观测方向十分接近,两者的非几何时延中有一些成分几乎相同,如钟差、仪器时延等。另外一些有关空间方向的成分,如电离层时延和中性大气时延等也可以近似认为是相同的。一般对卫星进行观测时,选取目标卫星附近位置精确已知的河外射电源作为参考源进行准同时观测,再将两者观测量

进行差分以消除两者共同的误差影响,由此可以获取卫星与参考源精确的相对位置。差分 VLBI 观测时延可以表示为:

$$\tau_{\text{目标}} = \tau_{g1} + \tau_{\text{err}1} , \quad (2)$$

$$\tau_{\text{参考}} = \tau_{g2} + \tau_{\text{err}2} , \quad (3)$$

其中,  $\tau_{\text{目标}}$  为目标观测时延,  $\tau_{\text{参考}}$  为参考源观测时延。由于射电参考源位置精确已知,参考源几何时延( $\tau_{g2}$ )可以通过已知参数和模型计算获得。由于目标与校准源位置十分接近,所以

我们假设  $\tau_{\text{err}1} \approx \tau_{\text{err}2}$ , 以消除大部分观测中的传播介质误差、钟差及仪器误差。由此可得:

$$\tau_{\text{目标}} = \tau_{\text{g}1} + (\tau_{\text{校准}} - \tau_{\text{g}2}) . \quad (4)$$

理论上利用 3 个以上 VLBI 测站同时进行观测, 通过式 (4) 就可以算出目标空间坐标分量。

## 2.2 卫星 VLBI 观测及数据处理

2.1 节主要介绍了 VLBI 观测的原理, 本节主要对 VLBI 观测纲要编制、卫星跟踪方法及数据处理进行简单介绍。

### 2.2.1 观测纲要编制及天线跟踪方法

在每次 VLBI 观测实验之前, 人们都会进行实验设计, 即观测纲要编制。卫星 VLBI 观测纲要编制时主要考虑因素包括台站网、观测历元、校准源选取和观测目标的方位角和高度角, 以及观测需要确定的参数等。为了能够得到理想的观测结果, 根据各个台站分布, 确定可以利用的台站观测网。观测历元必须有足够多的时间, 并需要确定卫星和参考源最合适的观测时间。参考源选取原则上是选取与卫星角距离较小且位置精确已知的河外射电源, 卫星及参考源的位置数据事先确定并可以直接使用。随着相关研究发展, 卫星 VLBI 观测纲要编制的软件正在开发当中。

在常规的 VLBI 观测中, 在所有参加观测的 VLBI 测站运行期间, 观测目标 (即射电源的位置) 在天球参考架下被假设固定不变, 所以在观测期间, 天线仅需要随地球的自转缓慢跟踪射电源即可。由卫星 VLBI 观测可知, 相对于遥远射电源, 卫星的运动速度较快。因此, 参与观测的台站天线需要对卫星进行跟踪, 国外采用“stepwise”方法<sup>[6]</sup>跟踪卫星, 如图 2 所示, 即事先将卫星轨道转化为一系列不同的赤道坐标数据输入到台站天线控制文件中, 在观测目标卫星时根据文件中坐标数据在规定时间内天线重新定位卫星的位置。国内通常采用直接给台站天线提供不同观测时刻卫星的方位与俯仰角<sup>[7]</sup>的方法, 实现对卫星进行跟踪观测。

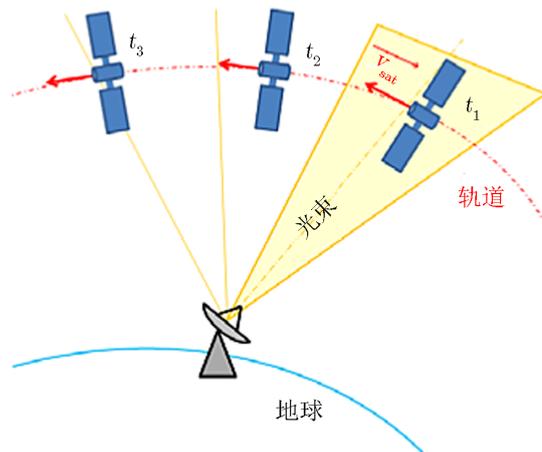


图 2 stepwise 方法基本原理<sup>[6]</sup>

### 2.2.2 卫星 VLBI 观测数据相关处理

台站原始观测数据的相关处理直接影响整个 VLBI 观测结果, 所以相关处理机软件是 VLBI 观测系统中重要的组成部分。DiFX (D istributed FX Correlator) 软件是 2006 年由澳大利亚 Adam Deller 博士开发的一款 VLBI 数据相关处理软件。DiFX<sup>[8, 9]</sup> 是一款开源的软件, 具有灵活、移植性高、计算速率高等特点, 是目前十分成功的相关处理软件之一。软件发布之后应用广泛, 许多科研机构对其进行完善和发展。目前美国甚长基线阵列 (Very Long Baseline Array, VLBA), 德国马普射电天文研究所, 澳大利亚国立天文台, 韩国 VLBI 网以及中国 VLBI 网 (Chinese VLBI network, CVN) 相继使用 DiFX 作为 VLBI 数据相关处理软件。下面以 DiFX 相关处理软件为例, 介绍卫星 VLBI 观测数据相关处理过程。使用 DiFX 软件进行数据相关处理需要进行一些准备工作, 确保软件运行顺利。除了各个台站的观测数据外, DiFX 软件需要一个 Vex 文件, 即 VLBI 观测纲要文件, 该文件主要提供观测的各种信息, 包括观测时间、观测目标、校准源位置、台站信息、观测频率、频段等。另外, 在 Vex 文件中, 人们会添加各个台站观测记录的时钟信息, 以提供各个观测台站的钟差钟速修正信息以及观测时段相应的地球自转参数。在准备结束后就可以运行 DiFX 进行数据相关处理。首先运行 DiFX 的子程序 vex2difx 读取 Vex 文件信息, 然后运行程序 calcif2 生成相关文件, 其中包括了基线投影、几何延迟、干涉模型等信息, 最后通过相应的命令 startdifx 运行程序, 生成相关处理结果文件。需要注意的是, 由于 DiFX 采用标准 (射电源) 模型来处理数据<sup>[10]</sup>, 所以需要将其替换成适用于卫星 VLBI 观测的模型。

### 2.3 卫星 VLBI 观测与常规的 VLBI 观测差异

由于河外射电源与 VLBI 测站距离非常远, 所以信号波前传播到地面台站的路径被视为平行的。与河外射电源相比, 人造地球卫星距离测站较近, 信号传播路径不能简单视为平行。如图 3 所示, 人造地球卫星相对于河外射电源的角速度非常快, 对于选取合适的参考源具有一定难度。

