

引用格式: 南凯, 曹芬, 雷辉, 等. VLBI 观测对转发式 GEO 卫星定轨精度的贡献分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 127-138.

VLBI 观测对转发式测距 GEO 卫星定轨精度的贡献分析

南凯^{1,2,3†}, 曹芬^{1,2,3}, 雷辉^{1,2,3}, 李西顺^{1,2,3},

刘佳^{1,2,3}, 马浪明^{1,2,3}, 杨旭海^{1,2,3†}

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学 天文与空间学院, 北京 100049;
- 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

摘要: 联合甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 时延数据与转发式 (orbit determination by transfer tracking, ODTT) 测距数据能够有效提高地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星定轨精度。参照位置精度衰减因子 (position dilution of precision, PDOP) 的改变, 研究不同 VLBI 基线时延数据与转发式测距数据的联合对 GEO 卫星定轨精度的改善, 可为特定条件下联合观测时 VLBI 基线的最优选择提供参考。基于中国科学院国家授时中心宽带 VLBI 系统和转发式测轨系统的实测数据, 开展中星 12 号 GEO 卫星的定轨试验。试验结果表明定轨精度的提高与 PDOP 的降低成正相关。相比于转发式单独定轨, 联合 VLBI 系统中的喀什—三亚基线, PDOP 降低了 3.00, 定轨精度提高了 11.48%; 联合 VLBI 系统中的吉林—喀什基线, PDOP 降低了 3.38, 定轨精度提高了 14.73%; 联合 VLBI 系统中的吉林—三亚基线, PDOP 降低了 6.90, 定轨精度提高了 19.75%; 联合 VLBI 系统中的吉林—三亚和吉林—喀什两条基线, PDOP 降低了 9.94, 定轨精度提高了 27.23%。

关键词: 甚长基线干涉测量; 转发式; 地球静止轨道; 测定轨; 位置精度衰减因子

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0127-12

Analysis of contribution of orbit determination precision of GEO satellite using transfer ranging added VLBI

NAN Kai^{1,2,3†}, CAO Fen^{1,2,3}, LEI Hui^{1,2,3}, LI Xi-shun^{1,2,3},

LIU Jia^{1,2,3}, MA Lang-ming^{1,2,3}, YANG Xu-hai^{1,2,3†}

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, School of Astronomy and Space, Beijing 100049, China;
- Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: Combining ranging data of orbit determination by transfer tracking (ODTT) with baseline delay

收稿日期: 2023-04-16; 接受日期: 2023-06-17; †: nankai@ntsc.ac.cn; yyang@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12073034; 12273047); 中国科学院前瞻战略科技先导专项 (XDA0350305)

data of very long baseline interferometry (VLBI) can effectively improve the orbit accuracy of Earth orbit (GEO) satellite. We investigate the relations between the change of position dilution of precision (PDOP) and the orbit determination accuracy with real observational experiments by using different VLBI baseline combinations, which are useful for the optimal selection of VLBI baseline in joint observation under some specific conditions. The experiments of orbit determination were carried out by observing ZX #12 GEO satellite with both the broadband VLBI system and the ODTT system of the National Time Service Center (NTSC), Chinese Academy of Sciences. The results indeed show that the improvement of orbit determination precision is related to the reduction of PDOP. Compared with only using the data of ODTT, PDOP is reduced by 3.00 and the precision of orbit determination is improved by 11.48% by adding the Kashi-Sanya baseline delay data; PDOP is reduced by 3.38 and the precision of orbit determination is improved by 14.73% by adding the Jilin-Kashi baseline and ODTT; PDOP is reduced by 6.90 and the precision of orbit determination is improved by 19.75% by adding the Jilin-Sanya baseline delay data; PDOP is reduced by 9.94 and the precision of orbit determination is improved by 27.23% when adding Jilin-Sanya and Jilin-Kashi baseline delay data.

Key words: very long baseline interferometry (VLBI); orbit determination by transfer tracking (ODTT); geostationary earth orbit (GEO); orbit determination; position dilution of precision (PDOP)

地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星分布在距离地面约 36 000 km 的高空轨道中, 覆盖范围广, 且静地特性显著, 在通信、导航、跟踪和数据中继等领域发挥着突出作用, 是北斗卫星导航系统的重要组成部分^[1-3]。因此, 保证 GEO 卫星的轨道精度是维持北斗卫星导航系统正常运行的基础, 是一项关乎国防建设、国民经济发展的重大工作。

中国科学院国家授时中心 (National Time Service Center, NTSC) 于 2008 年提出了一种自主创新的高精度卫星测定轨方法, 即转发式卫星测定轨方法^[4]。目前该方法广泛应用于中国区域定位系统和其他 C 波段转发测轨系统, 测距精度可达厘米级, 在径向方向对目标有较强的约束能力, 加上钟差与测距分离的优势, 可实现米级水平的 GEO 通信卫星的定轨精度^[5-6]。甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术诞生于 20 世纪 60 年代, 具有超高空间分辨率, 同样可用于人造地球卫星的高精度观测^[7-8]。与转发式测量在径向约束能力突出的特点不同, VLBI 在横向方向对目标具有较强的约束能力, 可以说 VLBI 是转发式的天然补充, 联合 VLBI 和转发式的测量数据对 GEO 卫星进行精密定轨, 可有效提高轨道精度^[9-13]。

