



测绘科学
Science of Surveying and Mapping
ISSN 1009-2307, CN 11-4415/P

《测绘科学》网络首发论文

题目: BDS 不同卫星选择对相对定位精度的影响研究
作者: 曹多明, 成英燕, 常春涛, 王周杰, 卢浩
收稿日期: 2020-12-17
网络首发日期: 2021-12-01
引用格式: 曹多明, 成英燕, 常春涛, 王周杰, 卢浩. BDS 不同卫星选择对相对定位精度的影响研究[J/OL]. 测绘科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20211130.1222.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

BDS 不同卫星选择对相对定位精度的影响研究

曹多明^{1,2,3}, 成英燕², 常春涛^{2,3}, 王周杰^{1,2,3}, 卢浩^{1,2,3}

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国测绘科学研究院, 北京 100036;

3. 北京房山人卫激光国家野外科学观测研究站, 北京 102488)

*通信作者 成英燕 研究员 E-mail: yycheng@casm.ac.cn

摘要 针对第三代北斗卫星导航系统(BDS-3)全球成功组网完成后, 原先第二代北斗卫星导航系统(BDS-2)部分广播星历轨道精度较差的卫星会影响整体相对定位解算精度的问题, 提出了在使用 BDS-2/BDS-3 卫星进行相对定位过程中, 需要顾及某些长基线的存在, 并且对参与解算的卫星进行慎重选择。本文采用亚太及周边区域内部分多模 GNSS 实验站(MGEX)发布的观测数据, 顾及卫星的广播星历轨道精度及卫星空间位置精度因子(PDOP)两种因素, 制定不同的卫星选择方案以研究其对相对定位精度的影响情况。研究表明, 各方案中当剔除 C01~C05 卫星时基线解算精度和站点定位精度都能达到最高, 其中各方向基线解算精度在 5 mm 以内, 站点定位精度可达到 15 mm。

关键词 BDS; PDOP; 相对定位; 精度评定; 卫星选择

中图分类号 P228 文献标志码 A

Research on the Influence of Different BDS Satellite Selection on Relative Positioning Accuracy

CAO Duoming^{1,2,3}, CHENG Yingyan², CHANG Chuntao^{2,3}, WANG Zhoujie^{1,2,3}, LU Hao^{1,2,3}

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China; 3. Beijing Fangshan Satellite Laser Ranging National Observation and Research Station, Beijing 102488, China)

Abstract For the problem of after the third-generation BeiDou satellite navigation system (BDS-3) has successfully completed the global network, some satellites with poor orbital accuracy of the broadcast ephemeris of the second-generation BeiDou satellite navigation system (BDS-2) will affect the overall relative positioning solution accuracy, puts forward that in the process of using BDS-2/BDS-3 satellites for relative positioning, it is necessary to take into account the existence of certain long baselines and carefully select the satellites participating in the calculation. This paper adopts the observation data of some multi-GNSS experiment (MGEX) in the Asia Pacific and surrounding regions, taking into account two factors of the satellite broadcast ephemeris orbit accuracy and the satellite position dilution of precision (PDOP), formulates different satellite selection schemes to study their influence on the relative positioning accuracy. Research shows that the accuracy of baseline resolution and site positioning accuracy can reach the highest in each scheme when C01~C05 satellites are eliminated. The baseline resolution accuracy of each direction is within 5 mm, and the site positioning accuracy can reach 15 mm.

Key words BDS; PDOP; relative positioning; accuracy evaluation; satellite selection

收稿日期: 2020-12-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501405)

作者简介: 曹多明(1996—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为地球参考框架维持与 GNSS 测量数据处理。E-mail: 2513080676@qq.com

网络首发时间: 2021-12-01 08:03:25 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20211130.1222.006.html>

0 引言

我国自主研制的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是当今科技发展的重要产物, 极具战略意义^[1-3]。2020年7月31日, 第三代北斗卫星导航系统(the third generation BeiDou navigation satellite system, BDS-3)全球组网成功, 其卫星相对定位精度较第二代北斗卫星导航系统(the second generation BeiDou navigation satellite system, BDS-2)有了较大提高, 并且位于亚太地区上空的北斗卫星数量也得到明显提升, 这标志着我国北斗卫星导航系统成功取得了最后阶段的胜利^[4-6]。

自北斗卫星系统建立以来, 诸多学者对其相对定位进行了研究。其中, 文献[7]研究发现 BDS-2+BDS-3 卫星短基线定位精度高于 BDS-2 卫星; 文献[8]研究表明 BDS-2 三种轨道类型的卫星对定位精度有着不同影响; 文献[9]研究发现对流层延迟误差对 BDS-2 卫星在高程方向的定位精度影响最大; 文献[10]研究表明施加电离层时延误差模型能够显著提升 BDS-2+BDS-3 卫星相对定位精度; 文献[7]研究发现, BDS-3 短基线相对定位精度要优于 BDS-2。上述研究主要针对 BDS-2 或 BDS-2+BDS-3 卫星数据, 而单独针对 BDS-3 卫星的研究较少, 且研究角度尚未顾及当有长基线参与解算时, 北斗卫星轨道精度和卫星空间位置(position dilution of precision, PDOP)两种影响因素对相对定位解算精度的影响。鉴于此, 本文以卫星的广播星历轨道精度以及卫星空间位置精度因子作为影响因素, 采用亚太及周边区域内部分多模 GNSS 实验站(multi-GNSS experiment, MGEX)发布的观测数据, 制定了不同的卫星选择方案进行实验对比以研究其对相对定位精度的影响。

1 相对定位卫星的最优选择

到目前为止, BDS-2+BDS-3 空间在轨卫星由 30 颗中圆地球轨道(medium orbit earth satellite, MEO)、8 颗地球静止轨道卫星(geosynchronous orbit, GEO)和 8 颗倾斜地球同步轨道卫星(inclined geosynchronous orbit, IGSO)组成^[11]。在相对定位的过程中, 两测站同步观测相同的卫星, 可认为两测站所受的众多误差是相同的, 如卫星轨道误差, 可借助数据后处理进行消除或大幅度削弱, 但若涉及有相应长基线参与解算时, 某些测站之间在同步观测时所观测到的共同卫星数量减少, 导致非同步观测到的卫星轨道误差难以通过相对定位彻底进行消除。因此不同卫星轨道精度的差异, 会影响到最终的站点相对定位精度, 此外卫星所处位置精度因子也会影响到定位结果, 因此卫星的最优选择对提高相对定位精度尤为重要。

