

引用格式: 贾浩然, 吉日格乐, 雷辉, 等. 基于干涉时差测量的卫星无源测定轨技术及其结果[J]. 时间频率学报, 2023, 46(2): 105-115.

基于干涉时差测量的卫星无源测定轨技术 及其结果

贾浩然^{1,2}, 吉日格乐³, 雷辉^{1,2,*}, 吴元伟^{1,*}, 韦沛¹, 杨颖¹,
段洪涛³, 霍甲³, 杨旭海^{1,2,4}, 姚当^{1,*}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家无线电监测中心, 北京 100049;

4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 基于干涉时差测量的卫星无源测定轨是一种有巨大发展潜力的测定轨方法, 各测站使用网络传输观测数据至相关中心, 再通过干涉测量手段测量卫星信号至各测站的时间差值, 最后使用时差数据进行卫星定轨。为了验证基于干涉时差测量的卫星无源测定轨的定轨精度, 在北京、喀什、深圳、哈尔滨搭建实验网, 对 GEO(geosynchronous Earth orbit) 卫星亚太 6C 进行干涉时差测量测定轨, 观测时长为 9 天。对时差数据、定轨残差和重叠弧段轨道差的分析表明, 干涉时差测量测定轨的时差测量的精度约为 0.7 ns, 定轨残差的 RMS (root mean square) 优于 0.7 m, 定轨精度 (重叠弧段轨道误差) 为 17.78 m。对轨道误差源进行了分析, 并根据误差源提出了后续进一步提高轨道精度的几种方法。

关键词: 无源; 干涉; 时差; 测定轨

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-02-0105-11

Satellite orbit determination based on interferometric time delay measurement

JIA Hao-ran^{1,2}, JIRI Ge-le³, LEI Hui^{1,2,*}, WU Yuan-wei^{1,*}, WEI Pei¹, YANG Ying¹,
DUAN Hong-tao³, HUO Jia³, YANG Xu-hai^{1,2,4}, YAO Dang^{1,*}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Radio Regulation of China, Beijing 100049, China;

4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: orbit determination of satellites based on interferometric time delay measurement is an orbit

determination method with great potential. Measurement data of each stations were transferred to correlator center, then the baseline time delay of the satellite signal is determined by processing of interferometric data, and finally the time delay data is used to determine the satellite orbit. In order to verify the orbit accuracy of this method, an experimental network was built at Beijing, Kashgar, Shenzhen and Harbin. With this network, orbit determine experiments on the geosynchronous Erath orbit (GEO) satellite APSTAR-6C were conducted. In total, 9 days observational data were recorded, we present analysis of the time delay data and evaluations of the satellite orbit. The post-fitted delay residuals after orbit determination is around 0.7 ns, the root mean square (RMS) of the orbit difference of the overlapped is better than 0.7 m, while the average overlapped orbit difference is 17.78 m. Sources of the orbit error are analyzed. Methods to further improve the accuracy of the orbit are proposed.

Key words: passive; interferometric; time difference; orbit determination

0 引言

卫星轨道是人造卫星的基本参数,对于人造卫星应用不可或缺。常见的卫星测定轨技术根据是否主动向卫星发射信号分为有源测定轨和无源测定轨两种^[1]。有源测定轨技术如统一 S 波段系统 (unified S-band system, USB)、统一 C 波段系统(unified C-band system, UCB)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)^[2]、基于卫星转发信号的轨道确定技术 (orbit determination by transfer tracking, ODTT)^[3]等都需星上特定载荷或资源支持^[4]。

当需要对星上不具备有源观测所需载荷的卫星进行测定轨时,就只能使用无源测定轨手段。无源测定轨技术可以对不具备有源观测条件的卫星进行轨道测量。其中干涉测量技术可以观测任何向地面发射信号的卫星,同时被动接收信号使测站特别适用于卫星的长期观测。基于射电源观测的甚长基线干涉技术 (very long baseline interferometry, VLBI) 已经有应用于卫星轨道测定的先例^[5],但是 VLBI 为了观测射电源,采用大口径天线、宽带观测都极大增加测站的建设成本和运维难度。以 VLBI2010 为例^[6],要求天线口径 12 m、频率连续覆盖范围 2~14 GHz,这些要求使得建站难度大大提高。

由于卫星信号强,可以使用小口径天线的干涉测量技术,以有效降低测站建设成本和观测数据量。本文利用 4 个小口径天线的测站,形成 6 条基线,对同步地球轨道卫星亚太 6C 进行干涉时差测量,并将得到的时差数据用于轨道确定,通过定轨残差和重叠弧段轨道差,分析轨道精度及本技术的优势。

1 干涉时差测量

1.1 系统组成及原理

如图 1 中所示,干涉时差测量技术测量卫星信号同一波前到达基线两端的测站的时刻差 Δt ,相当于测量卫星与观测站 A、B 的距离差,卫星距离地球的距离较近,其信号应当作球面波处理^[7]。干涉时差测量使用的相关处理为时域相关,首先通过卫星星下点经度计算出粗差,在粗差附近通过不断时域平移来确定相关峰的位置,最后得到卫星信号到两个测站的时刻差,继而得到卫星到两个测站的距离差。