参照 VLBI 2010 规范, 中国科学院国家授时中心建成了国内首套 VGOS (VLBI 2010 global

observation system) 系统^[14]。该系统包括 1 个数据分析中心和 3 个 13 m 天线观测站, 数据分析中心位于西安, 3 个观测站则分别位于喀什、三亚和吉林。喀什—三亚的基线长度为 3 900 km, 吉林—喀什的基线长度为 4 081 km, 吉林—三亚的基线长度为 3 215 km。对于信号带宽较宽, 信号强度较强的 GEO 卫星信号, VLBI 群时延测量精度优于 1 ns。每个观测站均配备宽带致冷接收机、宽带记录终端和高稳定氢原子钟。宽带致冷接收机的频率覆盖范围为 1.2~9 GHz。通过对终端馈线和低噪放致冷, 实现系统噪声温度低于 50 K, 大大降低了接收机本身的噪声。宽带记录终端共有 4 路, 1 路终端最大可记录 512 MHz 带宽数据, 数据以 Mark5B 格式记录存储在本本地磁盘阵列上, 再通过网络传回西安数据分析中心。西安数据分析中心配备 VLBI 硬件相关处理系统、纲要软件服务器、测站监控软件、DiFiX 软件相关处理集群和相关后处理软件, 整个系统可远程控制。VLBI 系统对射电源和卫星进行交替观测, 选取位置精确已知的河外射电源可实现对 VLBI 系统自身进行系统差标校^[15]。

联合 VLBI 时延数据和转发式测距数据对 GEO 卫星进行定轨, 相比于转发式测距数据单独定轨, 定轨精度得到提高。但各基线对转发式 GEO 卫星定轨精度的改善存在差异, 这种差异与位置精度衰减因子 (position dilution of precision, PDOP) 的变

化相关。研究不同 VLBI 基线时延数据联合转发式测距数据对 GEO 卫星的轨道确定, 可为在特定条件下联合观测时基线的优先选择提供参考。

1 测量原理

1.1 转发式卫星测量原理

转发式卫星测轨原理是: 采用码分多址技术, 可在同一频段生成多个伪码扩频信号, 经由地面原子钟产生的高精度时间信号向卫星播送, 再经卫星上的转发器转发至各测站。通过测定接收信号的路径时延计算测站到卫星之间的距离。根据卫星信号发送、接收方式的不同, 将转发式卫星观测模式分为自发自收、一发多收和组队观测 3 种测轨模式^[16-17]。自发自收常用于卫星精密定轨, 该模式可消除地面站原子钟钟差的影响, 如图 1 所示。

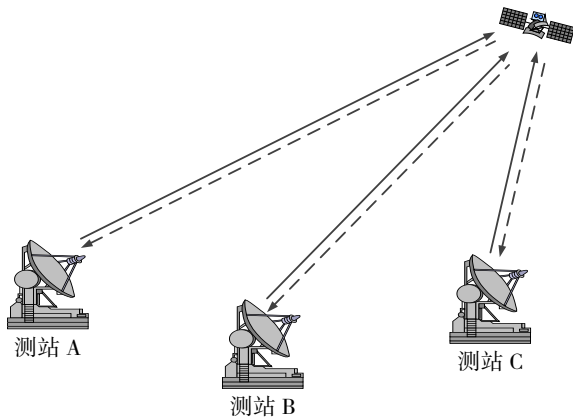


图 1 自发自收观测模式

从图 1 中可以看出, 以测站 A 为例, 自发自收观测模式的特点是由 A 站发射高精度时间信号, 经过卫星转发器转发回 A 站。

假设 t_s 为第 i 站发射信号的时刻, t_r 为发射信号经过卫星转发后再次被该站接收的时刻。时刻 t 与对应该时刻的距离观测值 $\rho_i(t)$ 为该站的观测值, 因为卫星信号经历了上行和下行两个过程, 所以距离观测值 $\rho_i(t)$ 为自发自收往返测距值的一半, 如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} t = (t_s + t_r)/2 \\ \rho_i(t) = (t_r - t_s) \cdot c/2 \end{cases} \quad (1)$$

$\rho_i(t)$ 可表达为

$$\begin{aligned} \rho_i(t) = & l + \frac{1}{2} \cdot (d_t + d_r) + d_{tro} + \\ & \frac{1}{2} \cdot (d_{ion1} + d_{ion2}) + \\ & \frac{1}{2} \cdot d_\tau + d_{os} + d_{om} + d_{rl} \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 中: l 为 t 时刻测站与卫星的几何距离; d_t 为测站发射信号的设备时延; d_r 为测站接收信号的设备时延; d_{tro} 为对流层时延; d_{ion1} 为上行信号频率对应的电离层时延; d_{ion2} 为下行信号频率对应的电离层延迟; d_τ 为卫星转发器时延; d_{os} 为卫星转发器天线相位中心改正; d_{om} 为测站天线相位中心改正; d_{rl} 为相对论效应修正。模型改正与参考框架的选取如表 1 所示。

表 1 模型与参考框架

名称	模型
几何距离	卫星和测站之间
设备时延 (信号发射、信号接收)	主要包括调制解调器、信号上行与信号下行变频器、功率放大器、低噪声放大器、线缆所产生的时延
对流层时延改正	Saastamonien 模型与 Niell 映射函数
电离层时延改正	电离层网格模型
卫星转发器时延	转发器时延在卫星发射前测定, 但卫星入轨后存在很多不确定的情况, 视作系统差一并处理
卫星天线相位中心改正	卫星天线相位中心到卫星质心的距离
地面测站相位中心改正	卫星观测的每小时的前 10 min, 利用小环消除相位中心改正和设备时延的影响
相对论效应修正	Shapiro 模型
	惯性系 J2000.0
参考系	国际地球参考框架 ITRF2000 行星星历 DE403/LE403

1.2 VLBI 卫星测量原理

VLBI 的基本观测量为时延，时延指信号同一波前到达两个不同位置台站的时间差。观测时延主要由几何时延和误差项两部分组成，几何时延由发射信号的目标和观测台站的位置决定，误差项包括电离层、中性大气、钟差、设备误差和随机误差。当观测目标为位置精确已知的河外射电源时，可反算误差项。若交替观测的河外射电源与卫星的角位置接近，认为两者时延的误差项近似，以此较好地扣除了卫星观测的电离层、对流层、钟差、设备时延等误差，实现对 VLBI 系统差的标校^[18-20]。