1.1 卫星轨道精度

目前对卫星轨道空间精度的研究, 主要是借助事后精密星历轨道值作为真值, 利用比较法探究广播星历轨道误差的大小及其变化规律, 从而建立相应的补偿模型, 达到提高卫星轨道精度的目的^[12-13]。对卫星轨道坐标系的径向 R 、切向 T 、法向 N 进行投影归算^[14-15], 因此需要将轨道误差 Δr 进行地心惯性坐标系 XYZ 到卫星轨道坐标系 RTN 的转换, 设 P_{XYZ} 为卫星质心在地心惯性坐标系中的坐标值, V_{XYZ} 为其速度值, 转换公式见式 (1)。

$$\mathbf{e}_T = \frac{V_{XYZ}}{|V_{XYZ}|}, \mathbf{e}_R' = \frac{P_{XYZ}}{|P_{XYZ}|} \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_N = \mathbf{e}_R' \times \mathbf{e}_T, \mathbf{e}_R = \mathbf{e}_T \times \mathbf{e}_N \quad (2)$$

式中: \mathbf{e}_R 、 \mathbf{e}_T 、 \mathbf{e}_N 为轨道坐标系 3 方向上的单位误差, 则各方向上的轨道误差分量 Δr_R 、 Δr_T 、 Δr_N 的表示见式 (3)。

$$\Delta r_R = \mathbf{e}_R \Delta r, \Delta r_T = \mathbf{e}_T \Delta r, \Delta r_N = \mathbf{e}_N \Delta r \quad (3)$$

卫星轨道整体精度可采用空间信号距离误差 (signal-in-space range error, SISRE)来表示, 是卫星轨道误差反映在视线方向上的重要评价指标,常借助平均值(MEAN)和均方根误差 (root mean square error,

RMSE)来表征精度^[16], 见式(4)。

$$SISRE^2 = (p_R \cdot \Delta r_R - c \cdot \Delta clk)^2 + p_{T,N}^2 (\Delta r_T^2 + \Delta r_N^2) \quad (4)$$

式中: c 为光速; Δclk 为卫星钟差; p 为权重系数, 且对 BDS 不同轨道卫星取值不同。一般在 GEO、IGSO 中 $p_R=0.99$, $p_{T,N}=1/126$; 在 MGO 中, $p_R=0.98$, $p_{T,N}=1/54$ 。

相关研究表明, BDS-2 部分卫星的广播星历轨道精度相对较差, 因此在使用 BDS-2/BDS-3 卫星进行相对定位过程中, 对卫星的选择十分重要。目前已有诸多学者对北斗卫星的广播星历轨道精度做出了研究^[17], 其中, 文献[18]研究指出, BDS-2 中 C01~C05 以及 C06 和 C09 卫星的广播星历轨道精度相对较低, 具体精度值如表 1 所示, 本研究基于此发布的卫星轨道精度值作为卫星选择的依据之一。

表1 BDS-2卫星轨道误差均值和均方根误差统计

Tab.1 BDS-2 Satellite Orbit Error Mean and Root Mean Square Error Statistics

卫星 PRN 号	卫星类型	MEAN/m				RMSE/m			
		R	T	N	SISRE	R	T	N	SISRE
C01	GEO	-0.066	-7.943	3.394	1.086	0.702	3.422	4.188	0.355
C02	GEO	-0.298	8.073	2.614	1.111	0.778	3.687	3.658	0.480
C03	GEO	-0.210	1.552	0.490	0.725	0.724	4.340	1.811	0.480
C04	GEO	-0.251	0.177	4.608	0.993	0.843	4.308	4.879	0.527
C05	GEO	-0.069	4.278	1.528	0.798	0.701	3.943	2.102	0.415
C06	IGSO	0.025	1.661	0.289	0.557	0.663	4.157	1.475	0.432
C07	IGSO	-0.012	1.010	0.001	0.419	0.548	1.653	1.367	0.406
C08	IGSO	0.138	1.481	0.015	0.625	0.775	1.899	1.950	0.543
C09	IGSO	0.022	1.162	0.238	0.627	0.817	4.370	1.537	0.666
C10	IGSO	-0.056	0.977	-0.012	0.445	0.575	2.041	1.504	0.435
C11	MEO	-0.044	0.661	-0.092	0.472	0.528	2.212	0.819	0.317
C12	MEO	-0.051	0.597	-0.091	0.453	0.494	2.294	0.787	0.294
C14	MEO	-0.067	0.830	0.066	0.503	0.558	2.673	0.881	0.355

1.2 卫星位置精度因子

PDOP 是评价卫星星座性能的重要指标, 反映的是站点上方可观测卫星位置几何构型对相对定位精度的影响^[19]。

假设某测站上方可观测卫星数为 n ($n \geq 4$), 则设计观测矩阵形式 A 见式(5)。

$$A = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & p \\ u_2 & v_2 & w_2 & p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n & v_n & w_n & p \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: u_i 、 v_i 、 w_i 为某卫星 S_i ($i=1,2,\dots,n$) 在地心直角坐标系 XYZ 方向上的位置坐标; p 为站点接收机钟差参数系数, 一般取 p 为 1。则位置精度因子 PDOP 的表示见式(6)、式(7)^[20]。

$$Q_{xx} = (A^T A)^{-1} \quad (6)$$

$$PDOP = (Q_{11} + Q_{22} + Q_{33})^{1/2} \quad (7)$$

2 实验数据及方案设计

2.1 实验数据

本文采用亚太及周边地区部分 MGEX 站观测数据, 并按照连续稳定性原则、均匀分布原则共选择出 21 个测站, 测站分布如图 1 中红色五角星所示, 测站间形成的基线最长约 12 500 km。其中, 绿色线条为站点上方 BDS-3 卫星轨迹, 蓝色线条为 BDS-2 卫星轨迹。顾及 BDS-3 全球组网成功的时间, 最终选取解算时间段为 2020 年 doy 245~274 共 30 d。

