



VLBI 应用于 GEO 导航卫星的测定轨

黄勇^①, 胡小工^①, 张秀忠^①, 蒋栋荣^①, 郭睿^②, 王宏^③, 石善斌^③

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

② 北京环球信息应用开发中心, 北京 100094;

③ 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

E-mail: yongh@shao.ac.cn

2011-03-11 收稿, 2011-04-19 接受

国家自然科学基金(10703011, 11073047, 11033004)、国家高技术研究发展计划(2008AA12A209, 2008AA12A210)和上海市科学技术委员会(06DZ22101)资助项目

摘要 我国区域卫星导航定位系统的星座设计包括了 5 颗或更多地球同步卫星, GEO 卫星相对于地面测站的运动较小, 且由于需要维持轨位而必须较频繁地机动轨道, 这两个特点对 GEO 导航卫星的精密定轨都提出了新的挑战. 目前已有采用 C 波段转发式测距和 L 波段直发式伪距测量实现 GEO 卫星精密定轨的成功实践. 本文将在探月工程“嫦娥一号”和“嫦娥二号”测定轨中发挥重要作用的 VLBI 技术应用于 GEO 卫星测定轨, 介绍了 VLBI 的测定轨原理和系统差校正方法, VLBI 测量主要约束了 GEO 卫星的南北和东西位置分量. 中国 VLBI 网(CVN)对某 GEO 导航卫星进行了 24 h 观测试验, 本文综合利用 VLBI 测轨数据和 C 波段转发式测距数据进行定轨分析, VLBI 时延测量精度约 3.6 ns, 时延率约 0.4 ps/s. 分析表明, VLBI 数据提供了对测距数据系统差的标定, 而综合两种类型数据联合定轨可以显著提高卫星机动后轨道快速恢复定轨预报精度.

关键词

GEO 卫星
VLBI
测定轨

GPS 系统的星座由分布于 6 个轨道面的超过 24 颗 MEO(Medium Earth Orbit)卫星构成^[1], 而我国卫星导航系统作为区域导航系统, 空间部分采用地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)/倾斜地球同步轨道(Inclined Geostationary Earth Orbit, IGSO)/MEO 混合星座设计, 导航系统由 3 颗 GEO, 3 颗 IGSO 和 24 颗 MEO 卫星构成^[2]. GEO 卫星的任务之一是通过改善用户定位的精度放大因子 GDOP 提高区域用户的定位精度, 之二是提供不间断的短报文 RDSS(Radio Determination Satellite Service)服务. 导航卫星的精密定轨是整个卫星导航系统运行的基础, 与其他轨道类型卫星相比, GEO 卫星精密轨道确定存在较大的困难, 主要表现在: (1) 由于 GEO 卫星轨道高约 36000 km, 跟踪站布设范围相对较小, 集中于国内, 使得对 GEO 卫星的观测几何结构强度相当差; (2) GEO 卫星与地面跟踪站的位置相对静止, 站星几

何的变化很小, 增加观测时间带来的信息量有限, 使得一些系统误差如钟差及测站偏差等难以解算和分离; (3) 为了保持位置相对地球同步, GEO 卫星需要频繁地实施机动控制, 也给 GEO 卫星精密轨道的确定和预报带来较大麻烦^[3-6].

GEO 卫星常用的测控手段是 S 波段统一测控系统(USB)观测技术, 其测距精度为 m 级^[7,8], 卫星定轨精度为百米量级水平, 可以完成卫星常规定轨和测控任务, 但是为了满足卫星导航对定轨精度的要求, 还需要发展更高精度的 GEO 卫星测轨技术. 目前高精度的 GEO 卫星测定轨技术主要还是距离测量, 包括伪距和载波相位测量、转发式测距测量和激光测距等模式. 利用伪距对 GEO 卫星定轨, GEO 卫星的静地特性致使在定轨解算中无法对星地组合钟差进行有效估计, 需要星地时间同步和站间时间同步的支持^[7]. 同样, 载波相位测量虽然精度很高(mm 量级),

但需克服整周模糊度等问题. C 波段转发式测距的噪声为 cm 量级, 但跟踪站设备的时延误差和卫星的转发器时延误差将直接影响 GEO 卫星的定轨精度. 卫星激光测距(SLR)精度高, 目前已经达到 cm 级或 mm 量级, 但要实现对 36000 km 外的 GEO 卫星的激光测距, 对卫星上的激光反射器和地面的激光测距系统都提出了很高的要求^[9], 而且激光测距受天气等因素影响较大, 测量数据有限, 一般作为定轨精度外符之用.

为了进一步提高 GEO 卫星的轨道确定精度, 针对传统测定轨手段的不足, 国内外一些学者对 GEO 卫星测定轨新技术展开了一系列理论研究和实验. 这些新技术包括: 高分辨率角度观测, 如甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、连线干涉测量(CEI)以及高精度 CCD 光学照相等技术, GPS 辅助 GEO 卫星精密定轨技术以及天地基联合定轨等^[3,10]. 欧吉坤等人^[3]针对 GEO 卫星与地面跟踪网之间几何结构不好引起的法方程病态的问题, 提出了镜面投影法.