当观测目标为河外射电源时，由于这些天体到观测站的距离相当远，与 VLBI 基线的长度相比是一个无穷大量，因此可视射电源到达不同观测站的信号为平面波，信号的传播路径是平行的，如图 2 所示。几何时延与基线的关系如下：

$$c \cdot \tau_{RO} = -\vec{B} \cdot \vec{I} \quad (3)$$

式 (3) 中： c 为真空中的光速， τ_{RO} 为射电源与两个观测站间产生的几何时延， \vec{B} 为基线矢量， \vec{I} 为射电源方向的单位矢量。对式 (3) 求导可以得到射电源时延率 $\dot{\tau}_{RO}$ 的表达式：

$$c \cdot \dot{\tau}_{RO} = -\dot{\vec{B}} \cdot \vec{I} - \vec{B} \cdot \dot{\vec{I}} \quad (4)$$

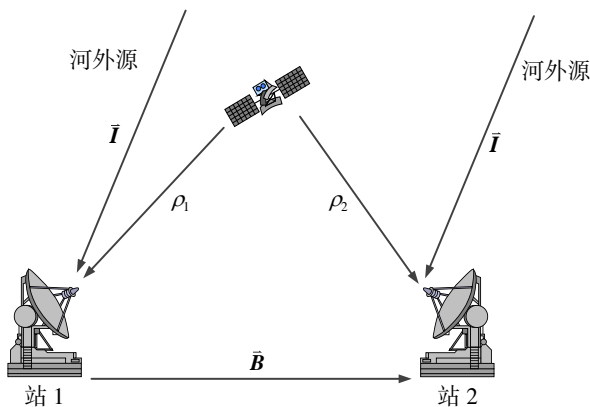


图 2 VLBI 观测模式

当观测目标为卫星时，由于卫星到观测站的距离较近，因此认为不同观测站接收到的电磁波为球面波，而非平面波。图 2 中的 ρ_1 和 ρ_2 分别为观测站 1 和观测站 2 到卫星的距离，则卫星与两个观测站间的几何时延 τ_{SO} 可作如式 (5) 表达：

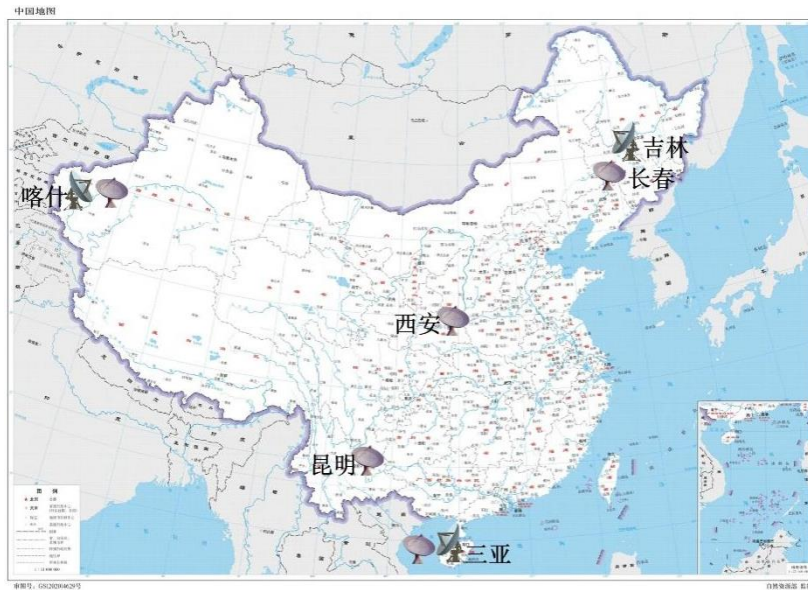
$$c \cdot \tau_{SO} = \rho_2 - \rho_1 \quad (5)$$

假设卫星在 t_0 时刻发出信号时的地心位置矢量为 $\vec{r}(t_0)$ ，站 1 在 t_1 时刻接收到卫星信号的地心位置矢量为 $\vec{R}_1(t_1)$ ，此时站 1 到卫星的单位矢量为 $\vec{\rho}_{1u}(t_1)$ ，站 2 在 t_2 时刻接收到卫星信号的地心位置矢量为 $\vec{R}_2(t_2)$ ，此时站 2 到卫星的单位矢量为 $\vec{\rho}_{2u}(t_2)$ ，所以式 (5) 可以转换成式 (6)：

$$\begin{aligned} c \cdot \tau_{SO} = \rho_2 - \rho_1 = & (\vec{r}(t_0) - \vec{R}_2(t_2)) \cdot \vec{\rho}_{2u}(t_2) - \\ & (\vec{r}(t_0) - \vec{R}_1(t_1)) \cdot \vec{\rho}_{2u}(t_1) = & (6) \\ & \vec{r}(t_0) \cdot (\vec{\rho}_{2u}(t_2) - \vec{\rho}_{2u}(t_1)) + \\ & \vec{R}_1(t_1) \cdot \vec{\rho}_{2u}(t_1) - \vec{R}_2(t_2) \cdot \vec{\rho}_{2u}(t_2) \end{aligned}$$

2 基于不同 VLBI 基线联合转发式测轨系统的 PDOP

地面观测站与目标卫星组成的几何构型对卫星定轨的影响可以用位置精度衰减因子 PDOP 来反映，PDOP 值越小，定轨结果越好^[21-22]。转发式测轨系统由长春站、西安站、昆明站、喀什站和三亚站 5 个 3.7 m 天线的观测站组成。VLBI 系统由喀什站、三亚站和吉林站 3 个 13 m 天线的观测站组成。VLBI 系统的 3 个观测站可组合得到 3 条基线，分别是喀什—三亚基线、吉林—喀什基线和吉林—三亚基线。转发式测轨系统和 VLBI 系统的观测站地理分布如图 3 所示。



