

引用格式: 王应波, 吕宏春, 沈文凯, 等. 地面站坐标误差对卫星共视时间比对的影响分析[J]. 时间频率学报, 2025, 48(2): 91-100.

# 地面站坐标误差对卫星共视时间比对的影响分析

王应波<sup>1</sup>, 吕宏春<sup>2</sup>, 沈文凯<sup>1</sup>, 李学敏<sup>1</sup>

1. 中国移动通信集团广东有限公司, 广州 510623;
2. 浙江赛思电子科技有限公司, 嘉兴 314006

**摘要:** 为更好地认识地面站坐标误差对卫星共视时间比对的影响特点, 针对性开展了理论推导、仿真分析和试验。结果表明, 地面站坐标误差引起共视偏差, 在对共视偏差的贡献中, 两站坐标的相对误差影响占主因, 两站坐标的绝对误差影响次之, 宜采用主从站相对定位方式计算地面站坐标; 共视偏差包含固定部分和波动部分, 采用多星共视方式可以起到平均的效果, 能够一定程度上削弱波动程度, 减小标准差; 共视应用中对地面站坐标精度的要求与参与共视的两地面站距离有关, 距离越远对地面站坐标精度要求越高, 对于 10 000 km 以内基线长度共视比对, 若要使地面站坐标误差对卫星共视的影响控制在 0.3 ns 以内, 则坐标相对误差应小于 0.04 m, 坐标绝对误差应小于 0.12 m。

**关键词:** 坐标误差; 卫星共视; 坐标误差影响

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-02-0091-10

## Analysis of the influence of ground station's position error on satellite common-view time comparison

WANG Ying-bo<sup>1</sup>, LÜ Hong-chun<sup>2</sup>, SHEN Wen-kai<sup>1</sup>, LI Xue-min<sup>1</sup>

1. China Mobile Communications Group Guangdong Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;
2. Zhejiang Saisi Electronic Technology Co., Ltd, Jiaxing 314006, China

**Abstract:** To better understand the influence of position error of ground station on the time comparison of satellite common-view, theoretical derivation, simulation analysis and experiments were carried out. Results show that the common-view error was caused by the ground station position's error, the influence of the relative error was the main reason for the contribution of the common-view error, followed by the absolute error, thus the relative positioning method should be used to calculate position. Common-view error includes a fixed part and a fluctuating part, STD (standard deviation) which weakens the influence of the fluctuating part to a certain extent, was reduced by the multi-satellite common-view method by averaging. The requirements for the position accuracy of the ground station in the common-view were related to the distance between the two ground stations, and the farther the distance, the higher the requirement for the position accuracy. For baseline length within

10 000 km, if the influence of ground station position error on satellite common-view was to be controlled within 0.3 ns, the relative position error of the two stations should be less than 0.04 m, and the absolute position error should be less than 0.12 m.

**Key words:** position error; satellite common-view; influence of position error

时频传递常用方法主要有单向法、双向法和共视法, 当采用卫星技术实现时有卫星单向授时法、卫星双向时间同步法、以及卫星共视法<sup>[1]</sup>, 一般认为单向授时法的精度约 20 ns, 卫星共视法的精度根据基线长度的不同一般在 1~10 ns, 卫星双向时间同步精度能达到优于 1 ns<sup>[2-3]</sup>。其中卫星单向授时法精度有限, 卫星双向时间同步法需要租用通信卫星且造价较为昂贵, 而卫星共视法由于其精度高、范围广、相对低价和易于实现, 使其在远程时间比对中成为性价较高的方式, 并逐渐广泛应用于通信、电力、运输、国防和空间技术领域<sup>[4]</sup>。

一般认为卫星共视法需要提前精确测定地面站坐标<sup>[2,5-6]</sup>, 使用高精度的地面站坐标避免接收机位置误差带来的影响<sup>[7]</sup>。有的学者为更好地提高精度, 在使用精确固定坐标的基础上还考虑了天线相位中心偏离 (PCO) 的影响等<sup>[8]</sup>。而若无法获得高精度地面站坐标, 且用户的精度需求在可接收范围, 那么地面站坐标误差带来的影响作为 B 类测量不确定度<sup>[9]</sup>。

可见在以往的研究中, 常在卫星共视中默认采用高精度的地面站坐标, 缺乏对地面站坐标误差影响特点的探讨, 对于用户使用低精度地面站坐标或地面站坐标计算错误导致的具体影响少有分析, 不利于共视技术的拓展应用。

为了更好地提高卫星共视比对精度, 本文对地面站坐标误差在共视比对中的影响特点进行分析, 在理论推导的基础上基于北斗卫星星座开展仿真, 并进行试验验证。

## 1 地面站坐标误差对卫星共视影响的理论分析

对地面站坐标误差在卫星共视比对中的具体

影响因素进行理论分析。

### 1.1 共视比对中地面站坐标误差的影响形式

卫星共视基本原理是: 当卫星在两个地面站 A、B 的可视范围内时, 地面站同时接收该卫星发射的下行测距信号, 分别修正单向伪距并计算得到 A、B 地面站与该卫星的星地钟差, 交换 A、B 两站的星地钟差数据并相减, 抵消或削弱卫星星历、钟差、电离层、对流层影响等共有误差, 进而得到 A、B 两站的相对钟差<sup>[10-12]</sup>。

