

郑三君,马下平,李祖锋,等. 甘肃省BDS-3 PPP高等级控制网构建方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):90-97.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250315

ZHENG Sanjun,MA Xiaping,LI Zufeng,et al.Method for establishing high-grade control network based on BDS-3 PPP technology in Gansu Province[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 90-97. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250315

甘肃省 BDS-3 PPP 高等级控制网构建方法

郑三君¹, 马下平^{2*}, 李祖锋³, 赵亮¹

(1. 甘肃省测绘工程院北斗导航定位中心,甘肃兰州 730000;2. 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西西安 710054;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司地质勘测工程院,陕西西安 710065)

摘要:为解决全球卫星导航系统(GNSS)相对定位成本高、作业复杂的问题,基于北斗三号(BDS-3)观测数据,提出一种利用精密单点(PPP)定位结果及其方差-协方差信息构建虚拟基线向量,并通过布尔莎模型实现国际地球参考框架2020(ITRF2020)至2000中国大地坐标系(CGCS2000)的坐标转换。研究表明:BDS-3 PPP观测4 h, E、N、U方向定位精度分别优于11.9 mm、11.8 mm、13.1 mm,满足GNSS大地控制网要求;观测72 h, E、N、U方向定位精度分别为3 mm、4 mm和7 mm;布尔莎模型转换精度与公共点同步观测时长显著相关,待转点与公共点同步观测时长一致时, E、N、U方向的转换精度分别为4.0 mm、2.1 mm、3.4 mm;虚拟基线向量在观测0.5 h、1 h后可分别达到GNSS大地控制网D级、C级精度要求,观测4 h后基线向量分量误差小于3 mm,相对中误差小于 9.1228×10^{-8} , CGCS2000空间直角坐标分量误差小于2 mm,优于相对定位基线向量网24 h解算结果。研究结论为有效提升控制网建设效率提供参考。

关键词:北斗三号全球卫星导航系统;精密单点定位;布尔莎模型;基线向量;方差-协方差矩阵

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)01-0090-08

Method for establishing high-grade control network based on BDS-3 PPP technology in Gansu Province

ZHENG Sanjun¹, MA Xiaping^{2*}, LI Zufeng³, ZHAO Liang¹

(1. Beidou Navigation and Positioning Center, Surveying and Mapping Engineering Institute of GanSu, Lanzhou 730000, China; 2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Geological Survey Engineering Institute, Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: To solve the challenging problems of high cost and complex operation in Global Navigation Satellite System(GNSS), based on the observation data of BeiDou-3 Global Navigation Satellite System(BDS-3), a high-level control network construction method is proposed, which uses precise point positioning(PPP) results and their variation-covariance information to construct a virtual baseline and realizes the coordinate transformation from International Terrestrial Reference Frame 2020(ITRF2020) frame instantaneous epoch coordinates to China Geodetic Coordinate System 2000(CGCS2000) through the Bursa model. The research results show that after 4 hours of BDS-3 PPP observation, the positioning accuracy in the E, N, and U directions is better than 11.9 mm, 11.8 mm, and 13.1 mm respectively, meeting the requirements of the GNSS geodetic control network point. After 72 hours of observation, the positioning accuracy in the E, N and U directions can reach 3 mm, 4 mm and 7 mm respectively; The conversion accuracy of the Bursa model is significantly correlated with the synchronous observation duration of the common point. When the synchronous observation duration of the point to be converted is consistent with the common point, the conversion accuracy in the E, N, and U directions can reach

收稿日期:2025-07-17 修回日期:2025-09-12 接受日期:2025-10-12 责任编辑:黄琦

基金项目:国家自然科学基金项目(42364002;42274039);甘肃省科技重大专项(23ZDFA017);西安市科学技术计划项目(24ZDCYJSGG0015)

作者简介:郑三君(1983-),男,甘肃庆阳人,高级工程师,主要从事GNSS大地测量数据处理方面的研究。E-mail:17318717584@163.com

通信作者:马下平(1984-),男,甘肃庆阳人,博士研究生,副教授,主要从事GNSS大地测量数据处理方面的研究。

E-mail:celiang0321@163.com

4.0 mm, 2.1 mm, and 3.4 mm respectively. The virtual baseline vector can respectively meet the accuracy requirements of Grade D and Grade C of the GNSS control network after 0.5 hours and 1 hour of observation. After 4 hours of observation, the error of the baseline vector component is less than 3 mm, the relative mean error is less than 9.122×10^{-8} , and the error of the spatial rectangular coordinate component of CGCS2000 is less than 2 mm, which is superior to the 24-hour solution result of the relative positioning baseline vector network. The research conclusion provides a reference for effectively improving the construction efficiency of control networks.