VLBI 技术诞生于 20 世纪 60 年代, 具有高精度、高分辨率以及多用途等特点, 在天文地球动力学和大地测量中得到了富有成果的应用^[11]. VLBI 测量的实质是测角, 其对与视线垂直方向上卫星的轨道和位置变化有很高灵敏度, 是对测距测速技术的有益补充^[8]. VLBI 测轨时只需要接收卫星的下行信号, 即使卫星非常遥远, 下行信号非常微弱, 也不会影响相关处理, 因此, 目前 VLBI 在卫星测轨方面的应用主要在月球和深空探测^[8,12-14], 我国的“嫦娥一号”、“嫦娥二号”月球探测卫星采用了 USB 和 VLBI 联合测轨模式, 大大提高了卫星的测定轨精度, 特别是短弧段的定轨精度, 这也是世界上首次将 VLBI 应用于实时航天工程^[8].

针对天线与设备的技术老化, 系统运行维护的高成本等问题, 国际 VLBI 服务组织(IVS)正在积极推进下一代 VLBI 系统, 即 VLBI2010^[15-17]. 下一代的 VLBI2010 系统天线口径更小(10~12 m), 时延测量精度更高、操作效率更高, 实时能力更强. 将从目前固定的 S/X 双频带系统提高为 4 频带系统, 且各频带可以在 2~14 GHz 范围内自由设置^[15]. VLBI2010 使得利用 VLBI 观测 GNSS(Global Navigation Satellite System)卫星成为可能^[18]. 利用 VLBI 对导航卫星的观测资料, 联合已有的距离测量量, 可以提高定轨精

度, 也可以如激光数据一样作为轨道精度外符合检验. VLBI 是实现天球参考架以及 UT1、章动的唯一空间观测技术, VLBI 对导航卫星的观测还可以更有效地解决不同类型观测资料的并址问题, 提高天球参考系和地固参考系的测量和维系精度, 并通过章动序列和地球定向参数序列的解算将这两个参考系联系起来^[19].

中国 VLBI 网(Chinese VLBI network, CVN)包括上海(25 m)、北京(50 m)、昆明(40 m)和乌鲁木齐(25 m)四架射电天线和一个相关处理中心(上海)^[12,14], 一直活跃在国际 VLBI 研究领域, 在 VLBI 技术研发以及射电天文和天测与测地应用研究领域获得了宝贵的知识、技术与经验储备, 在国际相关领域也拥有一席之地, 已成功地完成了“嫦娥一号”、“嫦娥二号”月球探测工程测轨任务, 并参与了日本 SELENE-1 月球探测的国际联合观测^[12], 并将承担我国的火星探测器测定轨任务^[14]. 上海佘山 65 m 射电天线已于 2009 年底奠基, 至 2012 年底将基本建成^[16].

在 VLBI 对 GEO 卫星定轨方面, 杜兰等人^[10]做了一些仿真工作, 仿真结果表明, 仅利用不定期的少量 VLBI 高精度数据就能够显著改善测距偏差对轨道的影响, 保证卫星的整体位置解算精度. 杜兰等人^[20]还分析了短基线干涉测量应用于 GEO 卫星定轨的可行性.

为验证 VLBI 应用于 GEO 导航卫星测定轨的可行性, CVN 组织国内 4 个 VLBI 站对某 GEO 导航卫星进行了 24 h 的连续跟踪实验, 利用的是星上的 S 波段测控信号, 成功获得了 VLBI 时延和时延率数据. 本文对 GEO 导航卫星的 VLBI 测轨数据进行了分析, 并且综合已有的导航测量资料进行了联合定轨分析, 对 VLBI 应用于导航卫星的测定轨进行了一定的探讨.

1 VLBI 的测定轨原理和测量系统差校正

在 VLBI 技术的天文或大地测量应用中, 观测对象是遥远的射电源, 由于这些天体到观测站的距离相当遥远, 与 VLBI 基线的尺度相比是一个无穷大量, 因此可以假定被不同天线接收到的由射电源发出的电磁波为平面波^[11]. 本文讨论的则是对有限距离人造天体的 VLBI 观测, 此时观测对象是位于有限空间距离的人造信标, 所发出的电磁波信号是以球面波形式传播的, 而非平行平面波^[21].

根据 VLBI 的测量原理, 射电信号干涉后得到的是同一信号到达两个天线的延迟以及时间延迟的时间变化率^[19]. VLBI 的观测一般有群时延和相位时延两种, 群时延是通过相关相位除以电磁波的带宽得出的, 由于电力及可用频段等条件的限制其发射电磁波的带宽一般小于 10 MHz, 所以群时延的测量精度一般限制到纳秒量级. 如果星上能够发送多频点的信标, 由于各个频点的频率间隔即相当于带宽, 其间隔越大, 求出的群延迟的精度就越高. 相位时延是相关相位的绝对值除以载波信号的频率得出的, 如在 S 频段观测, 其分母约为 2200 MHz, 故其测量误差可以降到很小的 ps 量级^[22]. 在日本 SELENE 月球卫星观测中, 已经实现了 ps 量级的差分相位时延观测及其卫星定轨工作^[22,23].