卫星共视的原理公式为

$$t_{\text{clk}a} - t_{\text{clk}b} = [(\rho_a - \rho_b) - (P_a - P_b)]/c - (\varepsilon_a - \varepsilon_b)。(1)$$

式 (1) 中,  $t_{\text{clk}a}$ 、 $t_{\text{clk}b}$  分别为 A、B 两站的站钟差;  $\rho_a$ 、 $\rho_b$  分别为两站观测伪距;  $P_a$ 、 $P_b$  分别为两站对星的星地几何距离;  $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_b$  分别为两站星地观测中的其他误差项, 包括对流层时延、电离层时延、地球自转效应引起的时延、通道时延等。

由式 (1) 可知卫星共视偏差受两站星地几何距离之差 ( $P_a - P_b$ ) 影响, 而计算星地几何距离需要使用地面站坐标, 因此地面站坐标误差能够对卫星共视产生直接影响。为具体分析地面站坐标误差对共视的影响特点, 忽略对流层、电离层等其他误差项, 将地面站坐标误差作为唯一误差来源开展理论分析, 如图 1 所示。

设在 ECEF (earth-centered, earth fixed) 坐标系下 A、B 两站坐标分别为  $(x_a, y_a, z_a)$ 、 $(x_b, y_b, z_b)$ , 卫星坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 则两站星地几何距离值分别为:

$$P_a = \|x_i - x_a, y_i - y_a, z_i - z_a\|, (2)$$

$$P_b = \|x_i - x_b, y_i - y_b, z_i - z_b\|。(3)$$

式 (2) 和 (3) 中,  $\| \cdot \|$  表示模值运算。

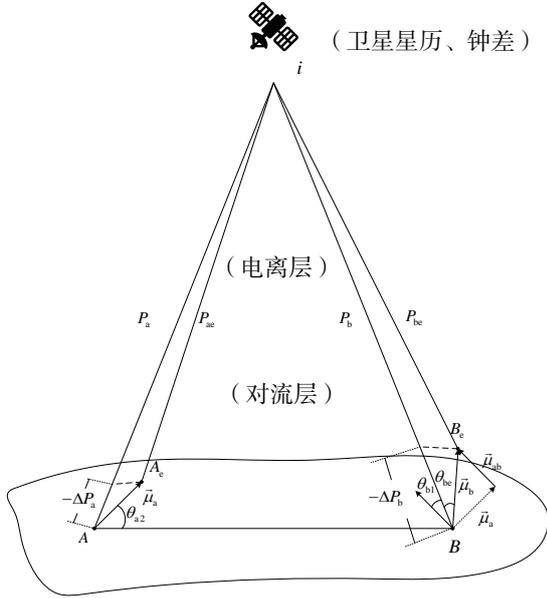


图 1 地面站坐标误差对共视的影响示意图

地面站坐标作用于星地几何距离的计算中,若地面站坐标存在误差,将导致星地几何距离的计算偏差,进而影响站间钟差计算结果。设 A 站在 ECEF 坐标系三轴  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$  方向误差分别为  $\Delta x_a$ 、 $\Delta y_a$ 、 $\Delta z_a$ , 无误差坐标点用  $A$  表示,带误差坐标点用  $A_e$  表示,带误差的星地几何距离值为  $P_{ae}$ , 则 A 站坐标误差带来的几何距离计算偏差  $\Delta P_a$  为

$$\Delta P_a = \frac{-2\Delta x_a(x_i - x_a) - 2\Delta y_a(y_i - y_a) - 2\Delta z_a(z_i - z_a)}{P_{ae} + P_a} + \frac{\Delta x_a^2 + \Delta y_a^2 + \Delta z_a^2}{P_{ae} + P_a} \quad (4)$$

卫星实时定位精度可达米级、精密定位精度可达厘米级,导航卫星星地几何距离约在 20 000 km 至 40 000 km, 因此  $(\Delta x_a^2 + \Delta y_a^2 + \Delta z_a^2)/(P_{ae} + P_a)$  项的影响可以忽略,又由于  $P_{ae} \approx P_a$ , 则式 (4) 化简为

$$\Delta P_a = -\frac{(x_i - x_a) \cdot \Delta x_a + (y_i - y_a) \cdot \Delta y_a + (z_i - z_a) \cdot \Delta z_a}{P_a} \quad (5)$$

同理设 B 站在 ECEF 坐标系三轴  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$  方向误差分别为  $\Delta x_b$ 、 $\Delta y_b$ 、 $\Delta z_b$ , 无误差坐标点用

$B$  表示,带误差坐标点用  $B_e$  表示,带误差的星地几何距离值为  $P_{be}$ , 计算得到 B 站坐标误差带来的几何距离偏差为

$$\Delta P_b = -\frac{(x_i - x_b) \cdot \Delta x_b + (y_i - y_b) \cdot \Delta y_b + (z_i - z_b) \cdot \Delta z_b}{P_b} \quad (6)$$