Keywords: BeiDou-3 Global Navigation Satellite System(BDS-3); precise point positioning(PPP); Bursa model; baseline vector; variance-covariance matrix

0 引言

目前, 低轨卫星及星链差分技术日趋成熟, 地基增强系统特别是地面站建设, 需要在诸多因素之间进行合理取舍, 避免盲目建设。中国西北地区面积广袤, 在大尺度空间范围内无法精准快速建立高等级控制网, 主要体现在: 基准站密度远低于东部发达地区; 对于大面积无人区或部分偏远、经济不发达地区, 无法提供完备的通信、电力及交通保障; 地形复杂导致大气延迟误差过大。上述因素导致网络RTK (network real-time kinematic) 无法固定或固定效果较差, 短时内无法获取高精度三维坐标。高等级测绘基准的建立大多基于连续运行参考站的静态联测及数据处理方法, 待解算点与已知点形成点观测或网观测模式, 通过高精度基线解算和网平差获取CGCS2000坐标。但受起算点CGCS2000坐标、观测数据保密和解算软件掌握程度等因素限制, 仅少数单位能使用该方法。C级以下的高等级控制网数据处理存在控制网型分布差、观测时长较短和数据处理软件精度不足等问题, 导致建立测绘基准的时效性及精度无法满足要求。

随着精密单点定位 (PPP) 技术的日趋成熟, 学者对PPP技术应用于测绘基准建立方面开展了深入研究。文献[1]对美国全球定位系统 (GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS)、欧盟伽利略卫星导航系统 (Galileo) 和中国北斗全球卫星导航系统 (BDS) 的PPP静态定位精度进行统计分析, 结果显示, GPS、BDS、GLONASS和Galileo的外符合精度中, 平面定位精度均优于1 cm, 垂直方向GPS的定位精度优于1 cm, BDS、GLONASS和Galileo的定位精度均优于2 cm。文献[2]采用全球卫星导航系统 (GNSS) 接收机分析BDS在中国西部地区的PPP定位精度, 研究表明, GLONASS与Galileo的PPP解收敛速度相当, BDS-3经过2 h收敛即可达到5 cm定位精度。文献[3]评估了模糊度固定 (AR) 算法对PPP定位精度的

提升效果, 研究表明, 与浮点解相比, 宽巷-窄巷模糊度固定 (WL-NL AR) 方法和基于非组合原始观测值的模糊度固定 (N1-N2 AR) 方法的解在E方向提升最大, “GPS+BDS+GLONASS+Galileo”组合系统的单天解误差平面方向优于5 mm, 垂直方向优于1 cm。文献[4]对不同模糊度固定产品开展PPP AR固定性能研究, 结果表明, 置信度为95%时, 不同模糊度固定产品定位精度相当, 最大差异仅为6 mm。解算时间为1 h时, 与浮点解相比, 固定解定位精度提升最显著。解算2 h, E方向和N方向定位精度优于1 cm, U方向定位精度优于3.5 cm。文献[5]针对全球均匀分布的100多座IGS站静态观测数据, 估算了GPS/Galileo/BDS的全频率小数相位偏差, 并开展静态PPP实验。研究表明, 估算的小数相位偏差产品满足PPP-AR要求, GPS L1/L2频率组合在E、N、U方向7 d静态解的平均定位精度分别为0.18 cm、0.21 cm、0.60 cm。文献[6]对PPP技术在无基准或多基准测区的应用开展研究, 结果表明, 基于国外商业PPP解算软件GrafNav解算大量国际GNSS服务站观测数据, 其PPP单天解平面平均误差优于1 cm, 高程平均误差优于10 cm。观测时长超过4 h, 解算误差达到稳定值。文献[7]评估了BDS PPP在大面积省域范围的定位性能, 研究表明, BDS-3可实现地震过程中连续运行参考站 (CORS) 毫米级位移监测。随着组网的日益完善, BDS已具备其他GNSS系统无法比拟的独特优势: BDS-3地球静止轨道卫星的B2b增强信号支持播发精密轨道、钟差改正参数等载波相位差分增强信息, 可为全球GNSS用户提供实时PPP服务^[8]; BDS-3区域增强服务可通过星基增强、PPP和短报文通信等功能, 显著提升北斗系统的定位精度、可用性和可靠性^[9]。目前, 在单GNSS与多GNSS中的PPP定位精度、模糊度固定及收敛时间等领域, 已取得许多研究成果。以省级CORS网为主的高等级控制测量中, 控制点之间的相对定位精度较为关键。但已有的相对定位常采用多观测站多时段联测模式, 需投入大量的观

测时间和仪器设备,工作效率不高。

为充分发挥PPP定位优势,提高定位效率,基于BDS-3 PPP定位结果及其方差-协方差矩阵,构建虚拟基线向量,结合布尔莎模型实现ITRF2020框架瞬时历元坐标与CGCS2000坐标之间的转换,分析BDS-3 PPP建立高等级测绘基准的可行性,并以甘肃省GNSS大地控制网为例进行验证,为用户在测绘基准无法覆盖地区快速建立高等级控制网提供参考。