根据 VLBI 的测量原理, 选取典型特例, 对 VLBI 测量误差和卫星轨道径向、横向误差之间的关系进行了定性分析. 利用几何关系, 根据图 1, 对于 MEO/GEO 或者更高卫星, L 可以近似认为是卫星到测站距离, 在 L 远大于基线长度时, 泰勒展开后仅保留一阶项, 轨道横向误差 $\Delta\epsilon$ 反映到 VLBI 时延测量上的误差 $\Delta\tau$ 关系为

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\epsilon}{c} \cdot \frac{B}{L}, \quad (1)$$

其中 c 为光速. 而轨道径向误差 ΔR 反映到 VLBI 时延测量上的误差 $\Delta\tau$ 关系为

$$\Delta\tau = \frac{\Delta R}{c} \cdot \frac{x^2}{2L^2}. \quad (2)$$

由(1)和(2)式可知, VLBI 测量对轨道横向误差敏感, 而且基线 B 越长, 卫星越低, 对轨道的约束越强. 以 GEO 卫星为例, 3000 km 基线长度, 1 ns 的时延测量误差相当于约 4 m 的轨道误差.

在定位计算中, 至少需要 3 个台站组成 3 条基线, 才能解算位置 3 个分量. 在定轨计算中, 由于采用统计定轨方法, 即使一条基线的 VLBI 测量数据也能进行轨道解算. 当然, 基线越多, 对卫星各个方向的约束越好, 越有利于定位和定轨解算精度提高.

为了消除仪器延迟误差和测站钟差等系统误差, 目前广为采用的是较差 VLBI 测量, 其测量原理是卫星观测的同时交叉观测卫星附近的河外射电源, 以此消除共同的仪器延迟误差和测站误差, 电离层和对流层的大气传播误差也部分被消除^[8,11,13]. 在 VLBI 卫星观测的实际工作中, 首先选择探测器附近空间区域内的河外射电源进行观测, 通过对观测数据进行相关处理, 可以得到河外射电源发射的射电信号到达地面两个天线的时延差, 这个时延差被称为河外射电源观测时延 τ_{RSO} , 河外射电源观测时延中含有很多系统误差项, 包括介质传播误差、时间同步误差和设备时延等, 河外射电源观测时延和几何时延 τ_{RS} 的关系为

$$\tau_{\text{RSO}} = \tau_{\text{RS}} + \Delta\tau_{\text{RS}}. \quad (3)$$

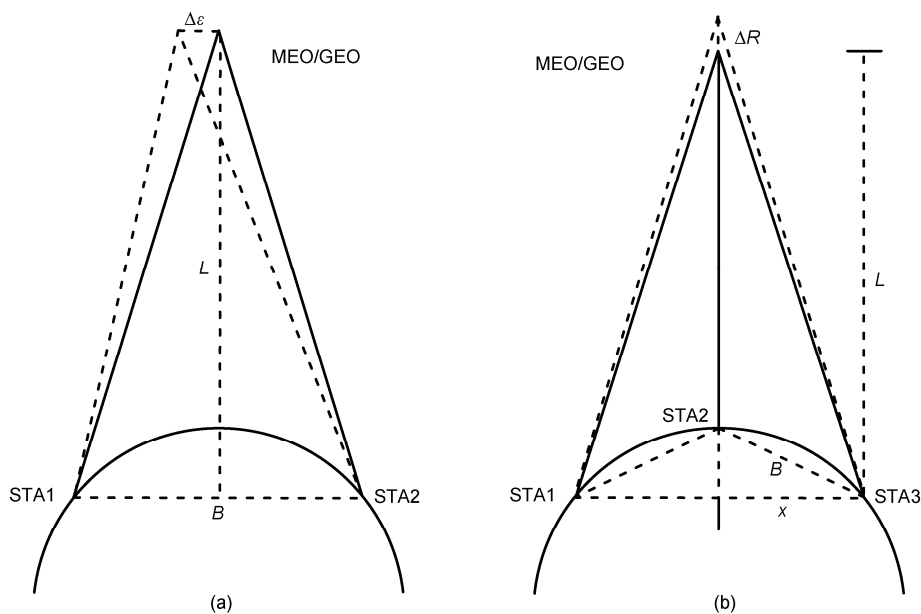


图 1 轨道横向(a)和径向(b)误差与 VLBI 时延误差的关系示意图

射电源观测后进行卫星观测,同理可以得到卫星观测时延和几何时延的关系:

$$\tau_{\text{SCO}} = \tau_{\text{SC}} + \Delta\tau_{\text{SC}} \quad (4)$$

经过 30 多年的 VLBI 测量,ICRF2 的 295 颗射电源位置测量精度已好于 $0.3 \text{ mas}^{[11,13]}$. 由于河外射电源的位置已知, τ_{RS} 可以通过计算获得,这样其观测时延的误差项可以通过 $\Delta\tau_{\text{RS}} = \tau_{\text{RSO}} - \tau_{\text{RS}}$ 求得. 由于探测器和河外射电源的角位置非常靠近,可假设认为 $\Delta\tau_{\text{SC}} \approx \Delta\tau_{\text{RS}}$, 这样,由电离层、对流层等传输介质引起的时延误差、时钟同步误差、测量设备时延误差可以被大部分扣除^[13].