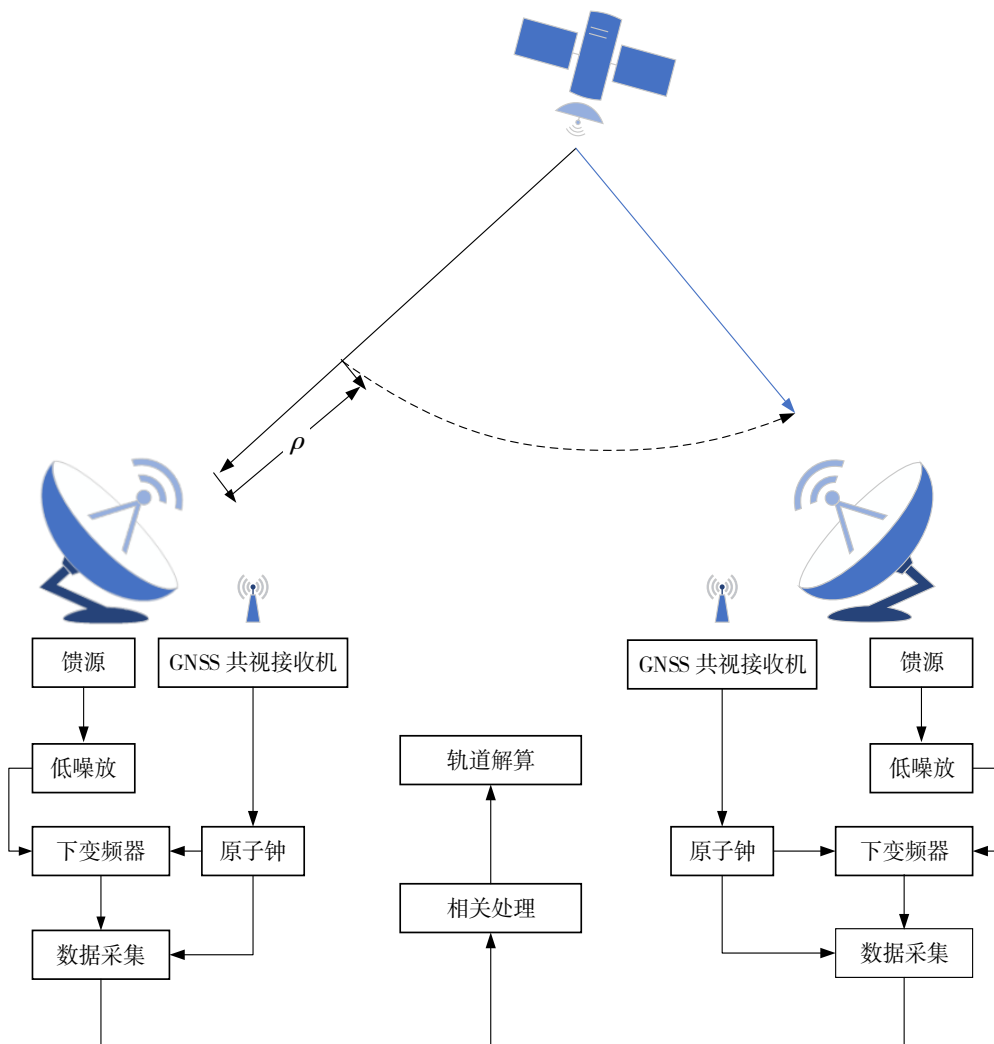
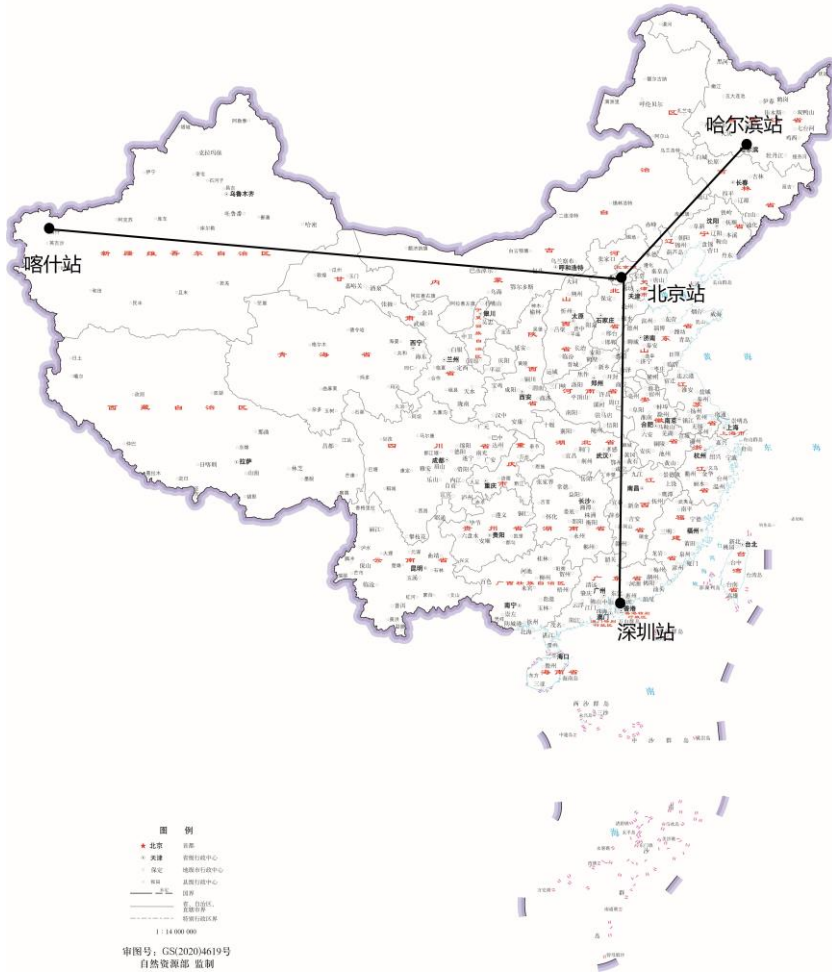