1 数学模型

1.1 精密单点定位

测站 r 到卫星 s 的双频GNSS数据所对应的第 i ($i=1,2$) 频率的伪距 $P_{r,i}^s$ 和载波相位原始观测值 $L_{r,i}^s$ [10-12]分别为

$$\begin{cases} P_{r,i}^s = \rho_r^s + c(\delta_{t_r} - \delta_{t_s}) + \frac{A}{f_i^2} + d_{r,i} - d_i^s \\ L_{r,i}^s = \rho_r^s + c(\delta_{t_r} - \delta_{t_s}) - \frac{A}{f_i^2} + \lambda_i N_{r,i}^s + b_{r,i} - b_i^s \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ρ_r^s 为站星几何距离; c 为真空中光速; δ_{t_r} 和 δ_{t_s} 分别为接收机钟差和卫星钟差; A/f_i^2 为一阶电离层延迟; f_i 为 $L_{r,i}^s$ 的频率; λ_i 为波长; $N_{r,i}^s$ 为卫星 s 的整周模糊度; $d_{r,i}$ 和 d_i^s 分别为第 i 频率上由硬件延迟引起的接收机端伪距偏差和卫星端伪距偏差; $b_{r,i}$ 和 b_i^s 分别为第 i 频率上由硬件延迟引起的接收机端相位偏差和卫星端相位偏差。

式(1)忽略高阶电离层延迟、对流层延迟、多路径效应以及观测噪声等。其中, ρ_r^s 可表示为

$$\rho_r^s = X^s(t_s) - X_r(t_r), \quad (2)$$

式中: t_s 和 t_r 分别为信号发射时刻和信号接收时刻; $X^s(t_s)$ 和 $X_r(t_r)$ 分别为信号发射时刻的卫星坐标向量和信号接收时刻的接收机坐标向量。

GNSS多频接收机常采用无电离层组合观测值法来消除一阶电离层延迟的影响 [13-14], 即

$$\begin{cases} P_{r,IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,2}^s \\ = \rho_r^s + c(\delta_{t_r} - \delta_{t_s}) + d_{r,0} - d_0^s \\ L_{r,IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{r,2}^s \\ = \rho_r^s + c(\delta_{t_r} - \delta_{t_s}) + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_{r,1}^s - \\ \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_{r,2}^s + b_{r,0} - b_0^s \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $P_{r,IF}^s$ 和 $L_{r,IF}^s$ 分别为无电离层组合的伪距观测

值和载波相位观测值; $d_{r,0}$ 和 d_0^s 分别为接收机端伪距偏差和卫星端伪距偏差; $b_{r,0}$ 和 b_0^s 分别为接收机端相位偏差和卫星端相位偏差。

1.2 基于PPP定位结果构建基线向量

布尔莎模型包括3个平移参数、3个旋转参数和1个尺度参数,可实现两套不同基准空间直角坐标系之间的转换。采用布尔莎模型,将某点PPP定位结果ITRF2000框架瞬时历元的三维坐标转换为CGCS2000坐标,其转换关系为

$$(X \ Y \ Z)_{CGC}^T = (X_0 \ Y_0 \ Z_0)^T + (1+k) \times \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} (X \ Y \ Z)_{ITR}^T, \quad (4)$$

式中: X_0 、 Y_0 、 Z_0 为平移参数; k 为尺度参数; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为空间直角坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的旋转角; $(X \ Y \ Z)_{CGC}^T$ 为CGCS2000坐标向量; $(X \ Y \ Z)_{ITR}^T$ 为ITRF2020框架瞬时历元坐标向量。

根据最小二乘原理,采用3对以上不同坐标基准的公共点来计算 X_0 、 Y_0 、 Z_0 、 k 、 ε_x 、 ε_y 、 ε_z ,并据此实现其他未知点的坐标转换。根据PPP静态定位结果协方差矩阵,利用误差传播定律推算得到某点转换后的CGCS2000协方差矩阵,即

$$\begin{pmatrix} D_X & D_{XY} & D_{XZ} \\ D_{YX} & D_Y & D_{YZ} \\ D_{ZX} & D_{ZY} & D_Z \end{pmatrix}_{CGC} = (1+k)^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 1 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} D_X & D_{XY} & D_{XZ} \\ D_{YX} & D_Y & D_{YZ} \\ D_{ZX} & D_{ZY} & D_Z \end{pmatrix}_{ITR}^T, \quad (5)$$

式中: D_X 、 D_Y 、 D_Z 分别为 X 、 Y 、 Z 坐标的方差; D_{XY} 、 D_{XZ} 、 D_{YZ} 分别为 X 与 Y 坐标的协方差、 X 与 Z 坐标的协方差、 Y 与 Z 坐标的协方差; D_{YX} 、 D_{ZX} 、 D_{ZY} 分别为 Y 与 X 坐标的协方差、 Z 与 X 坐标的协方差、 Z 与 Y 坐标的协方差, $D_{XY}=D_{YX}$, $D_{XZ}=D_{ZX}$, $D_{YZ}=D_{ZY}$ 。

ITRF2020框架瞬时历元下PPP三维坐标协方差矩阵的各元素可从静态定位解算文件中获取。根据转换后的CGCS2000坐标及其协方差矩阵,构建测区内所有控制点之间的虚拟基线向量及其方差信息。基准站 i 和基准站 j 的三维基线向量 [15]构建方式为

$$\begin{cases} \Delta X_{ij} = X_j - X_i \\ \Delta Y_{ij} = Y_j - Y_i \\ \Delta Z_{ij} = Z_j - Z_i \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $(\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij})$ 为基准站 i 至基准站 j 的空间