设 A、B 两站基线长度为  $B_{AB}$ , 基线矢量在三轴  $OX$ 、 $OY$ 、 $OZ$  方向的分量分别为  $\Delta x_{ab}$ 、 $\Delta y_{ab}$ 、 $\Delta z_{ab}$  设 A、B 两站星地几何距离之差为  $\Delta P_{ab} = P_b - P_a$ , 则计算得到以 B 站坐标为参考表示的 A、B 两站坐标误差对两站星地几何距离差的影响为

$$\begin{aligned} \Delta P = \Delta P_b - \Delta P_a = & -\frac{1}{P_a} [x_i - x_b, y_i - y_b, z_i - z_b] \cdot \\ & [\Delta x_b - \Delta x_a, \Delta y_b - \Delta y_a, \Delta z_b - \Delta z_a]^T - \\ & \frac{\Delta P_{ab}}{P_a \cdot P_b} [x_i - x_b, y_i - y_b, z_i - z_b] \cdot [\Delta x_b, \Delta y_b, \Delta z_b]^T - \\ & \frac{1}{P_a} [\Delta x_{ab}, \Delta y_{ab}, \Delta z_{ab}] \cdot [\Delta x_a, \Delta y_a, \Delta z_a]^T \end{aligned} \quad (7)$$

分别记 A 站坐标误差矢量  $\vec{\mu}_a = [\Delta x_a, \Delta y_a, \Delta z_a]$ 、B 站坐标误差矢量  $\vec{\mu}_b = [\Delta x_b, \Delta y_b, \Delta z_b]$ 、B 站对 A 站坐标相对误差矢量  $\vec{\mu}_{ab} = [\Delta x_b - \Delta x_a, \Delta y_b - \Delta y_a, \Delta z_b - \Delta z_a]$ 。设两站坐标相对误差矢量与 B 站星地几何距离矢量的夹角为  $\theta_{b1}$ , B 站坐标误差矢量与 B 站星地几何距离矢量的夹角为  $\theta_{be}$ , A 站坐标误差矢量与两站基线矢量的夹角为  $\theta_{a2}$ , 则式 (7) 转化为

$$\begin{aligned} \Delta P = & -\frac{P_a - \Delta P_{ab}}{P_a} \cdot \|\vec{\mu}_{ab}\| \cdot \cos \theta_{b1} - \frac{\Delta P_{ab}}{P_a} \cdot \|\vec{\mu}_b\| \cdot \cos \theta_{be} - \\ & \frac{B_{AB}}{P_a} \cdot \|\vec{\mu}_a\| \cdot \cos \theta_{a2} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (7) 和 (8) 表征了地面站坐标误差对两站星地几何距离差的影响,均为距离量,除以光速即可得到时间偏差量,因此  $\Delta P$  就是以距离量表示的地面站坐标误差带给共视时间比对的偏差。

式 (8) 分为三项并设:

$$|\Delta P_1| = \frac{P_a - \Delta P_{ab}}{P_a} \cdot \|\vec{\mu}_{ab}\| \cdot |\cos \theta_{b1}|, \quad (9)$$

$$|\Delta P_2| = \frac{|\Delta P_{ab}|}{P_a} \cdot \|\vec{\mu}_b\| \cdot |\cos \theta_{be}|, \quad (10)$$

$$|\Delta P_3| = \frac{B_{AB}}{P_a} \cdot \|\vec{\mu}_a\| \cdot |\cos \theta_{a2}|。 \quad (11)$$

显然总误差的绝对值不大于各项误差绝对值之和, 即有:

$$|\Delta P| \leq |\Delta P_1| + |\Delta P_2| + |\Delta P_3|。 \quad (12)$$

式(9)中 $|\Delta P_1|$ 项表征了两站坐标相对误差对共视的影响, 定义对应误差放大因子为

$$Q_1 = \frac{P_a - \Delta P_{ab}}{P_a} = 1 - \frac{\Delta P_{ab}}{P_a}。 \quad (13)$$

$Q_1$ 描述了两站坐标相对误差对共视的影响与星地几何距离之差 $\Delta P_{ab}$ 的关系。

式(10)中 $|\Delta P_2|$ 项和式(11)中 $|\Delta P_3|$ 项共同表征了地面站坐标绝对误差对共视的影响, 分别定义误差放大因子为:

$$Q_2 = \frac{\Delta P_{ab}}{P_a}, \quad (14)$$

$$Q_3 = \frac{B_{AB}}{P_a}。 \quad (15)$$

$Q_2$ 描述了地面站坐标绝对误差对共视的影响与星地几何距离之差 $\Delta P_{ab}$ 的关系,  $Q_3$ 则描述了地面站坐标绝对误差对共视的影响与基线长度 $B_{AB}$ 的关系。

由于两个地面站与卫星呈三角形关系, 因此基线长度恒大于星地几何距离之差。该三角形中当基线与星地连线的夹角趋于零时, 星地几何距离之差取得极大值, 此时该极大值趋于基线长度。为简化分析, 可近似得到星地几何距离之差极大值:

$$|\Delta P_{ab, \max}| = \begin{cases} B_{AB}, B_{AB} < |\Delta P_{\max}| \\ |\Delta P_{\max}|, B_{AB} \geq |\Delta P_{\max}| \end{cases}。 \quad (16)$$