图1 干涉时差测量原理示意图

至少需要3个测站组成的2条独立基线的数据，才能获得较好的轨道。3个测站组成的系统稳定性较差，如果其中一个测站因为各种原因导致没有数据，便只剩下一条基线的数据，导致轨道结果变差。如果系统中有4个测站，组成3条独立的基线，则在其中一个测站故障时其余测站依旧能够提供足够的数据进行轨道解算。如图2所示，本系统建立了分别位于北京，喀什，深圳，哈尔滨的4个测轨站组成。各测轨站均配备一套4.5 m天线系统，低噪声放大器，下变频器，以及数据采集设备。另外，各测轨站均通过本地的铷原子钟提供本振，由GNSS共视接收机提供站间时间同步以及站间钟差记录。将各测轨站的观测数据通过各站之间的专用网络，传回北京测轨站的相关处理服务器和定轨服务器，完成相关处理及轨道解算。天线接收C波段信号后，由馈源经过低噪声放大器放大，经下变频器变频为中频信号，由数据采集服务器进行模数转换。通过测站接收到的数据发送到相关处理服务器，进行相关处理后得到时差，用时差数据进行统计定轨。由于观测的是人造卫星，可以事先得知信号频谱，便于选择合适的频段进行观测。通过网络将数据传输至相关处理服务器进行相关处理，实现快速的轨道解算。

采用统计定轨手段，即使一条基线的时差数据也能进行轨道解算。但是参与轨道解算的不同朝向的基线越多，对各个方向轨道的约束越好，越有利于定轨精度的提高^[8]。将各条基线时差数据与各站钟差等数据一起进行数据预处理之后，进行轨道解算得到目标卫星的轨道。

中国地图



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) 4619 号的标准地图制作，底图无修改

图 2 测站分布图

1.2 测站分布及精度衰减因子

测站分布如图 2 所示，系统由 4 个测轨站组成，分别分布于北京、喀什、深圳和哈尔滨。其中南北向最长的基线深圳—哈尔滨大约 2 798 km，东西向最长的基线喀什—哈尔滨约为 4 099 km。

在卫星定轨时，常用位置精度因子（position dilution of precision, PDOP）来表示测轨站和待测卫星的位置关系和几何分布对定轨误差的影响^[9-10]。对于干涉时差测量定轨，若卫星位置记为 (X_s, Y_s, Z_s) ，时差测量基线的两个测站坐标分别表示为 i 站坐标 (x_i, y_i, z_i) ， j 站坐标 (x_j, y_j, z_j) ，则卫星到两站的距离差可表示为

$$\rho_{ij} = \rho_i - \rho_j = \sqrt{(X_s - x_i)^2 + (Y_s - y_i)^2 + (Z_s - z_i)^2} - \sqrt{(X_s - x_j)^2 + (Y_s - y_j)^2 + (Z_s - z_j)^2} \quad (1)$$

式 (1) 中： ρ_{ij} 表示卫星至两个测站的距离差，对其进行微分

$$d\rho_{ij} = \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial X_s} dX_s + \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial Y_s} dY_s + \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial Z_s} dZ_s \quad (2)$$

用矢量表示的观测方程为

$$\begin{bmatrix} d\rho_{12} \\ \dots \\ d\rho_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{12}}{\partial X_s} & \frac{\partial \rho_{12}}{\partial Y_s} & \frac{\partial \rho_{12}}{\partial Z_s} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial X_s} & \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial Y_s} & \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial Z_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_s \\ dY_s \\ dZ_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{12}}{\partial X_s} & \frac{\partial \rho_{12}}{\partial Y_s} & \frac{\partial \rho_{12}}{\partial Z_s} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial X_s} & \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial Y_s} & \frac{\partial \rho_{ij}}{\partial Z_s} \end{bmatrix}$ ，则 $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 的分量形式为

$$(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中： D_{ij} 为矩阵的各个分量，干涉时差定轨的PDOP为

$$P_{\text{PDOP}} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}} \quad (5)$$

位置精度几何衰减因子是决定卫星三维精度的放大因子，从定义上来看，可以根据PDOP值估算测距精度。根据计算可知，观测位于134°E的亚太6C卫星，在如图2所示的Y型测站分布下，PDOP值为714.19，若需要达到优于百米的轨道精度，则观测亚太6C时至少需要0.14 m的单次测量精度。下文中对测量精度进行了分析，在不考虑钟差误差和电离层、对流层误差的情况下，时差测量精度已经达到了0.7 ns，即0.21 m，并未达到上文所说的单次测量精度要求，但是轨道结果依旧符合要求，这是因为PDOP只是几何因子，动力学统计定轨过程是一个多次测量的平差过程，对单次测量的精度要求并不会这么高。