直角坐标向量; (X_i, Y_i, Z_i) 、 (X_j, Y_j, Z_j) 分别为基准站 i 和基准站 j 的三维空间直角坐标。

根据误差传播定律, 基线向量的协方差矩阵可由两个站点的坐标协方差矩阵相加得到, 则基线 ij 的协方差矩阵为

$$D_{XYZ}^i + D_{XYZ}^j = \begin{pmatrix} D_{\Delta X_{ij}} & D_{\Delta Y_{ij}} & D_{\Delta Z_{ij}} \\ D_{\Delta Y_{ij}} & D_{\Delta X_{ij}} & D_{\Delta Z_{ij}} \\ D_{\Delta Z_{ij}} & D_{\Delta Y_{ij}} & D_{\Delta X_{ij}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中: ΔXY_{ij} 、 ΔXZ_{ij} 、 ΔYX_{ij} 、 ΔYZ_{ij} 、 ΔZX_{ij} 、 ΔZY_{ij} 为基线 ij 在 XY 、 XZ 、 YX 、 YZ 、 ZX 、 ZY 方向坐标差; $(D_{\Delta X_{ij}}, D_{\Delta Y_{ij}}, D_{\Delta Z_{ij}}, D_{\Delta X_{ij}}, D_{\Delta Y_{ij}}, D_{\Delta Z_{ij}})$ 为对应的协方差矩阵; $(D_{\Delta X_{ij}}, D_{\Delta Y_{ij}}, D_{\Delta Z_{ij}})$ 为基线 ij 的 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 方差矩阵; D_{XYZ}^i 为基准站 i 在三维空间直角坐标系下 X 、 Y 、 Z 坐标分量的协方差矩阵; D_{XYZ}^j 为基准站 j 在三维空间直角坐标系下 X 、 Y 、 Z 坐标分量的协方差矩阵。

根据多个基准站 PPP 坐标协方差矩阵可构建虚拟基线向量的协方差信息, 再结合基线向量长度即可得到基线向量相对中误差。

2 BDS-3 PPP 数据处理及坐标转换

2.1 BDS-3 PPP 静态定位

采用开源软件 Pride PPP-AR, 对 2022 年甘肃省全域均匀分布的 60 座基准站连续 3 d (年积日为 074~076) 的观测数据进行静态解算。基准站接收机型号为中海达 VNet8U-I, 天线型号为 TRM59900.00 SCIS, 天线高为标石面到天线座底部的直高。为完整评估 BDS-3 PPP 从初始快速收敛到稳定的全程性能, 以匹配不同工程应用场景的精度需求, 观测时长取 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h、48 h、72 h。数据处理策略参考文献[16]~文献[18], 具体见表 1。

表 1 数据处理策略
Tab.1 data processing strategy

类别	参数	处理策略
观测值	卫星系统	BDS-3
	截止高度角	取 7°
	采样间隔	取 30 s
	差分码偏差改正	WUM 精密 OSB 产品
	地球自转参数	WUM 精密 ERP 产品
	轨道与钟差	WUM 精密轨道钟差产品
	卫星端/接收机端 PCO/PCV	igs14.atx
改正模型	对流层	“模型改正+随机游走”估计
	电离层	无电离层组合消去一阶项, 忽略高阶项的影响
	相对论效应、固体潮、海潮、极潮、相位缠绕等	软件自带模型
参数估计	位置	随机游走
	接收机钟差	白噪声
	模糊度	常数估计

当 PPP 定位结果中连续 20 个历元在 E、N、U 方向的定位偏差均小于 0.1 m 时, 认为 PPP 定位解达到收敛状态^[19]。将收敛的 BDS-3 PPP 静态定位结果与采用静态联测数据处理方法解算的甘肃省北斗卫星导航定位基准站 CGCS2000 坐标 (视为真值) 作差, 得到 BDS-3 PPP 在 E、N 和 U 方向的静态定位偏差, 见表 2。

由表 2 可知, BDS-3 PPP 在 E 方向的静态定位偏差整体上小于 N、U 方向, E、N 方向静态定位偏差的平均值在观测 1 h 后小于 5 mm, U 方向静态定位偏差的平均值在观测 2 h 后小于 7 mm。观测时长为 1 h 时, 个别站点的双频观测量较少, 导致定位结果失真, E、N、U 方向静态定位偏差的最

大值分别为 56.7 mm、18.4 mm、110.2 mm, 该观测时长内 PPP 定位结果不收敛。观测时长为 2 h 时, E、N、U 方向静态定位偏差的最大值分别为 9.9 mm、14.5 mm、47.0 mm, 该观测时长内, 定位结果虽已收敛, 但个别站点仍不满足国家 GNSS 大地控制网精度要求。观测时长为 4 h 时, E、N、U 方向静态定位偏差的平均值分别为 1.8 mm、4.6 mm、3.9 mm, 最大值均小于 15 mm, 所有站点定位结果均小于 0.03 m, 满足国家 GNSS 大地控制网精度要求^[20]。观测时长由 6 h 增至 72 h, E、N 方向静态定位偏差的平均值和最大值整体上均呈递减趋势, 但 U 方向静态定位偏差的平均值和最大值波动较大, 有多处定位精度发生衰减。