式(16)中,  $\Delta P_{\max}$ 表示两地面站星地几何距离之差的极限值, 可依据具体卫星轨道高度估算。

则决定 $|\Delta P_1|$ 项、 $|\Delta P_2|$ 项及 $|\Delta P_3|$ 项大小的因素包括: 误差放大因子, 地面站坐标相对或绝对误差的模值, 及各夹角余弦值的绝对值。

## 1.2 地面站坐标误差分析及控制措施

通过理论分析可知, 地面站坐标误差对共视的

影响不仅与地面站坐标误差本身有关, 还与误差放大因子有关。误差放大因子越小, 则地面站坐标误差的影响越小。根据式(13)~(15), 误差放大因子与基线长度、星地几何距离之差有关, 而根据导航卫星运动规律和几何关系, 基线长度极限值、星地几何距离之差极限值均与卫星及地面站相对距离有关。

为简化分析, 将地球近似为圆球形状, 假设卫星与两个地面站 A、B 以及地心四点共面, 此时卫星高度  $h$ 、星地距离  $P_a$  及  $P_b$ 、基线长度  $B_{AB}$  关系如图 1 所示, 其中角  $\rho$  为地心-卫星方向与地心-地面站 B 方向夹角, 角  $\alpha'$  为地心-地面站 B 方向与地面站 B-卫星方向夹角,  $R$  为地球半径。

根据正弦定理有:

$$\frac{\sin \rho}{P_b} = \frac{\sin \alpha'}{h + R}。 \quad (17)$$

计算有:

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\sin \rho \cdot (h + R)}{P_b}\right) = \arcsin\left(\frac{B_{AB} \cdot (h + R)}{2RP_b}\right)。 \quad (18)$$

当观测仰角取极值  $0^\circ$  时, 角  $\alpha'$  取得极值  $90^\circ$ , 此时存在关系  $P_b = \sqrt{(h + R)^2 - R^2}$ , 得到基线长度极限值为

$$B_{AB\max} = \frac{2RP_b}{h + R}。 \quad (19)$$

但实际情况下观测仰角大于  $0^\circ$ , 因此基线长度小于  $B_{AB\max}$ 。

北斗卫星导航系统 MEO (middle earth orbit) 卫星轨道高度为 21 528 km, GEO (geostationary orbit) 及 IGSO (inclined geosynchronous orbit) 卫星轨道高度为 35 786 km<sup>[13]</sup>, 地球半径约 6 371 km。则根据几何关系, 当两站处于共视可视极限位置时有最大基线, 经计算基于 MEO 的极限基线长度约为 12 405 km, 基于 GEO 或 IGSO 卫星的极限基线长度约为 12 596 km。随着基线长度的增加往往带来共视质量下降、共视时间变短、共视误差抵消能

力减弱等问题，因此共视基线不宜过长。一般共视应用中基线长度远小于极限值，即使是国际超远距离共视基线通常也小于 10 000 km，目前国内报道了国家授时中心与欧洲的基于 GEO 卫星共视的超远距离共视基线为 7 000~9 000 km<sup>[14-15]</sup>。因此对于基线长度的分析一般低于 10 000 km。

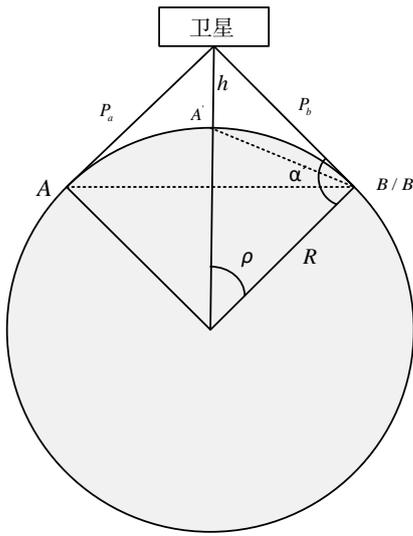


图 2 基线长度、星地几何距离之差及与卫星高度的几何关系

两站星地几何距离之差小于基线长度，当一个地面站处于卫星星下点，而另一个地面站位于卫星与地球的切线位置时，两站星地几何距离之差取得极限值，此时观测站分别在图 2 中的 A' 点和 B' 点，卫星-地面站 A' 的距离等于星地距离 h。以北斗卫星导航系统轨道高度计算，则基于 MEO 卫星的两站星地几何距离之差极限为  $\Delta P_{\max} = P_b - P_a = P_b - h = 5\,634\text{ km}$ ；基于 GEO 卫星的两站星地几何距离之差极限为  $\Delta P_{\max} = P_b - P_a = P_b - h = 5\,887\text{ km}$ 。

假设要使  $|\Delta P_1|$  项、 $|\Delta P_2|$  项及  $|\Delta P_3|$  项误差影响最大值均不大于 0.3 ns（即约 0.1 m），并假设三轴坐标误差等值分配。根据放大因子的定义、基线长度极限值及星地几何距离之差极限值关系，能够计算得到不同放大因子与基线长度的最大地面站坐标误差分配情况。以基于 MEO 卫星基线长度等于