2 结果分析与评估

在2021年7月23日至2021年8月1日，对星下点经度为134°E的GEO卫星亚太6C进行观测。观测的中心频点为3 888 MHz，观测带宽为2 MHz。使用北京、喀什、深圳和哈尔滨4个站组成北京—喀什、北京—深圳、北京—哈尔滨、喀什—深圳、喀什—哈尔滨、深圳—哈尔滨6条基线进行观测，观测期间哈尔滨测站因设备供电中断了一段时间，所以与之相关的3条基线数据有所缺损。

对于干涉时差测量得到的时差数据进行钟差校正后，与各站的气象数据一起进行预处理，再将预处理好的数据进行轨道解算，得到目标卫星的轨道。对于得到的观测数据所采用的定轨策略为：定轨弧长为1 d，解算卫星位置、速度、太阳光压系数、 T 方向经验加速度以及各测站设备误差等系统差。通过对重叠弧段轨道差和定轨残差的分析评估基于干涉时差测量的无源测定轨手段的定轨精度。定轨过程中对流层的改正采用Saastamonien模型，平均精度约为5 cm^[11]。电离层产品使用IGS(International GNSS Service)提供的电离层网格数据，精度约为2~8 TECU，C波段观测垂直电离层时延精度优于20 cm^[12]。站间钟差

用 GNSS 共视接收机进行站间时间同步及钟差记录, 钟差的精度约为 3 ns。测站坐标由全球卫星导航系统的大地测量手段测量, 精度达 $1 \text{ cm}^{[13]}$ 。测站的设备误差难以进行直接测量^[14], 但是作为参数在定轨过程中解算并扣除。

2.1 干涉时差测量数据分析

6 条基线在观测时段内的时差数据见图 3。图中按顺序依次为北京—喀什, 北京—深圳, 北京—哈尔滨、喀什—深圳、喀什—哈尔滨和深圳—哈尔滨 6 条基线的数据, 这也是用于轨道解算的 6 条基线。图 3 中横轴为时间, 纵轴数据为各基线的时差测量初始数据扣除站间钟差之后的值。从图 3 中可以看出各基线的时差峰-峰值都在 10^4 ns 量级, 并存在以天为周期的波动。对数据较为完整的北京—喀什, 北京—深圳和北京—哈尔滨 3 条基线的时差数据计算 3 站闭合差。通过将北京—喀什, 喀什—深圳基线的时差数据相加之后减去北京—深圳基线的时差数据得到 3 站时差闭合差。结果如图 4 所示, 3 站闭合差的 RMS (root mean square) 值为 0.13 ns , 3 站闭合差的精度并不能用来单独评估某一个站的时差测量精度, 但仍能说明 3 站时差测量精度较好。