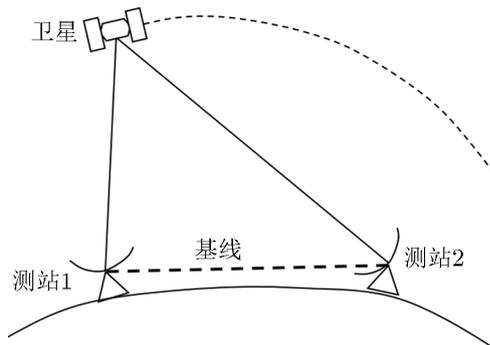


图 3 卫星信号路径图示意图

同时常规的河外射电源 VLBI 观测是通过 VLBI 网持续观测一组河外射电源, 从而解算出测站坐标、源坐标及地球定向参数 (earth orientation parameters, EOP) 等; 对于卫星 VLBI 观测, 假设已知精确的测站坐标、EOP 等参数, 一般利用两条近似正交基线同时观测, 通过观测时延和时延率就可以解算卫星的位置及速度。基线越多, 则对卫星各个方向的约束越好, 越有利于卫星位置解算精度的提高。

在观测数据误差修正方面, 常规的测地 VLBI 观测通过较长时间对河外射电源的持续观测, 在保证对源与站坐标、EOP 等测量参数解算精度的同时, 还可以对大气时延误差和钟差等进行解算。对于卫星 VLBI 观测, 由于观测目标一般为单个而且观测受多因素影响, 所以可以求解的测量参数较少, 往往将站坐标及 EOP 等参数视为精确已知。一般利用与位置精确已知的河外射电源差分观测修正大气时延误差、钟差及仪器差等。

通过从射电参考源选取、信号传播路径、观测方式及观测误差修正方面的比较, 可以看出卫星 VLBI 观测与常规 VLBI 观测有着较大差别。特别是误差修正方面, 卫星 VLBI 观测往往需要与邻近射电源进行差分。

### 3 卫星 VLBI 观测研究进展

根据卫星轨道高度, 用于 VLBI 观测的地球卫星主要有三类: 高轨道卫星、中轨道卫星以及低轨道卫星。目前 VLBI 技术用于卫星观测研究还处于探索阶段, 并没有太多的观测实例。随着地球卫星 VLBI 观测研究不断深入和发展, VLBI 将在卫星定位定轨方面起到重要的作用。

#### 3.1 高轨道卫星

地球同步卫星是运行在地球同步轨道上的人造卫星, 卫星距离地球的高度约为  $3.6 \times 10^4$  km。早期地球同步卫星对轨道精度要求并不高, 百米级精度就可以保证卫星正常工作运行。随着同步卫星在通讯、授时、气象、广播电视、数据中继等方面作用逐渐增强, 对于轨道精度要求越来越高。例如: 美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的跟踪和数据中继同步卫星 (TDRS)<sup>[1]</sup> 为了实现低轨道卫星精确定位, 要求提高同步卫星的轨道精度到米级; 在静止轨道上建立轨道深空中继站 (ODSRS) 的定位精度要求为米级; 我国导航系统为了满足卫星导航需求也需要同步卫星高精度的定轨<sup>[11]</sup>。

1982 年, Yunck 和 Wu<sup>[12]</sup> 利用双基线差分 VLBI 对同步卫星 (TDRS) 进行定轨研究, 结果表明, 精度可以达到米级, 基本可以满足低轨卫星导航要求。1984 年, Shiomi<sup>[13]</sup> 对地球同步通讯卫星 (CS) 进行类似的跟踪观测, 其时延残差大约在 2 ns, 利用观测量进行卫星定轨, 精度大约在百米级; 同时通过定轨精度分析以及模拟研究证明了差分 VLBI 地球同步卫星高精度定轨的实用性。1986 年, Shiomi 等人<sup>[14]</sup> 采用差分 VLBI 方法对地球同步卫星 DSCS-II 位置精度进行研究, 研究讨论了随机观测误差、时延误差、台站位置和校准源位置误差。通过卫星与校准源信号的观测数据处理, 采用差分方法得出了地球同步卫星定轨精度可以达到米级。研究还指出为了获取更精确的结果, 需要对大气模型误差进行修正。

2003 年在上海、乌鲁木齐和昆明站, 舒逢春等人<sup>[15]</sup> 开展了对地球同步卫星的首次差分 VLBI 观测。此次观测克服了卫星观测特殊性的困难, 成功地获得了卫星信号的干涉条纹。图 4 为上海-乌鲁木齐基线上卫星信号干涉条纹。基于条纹拟合的结果和系统差分析, 他们估算出双差单向测距的总误差约为 41 cm, 双差单向测速的总误差约为 0.148 mm/s, 相当于在地球同步轨道上 8 m 的位置误差, 2.8 mm/s 的速度误差。此次观测试验虽然成功获取了地球同步卫星信号的干涉条纹, 但是由于昆明站设备问题, 仅实现单基线 VLBI 观测。

2006 年杜兰等人<sup>[16, 17]</sup> 联合测距跟踪网与 VLBI 观测资料对同步卫星定轨进行了数值模拟研究。研究中, 他们采用测距网数据和附加 VLBI 数据的测距网数据分别对卫星进行定轨计算。图 5 给出两种数据定轨计算结果。研究结果表明, 仅利用中国 VLBI 网少量的同步卫星观测数据可以减小测距网偏差对定轨精度的影响, 使轨道切向分量的精度提高 1~2 个数量

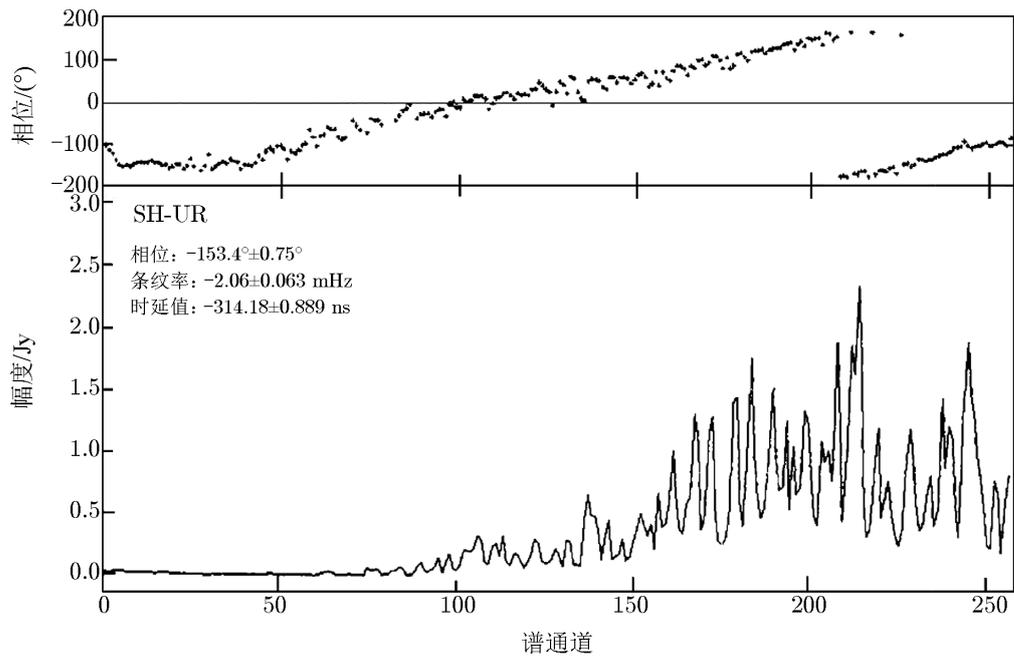
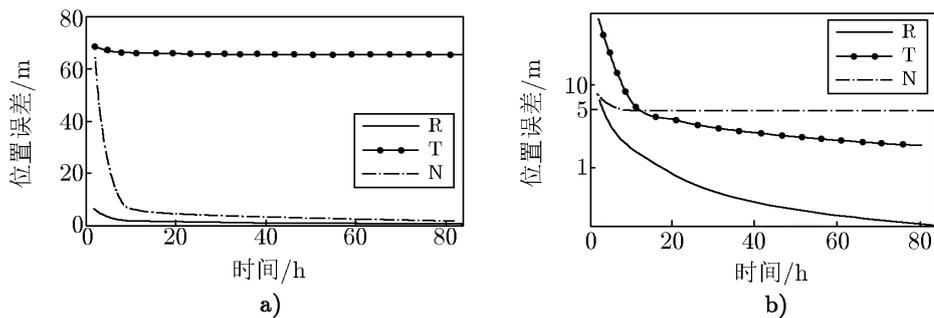