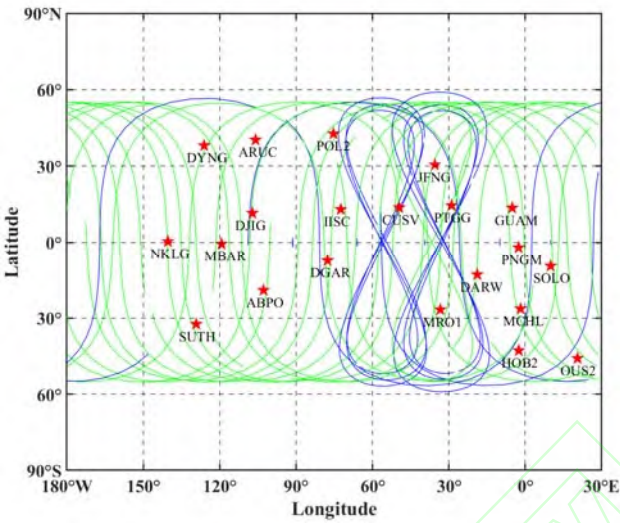


图 1 解算站点及北斗卫星轨迹分布
Fig.1 Track Distribution of Stations and Beidou Satellites

2.2 实验方案

为探究 BDS-2/BDS-3 卫星选择对相对定位精度的影响，本文制定以下 7 种实验方案，如表 2 所示。在探究 BDS-2 中轨道精度较差卫星的影响时，参考表 1 中所给卫星轨道精度，最终选择剔除 PRN 号为 C1~C5(GEO)以及 C6 和 C9(IGSO)卫星，并同时兼顾卫星所属轨道类型具体对待。

表2 各实验方案制定策略
Tab.2 Strategies for Each Experimental Plan

方案	设置策略
方案一	BDS-2+BDS-3 混合卫星进行解算
方案二	BDS-3 卫星进行解算
方案三	剔除 BDS-2 中 C1~C5 卫星，剩下和 BDS-3 卫星一起解算
方案四	剔除 BDS-2 中 C1~C5+C6+C9 卫星，剩下和 BDS-3 卫星一起解算
方案五	利用 GPS 进行解算
方案六	BDS-2 卫星进行解算
方案七	BDS-2 中剔除 C1~C5 卫星进行解算

本次实验采用 Gamit10.71/Globk5.32 软件进行解算，具体解算参数与策略设置见表 3。

表3 GAMIT软件基线解算主要参数设置
Tab.3 Main Parameter Settings of GAMIT Software Baseline Calculation

参数	处理方式
光压模型	ECOMC
观测值模式	LC-AUTCLN
处理模式	BASELINE
天顶延迟参数个数	13
固体潮模型	IERS10
海潮模型	FES2004(otl_FES2004.grid)
卫星截止高度角	10°
先验坐标所属框架	ITRF2014
其他设置	默认

3 实验结果与分析

3.1 标准化均方根误差

标准化均方根误差（normalized root mean square, NRMS），一般用来描述在单位时段内解算基线值与其加权平均值的偏离程度^[20]，是常用衡量解算质量的指标之一，NRMS 值的计算如式（8）所示。

$$NRMS = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2}{\sigma_i^2} \right) / n} \quad (8)$$

式中： n 为观测时段数； Q_i 和 Q 为基线解算值及其加权平均值； σ_i^2 为其单位权中误差。

对于基线解算而言，一个合格的解产生的 NRMS 值要小于 0.3^[21]，由图 2 知，各方案解算误差值都符合要求。其中，方案一中 BDS-2+BDS-3 卫星和方案六中 BDS-2 卫星解算出的 NRMS 值最小；方案五中 GPS 解算的 NRMS 值和方案二中 BDS-3 解算的 NRMS 值最为接近，两方案误差值在几种方案中最大，但在变化趋势上较为稳定；方案三和方案四分别为 BDS-2+BDS-3 中剔除 C1~C5 和 C1~C5+C6+C9 卫星，最终方案三解算的 NRMS 值要小于方案四，并且两方案解算的 NRMS 值都小于方案二解算的 NRMS 值，但在前五天内也出现了变化趋势的异常现象。说明相较于 BDS-3 卫星，利用 BDS-2 卫星计算得到的单时段解基线值与其加权平均值的偏差最小，处理过程中周跳得到了较好地修复，但在解算周期内，BDS-2 相关卫星数据解算得到的单天解相较于 BDS-3 相关卫星数据更具有稳定性。

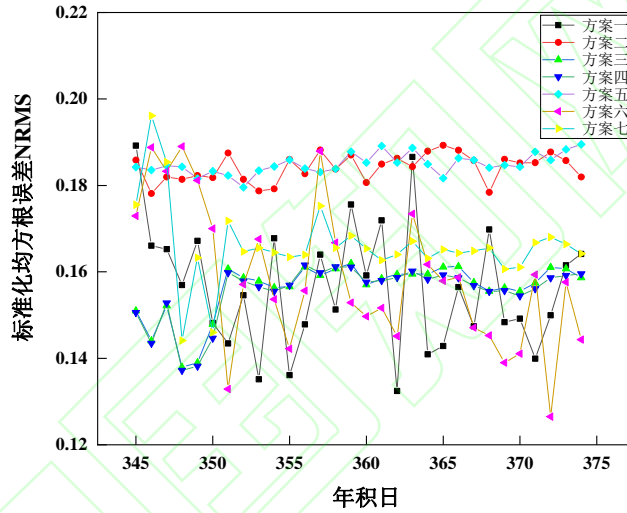


图 2 基线解算标准化均方根误差
Fig. 2 Standardized Root Mean Square Error of Baseline Solution

3.2 基线解算精度

1) 基线重复率。单时段的基线重复率可以反映出基线解算的内部精度，基线重复率分为基线绝对重复率和基线相对重复率两部分^[22]。基线相对重复率的计算公式如式 (9) 所示，基线绝对重复率的计算如式 (10) 所示。

$$R_L = \sqrt{\frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[(L_i - \bar{L})^2 / \sigma_i^2 \right]}{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma_i^2)}} \quad (9)$$

$$R_r = R_L \times \frac{\sum_{i=1}^n (1 / \sigma_i^2)}{\sum_{i=1}^n (L_i / \sigma_i^2)} \quad (10)$$