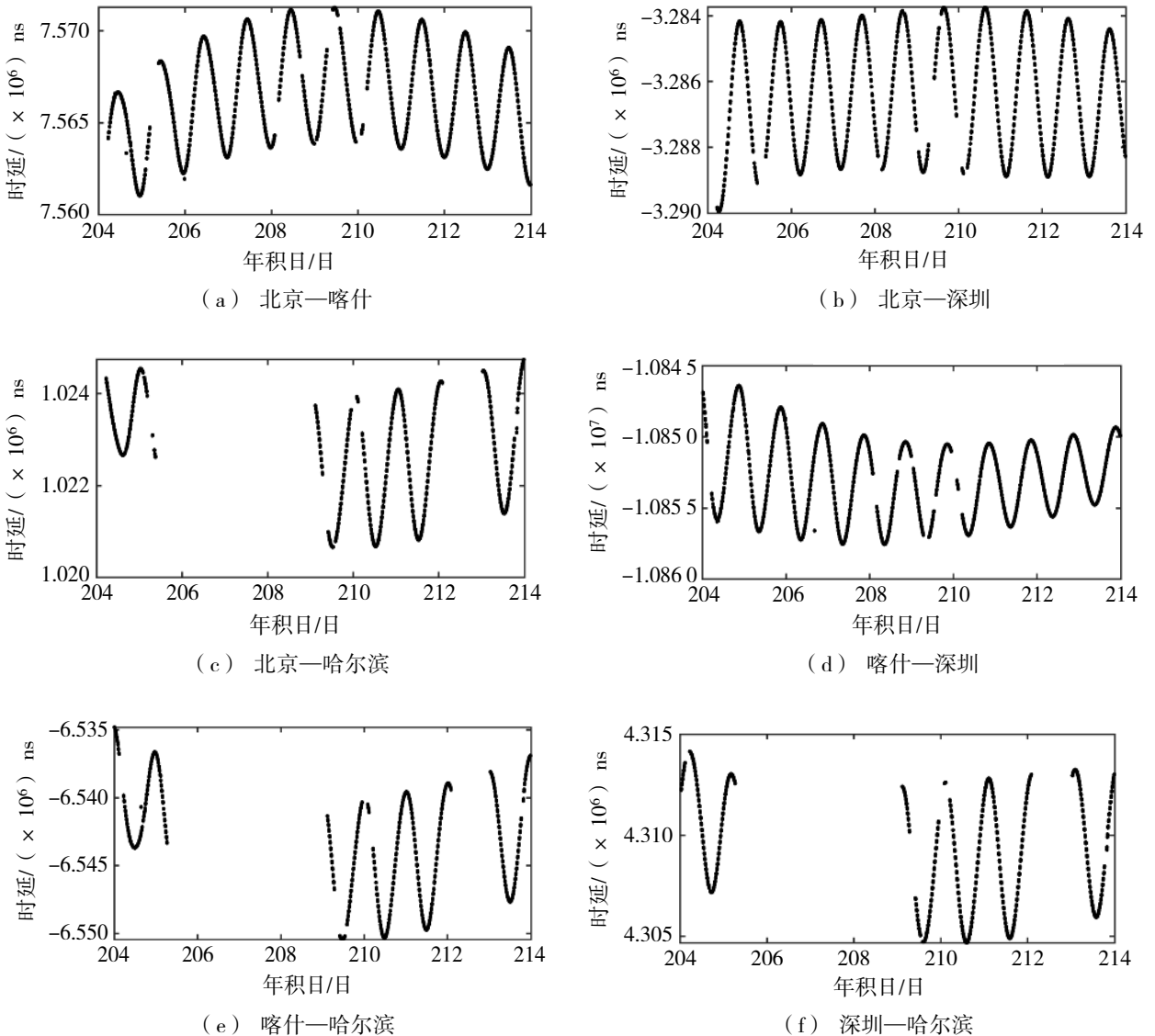


图 3 六基线时差数据图

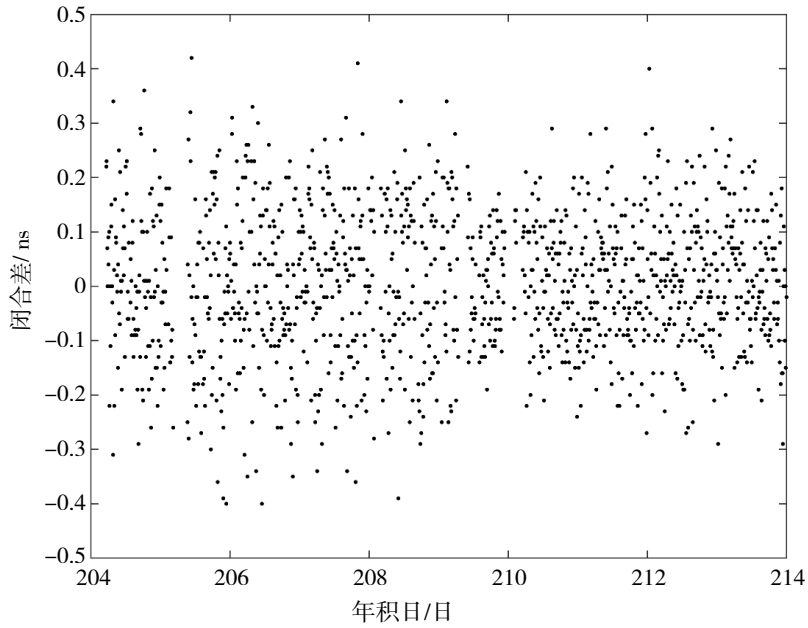
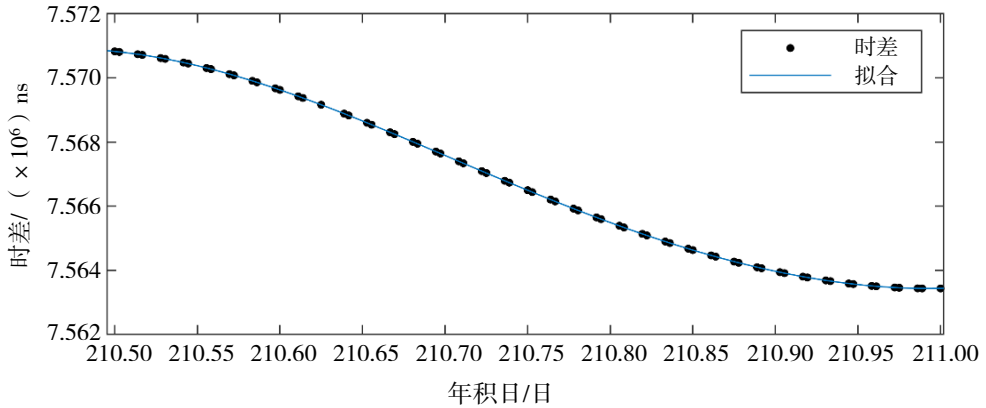
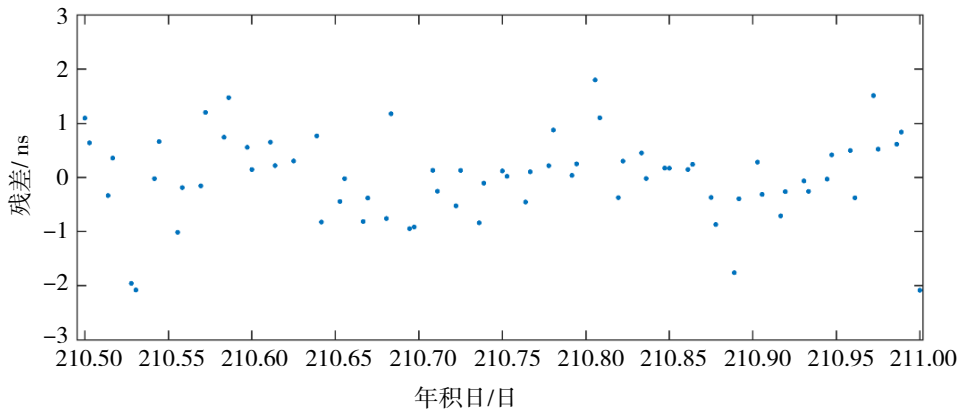