图 4 上海-乌鲁木齐基线卫星信号在频域上的干涉条纹<sup>[15]</sup>



注: R 表示径向, T 表示迹向, N 表示法向。

图 5 a) 仅测距网数据计算结果; b) 附加 VLBI 数据计算结果<sup>[16]</sup>

级, 从而在整体上使地球同步卫星的轨道精度从百米至数十米量级提高到米级。

2011 年, 黄勇等人<sup>[11]</sup> 利用 CVN 的 4 个 VLBI 站对地球同步导航卫星进行了连续 24 h 的跟踪观测研究试验, 采用了卫星的 S 波段信号成功获得 VLBI 观测数据资料。综合了 VLBI 观测数据和转发式测距数据进行卫星定轨后分析, VLBI 时延测量精度约为 3.6 ns, 时延率精度约  $4 \times 10^{-3}$ 。单独使用测距数据定轨与综合测距数据和 VLBI 数据定轨结果对比分析 (如图 6 所示), 发现利用测距数据定轨轨道径向方向位置误差较小, 轨道误差主要来自横向方向。单独使用 VLBI 观测数据定轨与综合定轨结果对比分析, 如图 7 所示, 发现轨道的三维位置误差在 15 m 左右, 但径向方向位置误差明显偏大。综合以上结果表明, 利用 VLBI 数据与

测距数据联合定轨, VLBI 数据定轨横向约束高、径向约束较差与测距数据定轨横向约束差、径向约束高可以形成互补, 从而提高对同步卫星整体的定轨精度。

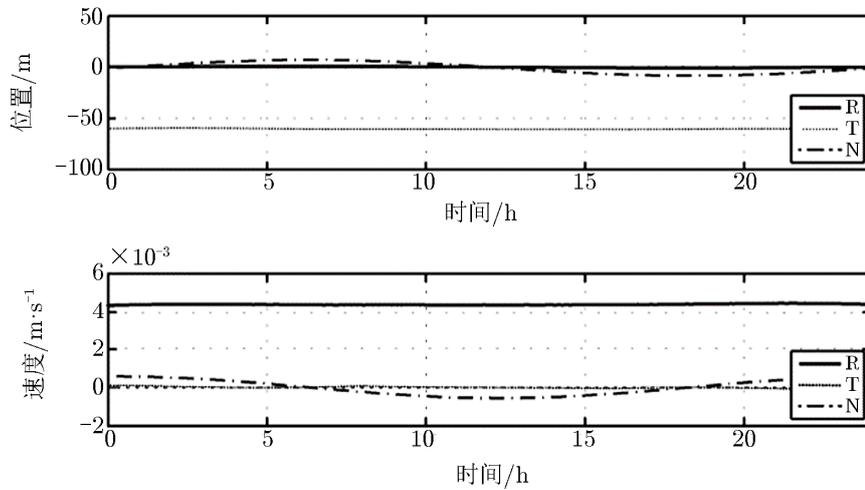


图 6 测距定轨与联合定轨结果对比<sup>[11]</sup>

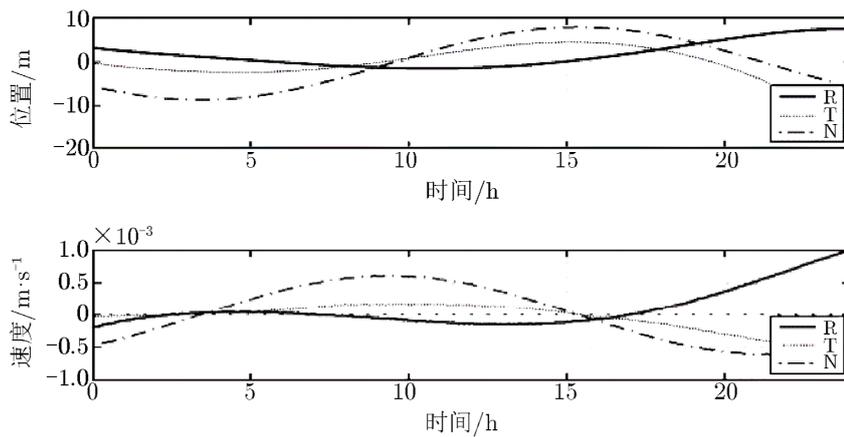


图 7 VLBI 数据定轨与联合定轨结果对比<sup>[11]</sup>

2017 年 8 月, 国家授时中心所属长春、喀什和三亚 VLBI 站, 对中星 12 号地球同步轨道卫星开展了 VLBI 试验观测<sup>[18]</sup>, 试验中射电源观测采用 512 MHz 带宽, 中星 12 卫星采用 32 MHz 带宽, 进行差分观测, 试验结果表明中星 12 号卫星时延测量精度优于 0.2 ns。此次 VLBI 试验观测的同时, 也采用转发式测定轨技术 (orbit observation and determination via transfer, OODT) 开展观测, 并进行 2 h 观测弧段的短弧定轨。试验结果表明, 与单独的 OODT 短弧定轨结果相比, 联合定轨的轨道精度改进 17%。使用 2 h 的 OODT 和 VLBI 观测的联合短弧定轨结果, 与 4 h 的单独 OODT 定轨精度相当。