式中： R_L 为相对重复率； R_r 为绝对重复率； n 为观测时段数； L_i 为第 i 个时段的基线解； \bar{L} 为单时段基线解加权平均值； σ_i^2 为单时段基线解的中误差值。

根据图 3 可以看出，方案二中 BDS-3 解算的基线相对重复率与方案五中 GPS 解算的基线相对重

复率相当, 其值在几种实验方案中最优, 处于 3×10^{-9} 量级以内; 方案三和方案四分别为 BDS-2+BDS-3 中剔除 C1~C5 和 C1~C5+C6+C9 卫星, 最终方案三解算的基线相对重复率要优于方案四, 并且两方案解算的基线相对重复率都要优于方案一中 BDS-2+BDS-3 卫星解算精度; 方案六中 BDS-2 卫星解算的基线相对重复率最差, 方案七中随着对 BDS-2 中 C1~C5 卫星进行剔除, 其基线相对重复率得到改善。

根据图 4 可知, 基线绝对重复率和基线长度成正比关系, 其与基线相对重复率反应的基线解精度情况完全一致。说明卫星观测数据反应在解算出的基线解内部精度上, GPS 和 BDS-3 为最优, BDS-2+BDS-3 相对较差, 将 BDS-2+BDS-3 中剔除 C1~C5 和 C1~C5+C6+C9 卫星后其精度要高于 BDS-2+BDS-3, 并且对其只剔除 C1~C5 卫星要更优于同时剔除 C1~C5+C6+C9 卫星的精度结果。除此之外, 基线绝对重复率还可以由固定误差和比例误差来衡量^[23], 见式 (11)。

$$R_r = a + bl \quad (11)$$

式中: R_r 为基线绝对重复率; a 为固定误差; b 为比例误差; l 为基线长。依图 4 所示, 以一次线性关系对固定误差 a 和比例误差 b 进行拟合可以直观地反映出基线长度与基线绝对重复率的线性关系, 具体数值如表 4 所示, 验证了上述现象分析。

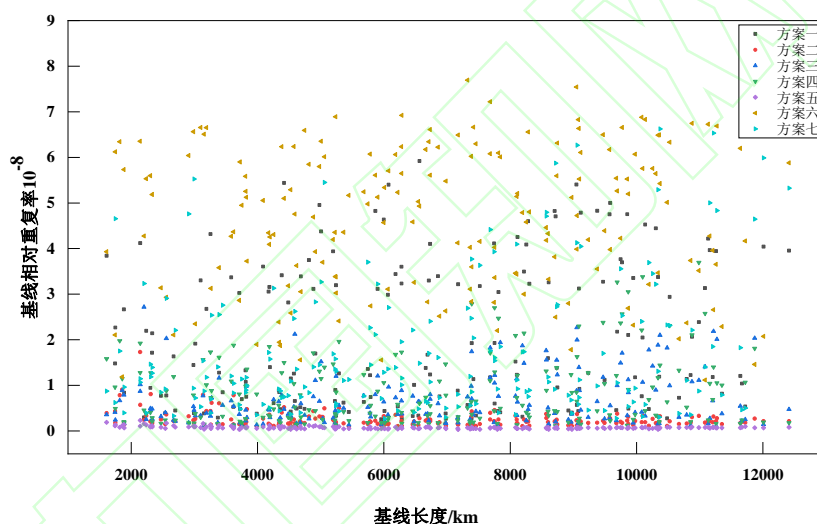


图 3 基线相对重复率
Fig.3 Relative Repetition Rate of Baseline

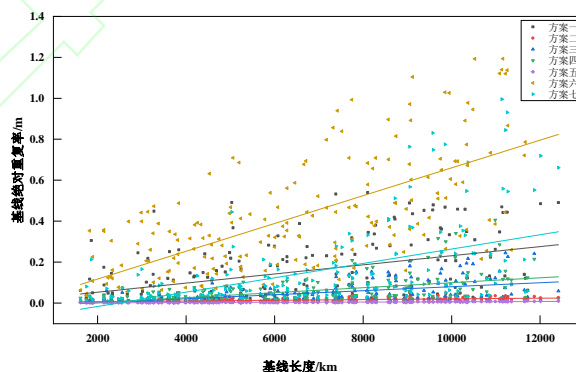


图 4 基线绝对重复率
Fig.4 Absolute Repetition Rate of Baseline

表4 基线固定误差和比例误差
Tab.4 Baseline Fixed Error and Proportional Error

实验方案	固定误差 a /mm	比例误差 b ($\times 10^{-5}$)
方案一	-0.031	2.368
方案二	0.006	0.243
方案三	-0.021	0.892
方案四	-0.027	1.287
方案五	0.002	0.075
方案六	-0.023	5.972
方案七	-0.075	4.167

2) 基线各方向精度。将解算时间段内的单日解进行联合平差处理,可得出基线在 N 、 E 、 U 方向上的解算精度。本研究在最后的平差解算结果中,按方向和长度挑选出 8 条基线进行分析,结果如图 5 所示。