图 4 北京—喀什—深圳 3 站时差测量闭合差

选取 2021 年 7 月 29 日 12:00 至 24:00 的北京—喀什基线的数据，进行拟合，拟合结果如图 5 所示。拟合残差的 RMS 为 0.7 ns。图中时差结果是扣除各站站间钟差之后的结果。



(a) 时差拟合



(b) 拟合残差

图 5 北京—喀什基线时差拟合残差

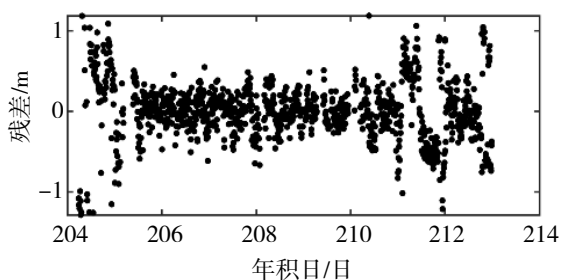
2.2 定轨残差

定轨残差是计算值与观测值之间的差值,是能够在一定程度表征实际定轨精度的重要指标。各基线从 2021 年 7 月 23 日至 2021 年 8 月 1 日的平均定轨残差和残差 RMS 如表 1 所示。

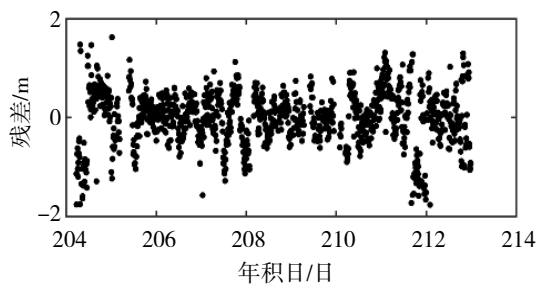
表 1 平均定轨残差

| 定轨时间 | 基线 | 平均定轨残差/m | 残差 RMS/m |
|---------------------------------------|--------|----------|----------|
| 2021-07-23T00:00/ 2021-08-01T24:00 | 北京—喀什 | 0.014 4 | 0.360 1 |
| 2021-07-23T00:00/ 2021-08-01T24:00 | 北京—深圳 | 0.003 3 | 0.539 0 |
| 2021-07-23T00:00/ 2021-08-01T24:00 | 北京—哈尔滨 | 0.005 8 | 0.617 7 |
| 2021-07-23T00:00/ 2021-08-01T24:00 | 喀什—深圳 | -0.004 9 | 0.398 4 |
| 2021-07-23T00:00/ 2021-08-01T24:00 | 喀什—哈尔滨 | 0.010 1 | 0.293 8 |
| 2021-07-23T00:00/ 2021-08-01T24:00 | 深圳—哈尔滨 | 0.008 1 | 0.582 4 |

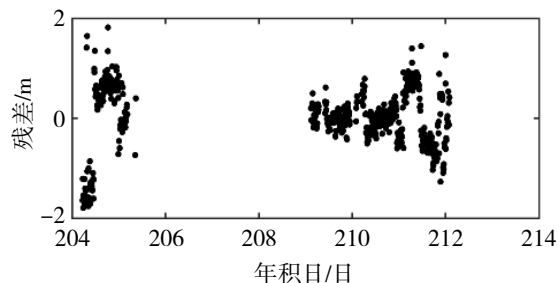
图 6 给出了定轨过程中各基线的具体残差值。



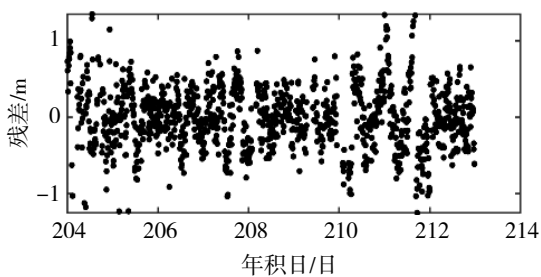
(a) 北京—喀什



(b) 北京—深圳



(c) 北京—哈尔滨



(d) 喀什—深圳

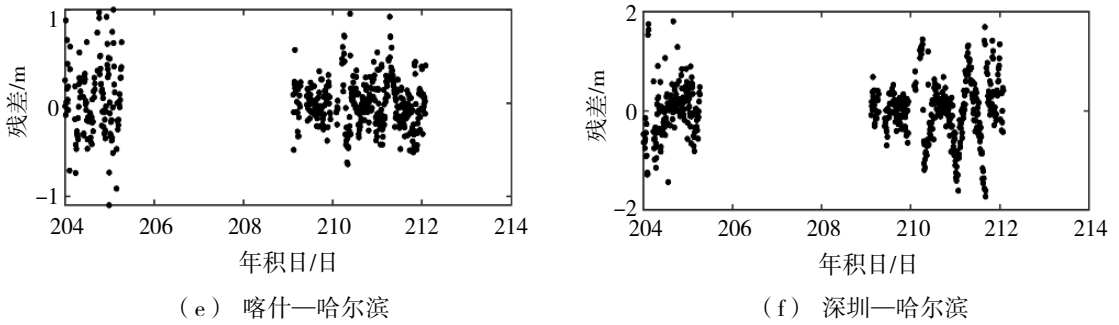


图6 六基线定轨残差

从定轨残差图中可以看出定轨残差峰-峰值优于4 m，RMS 优于0.7 m。在7月29日的轨道残差结果中，6条基线都出现了相同的发散趋势，查询钟差数据后发现是累积的站间钟差过大，对各站的钟进行了控制以减少钟差。