双星计划的“探测一号”是中国发射的一颗大椭圆轨道卫星，远地点高度比地球同步轨道高了一倍多，主要用于探测近地磁尾区的磁层空间暴过程及向阳面磁层顶区太阳风能量向磁层中的传输过程。2004年在修复了昆明站设备问题后，舒逢春等人<sup>[19]</sup>利用CVN对“探测一号”卫星进行观测并成功获取了3条基线的卫星VLBI观测资料，这是世界上首次获取到的大椭圆轨道卫星的实测VLBI资料。2006年黄勇等人<sup>[20]</sup>利用舒逢春等人获取的观测资料对“探测一号”卫星进行定轨，探讨了VLBI定轨的能力，并分别利用VLBI时延数据和时延率数据进行卫星定轨，结果表明，使用VLBI定轨拟合精度比测控部门的初轨的精度提高不少。他们利用卫星轨道和观测条件模拟VLBI观测数据并进行数值模拟分析，然后在不考虑动力学模型误差情况下利用VLBI数据进行定轨，结果发现精度大约为百米级，卫星定轨误差如图8 a)所示。在考虑太阳辐射压模型误差情况下重新利用VLBI数据进行定轨，其结果精度在千米级，卫星定轨误差如图8 b)所示。由此可以得出，实际利用VLBI数据定卫星轨道的位置精度可能要差于千米量级。如图9所示，在考虑太阳辐射压模型误差情况下进行VLBI与测距数据联合定轨，结果发现精度在百米级，精度提高了约一个量级。

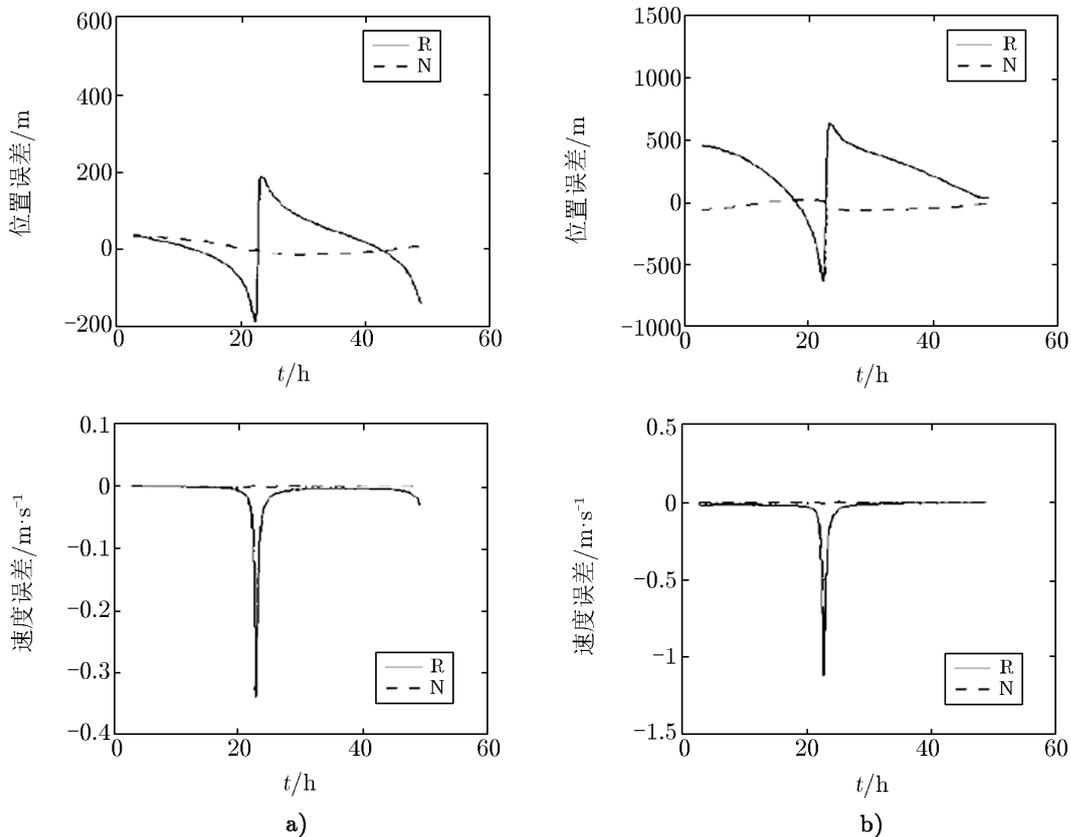


图8 a) 无动力学模型的定轨误差; b) 考虑太阳辐射压模型的定轨误差<sup>[20]</sup>

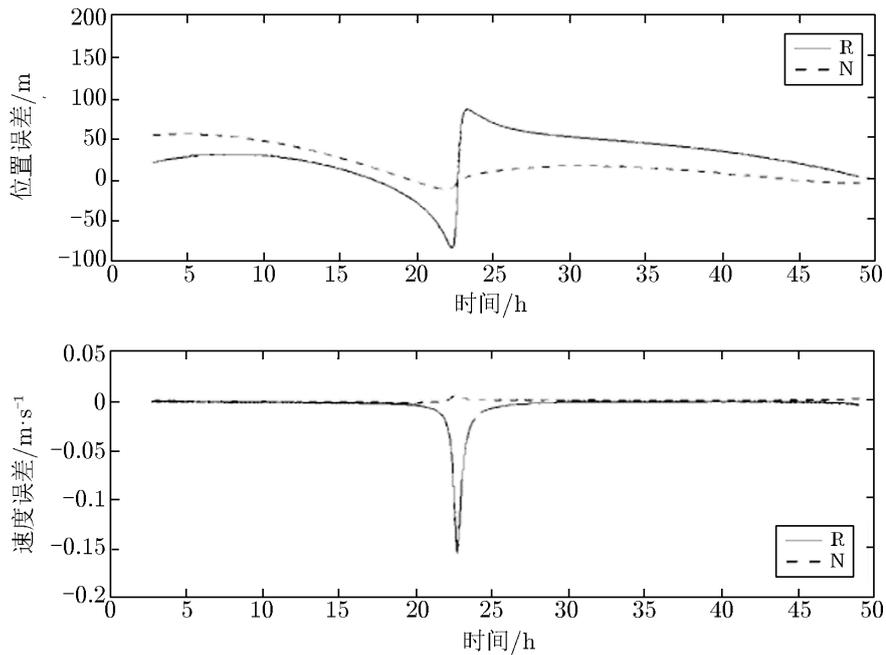


图 9 VLBI 与测距数据联合定轨的精度<sup>[20]</sup>

### 3.2 中轨道卫星

文中所指的导航卫星是距离地球表面  $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$  km 的地球卫星。随着导航卫星在各个领域发挥越来越重要的作用, 其定位精度要求也越来越高。近些年诸多学者对 GNSS 卫星 VLBI 观测展开了一系列研究。利用 VLBI 观测 GNSS 卫星这个想法是在 21 世纪初提出的, 2001 年 Brian 在 IVS (the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) 首次提出利用差分 VLBI 观测 GPS 卫星相位中心位置的可能性, 并主要讨论了卫星 VLBI 观测技术、观测校准源选取及观测误差修正等问题<sup>[10]</sup>。之后类似于 Barsever 等人<sup>[21]</sup> 在 2009 年提出通过在微小卫星装置上搭载 GNSS, SLR, DORIS 以及 VLBI 的传感器, 实现融合多个空间大地测量技术来得到地球参考架的目标, 即 GRASP (Geodetic Reference Antenna in Space) 设想, 激发了诸多学者利用 VLBI 观测 GNSS 卫星的研究兴趣。