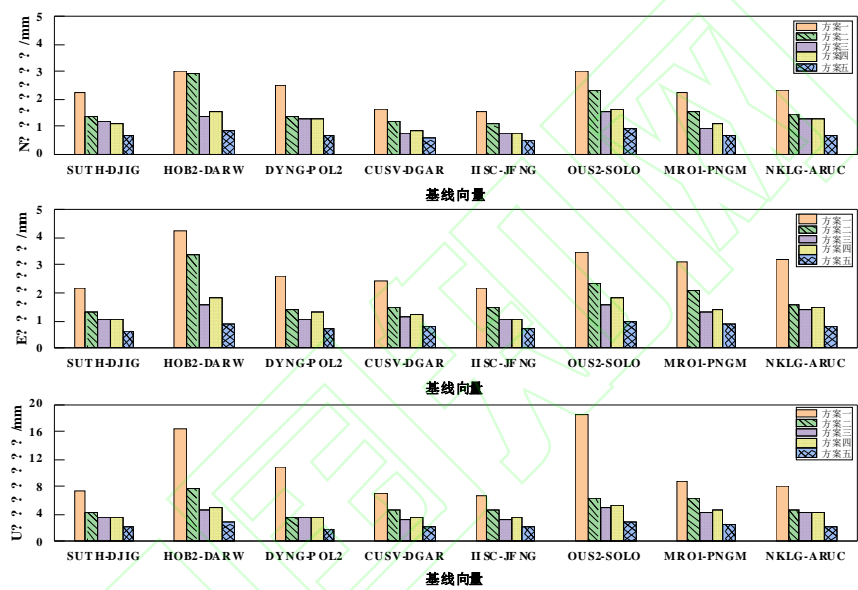


图5 部分基线向量在三方向上的解算精度
Fig.5 Accuracy of Partial Baseline Vector in Three Directions

前 5 种实验方案基线解算的精度在 N 、 E 方向上都能达到 5 mm,在 U 方向上最差能达到 20 mm。其中,方案五 GPS 在 3 个方向上基线解算精度都为最高,总体上方案三的各方向基线解算精度要略高于方案四各方向,但方案三和方案四的基线解算精度却都要优于方案二中 BDS-3 各方向基线解算精度,并且方案三要略高于方案四,而方案一中 BDS-2+BDS-3 卫星解算的基线精度最差。

3.3 站点定位精度

目前常用标准差(standard deviation, STD)对站点定位精度进行描述^[24],见式(12)。

$$STD_X = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (X_i - \mu)^2}, \quad STD_{总} = \sqrt{STD_X^2 + STD_Y^2 + STD_Z^2} \tag{12}$$

式中: $STD_{总}$ 为点位总误差; M 为测站数; X_i 为第 i 历元下解算结果; μ 为对应历元下的另一解算数据,通常取真值或者平均值代替; STD_X 为 X 方向的标准差; STD_Y 为 Y 方向的标准差; STD_Z 为 Z 方向的标准差。

将 5 种实验方案平差得到的相对定位结果,与 ITRF 官网给出的相同历元下的站点坐标进行对比,分析其在 X 、 Y 、 Z 方向上的差异。表 5 统计了各实验方案解算的点位坐标差值的最大值(MAX)、最小值(MIN)、平均值(MEAN)以及标准差,可以看出方案五中 GPS 在各项指标上精度都要优于其他方案中的北斗系统。

统计 7 种实验方案在各测站上解算的点位精度，由图 6 可知。前 5 种方案中，方案五中 GPS 解算的站点相对定位精度最高；方案一中 BDS-2+BDS-3 卫星解算得到的站点相对定位精度最差；方案二中 BDS-3 得到的站点定位精度只略优于方案一；方案三和方案四分别为 BDS-2+BDS-3 中剔除 C1~C5 和 C1~C5+C6+C9 卫星，最终方案三解算得到的站点定位精度在 15mm 以内，要高于方案四，并且两方案中解算得到的点位坐标精度都要高于方案二；方案六中 BDS-2 卫星得到的定位精度在 7 种方案中最差，方案六中 BDS-2 卫星解算的定位精度最差，方案七中随着对 BDS-2 中 C1~C5 卫星进行剔除，其相对定位精度明显得到提升。

统计前 4 种方案各站点在 3 方向上的定位精度，如图 7 所示，选取了其中 14 个站点进行分析。通过设定比对阈值 10 mm，4 种方案中所有站点 3 方向高于此阈值占比分别为 33.33%、23.81%、14.29%、19.05%。可见，方案一中 BDS-2+BDS-3 卫星解算的相对定位精度最差，方案二中 BDS-3 只是略优于方案一的相对定位精度，而方案三和方案四的相对定位精度要更优于前两种方案，并且几种方案中偏离此阈值的最大值也是方案三最小，说明只剔除 BDS-2+BDS-3 中 C1~C5 卫星后相对定位精度最高。

表5 各方案解算点位坐标精度值
Tab.5 Accuracy Value of Point Coordinates Calculated by Each Scheme

系统	方向	MAX/m	MIN/m	MEAN/m	STD/m	STD 总/m
方案一	X	0.028 47	-0.010 73	0.008 87	0.010 04	0.018 17
	Y	0.022 20	-0.013 49	0.004 36	0.011 53	
	Z	0.022 00	-0.011 38	0.005 31	0.009 81	
方案二	X	0.023 23	-0.01082	0.006 21	0.010 59	0.016 23
	Y	0.027 79	-0.003 50	0.012 15	0.008 63	
	Z	0.021 53	-0.012 19	0.004 67	0.008 76	
方案三	X	0.015 44	-0.009 53	0.002 96	0.008 60	0.014 07
	Y	0.022 93	-0.004 00	0.009 46	0.007 24	
	Z	0.017 30	-0.011 03	0.003 14	0.008 46	
方案四	X	0.018 51	-0.008 76	0.004 87	0.008 93	0.015 64
	Y	0.024 64	-0.006 16	0.009 24	0.008 63	
	Z	0.016 16	-0.011 66	0.002 25	0.009 51	
方案五	X	0.012 49	-0.014 62	-0.001 07	0.007 60	0.012 39
	Y	0.017 46	-0.004 00	0.006 73	0.006 34	
	Z	0.013 51	-0.008 42	0.002 54	0.007 46	
方案六	X	0.061 33	-0.058 94	0.001 20	0.030 59	0.044 26
	Y	0.098 02	0.029 69	0.063 86	0.017 70	
	Z	0.015 73	-0.041 03	-0.012 65	0.026 65	
方案七	X	0.016 29	-0.020 34	-0.002 03	0.009 93	0.019 59
	Y	0.035 39	-0.008 34	0.013 53	0.012 69	
	Z	0.020 69	-0.013 11	0.003 79	0.011 14	