2.3 重叠弧段轨道差分析

重叠弧段轨道差是指在进行定轨计算时，使相邻的两弧段轨道有一段时间的重叠，重叠的时间内两弧段的轨道符合程度。本文中定轨弧长为1 d，两个定轨弧段之间间隔12 h，这样就有了12 h的重叠弧段。通常以重叠弧段轨道差异的三维RMS (root mean square) 作为衡量指标，其定义为

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2}{3}} \quad (6)$$

式(6)中： δ_x^2 、 δ_y^2 、 δ_z^2 分别代表重叠轨道3个直角坐标分量的差异的标准差，其中 δ_x^2 可以由下式计算

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{x_i})^2} \quad (7)$$

式(7)中， n 为比较的轨道的数量， d_{x_i} 为两次计算的轨道在*i*时间的位置在*x*方向上的差异。

重叠弧段的示意图见图7。

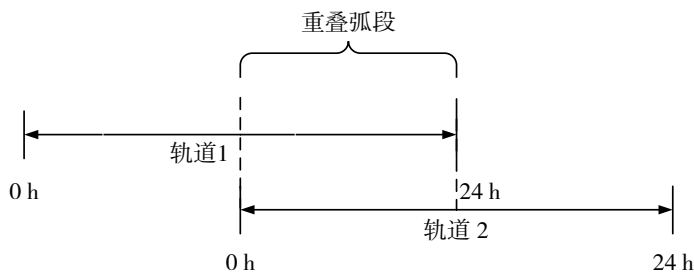


图7 重叠弧段示意图

各重叠弧段的轨道差RMS见表2。重叠弧段轨道差RMS的均值为*R*方向10.45 m、*T*方向9.29 m、*N*方向8.09 m、总位置为17.78 m。

表2 重叠弧段轨道差

| 重叠弧段起始时刻 | <i>R</i> 方向/m | <i>T</i> 方向/m | <i>N</i> 方向/m | 三维方向/m |
|------------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| 2021-07-23T12:00 | 15.497 | 4.954 | 4.890 | 16.988 |
| 2021-07-24T00:00 | 6.018 | 9.709 | 5.869 | 12.843 |
| 2021-07-24T12:00 | 3.188 | 7.283 | 10.900 | 13.492 |

续表 2

| 重叠弧段起始时刻 | R 方向/m | T 方向/m | N 方向/m | 三维方向/m |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| 2021-07-25T00:00 | 13.214 | 4.790 | 2.000 | 14.197 |
| 2021-07-25T12:00 | 5.153 | 1.285 | 1.815 | 5.612 |
| 2021-07-26T00:00 | 18.129 | 15.871 | 2.700 | 24.246 |
| 2021-07-26T12:00 | 11.199 | 6.412 | 4.179 | 13.564 |
| 2021-07-27T00:00 | 12.480 | 15.328 | 6.058 | 20.673 |
| 2021-07-27T12:00 | 9.020 | 29.170 | 8.916 | 31.808 |
| 2021-07-28T00:00 | 7.322 | 5.386 | 1.292 | 9.181 |
| 2021-07-28T12:00 | 10.990 | 20.017 | 8.987 | 24.540 |
| 2021-07-29T00:00 | 12.698 | 16.573 | 13.054 | 24.623 |
| 2021-07-29T12:00 | 6.123 | 2.519 | 9.703 | 11.747 |
| 2021-07-30T00:00 | 17.076 | 4.683 | 22.315 | 28.487 |
| 2021-07-30T12:00 | 3.025 | 4.324 | 4.382 | 6.859 |
| 2021-07-31T00:00 | 13.993 | 9.918 | 27.822 | 32.683 |
| 2021-07-31T12:00 | 13.184 | 2.109 | 1.852 | 13.479 |
| 2021-08-01T00:00 | 9.942 | 6.930 | 9.041 | 15.120 |