由于 GNSS 卫星信号波段是在 L 波段, 要求进行 VLBI 观测的射电望远镜需要装载 L 波段接收机而不是常用的 S/X 波段信号接收机, 所以欧洲大多数的观测试验选择在 Onsala (瑞典), Medicina (意大利) 和 Wettzell (德国) 3 个站进行。2010 年 Tornatore 等人<sup>[22, 23]</sup> 在 Medicina 和 Onsala 两站进行 GLONASS 卫星差分 VLBI 观测试验, 成功观测了 3 颗 GLONASS 卫星。通过处理卫星和校准源的 VLBI 观测数据, 获得了卫星和校准源的干涉条纹, 如图 10 所示。为了证明数据相关处理的可行性, 对观测数据进行延迟模型改正并得到了卫星和校准源的时延残差, 如图 11 所示。此次观测试验结果成功证明了 VLBI 观测 GNSS 卫星是可行的。

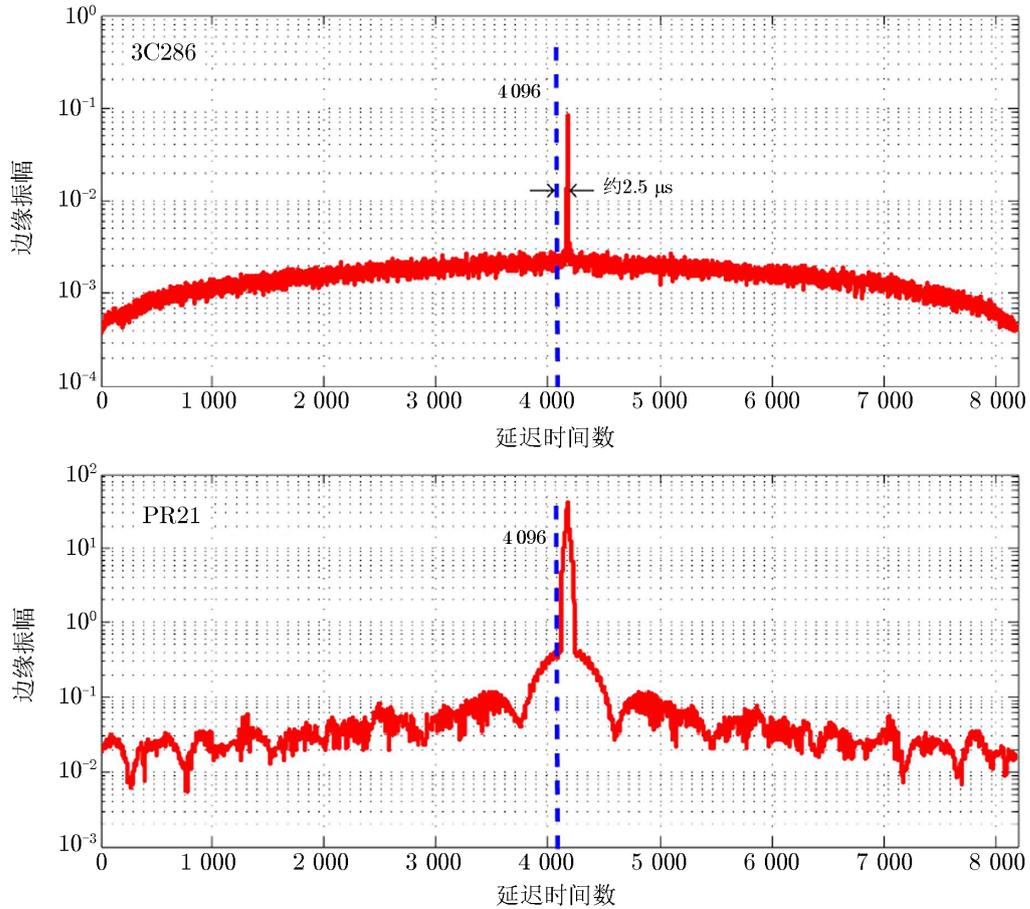


图 10 校准源 3C286 与卫星 PR21 干涉条纹<sup>[22]</sup>

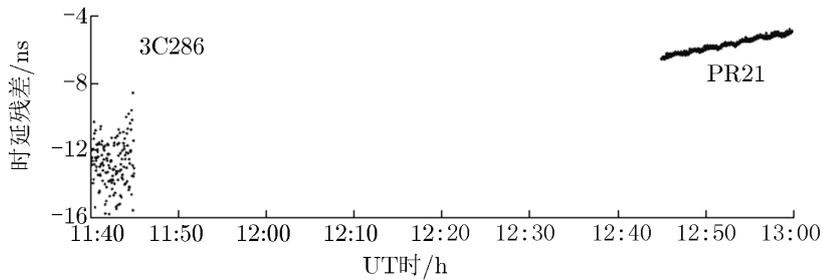
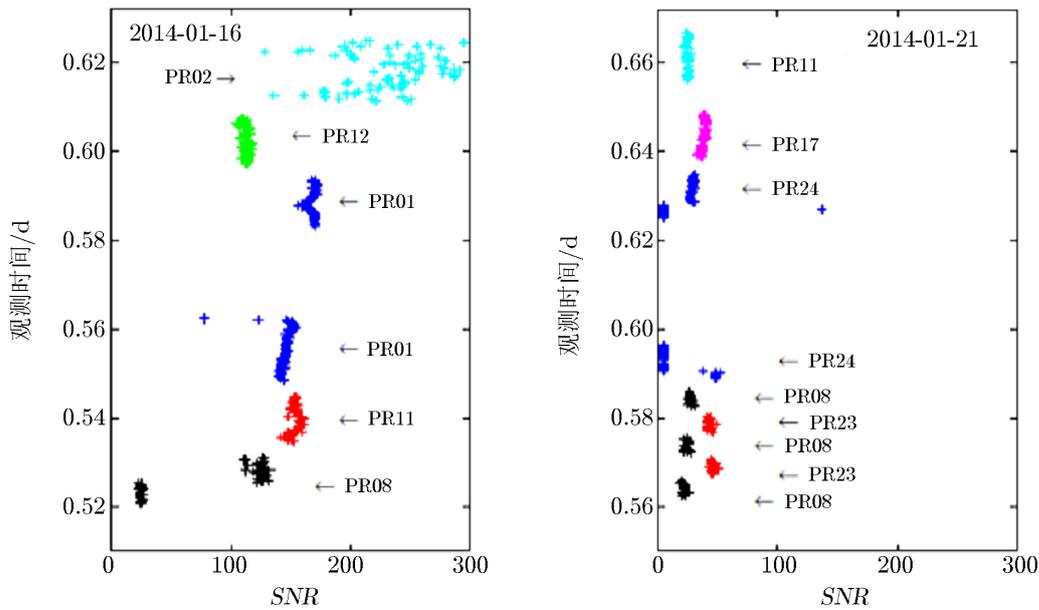