1 000 km 为例，根据上面分析可知  $|\Delta P_{\max}| = 5\,634\text{ km}$ ，满足  $B_{AB} < |\Delta P_{\max}|$ ，因此根据式（16）得到  $|\Delta P_{ab,\max}| = 1\,000\text{ km}$ ，进而根据式（13）~（15）并近似星地几何距离  $P_a \approx 21\,528\text{ km}$  得到各放大因子。当  $\Delta P_{ab,\max}$  为正时，计算得到  $Q_1$  为 0.953；当  $\Delta P_{ab,\max}$  为负时，计算得到  $Q_1$  为 1.047；计算得到  $Q_2$ 、 $Q_3$  均为 0.047。根据式（9）并假设取得最大值 1，反推得到两地面站坐标相对误差的分配值，当  $\Delta P_{ab,\max}$  为正时为 0.061 m，当  $\Delta P_{ab,\max}$  为负时得到 0.055 m；根据式（10）和式（11）分别得到基于地面站坐标绝对误差的分配值为 1.242 m。基线长度不同时，计算方法类似。

表 1 所示分别计算给出了基线长度 0.01~10 000 km 的 MEO 卫星、GEO/IGSO 卫星的各放大因子及地面站坐标误差分配值。在目标误差一定的情况下，分配误差越大，则该项地面站坐标误差对共视结果的影响越小，从表 1 可知，地面站坐标误差对共视的影响中，地面站坐标相对误差是主因，绝对误差是次因。对于目标误差 0.3 ns，基于  $Q_1$  项的地面站坐标相对误差分配值在 0.04~0.07 m，MEO 卫星与 GEO、IGSO 卫星的影响相近；基于  $Q_2$ 、 $Q_3$  项的地面站坐标绝对误差分配值根据基线长度有较大不同，基线越长分配值越小。对于 1 000 km 基线以内的共视应用，基于 MEO 卫星计算的地面站坐标绝对误差分配值约 1.24 m，基于 GEO、IGSO 卫星计算的地面站坐标绝对误差分配值约 2.06 m，地面站坐标误差对 GEO/IGSO 高轨卫星的影响略小于中轨卫星 MEO；而对于 10 000 km 长基线，基于 MEO 卫星计算的地面站坐标绝对误差分配值约 0.12 m，基于 GEO、IGSO 卫星计算的地面站坐标绝对误差分配值约 0.21 m。不区分导航卫星类型，则对于 10 000 km 以内基线长度共视比对，若要使地面站坐标误差对卫星共视的影响控制在 0.3 ns 以内，则参与共视的地面站间坐标相对误差应小于 0.04 m，坐标绝对误差应小于 0.12 m。因此应首先尽可能地减小地面站坐标相对误差，其次是绝对误差。

表 1 不同放大因子及基线长度的地面站坐标误差分配值

卫星类型	基线长度/km	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	地面站坐标误差分配值/m		
					基于 $Q_1$ 项的地面站坐标相对误差	基于 $Q_2$ 项的地面站坐标绝对误差	基于 $Q_3$ 项的地面站坐标绝对误差
MEO	0.01	约 1	约 0	约 0	0.058	124 000	124 000
	100	0.995~1.005	0.005	0.005	0.057~0.058	11.547	11.547
	1 000	0.953~1.047	0.047	0.047	0.055~0.061	1.242	1.242
	10 000	0.738~1.262	0.262	0.465	0.043~0.074	0.223	0.124
GEO/IGSO	0.01	约 1	约 0	约 0	0.058	207 000	207 000
	100	0.997~1.003	0.003	0.003	0.058	19.245	19.245
	1 000	0.972~1.028	0.028	0.028	0.056~0.059	2.062	2.062
	10 000	0.835~1.165	0.165	0.279	0.048~0.067	0.350	0.207

采用相对定位方法能够获得高精度的基线解,最适合得到站点高精度相对坐标<sup>[16]</sup>,若在相对定位中加入已知高精度控制点的观测数据联合解算,则参与共视的地面站坐标绝对误差也能够有效控制。为了进一步提高相对定位精度,在进行地面站坐标测定时使用同时段的观测数据,采用相同数据分析中心提供的星历、钟差数据进行解算,有利于减小星历、钟差、卫星状况、天气、电离层活动、潮汐、地壳移动等带来的共有误差,从而减小地面站坐标相对误差,提高相对坐标测量精度。对于 0.1 m 级的共视比对精度需求,应要求在特定基线长度下地面站坐标精度优于表 1 所示,建议采用相对定位、PPP (precise point positioning) 等方式同时测定参与共视比对的两个地面站的精确坐标,当不区分基线长度时应使地面站坐标精度优于 0.04 m。

## 2 地面站坐标误差对卫星共视影响的仿真分析

基于北斗导航卫星开展仿真分析,采用中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心 2022 年 8 月 10 日北斗广播星历文件。仿真使用 ECEF 坐标系坐标,数据时长为 24 h。

仿真基线选择:以西安为主站,设定西安—北京、西安—三亚、西安—乌鲁木齐 3 条基线,基线

长度分别为 910.6、1 740.3 和 2 146.6 km。

仿真误差设置:在主站真值坐标各方向引入 -1 m 误差,在从站真值坐标各方向引入 +1 m 误差,则主从站各方向上坐标相对误差均为 2 m。

仿真采用的地面站坐标误差如表 2 所示,由于此处仅分析地面站坐标误差这一项因素,因此仿真分析不考虑电离层、对流层等其他因素的影响。

表 2 地面站坐标误差(仿真)