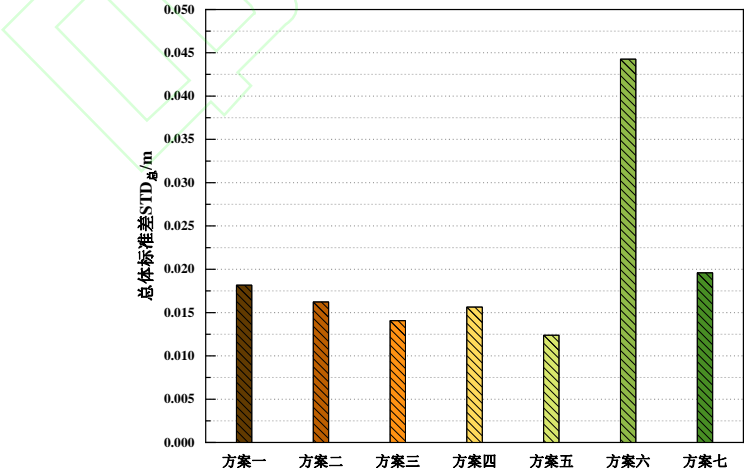


图 6 各方案定位结果总体标准差
Fig.6 The Overall Standard Deviation of the Positioning Results of Each Scheme

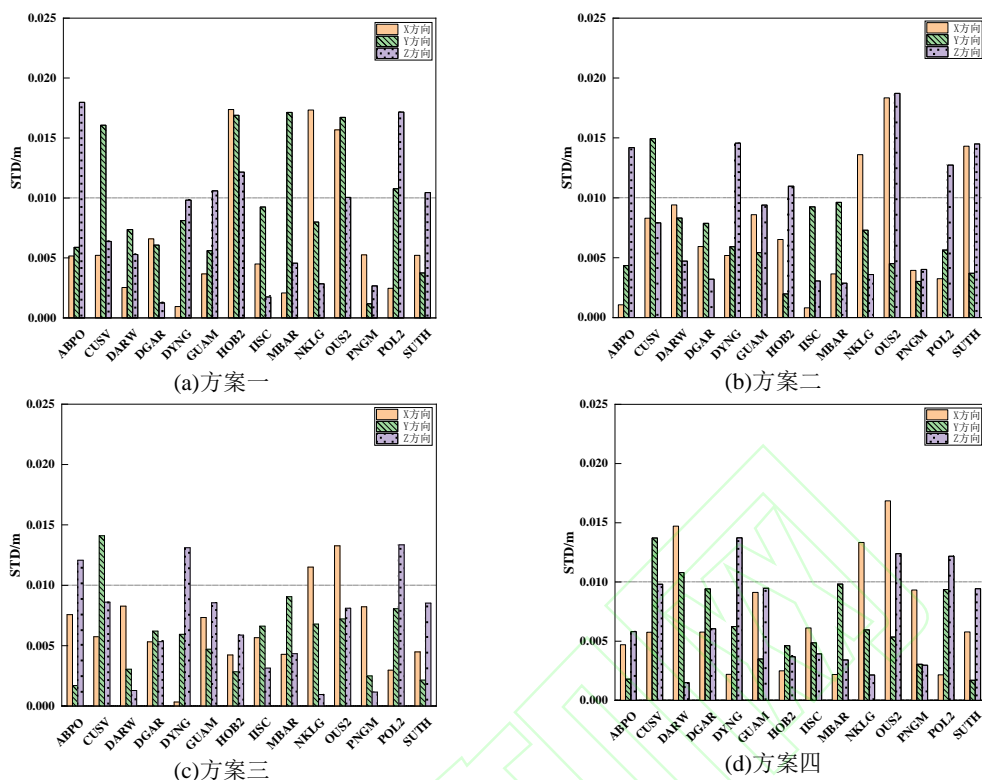


图 7 前 4 种方案部分测站解算点位标准差统计
Fig.7 Statistics of Standard Deviation of Some Stations in the First Four Schemes

3.4 PDOP 值评定

顾及到 PDOP 值可以反映站点上方可观测卫星位置几何构型对相对定位精度的影响, 为探究方案三的相对定位精度高于方案四的原因, 本文随机选取 ABPO 站点, 分析在 2020 年 doy245 下卫星个数和 PDOP 值变化情况, 如图 8、图 9 所示。