图 11 校准源 3C286 与卫星 PR21 的时延残差<sup>[23]</sup>

2014 年, Haas 等人<sup>[24]</sup> 在 Onsala-Wettzell 进行 GLONASS 卫星的 VLBI 观测试验, 并成功实现 8 颗 GLONASS 卫星的交替观测。与之前观测实验不同, 他们采用了 VieVs 软件的卫星模块生成观测纲要文件。VieVs 软件首先计算目标卫星位置, 检查在规定时间内特定 VLBI 测站是否可以观测; 然后检查观测的限制, 如天线转动速度等, 再选取适合的校准

源; 最后生成观测所需控制文件。观测数据相关处理是由软件 DiFX 进行的, 通过 Fourfit 软件进一步处理, 得到了 8 颗 GLONASS 卫星的干涉条纹。同时还对两天观测到的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 值进行了对比, 发现 21 号比 16 号的 SNR 明显要小并且相关处理相位和幅值也更差。图 12 给出两个观测时段观测卫星的 SNR。Haas 等人认为这是由于 21 号观测卫星信号接受端采用更高信号衰减造成的。另外他们还对观测相关处理结果数据采用不同时长进行测试, 结果证明只需要短时间观测就可以得到足够信噪比的观测数据。

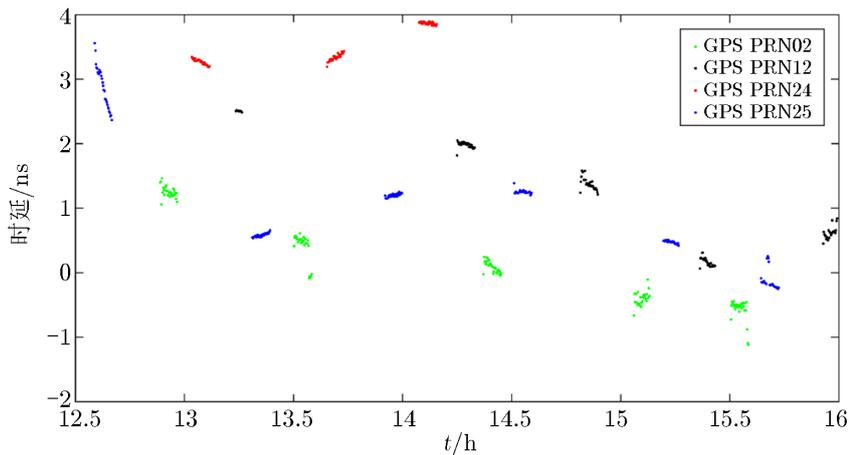


注: PR01, PR02, PR08, PR11, PR12, PR17, PR23, P241 是 8 颗 GLONASS 卫星的代号。

图 12 两个观测时段 8 颗卫星信号的 SNR<sup>[24]</sup>

2015 年, Hellerschmied 等人<sup>[6, 25]</sup>利用 Tornatore 等人获得的卫星 VLBI 观测数据, 在澳大利亚的 Hobart 和 Ceduna 进行了 GNSS 卫星 VLBI 观测试验, 成功观测了 GLNOASS 和 GPS 卫星。Hellerschmied 等人采用了 VieVs 的卫星模块制定观测计划, 观测数据相关处理主要由 DiFX 进行, 观测信号干涉条纹拟合由 AIPS 和 Fourfit 完成。图 13 所示, 他们把 7 月 24 日相关处理后卫星观测时延数据与在 VieVs 中先验模型计算时延数据进行对比, 发现各个卫星时延变化范围为 1~4 ns; 对一颗卫星不同观测时段的时延变化进行分析, 其均方误差为 10~100 ps。此次研究表明, 利用规划、观测、数据获取及已成功建立起的相关处理卫星 VLBI 观测程序, 可以用于实际的卫星 VLBI 观测。

2015—2016 年期间, Plank 等人<sup>[10]</sup>在澳大利亚的 Hobart 和 Ceduna 进行 GNSS 卫星 VLBI 观测研究。首次跟踪测试观测于 2015 年 6 月进行, 同年 8 月又进行了两次测试观测, 最后的观测试验于 2016 年 5 月完成。此次 VLBI 观测 GNSS 卫星试验包括从观测规划到观测数据分析的整个过程, Plank 等人利用已有的程序、设备及软件, 尽最大努力完善精简这个过程。综合之前的观测研究, Plank 等人采用软件 VieVs 首次实现了自动调度卫星与校准



注: PRN02, PRN12, PRN24, PRN25 是 4 颗 GPS 卫星的代号。

图 13 时延随时间的变化<sup>[6]</sup>

源观测; 在观测方面, 对观测天线、观察频率设置、卫星跟踪及信号进行了相应的调整和改善; 在观测数据处理方面, 相关处理使用了 DiFX 最新版本, 条纹拟合使用了 AIPS, 还使用了 Haystacky 天文台后处理系统的 fourfit。由于参考源时延数据精度较差, 后处理仅对卫星观测数据进行分析, 分析结果显示, 对于 5 min 观测时延精度, L1 波段比 L2 波段高。他们认为该结果的产生原因可能是, 卫星观测信号在 L1 波段, 信噪比高且稳定; 而在 L2 波段较低, 且易变。在数据分析方面, Plank 等人采用已开发的 VieVs 组件 VieVS2tie 对卫星观测数据进行测试。提取两个观测时段卫星数据进行分析, 其时延残差约 8 ns。如图 14 所示, 利用时延残差分别根据观测时间和卫星平均仰角作图, 发现同一卫星仰角越小, 其时延数据残差越大, 从而推断可能与信号传播介质有关, 比如电离层。使用 GNSS 观测所得全球总电子含量分布图对观测时延进行电离层修正, 结果显示时延残差降至 4 ns。之后为了进一步研究采用了更精确的电离层模型进行修正, 得到的时延残差精度比之前修正结果更高 (见图 15)。