地面站	坐标轴	坐标误差/m	坐标相对误差/m
西安主站	X	-1	\
	Y	-1	\
	Z	-1	\
北京从站	X	1	2
	Y	1	2
	Z	1	2
三亚从站	X	1	2
	Y	1	2
	Z	1	2
乌鲁木齐从站	X	1	2
	Y	1	2
	Z	1	2

以西安—北京基线为例,分别基于 GEO 卫星

C01、C02，IGSO 卫星 C06、C07，MEO 卫星 C12、C13 分析地面站坐标误差对单星共视影响，根据式 (5) 和 (6) 计算卫星到西安、卫星到北京的星地几何距离偏差，然后再根据式 (7) 或式 (8) 得到地面站坐标误差引起的共视偏差，仿真分析结果如图 3 所示，统计结果见表 3，仿真数据长度为当天该星可视时段所有有效数据。地面站坐标误差引起的共视偏差分为固定部分和波动部分，基于 GEO 卫星的共视偏差以固定值为主，C01 和 C02 卫星的共视偏差均值分别为 2.86 ns 和 -6.97 ns，标准差分别为 0.09 ns 和 0.21 ns；基于 IGSO、MEO 卫星的共视偏差则受到卫星运动较大影响，固定部分和波动部分均不能忽视，例如基于 C06 卫星的共视偏差标准差达到 2.67 ns，共视偏差均值达到 -5.78 ns。根据式 (7) 或 (8) 可知，在地面站坐标及误差固定的情况下，某一时刻地面站坐标误差对共视的影响大小与卫星位置有关，GEO 卫星轨道相对地面站变化不大，因此基于单颗 GEO 卫星分析的共视偏差变化不大，而不同 GEO 卫星相对地面站的轨道不同，从而造成不同 GEO 卫星对共视的影响数值不同，可见基于 GEO 卫星的共视偏差中固定部分占主导，且基于不同 GEO 卫星的共视偏差不同；而对于 IGSO、MEO 卫星而言，由于卫星轨道相对地面站变化较快，基于单颗 IGSO 或 MEO 卫星的共视偏差随时间变化较大，从而造成基于单颗 IGSO 及 MEO 卫星的共视偏差中固定部分与波动部分均较显著，不同 IGSO 及 MEO 卫星的轨道差异

也引起共视偏差固定部分的数值不同，可见基于 IGSO 及 MEO 卫星的共视偏差的固定部分和波动部分均不能忽视。由于卫星相对地面站的坐标是时变的，特别是 IGSO 和 MEO 卫星相对地面站变化明显，因此地面站坐标误差对单星共视的偏差也是时变的，偏差的固定部分和波动部分分别以均值和标准差进行统计，则统计值受到统计时长和具体统计数据区间的影响，如图 3 所示，由于卫星运动导致基于 IGSO 和 MEO 的共视偏差曲线有着明显的时变特征，不失一般性，假设仅取  $3.1 \times 10^5$  s 时刻附近 1 min 的数据进行统计，以 C06 卫星为例得到该 1 min 时段误差均值约为 -7.23 ns，标准差仅约 0.005 ns，这与表 3 对应统计结果差别很大，可见地面站坐标误差对共视的影响更容易在较长观测时间段中被识别。

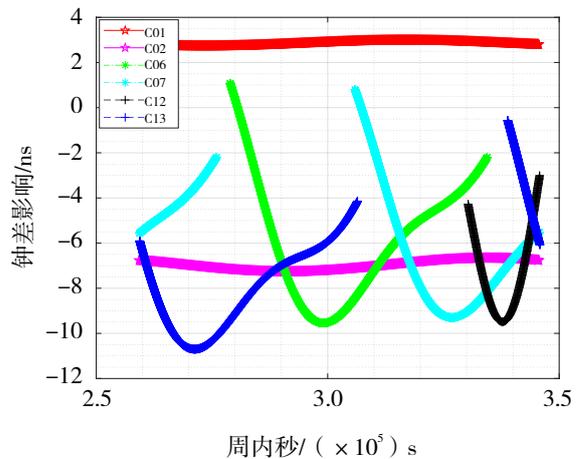


图 3 西安—北京基线地面站坐标误差对单星共视影响

表 3 西安—北京基线地面站坐标误差对单星共视影响统计 (24 h 时长) 单位: ns

共视卫星	最大值	最小值	标准差	平均值
C01	2.99	2.73	0.09	2.86
C02	-6.67	-7.27	0.21	-6.97
C06	1.08	-9.55	2.67	-5.78
C07	0.79	-9.31	2.56	-5.79
C12	-3.01	-9.50	1.83	-7.36
C13	-0.58	-10.72	2.39	-7.36

使用当日北斗系统全部可用卫星进行多星共视比对分析,对西安—北京、西安—三亚、西安—乌鲁木齐 3 条基线仿真结果如图 4 所示,统计结果见表 4。在多星共视中,由地面站坐标误差导致的共视偏差变化曲线不再平滑,这是因为随着卫星运动,可共视卫星的加入或退出对共视偏差计算值产生台阶式的影响。西安—乌鲁木齐可共视卫星数目为 3 条基线中最少的,平均为 13.8 颗,西安—三