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的
审图号为 GS (2020) 4629 号的标准地图制作, 底图无修改

图 3 转发式测轨系统和 VLBI 系统的观测站地理分布

假设 (x_s, y_s, z_s) 为卫星坐标, (x_i, y_i, z_i) 为观测站 i 的坐标, 对于转发式的测距观测量而言, 其站星距离 ρ_i 可以表示为

$$\rho_i = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} \quad (7)$$

对站星距离 ρ_i 进行微分, 可得:

$$d\rho_i = \frac{\partial \rho_i}{\partial x_s} dx_s + \frac{\partial \rho_i}{\partial y_s} dy_s + \frac{\partial \rho_i}{\partial z_s} dz_s \quad (8)$$

假设总共有 n 个观测站, ρ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为第 i 个观测站到卫星的距离, 其观测方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} d\rho_1 \\ \vdots \\ d\rho_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial x_s} & \frac{\partial \rho_1}{\partial y_s} & \frac{\partial \rho_1}{\partial z_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial x_s} & \frac{\partial \rho_n}{\partial y_s} & \frac{\partial \rho_n}{\partial z_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_s \\ dy_s \\ dz_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

所以观测方程的系数矩阵 \mathbf{H} 如式 (10) 所示。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial x_s} & \frac{\partial \rho_1}{\partial y_s} & \frac{\partial \rho_1}{\partial z_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial x_s} & \frac{\partial \rho_n}{\partial y_s} & \frac{\partial \rho_n}{\partial z_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_s - x_{11}}{\rho_{11}} & \frac{x_s - x_{12}}{\rho_{12}} & \frac{y_s - y_{11}}{\rho_{11}} & \frac{y_s - y_{12}}{\rho_{12}} & \frac{z_s - z_{11}}{\rho_{11}} & \frac{z_s - z_{12}}{\rho_{12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_s - x_{n1}}{\rho_{n1}} & \frac{x_s - x_{n2}}{\rho_{n2}} & \frac{y_s - y_{n1}}{\rho_{n1}} & \frac{y_s - y_{n2}}{\rho_{n2}} & \frac{z_s - z_{n1}}{\rho_{n1}} & \frac{z_s - z_{n2}}{\rho_{n2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial x_s} & \frac{\partial \rho_1}{\partial y_s} & \frac{\partial \rho_1}{\partial z_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial x_s} & \frac{\partial \rho_n}{\partial y_s} & \frac{\partial \rho_n}{\partial z_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_s - x_1}{\rho_1} & \frac{y_s - y_1}{\rho_1} & \frac{z_s - z_1}{\rho_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_s - x_n}{\rho_n} & \frac{y_s - y_n}{\rho_n} & \frac{z_s - z_n}{\rho_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于 VLBI 的时延观测量而言, 假设 (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}) 为基线 i 中的一个观测站坐标, (x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}) 为基线 i 中的另一个观测站坐标, 卫星到两个观测站的距离差 ρ_i 可以表示为

$$\rho_i = \sqrt{(x_s - x_{i1})^2 + (y_s - y_{i1})^2 + (z_s - z_{i1})^2} - \sqrt{(x_s - x_{i2})^2 + (y_s - y_{i2})^2 + (z_s - z_{i2})^2} \quad (11)$$

假设共有 n 条基线, ρ_{i1} ($i=1, 2, \dots, n$) 为卫星到第 i 条基线中一个观测站的距离, ρ_{i2} ($i=1, 2, \dots, n$) 为卫星到第 i 条基线中另一个观测站的距离, 则 VLBI 对应的观测方程的系数矩阵 \mathbf{H} 如式 (12) 所示。

作如下矩阵运算:

$$(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \circ \quad (13)$$

所以 PDOP 可由式 (14) 得到:

$$P_{\text{PDOP}} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}} \circ \quad (14)$$

目标卫星为中星 12 号 GEO 卫星, 该 GEO 卫星的星下点经度为 87.5°E。转发式测轨系统与目标卫星的 PDOP 值为 25.12, 分别加入 3 条 VLBI 系统基线和加入吉林—喀什、吉林—三亚两条基线后 PDOP 值如表 2 所示。

表 2 加入 VLBI 基线前后转发式测轨系统的 PDOP 值

不同组合的观测构型	PDOP
转发式测轨系统	25.12
转发式测轨系统+喀什—三亚基线	22.12
转发式测轨系统+吉林—喀什基线	21.74
转发式测轨系统+吉林—三亚基线	18.22
转发式测轨系统+吉林—喀什基线、 吉林—三亚基线	15.18

从表 2 中可以看出, VLBI 系统基线联合转发式测轨系统的 PDOP 值都优于转发式测轨系统的 PDOP 值, 但不同 VLBI 系统基线联合转发式测轨系统的 PDOP 值大小不同。其中, 加入吉林—三亚基线的效果较好, PDOP 值降低了 6.90。吉林—喀什基线次之, PDOP 值降低了 3.38。喀什—三亚基

线的效果与前两者相比较弱, PDOP 值降低了 3.00。当加入吉林—喀什和吉林—三亚这两条基线时, PDOP 降幅最大, 可达 9.94。

3 基于不同 VLBI 基线联合转发式测轨系统的 GEO 卫星定轨

基于 VLBI 系统和转发式测轨系统的实测数据对中星 12 号 GEO 卫星进行定轨, 分别给出定轨残差和重叠弧段轨道差的结果, 实测数据的所在时段为 2017 年 8 月 20 日 12 点至 2017 年 8 月 23 日 12 点。如图 4 所示, 以 2017 年 8 月 20 日 12 点至 2017 年 8 月 22 日 0 点, 2017 年 8 月 21 日 0 点至 2017 年 8 月 22 日 12 点这两段定轨弧段为例来介绍重叠弧段差这一轨道精度评估方法。每次定轨所用数据弧长为 36 h, 滑动 12 h 作下一次定轨, 两次相邻定轨的重叠弧段为 24 h, 分别从径向、切向、法向和三维位置上给出重叠弧段的轨道差, 这里以三维位置上的轨道差为主对轨道精度进行评价。