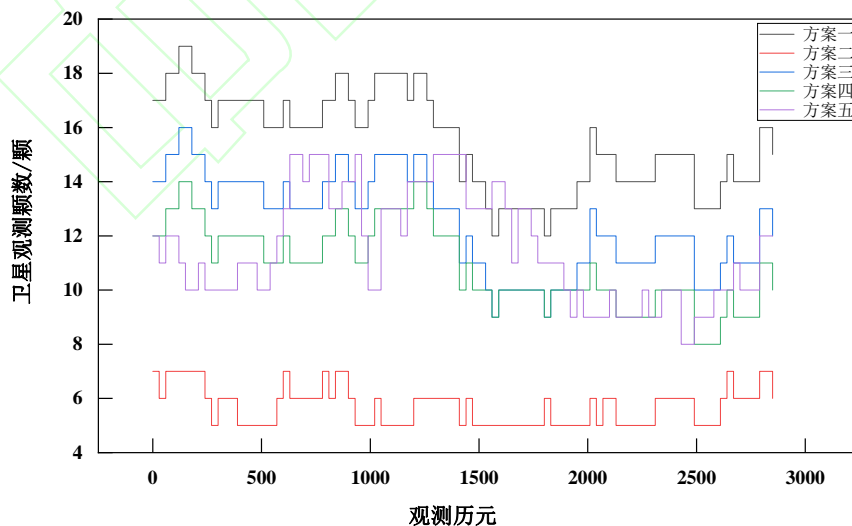


图 8 各方案观测卫星数
Fig.8 Number of Observing Satellites in Each Plan

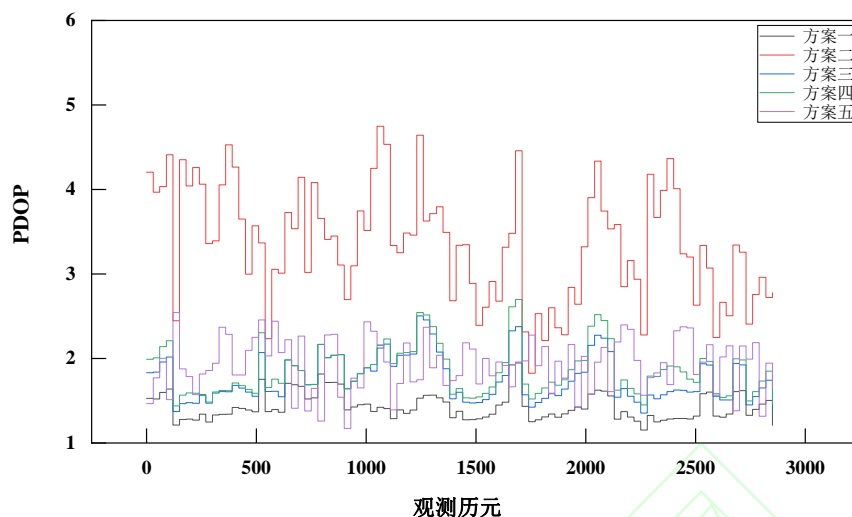


图9 各方案卫星 PDOP 值
Fig.9 Satellite PDOP Value of Each Plan

统计前 5 种实验方案结果, 各方案观测卫星颗数均大于 4, 满足定位原理的要求^[22]; 各方案的 PDOP 值均在 5 以下, 满足 0.5~99.9 的要求^[25]。其中, 方案五中 GPS 和方案一中 BDS-2+BDS-3 的 PDOP 值最小, 方案二中 BDS-3 的 PDOP 值最大; 方案四中的 PDOP 值始终要大于方案三, 使得方案三中的卫星空间位置几何构形精度要优于方案四。

4 结束语

本文顾及卫星的广播星历轨道精度及 PDOP 值, 对 BDS-2/BDS-3 卫星进行最优选择, 设计实验验证当有长基线参与解算时, 各方案对相对定位精度的影响情况, 得出以下结论。

1) 相较于 BDS-3 卫星, 利用 BDS-2 卫星计算得到的单时段解基线值与其加权平均值的偏差最小, 处理过程中周跳得到了较好的修复, 但在解算周期内, BDS-2 相关卫星数据解算得到的单天解相较于 BDS-3 更具有稳定性。

2) 利用 BDS-2 卫星进行相对定位时, 剔除 C1~C5 卫星能有效提升解算出的站点相对定位精度。

3) 利用 BDS-2+BDS-3 卫星中剔除 BDS-2 中广播星历轨道精度较差的卫星能明显提升定位精度, 但剔除过多会降低 PDOP 值, 剔除 C1~C5 卫星解算的相对定位精度最高, 各方向基线解算精度在 5 mm 以内, 站点定位精度可达到 15 mm。

4) 目前利用 BDS-3 以及 BDS-2+BDS-3 卫星解算得到的相对定位精度以及基线解算精度略差于 GPS 的解算精度。但其站点定位精度在 X、Y、Z 方向都能达到 19 mm, 基线相对重复率能达到 5×10^{-8} 量级, 基线相对重复率最大在 60 mm 以内, 基线解算精度在 N、E、U 方向都在 20 mm 以内。

综上所述, 现阶段利用 BDS-2+BDS-3 卫星观测数据进行相对定位, 顾及有长基线参与解算时, 在确保卫星数量满足定位要求的前提下, 剔除 C01~C05 卫星后解算精度更高。