亚可共视卫星数目为最多的,平均为 17.0 颗。3 条基线仿真结果表明多星共视中,共视偏差与可共视卫星数量呈负相关;坐标轴各方向上 2 m 的坐标相对误差对共视偏差引入标准差 0.35~0.50 ns、均值 -6.08~-4.15 ns 的影响。该标准差远小于基于 IGSO 和 MEO 卫星的单星共视,均值误差与单星共视在同一量级,这是由于多星综合的平均效应一定程度削弱了地面站坐标误差引起的共视偏差波动部分。

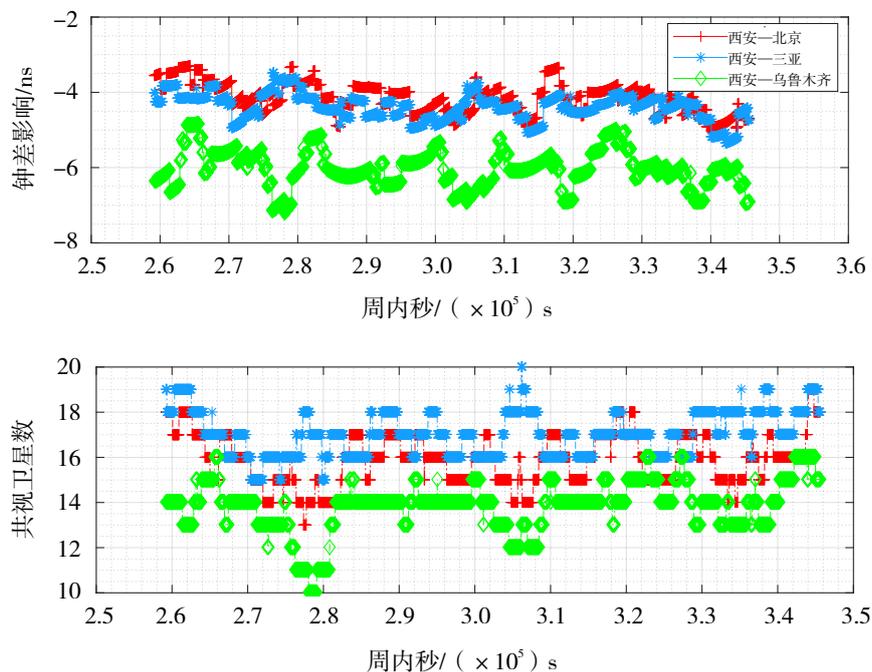


图 4 3 条基线地面站坐标误差对多星共视影响

表 4 3 条基线地面站坐标误差对多星共视影响统计 (24 h 时长)

基线	站间钟差平均值/ns	站间钟差标准差/ns	平均卫星数/颗
西安—北京	-4.15	0.40	15.9
西安—三亚	-4.41	0.35	17.0
西安—乌鲁木齐	-6.08	0.50	13.8

对比地面站坐标误差对单星共视和多星共视的影响可知:由于在 ECEF 坐标系中 GEO 卫星轨道相对静止,基于 GEO 卫星的单星共视偏差以固定部分为主;由于多星共视对共视结果的平均效应,从长时间统计结果看,多星共视结果的标准差远小于基于 IGSO 和 MEO 卫星的单星共视;而无

论单星共视还是多星共视,共视偏差的固定部分均不能忽略。坐标轴各方向上 2 m 的坐标相对误差带来了不大于 10 ns 的多星共视偏差均值,由于当共视结果出现固定偏差时难以区分该误差由共视设备通道时延、电缆时延标定残差引起还是由地面站坐标误差引起,因此必须警惕误将地面站坐标误差

带来的共视偏差视为设备时延的情况。

### 3 试验验证

为验证地面站坐标误差的影响，于 2023 年 4 月 10 日在广东东莞东城开展共视试验。天线架设场所为中国移动某机房楼顶，基线长度 3.25 m，采集数据后分别利用高精度坐标和带误差坐标离线计算接收机站间钟差。主、从站坐标误差如表 5 所示，带误差坐标为主、从站接收机开机后的前 30 min 实时标准定位结果均值，本次有效试验时长约 14.2 h。

试验结果分别如图 5 所示，统计结果见表 6。其中 1 s 间隔比对结果为实时比对结果，16 min 间隔比对结果为实时结果每 16 min 求均值，16 min 结果基本消除了测量热噪声，能够较好反映地面站

坐标误差的影响。以高精度坐标共视结果为参考，则主从站坐标轴各方向上分别引入了 2.597、-3.156、-2.401 m 的坐标相对误差，此时共视偏差均值变化了 -10.77 ns，标准差也由 0.18 ns 增大至 0.60 ns。

表 5 地面站坐标误差（试验）

共视站点	坐标轴	坐标绝对误差/m	坐标相对误差/m
主站	X	-1.321	\
	Y	1.971	\
	Z	2.528	\
从站	X	1.276	2.597
	Y	-1.185	-3.156
	Z	0.127	-2.401

表 6 地面站坐标误差对卫星共视影响试验统计 单位：ns

项目	1 s 间隔比对结果		16 min 间隔比对结果	
	均值	标准差	均值	标准差
高精度坐标共视	0.28	0.29	0.28	0.18
带误差坐标共视	-10.50	0.65	-10.49	0.60
偏差	-10.78	\	-10.77	\