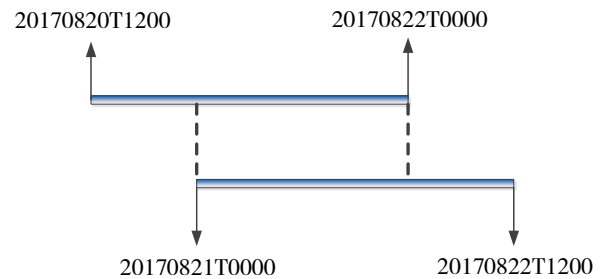


图 4 定轨弧段

基于转发式测轨系统实测数据的各站定轨残差的 RMS (root mean square) 值如表 3 所示。

表 3 基于转发式测轨系统实测数据的定轨残差

定轨弧段	定轨残差/m				
	长春站	西安站	昆明站	喀什站	三亚站
0820T1200/0822T0000	0.243	0.115	0.117	0.080	0.139
0821T0000/0822T1200	0.233	0.108	0.123	0.285	0.154
0821T1200/0823T0000	0.231	0.126	0.139	0.287	0.162
0822T0000/0823T1200	0.235	0.126	0.211	0.292	0.152

从表 3 中可以看出, 基于转发式数据进行定轨, 4 个轨道弧段中, 长春站、西安站、昆明站、喀什站和三亚站的定轨残差分别优于 0.3、0.2、0.3、0.3 和 0.2 m。其中长春站和喀什站的定轨残差略

大, 这与两站当时的观测情况不佳有关。

基于转发式测轨系统实测数据的重叠弧段轨道差 RMS 值如表 4 所示。

仅用转发式数据进行定轨, 3 段重叠弧段三维

位置的轨道差平均值为 2.152 m。以 0821T1200/0822T1200 的重叠弧段为例, 如图 5 所示, 给出径向、切向、法向和三维位置的连续重叠弧段轨道差值。从图 5 中可以看出, 基于转发式数据进行定轨, 该重叠弧段中径向方向的轨道差变化范围为-0.8~

-0.2m, 切向方向的轨道差变化范围为-0.8~2.4m, 法向方向的轨道差变化范围为-3.0~3.0 m, 三维位置的轨道差变化范围为 0.8~3.2 m。

基于 VLBI 系统不同基线联合转发式测轨系统实测数据的定轨残差 RMS 值如表 5 所示。

表 4 基于转发式测轨系统实测数据的重叠弧段轨道差

重叠弧段	定轨结果/m			
	径向	法向	切向	三维位置
0821T0000/0822T0000	0.201	1.094	1.859	2.166
0821T1200/0822T1200	0.493	0.832	1.906	2.137
0822T0000/0823T0000	0.633	1.063	1.761	2.152
平均值	0.442	0.996	1.842	2.152

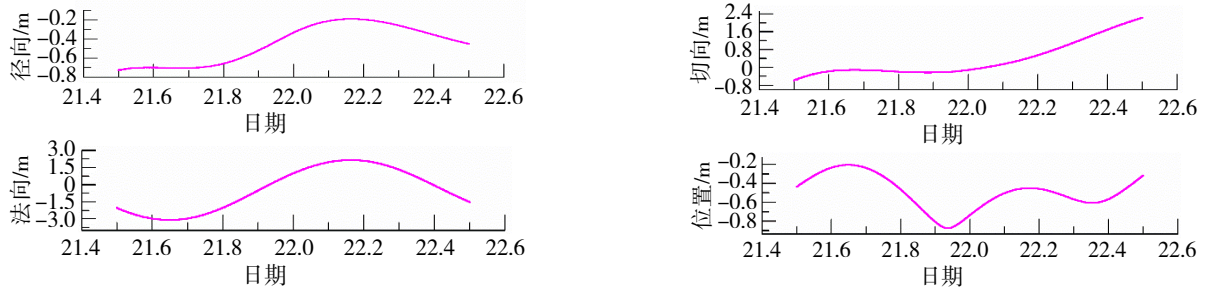


图 5 基于转发式实测数据的重叠弧段轨道差

表 5 基于 VLBI 系统不同基线联合转发式测轨系统实测数据的定轨残差

不同组合的 观测构型	重叠弧段	定轨结果/m					
		长春站	西安站	昆明站	喀什站	三亚站	
喀什—三亚基 线联合转发式							喀什—三亚
	0820T1200/ 0822T0000	0.209	0.134	0.100	0.097	0.121	0.526
	0821T0000/ 0822T1200	0.212	0.109	0.104	0.140	0.130	0.583
	0821T1200/ 0823T0000	0.218	0.136	0.117	0.113	0.132	0.542
	0822T0000/ 0823T1200	0.192	0.126	0.207	0.100	0.138	0.490
吉林—喀什基 线联合转发式							吉林—喀什
	0820T1200/ 0822T0000	0.208	0.131	0.102	0.098	0.123	0.423
	0821T0000/ 0822T1200	0.209	0.107	0.109	0.139	0.133	0.543
	0821T1200/ 0823T0000	0.217	0.137	0.115	0.115	0.132	0.381
	0822T0000/ 08/23T1200	0.197	0.130	0.201	0.100	0.131	0.384