表2 BDS-3 PPP静态定位偏差
Tab.2 BDS-3 PPP static positioning deviation

观测 时长/h	最大值/mm			平均值/mm		
	E方向	N方向	U方向	E方向	N方向	U方向
1	56.7	18.4	110.2	4.2	4.0	15.9
2	9.9	14.5	47.0	2.0	4.9	7.0
4	11.9	11.8	13.1	1.8	4.6	3.9
6	7.6	10.0	9.9	1.9	4.3	3.3
8	7.0	7.0	9.8	1.7	3.2	3.3
12	4.8	6.0	8.6	1.4	3.0	4.0
24	8.6	8.7	7.6	1.4	2.9	3.4
48	1.8	3.8	8.2	1.0	2.6	5.6
72	2.4	3.9	6.4	0.9	2.9	4.8

2.2 CGCS2000坐标转换

选取空间均匀分布、三维位置精度优于1 mm

表3 CGCS2000坐标转换精度

Tab.3 CGCS2000 coordinate transformation accuracy

方案	观测时长/h	待转点误差平均值/mm			待转点误差最大值/mm		
		E方向	N方向	U方向	E方向	N方向	U方向
1	4	4.0	2.0	5.5	7.8	3.7	15.2
	8	4.1	1.9	4.1	7.9	4.7	12.5
	12	4.1	2.1	3.3	8.1	4.6	8.2
	24	4.1	2.0	3.3	8.0	4.9	11.0
	72	4.0	2.2	3.2	7.7	5.6	6.6
2	4	4.5	2.5	6.6	8.7	6.2	18.9
	8	4.4	2.1	7.3	8.3	4.8	16.4
	12	4.4	2.4	6.9	8.5	5	9.4
	24	4.2	2.0	3.7	8	5.4	11.3
	72	4.0	2.2	3.2	7.7	5.6	6.6
3	4	4.0	2.0	5.5	7.8	3.7	15.2
	8	4.5	3.1	5.4	8.8	7.2	16.2
	12	4.6	3.2	4.4	9.0	7.5	10.3
	24	4.7	3.4	5.4	8.9	7.9	13.4
	72	4.5	3.0	4.4	8.6	7.9	8.8

由表3可知,3种方案在U方向的转换误差整体上大于E方向和N方向。不同观测时长下,方案1待转点各方向误差平均值均小于或等于方案2、方案3。方案2待转点各方向误差平均值整体上小于方案3。观测时长为4 h时,方案2待转点各方向误差平均值大于方案3。观测时长为8 h和12 h时,方案2在U方向待转点误差平均值大于方案3。通过以上分析可知,公共点与待转点观测时长相同,转换精度最优。

基于观测时长反比加权,计算N、E、U方向的单位权中误差,并作为精度评定指标,即

的公共点,利用式(4)将上述基准站ITRF2020框架瞬时历元坐标转换至CGCS2000坐标。

公共点CGCS2000坐标由2022年全国卫星导航定位基准站网平差项目提供,具有较高的三维精度及现势性。采用3种方案检验布尔莎模型七参数转换精度:①将公共点观测时长为4 h、8 h、12 h、24 h、72 h的定位结果分别与对应观测时长的CGCS2000坐标建立转换关系,对待转点定位结果分别进行转换;②将公共点观测时长为72 h的定位结果与CGCS2000坐标建立转换关系,对待转点不同观测时长的定位结果进行统一转换;③将公共点观测时长为4 h的定位结果与CGCS2000坐标建立转换关系,对待转点不同观测时长的定位结果进行统一转换。CGCS2000坐标转换精度见表3。

$$\begin{cases} \sigma_N = \sum_{i=1}^5 p_i \sigma_{N_i} \\ \sigma_E = \sum_{i=1}^5 p_i \sigma_{E_i} \\ \sigma_U = \sum_{i=1}^5 p_i \sigma_{U_i} \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_N 、 σ_E 、 σ_U 为不同观测时长下,N、E、U方向的中误差; p_i 为对应站心坐标系下坐标分量的权重; i 为对应的观测时长序号。观测时长为4 h、8 h、12 h、24 h、72 h所对应的权重分别为0.03、0.07、0.10、0.20、0.60。

基于观测时长反比加权的坐标转换精度见表4。坐标转换精度由高到低排序依次为方案1、方案2、方案3。与方案2、方案3相比,方案1转换精度在E、N和U方向至少分别提升2.4%、4.5%和17.1%。

表4 基于观测时长反比加权的坐标转换精度
Tab.4 coordinate transformation accuracy based on inverse weighting of observation duration