在嫦娥任务实时工作模式中,在卫星观测开始前观测约 1 h 射电源,解算各条基线的钟差和仪器时延差等系统误差,“嫦娥一号”任务时同时解算各条基线的时延率,用于实时任务中后续卫星观测数据的修正. 在后续卫星观测时,每隔 1 h 观测约 20 min 射电源,在卫星观测结束后,再进行一次加强射电源观测,事后工作模式则利用所有的射电源观测数据对卫星数据进行时延和时延率修正.

由于系统差变化率的校正精度将直接影响到实时卫星数据的精度,例如 1 ps/s 的校正误差在 1 h 后将会带来 3.6 ns 的 VLBI 时延误差,在嫦娥二号卫星观测中,卫星观测前的射电源数据处理中不再解算各条基线的时延率,而是采用了氢原子钟频率准确度的标校方法,氢原子钟的长期稳定度可达 $10^{-15} \sim 10^{-14}$,精度很高,观测结果证明这种校正方法有效可靠,提高了准实时数据的校正精度,特别是时延数据的系统误差测定精度,该方法的好处还在于可以使测量数据没有中断,更加连续. 在此次 GEO 卫星的 VLBI 观测实验中,实时数据也采用了这种校正方法,每隔 1 h 仍然观测约 20 min 射电源,用于事后数据处理.

2 数据分析和讨论

CVN 于 2010 年 8 月 26 日组织对 GEO 导航卫星的 VLBI 观测实验,观测时间 24 h,卫星观测频率 2.2 GHz ,观测带宽 2 MHz ,卫星定位在东经 84° . 参加台站为上海、北京、昆明、乌鲁木齐,4 个站构成了 6 条基线,其中东西方向的上海-乌鲁木齐构成了最长基线,长度 3249 km ,最短基线为上海-北京,长度 1114 km . 每个观测站都装备了 S/X 波段双频致冷接收机、VLBI 数据终端、氢原子钟等 VLBI 观测设备,

上海处理中心建有 4 台站的 VLBI 数据相关处理系统^[11]. 此次实验获得了 VLBI 时延和时延率数据,数据采样率为 5 s . VLBI 时延数据的噪声水平约为 1 ns ,时延率噪声约为 0.2 ps/s .

数据处理中还用到了 GEO 卫星的 C 波段转发式测距数据,该系统由中国科学院国家授时中心(NTSC)首创,利用星上转发器实现地面站到卫星的距离测量,相对于传统的无线电测量方式,其测量精度高,是一种新型的卫星测定轨手段^[24,25]. 转发式测距数据采样率为 1 s ,国内观测网 4 个台站,测距数据的噪声水平约为几 cm .

导航卫星精密定轨一般利用伪距和相位测量数据,但是对于 GEO 卫星,由于其特殊的“静地”特性,使得单星定轨时无法同时解算各测站伪距钟差或者相位模糊度,必须事先通过时间同步等技术确定钟差后再进行定轨,因此在本文的定轨分析中并未采用这类数据.

在定轨数据分析中,考虑到单独利用转发式测距数据定轨需要事先标定系统差,因而首先综合 VLBI 和测距数据联合定轨,同时求解转发式测距各站系统差;然后对测距数据单独定轨情况进行分析,着重分析系统差先验值对定轨精度的影响;还尝试单独利用 VLBI 数据进行定轨;针对 GEO 卫星机动后轨道快速恢复问题,进行了短弧定轨预报精度分析.

分析过程采用的天文常数、参考系、力学模型和测量模型参照(1996)IERS 规范,力学模型包括: (1) 日月引力摄动; (2) 固体潮摄动; (3) 海潮摄动; (4) 地球形状摄动(JGM3 地球引力场模型,截取到 10 阶次); (5) 太阳光压摄动; (6) 广义相对论; (7) 地球自转形变摄动; (8) 经验加速度.

测量模型包括: (1) Saastamoinen-NMF 大气折射模型; (2) 固体潮引起的台站位移; (3) 永久潮汐项对台站的影响; (4) 海潮负荷潮对台站的影响; (5) 地球自转形变对台站的影响.

定轨计算中涉及到的参考系包括: (1) J2000.0 平赤道(X-Y平面)和平春分点(X轴方向); (2) IAU76 岁差; (3) IAU1980 章动模型,加上 IERS 章动改正; (4) DE403/LE403 行星历表; (5) 地球参考架 ITRF2000.

测量数据包括: (1) 转发式测距,4 站,采样率降频到 5 s ; (2) VLBI 时延和时延率数据,4 站 6 条基线,采样率 5 s .

定轨弧段取为 1 d, 待估参数包括初始历元 6 个轨道根数, 1 个光压系数 C_r , 每个测站的转发式测距数据系统差, 每 8 h 解算一组 T 方向经验加速度.