续表 5

不同组合的 观测构型	重叠弧段	定轨结果/m						
		长春站	西安站	昆明站	喀什站	三亚站		
吉林—三亚基 线联合转发式	0820T1200/ 0822T0000	0.220	0.138	0.116	0.116	0.125	吉林—三亚 0.568	
	0821T0000/ 0822T1200	0.210	0.119	0.113	0.146	0.134	0.481	
	0821T1200/ 0823T0000	0.207	0.146	0.110	0.143	0.130	0.531	
	0822T0000/ 0823T1200	0.206	0.145	0.212	0.107	0.146	0.518	
							吉林—喀什	吉林—三亚
两条基线联 合转发式	0820T1200/ 0822T0000	0.208	0.131	0.101	0.098	0.123	0.506	0.581
	0821T0000/ 0822T1200	0.197	0.133	0.198	0.103	0.129	0.447	0.519
	0821T1200/ 0823T0000	0.197	0.133	0.198	0.103	0.129	0.447	0.519
	0822T0000/ 0823T1200	0.197	0.133	0.198	0.103	0.129	0.447	0.519

从表 5 中可以看出, 基于不同基线联合转发式数据进行定轨, 4 个轨道弧段中, 长春站、西安站、昆明站、喀什站、三亚站的定轨残差分别优于 0.3、0.2、0.3、0.3 和 0.2 m。与转发式单独定轨得到的

5 个测轨站的定轨残差处于同一水平。

基于 VLBI 系统不同基线联合转发式测轨系统实测数据的重叠弧段轨道差 RMS 值如表 6 所示。

表 6 基于喀什—三亚基线联合转发式测轨系统实测数据的重叠弧段轨道差

不同组合的观测构型	重叠弧段	定轨结果/m			
		径向	法向	切向	三维位置
喀什—三亚基线联合转发式	0821T0000/0822T0000	0.176	0.981	1.793	2.052
	0821T1200/0822T1200	0.296	0.919	1.379	1.684
	0822T0000/0823T0000	0.299	0.465	1.900	1.979
	平均值	0.257	0.788	1.691	1.905
吉林—喀什基线联合转发式	0821T0000/0822T0000	0.167	0.914	1.729	1.963
	0821T1200/0822T1200	0.271	0.805	1.354	1.599
	0822T0000/0823T0000	0.261	0.341	1.895	1.943
	平均值	0.233	0.687	1.659	1.835
吉林—三亚基线联合转发式	0821T0000/0822T0000	0.185	0.891	1.756	1.969
	0821T1200/0822T1200	0.447	1.265	0.552	1.450
	0822T0000/0823T0000	0.261	0.744	1.575	1.761
	平均值	0.297	0.967	1.294	1.727
两条基线联合转发式	0821T0000/0822T0000	0.160	0.809	1.659	1.852
	0821T1200/0822T1200	0.281	0.755	0.713	1.076
	0822T0000/0823T0000	0.300	0.482	1.677	1.771
	平均值	0.247	0.682	1.350	1.566

从表 6 中可以看出:与仅用转发式数据 2.152 m 的定轨精度相比,联合喀什—三亚基线得到三维位置上的轨道差平均值为 1.905 m,定轨精度提升了 11.48%;联合吉林—喀什基线得到三维位置上的轨道差平均值为 1.835 m,定轨精度提升了 14.73%;联合吉林—三亚基线与转发式数据得到三维位置

上的轨道差平均值为 1.727 m,定轨精度提升了 19.75%;联合吉林—喀什、吉林—三亚两条基线得到三维位置上的轨道差平均值为 1.566 m,定轨精度提升了 27.23%。以 0821T1200/0822T1200 的重叠弧段为例,如图 6 所示,给出径向、切向、法向和三维位置的连续重叠弧段轨道差值。