图 8 给出了 2021 年 7 月 30 日 12:00 至 7 月 31 日 00:00 的重叠弧段轨道差。

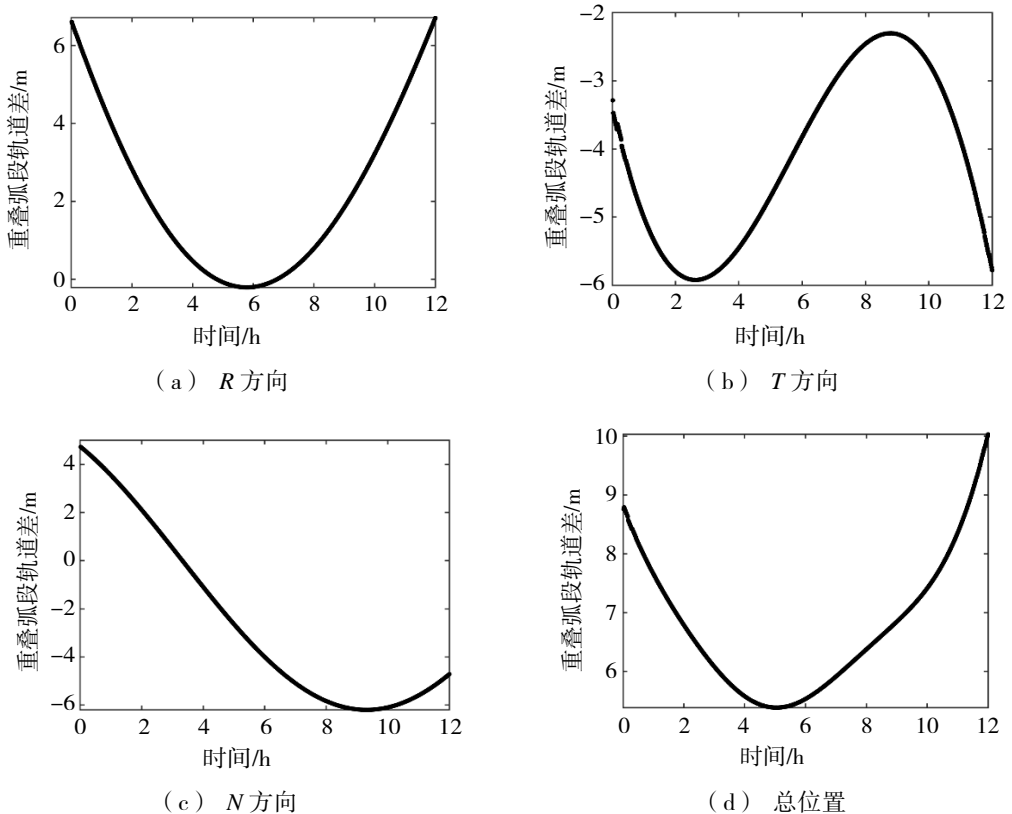


图 8 2021-07-30T12:00/2021-07-31T00:00 重叠弧段轨道差

从重叠弧段轨道差结果来看, 基于干涉时差测量的卫星无源定轨 12 h 重叠弧段轨道差 RMS 均值为 17.78 m。主要的误差来源为干涉时差测量站的站间钟差测量误差和测站设备误差, 其中站间钟差测量误差可以通过更换精度更高的 GNSS 共视接收机减少。测站设备误差作为参数在定轨过程中进行了解算, 也可以通过卫星较差观测, 对测站设备误差进行标校以获得准确的设备误差^[15]。

3 结论

传统基于射电源观测的 VLBI 在应用于卫星测定轨时, 建设运维成本高。使用小口径天线的干涉时差测量方法可以减少成本, 实现准实时的轨道解算。通过在北京、喀什、哈尔滨、深圳 4 地搭建测轨站, 对 GEO 卫星亚太 6C 展开干涉无源测定轨实验。结果表明, 在基线、测站分布合理, 且哈尔滨站数据缺损的情况下, 定轨精度优于 20 m, 满足轨道产品的一般应用需求。使用被动的站间时间同步手段, 整个系统不发射信号。

后续将尝试使用卫星较差观测来进一步提高轨道精度。通过选取目标星附近的一颗已知轨道的卫星作为参考卫星。因为参考卫星的轨道已知, 可以通过参考星的数据消除部分共同的误差, 进而提高定轨精度。

参考文献:

- [1] ZHOU S S, HU X G, LIU L, et al. Status of satellite orbit determination and time synchronization technology for Global Navigation Satellite Systems[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2019, 43(4): 479-492.
- [2] 赵有, 刘乃苓. 卫星激光测距的发展和现状[J]. 测绘通报, 1999(12): 23-26.
- [3] 杨旭海, 丁硕, 雷辉, 等. 转发式测定轨技术及其研究进展[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 216-224.
- [4] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [5] 黄勇, 胡小工, 张秀忠, 等. VLBI 应用于 GEO 导航卫星的测定轨[J]. 科学通报, 2011, 56(24): 1974-1981
- [6] NIELL A, WHITNEY A, PETRACHENKO W, et al. VLBI2010: A vision for future geodetic VLBI[M]. Berlin: Springer, 2007: 757-759.
- [7] 孟书宇, 王伟华, 吴晓平, 等. 高精度甚长基线干涉测量理论时延软件的实现[J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 159-165.
- [8] TAPLEY B D, SCHUTA B E, BORN G H. Statistical orbit determination theory[M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 1973.
- [9] 陈张雷, 李崇辉, 郑勇, 等. 天文定位中几何精度衰减因子最小值分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 879-888.
- [10] 韦沛. GEO 卫星无源测定轨关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
- [11] 曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽, 等. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. 天文学报, 2008, 49(1): 113-122.
- [12] 盛传贞, 张京奎, 张宝成. 不同全球电离层格网产品在中国区域的应用精度评估与分析[J]. 全球定位系统, 2021, 46(4): 8-15.
- [13] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 72-81.
- [14] 冯浩通, 舒逢春, 何旋. 上海佘山 VLBI 站的钟差补偿精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1148-1153.
- [15] 樊敏, 黄勇, 黄磊, 等. 基于北斗卫星校准的连接端站干涉测量与定轨[J]. 系统工程与电子技术, 2021(5): 1303-1309.