虽然转发式测距的测量精度很高, 但是其测距数据存在一定的系统误差, 主要来自于测站设备的信号延迟和星上的转发器时延, 其中星上转发器时延对各个测站数据均有影响, 该系统误差在 1 d 时间段内可以认为保持不变^[6]. 系统误差特别是测站设备时延的测定精度直接影响到定轨的准确度. 由于参数相关的原因, 在转发式测距数据单独定轨时, 不能同时解算出测站系统差和星上转发器时延, 相当于测量系统缺乏一个基准, 所以本文的测距系统差包含了星上和地面的综合影响. 对 GEO 卫星, 由于其独特的“静地”特性, 各测站系统差与轨道参数之间的相关性很强, 因此在利用转发式测距数据对 GEO 卫星定轨时, 一般首先确定各测站系统差, 李志刚等人^[25]采用约束各站系统偏差总和为零的原则, 对跟踪站的设备时延进行建模处理, 轨道的内符精度很好. 郭睿等人^[7]尝试利用激光数据标定转发式测距的系统差, 取得了很好的效果. 本文在综合利用 VLBI 数据和转发式测距数据定轨时, VLBI 数据也起到了标定转发式测距系统差的作用.

图 2 和 3 为 VLBI 和转发式测距综合定轨后的残差时间序列, 定轨后测距数据的残差 rms 约为 0.19 m, VLBI 时延数据残差 rms 约为 3.6 ns, VLBI 时延率数据残差 rms 约为 0.42 ps/s.

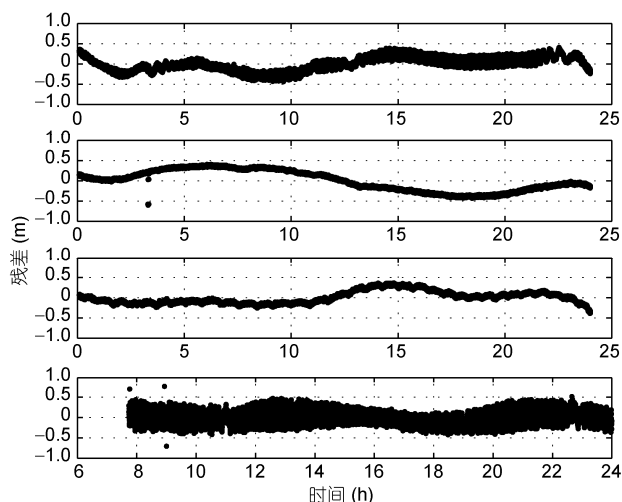


图 2 联合定轨后的转发式测距数据残差
从上到下分别代表 1~4 号站

从残差的时间序列分析看, 测距数据存在各站噪声不一致的情况, 1 号站和 4 号站的测量噪声偏大. VLBI 实时数据采用了氢原子钟频率准确度的标校方法, 观测中间每小时仍然观测 20 min 射电源用于事后数据处理, 因而会有观测空缺, 昆明站在约 12~14 h 缺失了约 2 h 数据是由于测站故障所致, 昆明站由于射电源观测较少, 时延校正精度较低, 其他一些故障也引起了 VLBI 测轨数据异常, 反映在残差图中, 在此不再详述. 总体来讲, VLBI 观测达到预期精度.

单独利用测距数据定轨, 如果解算系统差, 与综合定轨结果比, 在轨道切向(T 方向)会有约 60 m 的偏差, 见图 4(a), 相当于卫星轨道在轨道面旋转, 而 VLBI 数据相对于这条轨道的残差会有明显的约 10~20 ns 的偏差, 因此可以认为是解算系统差带来的轨道误差, 这也说明由于测站系统差和轨道参数之间的强相关性使得解算结果偏离了真值. 而数据分析还表明, 不同的系统差先验值也会给轨道结果带来较大的解算偏差, 主要反映在轨道切向方向. 进一步将联合定轨后解算出的转发式测距各站系统差作为先验值并固定, 测距数据单独定轨, 图 4(b)为定轨结果与联合定轨结果的差异, 与综合定轨解算结果比, 位置误差在 10 m 以内, 未见明显的系统性偏差. 图 4 还表明, 无论解算测站系统差与否, 利用测距数据定轨, 径向(R)误差都较小, 轨道误差主要来自于横向.

同时也尝试单独利用 VLBI 进行定轨, 与综合定轨结果的轨道差异见图 5, 虽然三维位置误差约在 15 m 以内, 但是与转发式测距定轨相比, VLBI 单独定轨的径向(R)方向的位置误差明显偏大, 最大接近 10 m, 反映出 VLBI 数据对轨道径向的约束较弱.

另外也尝试了利用少量 VLBI 数据进行联合定轨的分析, 杜兰等人^[10]的仿真工作表明, 仅利用不定期的少量 VLBI 高精度数据就能够显著改善测距偏差对轨道的影响, 保证卫星的整体位置解算精度. 本文利用中间约 3 h 的 VLBI 数据, 联合 24 h 测距数据进行定轨, 定轨精度并未显著下降.