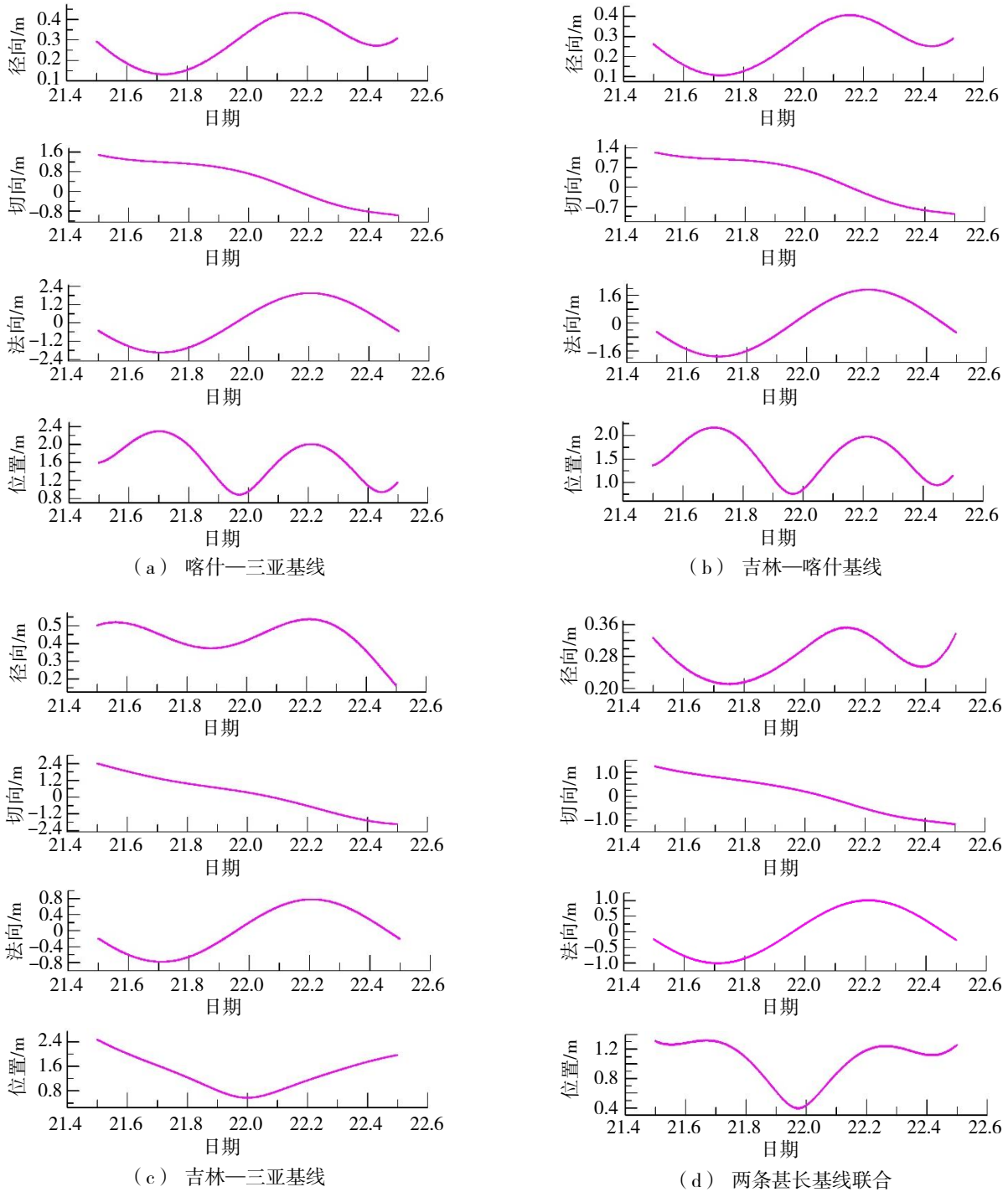


图 6 基于不同基线联合转发式实测数据的重叠弧段轨道差

从图 6 中可以看出: 基于喀什—三亚基线联合转发式数据进行定轨, 重叠弧段中径向方向的轨道差变化范围为 0.1~0.4 m, 切向方向的轨道差变化范围为-0.8~1.6 m, 法向方向的轨道差变化范围为-2.4~2.4 m, 三维位置的轨道差变化范围为 0.8~2.4 m; 联合吉林—喀什基线进行定轨, 重叠弧段中径向方向的轨道差变化范围为 0.1~0.4 m, 切向方向的轨道差变化范围为-0.7~1.4 m, 法向方向的轨道差变化范围为-1.6~1.6 m, 三维位置的轨道差变化范围为 1.0~2.0 m; 联合吉林—三亚基线进行定轨, 重叠弧段中径向方向的轨道差变化范围为 0.2~0.5 m, 切向方向的轨道差变化范围为-2.4~2.4 m, 法向方向的轨道差变化范围为-0.8~0.8 m, 三维位置的轨道差变化范围为 0.8~2.4 m; 联合吉林—三亚与吉林—喀什两条基线进行定轨, 重叠弧段中径向方向的轨道差变化范围为 0.20~0.36 m, 切向方向的轨道差变化范围为-1.5~1.5 m, 法向方向的轨道差变化范围为-1.0~1.0 m, 三维位置的轨道差变化范围为 0.4~1.4 m。相比于转发式单独定轨, 联合 VLBI 不同基线进行定轨, 同时段在各个方向以及三维位置上的重叠弧段轨道差都有不同

程度的减小。

转发式单独定轨在径向方向上的轨道精度为 0.442 m, 在横向方向上的轨道精度为 2.094 m。联合 VLBI 系统喀什—三亚基线后, 径向上的轨道精度为 0.257 m, 提高了 0.185 m, 横向上的轨道精度为 1.865 m, 提高了 0.229 m; 联合 VLBI 系统吉林—喀什基线后, 径向上的轨道精度为 0.233 m, 提高了 0.209 m, 横向上的轨道精度为 1.796 m, 提高了 0.298 m; 联合 VLBI 系统吉林—三亚基线后, 径向上的轨道精度为 0.297 m, 提高了 0.145 m, 横向上的轨道精度为 1.615 m, 提高了 0.479 m; 联合 VLBI 系统吉林—喀什、吉林—三亚两条基线后, 径向上的轨道精度为 0.247 m, 提高了 0.195 m, 横向上的轨道精度为 1.513 m, 提高了 0.581 m。不难看出, 联合 VLBI 系统的基线后, 轨道精度在横向上的改善更为明显。

转发式测轨系统实测数据单独定轨, 转发式分别联合 VLBI 系统喀什—三亚基线、VLBI 系统吉林—喀什基线、VLBI 系统吉林—三亚基线、VLBI 系统吉林—喀什、吉林—三亚两条基线实测数据进行定轨的轨道精度与 PDOP 统计如表 7 所示。

表 7 定轨精度与 PDOP 统计

不同组合的观测构型	定轨精度/m	定轨精度提升(相对于转发式单独)/%	PDOP
转发式单独	2.152	/	25.12
转发式+喀什—三亚基线	1.905	11.48	22.12
转发式+吉林—喀什基线	1.835	14.73	21.74
转发式+吉林—三亚基线	1.727	19.75	18.22
转发式+吉林—三亚、 吉林—喀什基线	1.566	27.23	15.18

VLBI 观测的优势在于对卫星轨道横向方向的运动敏感, 而转发式观测的优势在于对卫星轨道径向方向的运动敏感, 两者可形成相互补充, 从而提升卫星的定轨精度。当各 VLBI 基线的时延测量精度和设备状态差别不大时, VLBI 基线对于转发式测轨网 PDOP 的改善直接影响 VLBI 观测对于转发式 GEO 卫星定轨精度的提升。从定轨结果可以看