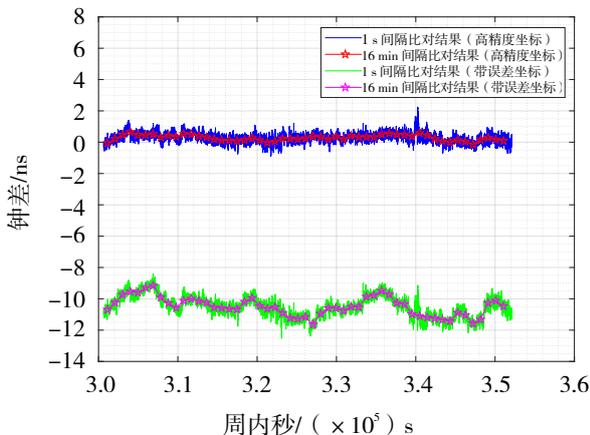


图 5 地面站坐标误差对卫星共视影响试验结果

试验验证结果与仿真分析的结论相一致，地面站坐标误差对共视结果带来的偏差分为固定部分和波动部分，本次试验中，由坐标相对误差引入的

共视偏差固定部分高达 10 ns 级，这是不可接受的。为减小共视误差，并避免地面站坐标误差带来的共视偏差与共视系统的硬件时延混淆，地面站坐标精度必须足够高。

### 4 结语

地面站坐标误差是卫星共视比对重要的误差来源，对卫星共视的影响特点主要包括 3 个方面。

① 地面站坐标相对误差是地面站坐标误差影响共视时间比对的主因。宜采用相对定位方式提高地面站坐标精度，并且对坐标精度的要求随着基线长度的增大而提高，对于基线长度小于 10 000 km 的共视比对，若要使地面站坐标误差对卫星共视的影响控制在 0.3 ns 以内，则共视两站的坐标相对误

差应小于 0.04 m, 坐标绝对误差应小于 0.12 m。

② 地面站坐标误差对基于不同类型的导航卫星共视影响不同, 多星共视能够一定程度削弱共视偏差的波动部分。基于 GEO 卫星的共视, 由于轨道相对固定, 采用低精度坐标引入的共视偏差标准差很小, 但往往引起较大的共视偏差均值; 基于 IGSO 和 MEO 卫星的共视偏差固定部分及波动部分均比较显著; 相比于基于 IGSO 或 MEO 卫星的单星共视, 多星共视能够通过平均效应显著减小地面站坐标误差带来的共视偏差标准差。

③ 地面站坐标误差引起的共视偏差固定部分的特征与设备时延相似。无论采用单星共视还是多星共视, 低精度相对坐标带来的共视偏差均值一般不能忽视, 且由于共视偏差固定部分的特征与共视设备通道时延、电缆时延的标定残差等高度相似, 必须警惕误将坐标误差带来的共视偏差视为设备时延的情况。

通过对地面站坐标误差在共视中的影响特点的探讨, 对于用户选用合适精度地面站坐标具有一定的参考价值, 有利于共视技术的拓展应用。

### 参考文献:

- [1] LEVINE J. A review of time and frequency transfer methods[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S162.
- [2] 杨旭海, 李孝辉, 华宇, 等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. *导航定位与授时*, 2021, 8(4): 10.
- [3] 何婷, 陈国军, 马嘉琳. 精密时频传递技术综述[J]. *测绘通报*, 2018(5): 5.
- [4] WANG P, WANG G, GAO Y, et al. Comparison of VLBI and GNSS common view for time transfer[J]. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2019, 10: 15.
- [5] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 北斗卫星共视时间传递技术要求: GB/T 39411-2020[S]. 2020.
- [6] DEFRAIGNE P, PETIT G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer[J]. *Metrologia*, 2015, 52(6): 61.
- [7] 赵淑洁. 基于 BDS-3 新体制信号的共视时间比对方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2022.
- [8] HUANG W, DEFRAIGNE P. BeiDou time transfer with the standard CGGTTS[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 1005-1012.
- [9] LOMBARDI M A, NOVICK A N. Remote time calibrations via the NIST time measurement and analysis service[J]. *NCSLI Measure*, 2006, 1(4): 50-59.
- [10] 张健, 董绍武, 武文俊, 等. GPS 多接收机加权组合共视时间比对[J]. *时间频率学报*, 2020, 43(3): 175-184.
- [11] 许龙霞. 基于共视原理的卫星授时方法[D]. 西安: 中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心), 2012.
- [12] 肖云, 焦文海, 梁海鹏, 等. 基于 GPS 卫星共视法站间时间同步[J]. *测绘科学与工程*, 2010(1): 4.
- [13] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空-地信号接口控制文件公开服务信号 B3I(1.0 版)[EB/OL]. (2018-02) [2018-02-09]. [http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201802/t20180209\\_14126.html](http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201802/t20180209_14126.html).
- [14] 武文俊, 王威雄, 王翔, 等. 基于北斗三号的长基线共视时间比对[J]. *宇航计测技术*, 2020, 40(1): 33-37.
- [15] GUANG W, DONG S, WU W, et al. Progress of BeiDou time transfer at NTSC[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 673.
- [16] 柴军兵. 高精度 GNSS 基线处理关键技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.