以上分析表明, 联合 VLBI 数据和测距数据对 GEO 卫星定轨, VLBI 数据可以有效标定各测站的测距系统差. 另外, 测距数据对轨道的径向约束强, 测距数据定轨存在径向精度高, 横向精度差的特点, 横向精度往往比径向精度差 1 个数量级, 而 VLBI 数据对轨道的横向约束强, 联合定轨有助于提高定轨精

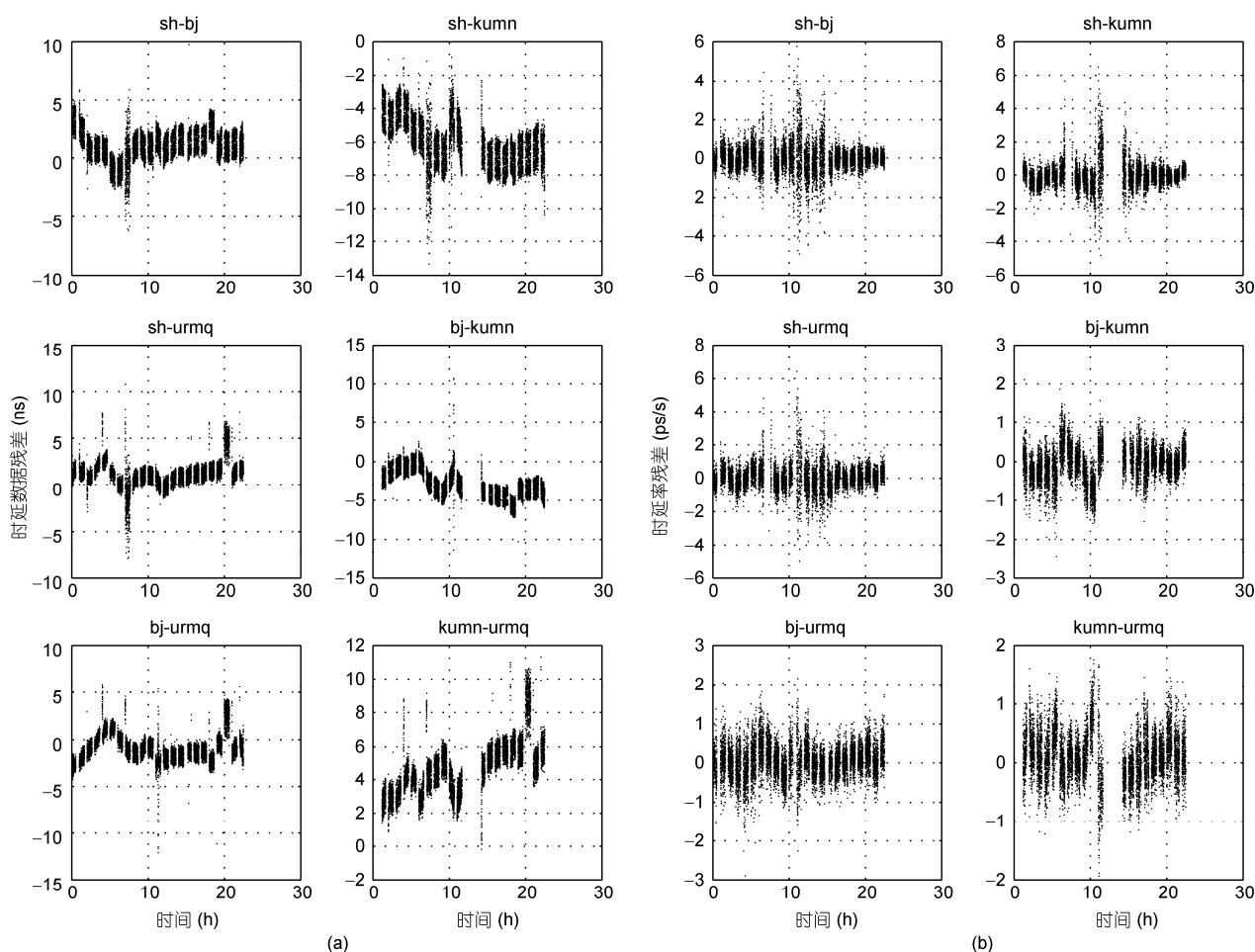


图3 联合定轨后的 VLBI 数据残差

(a) 时延数据残差; (b) 时延率残差

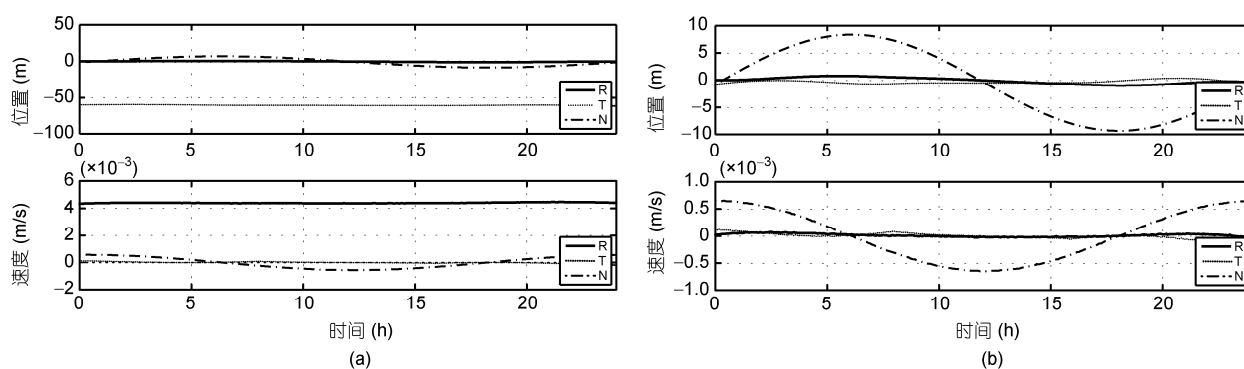


图4 单独利用测距数据定轨和联合定轨结果比较

(a) 解算系统差结果; (b) 固定综合解系统差结果. 上图为位置差, 下图为速度差, 分解到 RTN 三个方向

度. 同样, 在利用伪距数据对 GEO 卫星定轨时, 对星钟差和站钟差进行一定的建模处理后^[26], 联合 VLBI 数据, 也可以有效地解算 GEO 导航卫星的轨道以及钟差等参数.