方案	转换精度/mm		
	E方向	N方向	U方向
1	4.0	2.1	3.4
2	4.1	2.2	4.1
3	4.5	3.1	4.7

3 基线向量网观测模式对比分析

甘肃省地理坐标为北纬 $32^{\circ}11'N\sim 42^{\circ}57'N$,东经 $92^{\circ}13'E\sim 108^{\circ}46'E$,东西跨度1 480 km,南北跨度1 132 km,西北-东南方向最窄处仅有76 km。地貌复杂多样,地势自西南向东北倾斜。地形呈狭长状,东西长1 655 km,南北宽530 km,面积为45.4万 km^2 。可覆盖全省的北斗卫星导航定位基准站网和高等级GNSS大地控制网,共同构成甘肃省

现代测绘基准体系大地坐标框架。其中,甘肃省北斗卫星导航定位基准站网密度为每万平方千米2.82座,平均站间距为59.3 km,在偏远的戈壁地区最长站间距为180.6 km,最大站高差为2 633.3 m; C级及以上GNSS大地控制网密度为每平方千米0.001点。在海拔高差大、基准站及大地控制点间距过大,且站(点)密度偏低的情况下,若采用相对定位解算模式建立高等级控制网,难度较大。此外,地势起伏较大,容易引起对流层剧烈变化,导致U方向定位精度降低,无法保证高等级控制点解算精度。

为了验证BDS-3 PPP建立CGCS2000高等级控制网的可行性,基于BDS-3 PPP定位结果及其方差-协方差矩阵,构建虚拟基线向量,并与Trimble Business Center (TBC)相对定位结果进行对比分析。其中,BDS-3 PPP观测时长为0.5 h、1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h,分别采用式(5)、式(7)求解基线向量误差和CGCS2000点位误差,TBC相对定位仅解算观测时长为24 h的数据。基线解算和网平差常用三维空间直角坐标来描述,BDS-3 PPP解算模式下基线向量及CGCS2000点位误差见表5。

表5 BDS-3 PPP解算模式下基线向量及CGCS2000点位误差
Tab.5 baseline vectors and CGCS2000 positioning errors in BDS-3 PPP solution mode

观测时长/h	比较项	基线向量各分量误差/mm			基线向量相对中误差	CGCS2000点位误差/mm		
		d_x	d_y	d_z		X	Y	Z
0.5	平均值	2.0	5.5	3.7	$4.699 2 \times 10^{-8}$	1.4	3.8	2.6
	最大值	4.3	9.8	7.1	$2.713 4 \times 10^{-6}$	3.7	7.0	5.3
1	平均值	1.2	3.0	2.2	$1.653 9 \times 10^{-8}$	0.8	2.0	1.5
	最大值	2.2	6.8	4.6	$3.283 8 \times 10^{-7}$	1.6	4.9	3.5
2	平均值	0.8	2.1	1.4	$1.041 3 \times 10^{-8}$	0.5	1.4	1.0
	最大值	1.3	3.6	2.4	$1.382 8 \times 10^{-7}$	1.0	2.7	1.8
4	平均值	0.5	1.4	1.1	$7.250 8 \times 10^{-9}$	0.3	1.0	0.8
	最大值	0.8	2.4	1.8	$9.122 8 \times 10^{-8}$	0.6	1.9	1.4
8	平均值	0.4	1.0	0.7	$5.034 4 \times 10^{-9}$	0.3	0.7	0.5
	最大值	0.6	1.6	1.2	$6.450 5 \times 10^{-8}$	0.4	1.3	0.9
12	平均值	0.3	0.8	0.6	$4.062 6 \times 10^{-9}$	0.2	0.6	0.4
	最大值	0.5	1.3	1.0	$6.450 5 \times 10^{-8}$	0.3	1.0	0.8
24	平均值	0.2	0.6	0.4	$2.917 1 \times 10^{-9}$	0.1	0.4	0.3
	最大值	0.3	1.0	0.7	$4.184 7 \times 10^{-8}$	0.2	0.7	0.5

由表5可知,BDS-3 PPP解算模式下,观测时长为0.5 h,基线向量最大相对中误差为 $2.713 4 \times 10^{-6}$,基线向量各分量误差 d_x 、 d_y 、 d_z 的最大值分别为4.3 mm、9.8 mm、7.1 mm,基线向量误差最大值为12.8 mm,CGCS2000点位误差X、Y、Z的最大值分别为3.7 mm、7.0 mm、5.3 mm,CGCS2000点位误差的最大值为9.7 mm,基线相对中误差的最

大值小于文献[21]中规定的D级GNSS控制网基线相对中误差(10^{-5})。观测时长为1 h,基线向量最大相对中误差为 $3.283 8 \times 10^{-7}$,基线向量各分量误差 d_x 、 d_y 、 d_z 的最大值分别为2.2 mm、6.8 mm、4.6 mm,基线向量误差最大值为8.5 mm,CGCS2000点位误差X、Y、Z的最大值分别为1.6 mm、4.9 mm、3.5 mm,CGCS2000点位误差的最大值为6.2 mm,基线向量