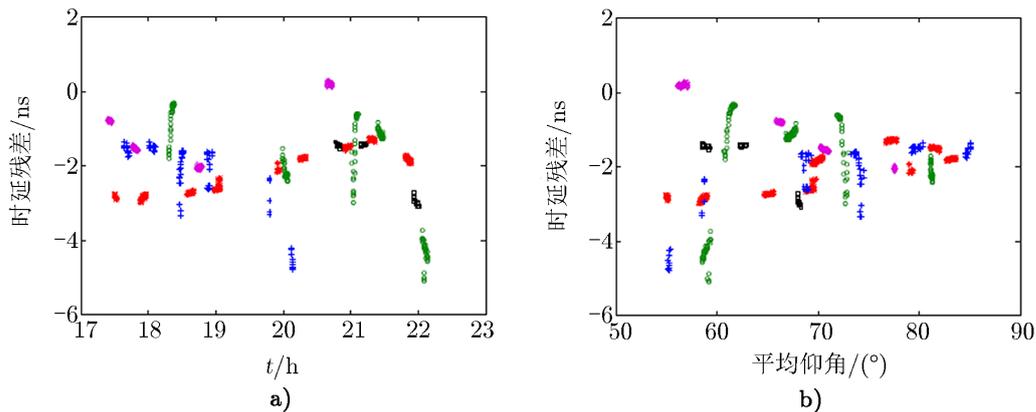
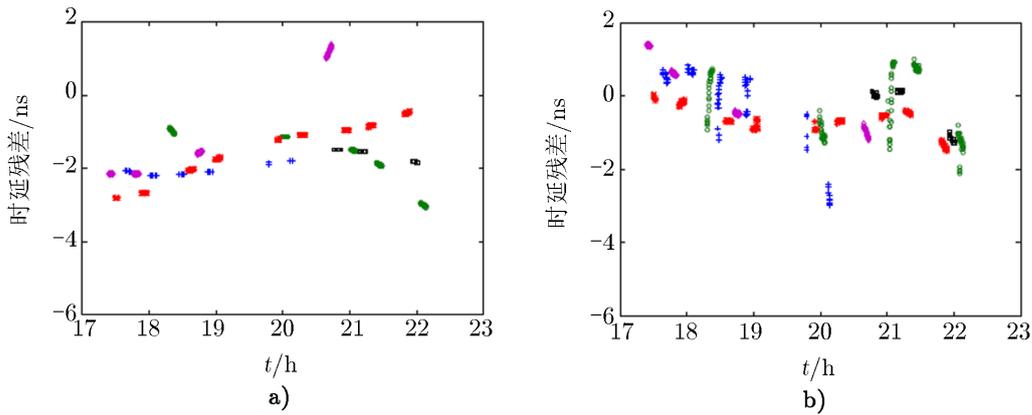


图 14 a) 时延残差与时间的关系; b) 时延残差与卫星仰角的关系<sup>[10]</sup>



注: a) 全球 TEC 图; b) 复杂电离层模型。

图 15 两种电离层改正后时延残差结果 [10]

### 3.3 低轨道卫星

APOD (Atmospheric Density Detection and Precise Orbit Determination) 卫星是一颗具有双频 GNSS (GPS/BD) 接收机、SLR 反射器和 VLBI X/S 双波段信标的低轨道卫星。2016 年 Sun 等人 [26] 对低轨道地球卫星 APOD 进行 VLBI 观测研究。为了克服低轨卫星观测的困难, 他们进行了多次准备测试。观测纲要的编制采用常用的 VieVs 软件; 为了跟踪快速运行低轨卫星, 天线控制软件采用了多种模式来测试, 最后采用了以时间标记的卫星 Az/EI 位置列表输入天线控制来跟踪卫星。在观测数据处理中, 由于相关处理模型采用的 APOD 卫星星历精度较低, 因此他们采用了 stepwise 方法, 通过 APOD 载波信号和 DOR 信号互相关获取观测卫星信号干涉条纹, 结果如图 16 所示。相关处理输出时延测量精度 S 波段为 0.6 ns, X 波段为 0.1 ns。Sun 等人首次成功地利用 VLBI 技术观测了低轨道地球卫星, 这对于未来实现用多空间测量技术观测地球卫星有着重要意义。

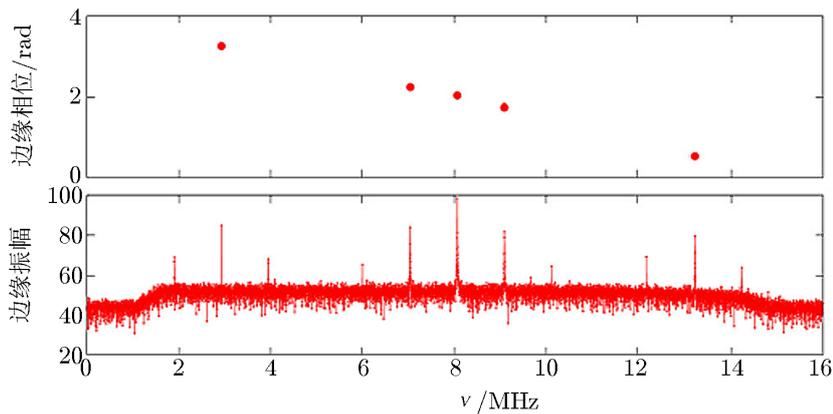


图 16 某观测时段卫星信号干涉条纹 [26]

## 4 存在的问题

由于地球卫星与传统河外射电源观测存在着许多不同之处,人们在进行卫星 VLBI 观测研究的过程中,不可避免地遇到一些问题。早期由于仪器设备等问题,只有少数的测站天线具备观测卫星的条件;目前随着仪器设备的不断更新和改进,越来越多的 VLBI 测站具备了观测卫星的能力。同时有的地球卫星上也装载了专门的 VLBI 信标,但是目前类似的卫星并不普遍,这对于卫星 VLBI 观测研究有一定的影响。

在观测纲要编制方面,由于没有专门应用于卫星的观测纲要编制软件工具,观测纲要编制需要耗费大量时间。同时由于不同类型 VLBI 观测的要求不同,观测纲要编制变得越来越困难。为了克服这些困难,Vienna VLBI 软件 VieVs 开发了用于编制卫星 VLBI 观测纲要专用模块,此模块根据输入台站、观测时间、卫星等相关参数检查以下三个方面:观测天线是否可观测卫星,卫星与太阳间距离是否超出阈值,观测天线是否具备足够跟踪卫星的能力。最后获得控制 VLBI 天线和台站设备的 VEX 文件。目前研究结果显示,在获得必要的先验观测以及确定观测要求情况下,VieVs 可以实现自动编制 GNSS 卫星和射电源的组合观测。但是由于不同的台站具有不同的天线控制系统,目前该软件的功能无法广泛用于卫星 VLBI 观测纲要。

在观测跟踪卫星方面,卫星比河外射电源的运行速度快很多,如同步卫星相对于河外射电源以约  $15^\circ/\text{h}$  的速度沿天赤道运行。国外在相关的观测实验中一般采用的是 stepwise 方法,即首先将卫星一系列轨道坐标数据输入到台站天线控制文件中,在观测目标卫星时天线根据文件中坐标数据在规定时间内重新指向卫星的新位置,以实现跟踪观测。在国内早期观测试验中,观测人员采用人工控制天线方法来实现观测地球静止卫星。目前人们采用直接给台站天线提供观测时刻卫星的方位与俯仰角的方法进行观测,即首先在观测纲要文件中定义卫星名称,在观测过程中观测目标判断为卫星时,台站天线通过卫星方位及俯仰角数据文件对卫星进行跟踪。与国外的跟踪方法相比,这种方法可以保证天线平滑稳定跟踪卫星,观测的实际效果较好。