GEO 卫星作为导航卫星, 有一个重要问题是卫星机动较为频繁. 基于统计定轨方法的预报轨道(或星历), 在卫星机动开始后将很快失效. 由于卫星机动开始后, 星上火箭推力器开始工作, 卫星机动会

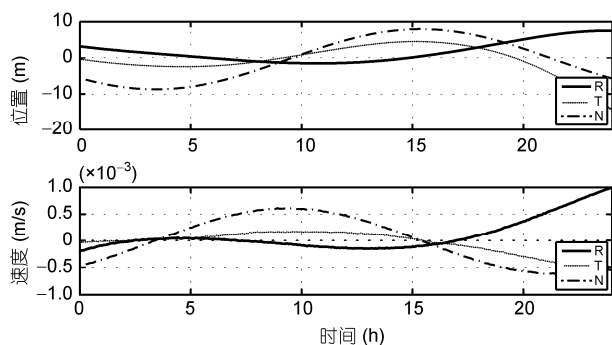


图5 单独利用 VLBI 数据定轨和联合定轨结果比较

使得轨道比预报轨道偏出几公里或数十公里。针对 GEO 卫星机动结束后的快速定轨, 提高导航星历可用度, 杨旭海等人^[6]利用 C 波段转发式测距进行了短弧定轨实验, 使用密集的短弧段观测资料, 并把公共系统偏差、各站系统偏差等作为常数(取自长弧段精密定轨), 主要解算 6 个轨道根数, 用统计定轨方法进行轨道预报, 通过减少解算参数提高预报精度, 可实现卫星星历的快速恢复。

本文综合利用 C 波段测距和 VLBI 数据进行短弧定轨, 根据实际情况, 定轨弧段取为 15 min, 预报 12 h, 计算测距数据相对于预报轨道的残差, 以此作为预报轨道径向(R 方向)精度。定轨预报分析结果表明, 综合利用 C 波段测距和 VLBI 数据 15 min 资料定轨, 预报 2 h, 轨道精度(O-C)约为 1.2 m, 预报 6 h, 轨道精度约为 4.4 m, 预报 12 h, 轨道精度约为 7.0 m。而如果仅单独利用 C 波段数据, 预报精度分别为 1.0, 8.1 和 18.8 m, 见表 1 和图 6, 表明 VLBI 数据参与短弧定轨可以有效提高轨道预报精度。

3 结论

作为传统卫星导航系统距离测量技术的有益补充, VLBI 技术可以丰富完善卫星导航系统的测轨技术, VLBI 既可以像激光数据那样作为标定和定轨精度外部检核, 也可以发挥其对轨道横向约束精度高的特点, 参与联合定轨, 提高轨道的横向定轨精度。

在本次 24 h GEO 导航卫星 VLBI 观测实验中, 采用了氢原子钟频率准确度的校正方法, 实验结果

表1 15 min 定轨预报轨道的 O-C 值(单位: m)