参考文献

- [1] 郭树人, 蔡洪亮, 孟铁男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821. (GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821.)
- [2] 和成强. BDS-3 不同类型卫星对 BDS-2 伪距定位性能提升定量分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(5): 67-71. (HE Chengqiang. Quantitative analysis of BDS-3 pseudo-range positioning performance improvement by different types of BDS-3 satellites[J]. GNSS World of China, 2020, 45(5): 67-71.)
- [3] 张昆仑, 郭将. BDS-3 卫星对 BDS 全球定位性能提升分析[J]. 全球定位系统, 2019, 44(6): 35-45. (ZHANG Kunlun, GUO Jiang. Analysis on the improvement of BDS-3 satellite to BDS global positioning service[J]. GNSS World of China, 2019, 44(6): 35-45.)
- [4] 李杰, 张荣之, 曾光, 等. 北斗三频数据的两个无电离层组合轨道钟差估计及其应用[J]. 测绘学报, 2020, 49(11): 1377-1387. (LI Jie, ZHANG Rongzhi, ZENG Guang, et al. Orbit determination and clock estimation via two ionosphere-free combinations of observation from BDS triple-frequency data and its application [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(11): 1377-1387.)
- [5] 孔豫龙, 柴洪洲, 潘宗鹏, 等. BDS-3 新卫星的标准单点定位结果分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(4): 152-157. (KONG Yulong, CHAI Hongzhou, PAN zongpeng, et al. Analysis of standard point positioning results of new BDS-3 satellite [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(4): 152-157.)
- [6] 程彤, 王潜心, 胡超, 等. BDS-2 和 BDS-3 卫星原子钟特性分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 69-76. (CHENG Tong, WANG Qianxin, HU Chao, et al. Characteristic analysis of BDS-2 and BDS-3 satellite atomic clocks [J]. Surveying and Mapping Science, 2020, 45(12): 69-76.)
- [7] 郑爽, 王世杰. 北斗三号短基线相对定位精度分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(1): 61-65. (ZHENG Shuang, WANG Shijie. Analysis of relative positioning accuracy of BDS-3 short baseline[J]. GNSS World of China, 2020, 45(1): 61-65.)
- [8] 齐光松, 祝会忠, 徐宗秋, 等. BDS 不同轨道卫星精密单点定位性能分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(12): 44-51. (QI Guangsong, ZHU Huizhong, XU Zongqiu, et al. Performance analysis of BDS different orbits satellites for PPP[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(12): 44-51.)
- [9] 艾力·库尔班, 何秀凤, 张浙涛, 等. 对流层延迟改正方案对 GPS/BDS 动态 PPP 定位精度的影响[J]. 导航定位学报, 2020, 8(2): 69-75. (AILI Kuerban, HE Xiufeng, ZHANG Zhetao. Influence of tropospheric delay correction scheme on GPS/BDS dynamic PPP positioning accuracy [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(2): 69-75.)
- [10] 周金宁, 赵齐乐, 胡志刚, 等. 北斗不同电离层模型精度分析[J]. 测绘通报, 2020(8): 71-75. (ZHOU Jinning, ZHAO Qile, HU Zhigang, et al. Evaluation on the precision of different BDS ionosphere model [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(8): 71-75.)
- [11] 苏艳华, 韩飞, 吴浩. 北斗 GEO/IGSO/MEO 混合星座对控制测量的影响分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 40-44. (SU Yanhua, HAN Fei, WU Hao. The influence of Beidou GEO/IGSO/MEO mixed constellation on control measurement [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 40-44.)
- [12] 张金旭, 杨强, 景冬, 等. BDS 卫星轨道误差预测模型[J]. 北京测绘, 2020, 34(12): 1790-1794. (ZHANG Jinxu, YANG Qiang, JING Dong, et al. BDS satellite orbit error prediction model [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2020, 34(12): 1790-1794.)
- [13] 刘万科, 任杰, 曾琪, 等. 2013—2015 年 BDS 空间信号测距误差的精度评估[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 1-6. (LIU Wanke, REN Jie, ZENG Qi, et al. Accuracy evaluation of BDS spatial signal ranging error from 2013 to 2015 [J]. Journal of National University of Defense Science and Technology, 2016, 38(3): 1-6.)
- [14] 孟祥广, 孙越强, 白伟华, 等. 北斗卫星广播星历精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(10): 870-873. (MENG Xiangguang, SUN Yueqiang, BAI Weihua, et al. Precision analysis of Beidou satellites' broadcast ephemeris [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(10): 870-873.)
- [15] 向涛, 史俊波, 郭际明. GPS 广播星历非整点时刻数据块性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(3): 372-378. (XIANG Tao, SHI Junbo, GUO Jiming. Quality assessment of non-integer-hour data blocks in GPS broadcast ephemeris [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(3): 372-378.)
- [16] 刘凡, 李雷, 刘国林, 等. BDS-2 与 BDS-3 卫星空间信号精度评估[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 54-61. (LIU fan, LI Lei, LIU Guolin, et al. Accuracy assessment of BDS-2 and BDS-3 satellite signal-in-space [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(1): 54-61.)
- [17] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 北斗卫星导航系统空间信号误差统计分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(3): 271-274. (ZHANG Qinghua, SUI Lifan, JIA Xiaolin, et al. SIS error statistical analysis of Beidou satellite navigation system [J]. Journal of Wuhan University: Information Science Edition, 2014, 39(3): 271-274.)
- [18] 马下平, 鲁尚强, 李秦政, 等. 北斗卫星导航系统的空间信号精度评估[J]. 测绘科学, 2019, 44(1): 90-97. (MA Xiaping, LU Shangqiang, LI Qinzheng, et al. Evaluation of signal in space accuracy for Beidou navigation satellite system [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(1): 90-97.)
- [19] 唐卫明, 崔健慧, 惠孟堂. 北斗区域星座对相对定位精度的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(8): 1107-1112. (TANG Weiming, CUI Jianhui, HUI Mengtang. Analysis of the influence of Beidou regional constellation on relative positioning accuracy [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(8): 1107-1112.)
- [20] 潘林, 蔡昌盛, 罗小敏, 等. 一种顾及权重的 PDOP 值计算方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(3): 236-239. (PAN Lin, CAI Changsheng, LU Xiaomin, et al. A computing method of weighted PDOP[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(3): 236-239.)
- [21] 刘彦军, 李建章, 刘江涛, 等. 新版 GAMIT10.70 解算 GPS/BDS 基线精度对比分析[J]. 导航定位学报, 2019, 7(2): 138-142.

- (LIU Yanjun,LI Jianzhang,LIU Jiangtao,et al.Comparative analysis of GPS / BDS baseline accuracy of new version gamit10.70 [J].Journal of Navigation and Positioning,2019,7(2):138-142.)
- [22] 杨德芳, 丁开华, 许伟. GAMIT/GLOBK 在高精度长基线像控点解算中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2019 (5): 849-858. (YANG Defang, DING Kaihua, XU Wei. Application of the GAMIT/GLOBK in high-precision long baseline as photo-control-point calculation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019 (5): 849-858.)
- [23] 任秀波, 尹伟言, 陈小英, 等. GPS 基线质量评价[J]. 测绘技术装备. 2017, 19 (2): 84-85. (REN Xiubo, YIN Weiyan, CHEN Xiaoying, et al. GPS baseline quality evaluation [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2017, 19 (2): 84-85.)
- [24] 罗权. 不同截止高度角对 GAMIT 基线解算的影响分析[J]. 测绘地理信息, 2017, 42 (3): 14-17. (LUO Quan. Effect of different cut-off elevation angles on GAMIT baseline solution[J]. Journal of Geomatics, 2017, 42 (3): 14-17.)
- [25] 慕仁海, 常春涛, 党亚民, 等. 利用国内 iGMAS 站的 BDS-2+BDS-3 精密相对定位研究[J]. 测绘科学, 2020, 45 (12): 34-39. (MU Renhai, CHANG Chuntao, DANG Yamin, et al. Research on BDS-2+BDS-3 precision relative positioning using iGMAS station in China[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45 (12): 34-39.)