由于测站坐标及 EOP 等相关参数精确已知,一般主要考虑卫星信号传播介质效应对观测数据的影响。对于电离层改正来说,一般河外射电源 VLBI 观测采用双频观测模式来消除电离层延迟,但是卫星 VLBI 观测无法实现类似河外射电源 VLBI 的双频观测,目前最常用的电离层延迟改正模型主要是建立在 GNSS 测量全球总电子含量分布图的基础上。卫星 VLBI 观测研究证明了这种电离层延迟改正模型的可行性,但是这种方法无法改正所有的电离层传播效应的影响。由于对流层延迟会随着观测目标高度角的降低而增大,一般采用沿测站天顶方向的对流层延迟与高度角相关的映射函数计算观测方向上对流层的延迟。这种方法虽然在一定程度上实现对流层改正,但是其改正结果并不理想,主要原因是对流层的湿大气引起的天顶方向延迟随着时间、地点及气候等条件的变化而变化。为了进一步提高观测非几何时延改正结果,中国学者提出了一种多校准源的差分 VLBI 观测方案<sup>[27]</sup>,利用同一观测时段多颗校准源的观测内插出卫星观测方向的非几何时延修正,以此获取对卫星非几何时延

秒级改正精度。如何进一步提高观测时延精度问题需要进行更多相关的卫星 VLBI 观测试验, 人们须根据实测数据研究设计一个切实可行的方案。

## 5 总结与展望

我们介绍了近些年国内外 VLBI 技术应用于地球卫星观测方面的研究进展。自 20 世纪 80 年代开始, VLBI 技术开始应用于地球卫星的观测研究, 早期观测目标主要是类似同步卫星的高轨道卫星。随着技术的不断发展, 人们逐渐开展了低中地球轨道卫星的观测, 观测目标包括 GNSS 卫星和 APOD 卫星。这些观测表明, 该方面研究的发展前景巨大。同时, 我们还分析讨论了地球卫星 VLBI 观测研究存在的问题及解决方案。在观测仪器设备方面, 台站信号接收机基本已经符合观测要求; 虽然卫星上已经开始装载 VLBI 信标, 但是并不普遍, 还需要一段时间发展。在观测纲要制定方面, 目前 VieVs 软件已经具备了卫星 VLBI 观测纲要制定的能力, 但是由于天线控制系统的原因, 软件仅适用于部分地区 VLBI 网。在观测跟踪卫星方面, 与国外采用的方法不同, 中国采用直接提供卫星方位角与仰角的方法进行引导跟踪, 实际观测效果更好。在观测系统差修正方面, 针对观测数据系统差修正方法不理想的问题, 我们提出了一种多校准源的差分 VLBI 观测方案; 但是要实现该方案, 还需要进行更多相关卫星观测试验来验证。

目前 VLBI 技术已经在月球探测计划中得到充分应用, 也将应用于中国其他深空探测计划。作为传统测距测速空间测量技术的有益补充, VLBI 技术发挥其自身技术优势, 丰富完善了地球轨道卫星测量技术。随着观测技术的进一步发展, 并结合其他空间测量技术, 如 SLR 和 GNSS 等, 卫星 VLBI 观测将在地球卫星轨道测定方面发挥重要作用。

### 参考文献:

- [1] 平劲松, 钱志瀚. 天文学进展, 1997, 15: 3
- [2] Sekido M, Ichikawa R, Yoshikawa M, eds. SICE Annual Conference. Takamatsu: IEEE, 2008: 3029
- [3] Soffen GA, Snyder CW. Science, 1976, 193: 759
- [4] 李金岭, 张津维, 刘鹏, 等. 航天器工程, 2012, 21: 62
- [5] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学. 济南: 山东科学技术出版社, 2000: 62
- [6] Hellerschmied A, Böhm J, Neidhardt A, eds. EGU General Assembly. Vienna: EGU, 2015: 13935
- [7] 舒逢春. 博士论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2008: 26
- [8] 陈文. 硕士论文. 云南: 中国科学院云南天文台, 2015: 86
- [9] Duev D A, Molera Calves G, Pogrebenko S V, et al. Astronomy and Astrophysics, 2012, 541: 515
- [10] Plank L, Hellerschmied A, McCallum J, et al. Journal of Geodesy, 2017, 91: 867
- [11] 黄勇, 胡小工, 张秀忠, 等. 科学通报, 2011, 56: 1974
- [12] Yunck T P, Wu S C. AIAA/AAS, 1982, 82: 1446
- [13] Shiomi T, Kozono S I, Arimoto Y, et al. Radio Research Laboratory, 1984, 30: 185
- [14] Shiomi T, Kawano N, Border J. International Symposium on Space Technology and Science, 1986, 2: 1147
- [15] 舒逢春, 张秀忠, 郑为民. 中国科学院上海天文台年刊, 2003, 24: 105

- [16] 杜兰, 郑勇, 李杰. 测绘科学技术学报, 2006, 23: 269
- [17] 杜兰, 郑勇, 张捍卫, 等. 测绘科学技术学报, 2003, 20: 100
- [18] 弓剑军. 博士论文. 西安: 国家授时中心, 2017: 12
- [19] 舒逢春, 郑为民, 蒋栋荣, 等. 天文学报, 2007, 48: 239
- [20] 黄勇, 胡小工, 黄斌, 等. 天文学报, 2006, 47: 82
- [21] Barsever Y, Haines B, Wu S. Egu General Assembly. Hellerschmied A, Böhm J, Kwak Y, eds. Vienna: EGU, 2009, 11: 1645
- [22] Tornatore V, Haas R, Duev D, et al. Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. Alef W, Bernhart S, Nothnagel A, eds. Bonn: EVGA, 2011: 162
- [23] Tornatore V, Haas R, Casey S, et al. Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. Rizos C, Willis P, eds. Berlin: Springer, 2014: 247
- [24] Haas R, Hobiger T, Hellerschmied A, eds. EGU General Assembly, Vienna: EGU, 2015: 107
- [25] Hellerschmied A, Böhm J, Kwak Y, eds. EGU General Assembly, Vienna: EGU, 2016: 8895
- [26] Sun J, Tang G, Shu F, et al. Advances in Space Research, 2018, 61: 823
- [27] 李金岭, 王静. 测绘科学技术学报, 2007, 24: 79

## Research Progress of Earth Satellite VLBI Observation

SUN Yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, SHU Feng-chun<sup>1</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** With the increasing role of Earth satellite in the economic and military fields, such as resource exploration, navigation and positioning, timing, tracking and data relay, the accuracy of satellite positioning using the traditional ranging and range-rate technology is no longer high enough for practical application. Owing its high precision angular resolution, VLBI technology has been applied for observation of artificial satellites. In this paper, we first introduce the basic principles of satellite VLBI observation, and its difference from the traditional VLBI observation of celestial radio source VLBI observations; then we describe the domestic and foreign satellite VLBI observation and their related achievement; finally, we discuss the problems existing in the past Earth satellite VLBI observation, and the current and future possible solution.

**Key words:** very long baseline interferometry; Earth satellite; differential VLBI