相对中误差的最大值小于文献[21]中规定的 C 级 GNSS 控制网基线相对中误差 (10^{-6})。BDS-3 PPP 定位结合布尔莎模型得到的虚拟基线向量和 CGCS2000 点位误差的平均值、最大值均随观测时间的延长而逐渐减小。观测时长为 4 h 时,基线向量各分量误差的最大值均小于 3 mm,CGCS2000 点位误差 X、Y、Z 的最大值均小于 2 mm,基线向量相对中误差的最大值为 $9.122\ 8 \times 10^{-8}$,各项指标均优于相对定位模式下观测 24 h 的解算结果。

相对定位解算模式下基线向量及 CGCS2000 点位误差见表 6。相对定位解算模式下,基线向量最大相对中误差为 $1.249\ 4 \times 10^{-7}$,其分量误差 d_x 、 d_y 、 d_z 的最大值分别为 2.2 mm、3.8 mm 和 2.7 mm,基

线向量误差的最大值为 5.2 mm;无约束平差 CGCS2000 点位误差 X、Y、Z 的最大值分别达到 0.3 mm、0.7 mm、0.5 mm,约束平差 CGCS2000 点位误差 X、Y、Z 的最大值分别为 3.1 mm、6.9 mm、4.8 mm,无约束平差、约束平差 CGCS2000 点位误差的最大值分别为 0.9 mm、9.0 mm。相对定位解算模式的基线向量相对中误差大于 BDS-3 PPP 观测 4 h 的对应值,其基线向量各分量误差的最大值均大于 BDS-3 PPP 观测 2 h 的最大值,约束平差 CGCS2000 点位误差 X、Y、Z 的平均值与最大值均大于 BDS-3 PPP 观测 1 h 的最大值。这说明 BDS-3 PPP 仅需观测 4 h,即可达到相对定位模式观测 24 h 的解算精度。

表 6 相对定位解算模式下基线向量及 CGCS2000 点位误差
Tab.6 baseline vectors and CGCS2000 positioning errors in relative positioning solution mode

网平差分项	比较项	基线向量各分量误差/mm			基线向量相对中误差	CGCS2000 点位误差/mm		
		d_x	d_y	d_z		X	Y	Z
无约束平差	平均值	1.2	2.3	1.7	$1.027\ 9 \times 10^{-8}$	0.3	0.6	0.5
	最大值	2.2	3.8	2.7	$1.249\ 4 \times 10^{-7}$	0.3	0.7	0.5
约束平差	平均值	-	-	-	-	2.6	5.3	3.9
	最大值	-	-	-	-	3.1	6.9	4.8

注:“-”表示该项数值与无约束平差对应项数值一致。

4 结论

基于 BDS-3 PPP 定位结果及其方差-协方差矩阵构建虚拟基线向量,结合布尔莎模型,实现 ITRF2020 框架瞬时历元坐标与 CGCS2000 坐标之间的转换。与相对定位模式下基线向量网解算结果对比,验证采用 BDS-3 PPP 技术建立高精度 GNSS 控制网的可行性,得出如下结论。

(1) BDS-3 PPP 在甘肃省能满足高精度控制网需求。观测时长为 4 h, E、N、U 方向的定位精度分别优于 11.9 mm、11.8 mm、13.1 mm,满足国家 GNSS 大地控制网精度要求。观测时长延长至 72 h, E、N、U 方向的定位精度可分别提升至 3 mm、4 mm、7 mm。在 U 方向,当观测时长超过 12 h,出现约 2 mm 的随机波动,稳定性略低于 E、N 方向。

(2) 布尔莎模型的坐标转换精度与观测时长显著相关。采用时间一致的公共点进行转换时, E、N、U 方向的转换精度分别为 4.0 mm、2.1 mm、3.4 mm,转换精度明显优于采用时间不一致公共点所得结果。时间一致性是影响坐标转换可靠性的关键指标。

(3) 基于 PPP 构建的虚拟基线向量网在观测 0.5 h 后即可达到 D 级 GNSS 大地控制网精度要求;观测 1 h 后可达到 C 级 GNSS 大地控制网精度要求;观测 4 h 后,虚拟基线向量误差与 CGCS2000 点位

误差均优于相对定位模式下基线向量网观测 24 h 的解算结果。

参考文献(References):

- [1] 蒋光伟,程传录,陈雄川,等.基于 BDS-3 的定位性能与区域参考框架维持分析[J].地球物理学进展,2021,36(3):887-893.
JIANG Guangwei, CHENG Chuanlu, CHEN Xiongchuan, et al. Positioning performance analysis and maintenance of regional reference frame based on BDS-3[J].Progress in Geophysics,2021,36(3):887-893.
- [2] 蒋光伟.基于 GNSS 的区域参考框架维持方法研究[D].西安:长安大学,2022:63-74.
- [3] 上官灏院,叶世榕,夏朋飞,等.非组合 PPP-AR 方法研究[J].导航定位学报,2024,12(6):1-9.
SHANGGUAN Haoyuan, YE Shirong, XIA Pengfei, et al. Investigation of PPP-AR algorithm based on uncombined model[J]. Journal of Navigation and Positioning,2024,12(6):1-9.
- [4] 宋开放,乔书波,肖国锐,等.基于不同模糊度固定产品的 PPP-AR 定位性能评估[J].大地测量与地球动力学,2024,44(10):997-1002.
SONG Kaifang, QIAO Shubo, XIAO Guorui, et al. Performance assessment of precise point positioning with ambiguity resolution using different products[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2024,44(10): 997-1002.
- [5] 董昊坤,张启元.GPS/Galileo/BDS 三系统全频率 PPP-AR 性能分析[J].全球定位系统,2023,48(5):38-45,70.
DONG Haoshen, ZHANG Qiyuan. Performance analysis of GPS/Galileo/BDS three systems and all-frequency PPP-AR[J]. GNSS