	外推 2 h 精度	外推 6 h 精度	外推 12 h 精度
测距	1.0	8.1	18.8
测距+VLBI	1.2	4.4	7.0

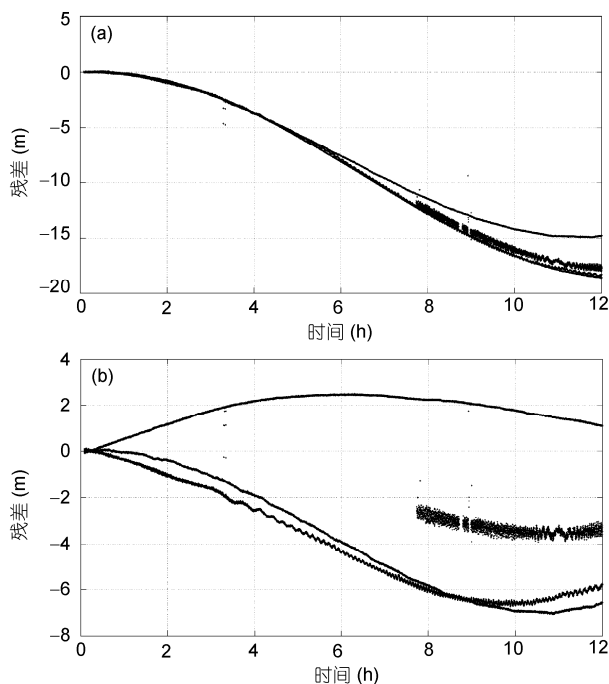


图6 短弧定轨预报轨道的 O-C 残差值

(a) 测距定轨结果; (b) 测距和 VLBI 联合定轨结果

表明该方法可靠有效, 该校正方法也已经应用到“嫦娥二号”卫星实时数据处理中, 取得了很好的效果。本次实验利用了 S 频段的测控信号, 观测带宽窄, 由于观测带宽等各方面的限制以及仪器设备故障等问题, 导致部分数据质量不高, VLBI 时延的测量精度限制在 3 ns 左右, 相当于轨道横向位置误差约 10 m, 远低于测距数据对轨道的径向约束精度, 因此在提高定轨精度方面作用有限, 综合定轨精度在 10 m 左右, 但是在标定测距系统差和轨道机动后快速恢复还是可以发挥重要作用。通过增加观测带宽(如增加到 16 M 带宽)或让卫星发射类似 DOR 的多频点信号, 提高射电源校正精度等技术手段, VLBI 观测精度可以进一步提高, 时延测量精度可以提高到 0.1 ns 左右甚至更高, 在“嫦娥二号”测定轨工作中, 利用带宽综合或者 DOR 数据处理方法, 已经实现了噪声精度优于 0.1 ns 的 VLBI 观测。

VLBI 技术已经在“嫦娥一号”、“嫦娥二号”和 SELENE 等月球探测计划中得到了充分应用, 也将应用于我国的火星探测计划和后续深空探测计划, 随着 VLBI 技术的发展特别是 VLBI2010 目标的实现, VLBI 技术可以进一步拓展应用, 在导航卫星测定轨等方面发挥重要作用。

致谢 本文工作得到了上海天文台 VLBI 测轨分系统的大力支持, 文中的 VLBI 数据由 VLBI 测轨分系统提供. 作者对钱志翰、刘庆会、郑为民、李金岭、平劲松、王广利、舒逢春、洪晓瑜等老师的帮助表示感谢.

参考文献

- 1 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1993
- 2 周善石, 胡小工, 吴斌. 区域监测网精密定轨与轨道预报精度分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 800–808
- 3 欧吉坤, 刘吉华, 孙保琪. 镜面投影法确定地球同步卫星精密轨道. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32: 975–979
- 4 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究. 博士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006. 1–3
- 5 黄勇, 胡小工, 黄斌, 等. 利用 CAPS 测距数据确定 GEO 卫星变轨期间的轨道. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1750–1758
- 6 杨旭海, 李志刚, 冯初刚, 等. GEO 卫星机动后的星历快速恢复方法. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1759–1765
- 7 郭睿, 胡小工, 唐波, 等. 多种测量技术条件下的 GEO 卫星定轨研究. 科学通报, 2010, 55: 428–434
- 8 Yan J G, Ping J S, Li F, et al. Chang'E-1 precision orbit determination and lunar gravity field solution. Adv Space Res, 2010, 46: 50–57
- 9 郭睿, 胡小工, 刘利, 等. 转发式测距和直发式伪距的 GEO 卫星联合定轨. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 1054–1062
- 10 杜兰, 郑勇, 李杰. VLBI 在 GEO 卫星精密定轨中的应用. 测绘科学技术学报, 2006, 23: 269–271
- 11 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学. 山东: 山东科技出版社, 2000
- 12 洪晓瑜. VLBI 技术的发展和“嫦娥工程”中的应用. 自然杂志, 2007, 29: 297–299
- 13 朱新颖, 李春来, 张洪波. 深空探测 VLBI 技术综述及我国的现状和发展. 宇航学报, 2010, 31: 1893–1899
- 14 曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. 利用中国 VLBI 网实现对“火星快车”的测定轨. 科学通报, 2010, 55: 2659–2666
- 15 Pet R B, Niell A, Behrend D, et al. Design Aspect s of the VLBI2010 System. IVS Annual Report, USA, 2009
- 16 李金岭, 魏二虎, 孙中苗. 关于我国天测与测地 VLBI 网络未来建设的讨论. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35: 670–673
- 17 夏金超, 李金岭, 韩延本. 关于新一代甚长基线干涉系统 VLBI2010 计划. 地球物理学进展, 2010, 25: 1623–1627
- 18 Tornatore V, Haas R. Considerations on the observation of GNSS-signals with the VLBI2010 system. In: Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Bordeaux, 2009
- 19 胡小工, 黄斌, 钱志翰. 空间 VLBI 和天文地球动力学. 天文学进展, 1998, 16: 177–186
- 20 杜兰, 郑勇, 张捍卫. 静地卫星定轨的模糊度及基线选址. 测绘学院学报, 2003, 20: 100–102
- 21 平劲松. 太阳系人造天体甚长基线干涉测量方法研究. 博士学位论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 1996
- 22 刘庆会, 史弦, 菊池冬彦, 等. 上海和乌鲁木齐射电望远镜的超高精度同波束 VLBI 观测. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 1410–1418
- 23 Goossens S, Matsumoto K, Ishihara Y, et al. Results for orbit determination of the three satellites of Kaguya. J Geod Soc Jpn, 2009, 55: 255–268
- 24 艾国祥, 施浒立, 吴海涛, 等. 基于通信卫星的定位系统原理. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1615–1633
- 25 李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1711–1722
- 26 胡轩宇, 黄勇, 胡小工, 等. 单颗 MEO 卫星定轨中的二阶钟差模型. 宇航学报, 2009, 30: 924–929