出, 加入 VLBI 基线后, 定轨残差为同等水平, 而在重叠弧段轨道差方面, 联合定轨优于转发式单独定轨。加入不同的 VLBI 基线, 联合定轨精度的提升程度有所不同, 联合喀什—三亚基线, PDOP 改善最小, 定轨精度提升了 11.48%, 联合吉林—喀什基线, PDOP 改善稍强, 定轨精度提升了 14.73%, 联合吉林—三亚基线, 在一条基线中 PDOP 改善最

大, 定轨精度提升了 19.75%, 而联合吉林—三亚、吉林—喀什两条基线, PDOP 的改善比任何一条基线都大, 定轨精度提升了 27.23%。由此可见, 两条基线对定轨精度的改善优于一条基线, 而在 3 条基线中, 吉林—三亚基线对定轨精度的改善最大, 吉林—喀什基线次之, 喀什—三亚基线改善最小, 这与基线对于转发式测轨系统 PDOP 值的改善成正相关。

4 结论

VLBI 系统联合转发式测轨系统是一种提高 GEO 卫星定轨精度的方法。基于转发式测轨系统和 VLBI 系统的实测数据对中星 12 号 GEO 卫星进行精密定轨, 分析定轨结果可得, 加入一条 VLBI 基线便可提高转发式卫星定轨精度, 加入不同的 VLBI 基线, 转发式卫星定轨精度提升的程度不同, 且各基线对转发式卫星定轨精度的提升与其对转发式测轨系统 PDOP 的改善成正相关。联合喀什—三亚基线, PDOP 降低了 3.00, 定轨精度提升了 11.48%。联合吉林—喀什基线, PDOP 降低了 3.38, 定轨精度提升了 14.73%。联合吉林—三亚基线, PDOP 降低了 6.90, 定轨精度提升了 19.75%。联合吉林—三亚、吉林—喀什两条基线, PDOP 降低了 9.94, 定轨精度提升了 27.23%, 由此可见, 两条基线对于定轨精度的提升和各基线对于定轨精度的提升与其对 PDOP 的改善成正相关, PDOP 降低地越多, 定轨精度提升地越多。该结论可为特定条件下联合观测时基线的最优选择提供参考。

参考文献:

- [1] 钦伟瑾, 杨旭海. 一种同频点的卫星接收机时延确定方法[J]. 电子学报, 2022, 51(2): 324-329.
- [2] CAO F, YANG X H, LI ZH G, et al. POD experiments using real and simulated time-sharing observations for GEO satellites in C-band transfer ranging system[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 58(4): 488-497.
- [3] MANZINO A M, DABOVE P, GOGOI N. Assessment of positioning performances in Italy from GPS, BDS and GLONASS constellations[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2018, 9(6): 439-448.
- [4] 李志刚, 杨旭海, 施浒立, 等. 转发器式卫星轨道测定新方法[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1711-1722.
- [5] 杨旭海, 翟惠生, 胡永辉, 等. 基于新校频算法的 GPS 可驯伽钟系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(1): 41-44.
- [6] CAO F, YANG X H, LI ZH G, et al. Signal biases calibration for precise orbit determination of the Chinese Area Positioning System using SLR and C-band transfer ranging observations[J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(6): 1234-1246.
- [7] 李西顺, 吴元伟, 姚当, 等. 基于国内宽带 VLBI2010 系统及 iGMAS 的 UT1/ Δ LOD 数据融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(5): 1644-1651.
- [8] SHIOMI T, KAWANO N. Precise orbit determination of a geosynchronous satellite by VLBI[J]. *Aeronautical & Space Sciences Japan*, 1987, 35(404): 425-432.
- [9] 杜兰, 郑勇, 李杰. VLBI 在 GEO 卫星精密定轨中的应用[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 269-271.
- [10] NAN K, CAO F, GONG J J, et al. The short-arc precise orbit determination of GEO satellites using VLBI and transfer ranging[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1572.
- [11] GONG J J, CAO F, YANG X H. et al. The GEO satellite orbit experiment measured by combination of the broadband VLBI & the orbit tracking of two way range[J]. *Boletin Tecnico/Technical Bulletin*, 2017, 55(8): 39-47.
- [12] HUANG Y, HU X G, ZHANG X Z, et al. Improvement of orbit determination for geostationary satellites with VLBI tracking[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2765-2772.
- [13] 王维, 张志斌, KALIUZHNYI M, 等. 微型 VLBI 系统的温度效应改正与精度评估[J]. 时间频率学报, 2021, 44(2): 142-152.
- [14] 吴元伟, 李西顺, 孙保琪, 等. 国家授时中心自主世界时测量与服务系统[J]. 时间频率学报, 2022, 45(3): 184-193.
- [15] YAO D, WU Y W, ZHANG B, et al. The NTSC VLBI system and its application in UT1 measurement[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(6): 229-238.
- [16] 曹芬. 基于转发测距数据的 GEO 导航卫星定轨方法研

- 究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2014.
- [17] CAO F, YANG X H, SU M D, et al. Evaluation of C-band precise orbit determination of geostationary Earth orbit satellites based on the Chinese Area Positioning System[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 67(2): 343-351.
- [18] SCHUH H, BEHREND D. VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry[J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 61(1): 68-80.
- [19] KAWASE S, TANAKA T. Orbit determination of a geosynchronous satellite by the VLBI technique[J]. *Radio Res Lab*, 1979, 26(119): 65-71.
- [20] 舒逢春, 张秀忠, 郑为民. 地球同步卫星的 VLBI 观测[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 2003, 37(24): 105-111.
- [21] HAN Y B, MA L H, QIAO Q Y, et al. Functions of retired GEO communication satellites in the PDOP value of CAPS[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanic & Astronomy*, 2009(3): 423-433.
- [22] ZHANG Y, LI Z S, WANG Z Y, et al. The improvement of BDS observation geometry with LEO constellations in orbit determination[J]. *Measurement*, 2021, 177(1): 109228.