- World of China,2023,48(5):38-45,70.
- [6] 冯江海,刘少英,郝恒强,等.PPP 技术在无基准或多基准测区应用研究[J].全球定位系统,2019,44(4):107-112.
FENG Jianghai,LIU Shaoying,HAO Hengqiang,et al.Application of PPP technology in non-datum or multi-datum survey area[J].GNSS World of China,2019,44(4):107-112.
- [7] 赵亮,杨南南,徐爱功.甘肃省 BDS PPP 精度分析及在地震位移监测中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):138-145.
ZHAO Liang,YANG Nannan,XU Aigong.The accuracy analysis of BDS PPP in Gansu Province and application in monitoring earthquake displacement[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(2):138-145.
- [8] 史俊波,董新莹,欧阳晨皓,等.基于北斗三号 PPP 服务的快速静态和低动态定位性能分析[J].大地测量与地球动力学,2023,43(10):997-1002.
SHI Junbo,DONG Xinying,OUYANG Chenhao,et al.Assessment of fast static and low-speed kinematic positioning based on BDS-3 PPP service[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2023,43(10):997-1002.
- [9] 王翔,聂志喜,王振杰,等.北斗三号 PPP-B2b 服务的海洋实时精密单点定位性能评估[J].导航定位学报,2023,11(4):18-23.
WANG Xiang,NIE Zhixi,WANG Zhenjie,et al.Initial assessment of offshore real-time precise point positioning based on BDS-3 PPP-B2b service[J].Journal of Navigation and Positioning,2023,11(4):18-23.
- [10] LI X P, PAN L. Precise point positioning with almost fully deployed BDS-3,BDS-2,GPS,GLONASS,Galileo and QZSS using precise products from different analysis centers[J]. Remote Sensing,2021,13(19):3905.
- [11] 阴冠澎,徐爱功,高猛,等.BDS-3 多频精密单点定位模型及性能分析[J].测绘科学,2023,48(2):36-44.
YIN Guanpeng,XU Aigong,GAO Meng,et al.Research on model and performance of BDS-3 multi-frequency precise point positioning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(2): 36-44.
- [12] SU K, JIN S G, JIAO G Q. Assessment of multi-frequency global navigation satellite system precise point positioning models using GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo and QZSS[J]. Measurement Science and Technology,2020,31(6):064008.
- [13] ZHU S L, YUE D J, HE L N, et al. Modeling and performance assessment of BDS-2/BDS-3 triple-frequency ionosphere-free and uncombined precise point positioning[J]. Measurement, 2021, 180: 109564.
- [14] 徐宗秋.基于多导航卫星系统的精密单点定位模型与方法研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013:22-27.
- [15] 吴磊,李博峰,王苗苗.采用 PPP 技术建立高精度 GNSS 控制网的方法[J].导航定位学报,2018,6(4):112-118.
WU Lei, LI Bofeng, WANG Miaomiao. Method of establishing high-precise GNSS control network using PPP technology[J]. Journal of Navigation and Positioning,2018,6(4):112-118.
- [16] 赵龙,郭将,栗广才,等.北斗/GNSS 机载动态 PPP 性能分析[J].全球定位系统,2022,47(5):57-64.
ZHAO Long, GUO Jiang, LI Guangcai, et al. Performance analysis of BDS/GNSS airborne kinematic PPP[J]. GNSS World of China, 2022,47(5):57-64.
- [17] 董建权,郭将,栗广才,等.不同对流层模型对机载精密单点定位的影响分析[J].全球定位系统,2022,47(6):9-17.
DONG Jianquan, GUO Jiang, LI Guangcai, et al. Influence analysis of different tropospheric models on airborne precise point positioning[J]. GNSS World of China,2022,47(6):9-17,37.
- [18] GENG J H, CHEN X Y, PAN Y X, et al. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2019,23(4):91.
- [19] 祝会忠,杨添宇,赵洪涛,等.GNSS 多系统精密单点定位方法与性能分析[J].测绘科学,2020,45(12):1-7,21.
ZHU Huizhong, YANG Tianyu, ZHAO Hongtao, et al. GNSS multi-system precise point positioning method and performance analysis [J]. Science of Surveying and Mapping,2020,45(12):1-7,21.
- [20] 国家测绘地理信息局.大地测量控制点坐标转换技术规范:CH/T 2014—2016[S].北京:测绘出版社,2017:3-7.
- [21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.全球导航卫星系统(GNSS)测量规范:GB/T 18314—2024[S].北京:中国标准出版社,2024:1-19.