



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: BDS-3 多频伪距定位性能分析
作者: 刘明亮, 安家春, 王泽民, 张保军, 宋翔宇
DOI: 10.13203/j.whugis20200714
网络首发日期: 2021-08-13
引用格式: 刘明亮, 安家春, 王泽民, 张保军, 宋翔宇. BDS-3 多频伪距定位性能分析. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200714>



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。

DOI:10.13203/j.whugis20200714

BDS-3 多频伪距定位性能分析

刘明亮¹ 安家春¹ 王泽民^{1*} 张保军¹ 宋翔宇^{2,3}

¹ 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉 430079

² 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄, 050043

³ 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄, 050043

摘要：BDS-3 于 2020 年 7 月 31 日正式开通全球服务，为详细评估 BDS-3 全球定位性能，以全球 16 个 MGEX 跟踪站多天实测数据为基础。采用 Net_Diff 软件进行了全球范围内 BDS-3 单频、双频无电离层组合与双频非组合模型下双频、三频非组合模型和三频无电离层两两组合模型三频伪距单点定位解算试验，并与 GPS、Galileo 部分频率进行对比。试验结果表明，在亚欧非地区 BDS-3 卫星数与空间几何构型优于 GPS 和 Galileo，对于 BDS-3 单频伪距单点定位，B1C、B1I、B2a、B3I 四个频率 E 方向精度优于 0.5 m，N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m，与 GPS 和 Galileo 对比定位精度关系为：B1C>B1I>L1>B3I>B2a>E1>L2>E5a。对于 BDS-3 双频组合伪距单点定位，B2aB3I 组合定位较差，不适合进行定位，B1CB2a、B1CB3I、B1IB2a、B1IB3I 组合频率 E 方向和 N 方向定位精度优于 1 m，U 方向定位精度优于 2 m，与 GPS 和 Galileo 对比定位精度关系为：B1CB2a>B1CB3I>L1L2>B1IB3I>B1IB2a>E1E5a>B2aB3I。对于 BDS-3 三频组合伪距单点定位，B1IB2aB3I、B1CB2aB3I 组合 E 方向和 N 方向定位精度优于 1 m，U 方向定位精度优于 2 m，与 GPS 和 Galileo 对比定位精度关系为：B1CB2aB3I>B1IB2aB3I>L1L2L2>E1E5aE5b。B1CB3I、B1IB3I、B1CB2a、B1IB2a 双频组合适合利用非组合模型进行定位，B2aB3I 适合利用无电离层模型进行定位，B1IB2aB3I 和 B1CB2aB3I 适合利用非组合模型定位。结合实验结果可知，BDS-3 在全球范围内定位性能较优，甚至部分频率定位性能优于 GPS 和 Galileo，可为今后 BDS-3 相关研究提供一定参考。

关键词：BDS-3；不同模型；多频；伪距单点定位

中国分类号：P228

文献标识码：A

众所周知，北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）是根据中国发展需要、自主设计研发的卫星导航定位系统，是重要的基础民生设施。根据其“三步走”建设策略，2000 年建设完成北斗一号（BDS-1）即双星定位系统、2012 年底建设完成北斗二号（BDS-2）即区域定位系统、2020 年建设完成北斗三号（BDS-3）即全球定位系统，截至到 2020 年 6 月 23 日，BDS-3 最后一颗组网卫星成功发射^[1-3]。2020 年 7 月 31 日，习近平主席宣布“BDS-3 正式开通服务”，标志着 BDS-3 正式为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务，完整的 BDS-3 星座共由 30 颗卫星组成，包括 24 颗中地

项目资助：国家自然科学基金（41941010，41776195）；国家海洋局极地考察办公室极地科学协同创新平台项目（CXPT2020007）。

第一作者：刘明亮，博士生，主要从事高精度 GNSS 定位、极地冰雪监测研究。liuming_liang@163.com

*通讯作者：王泽民，教授，博士生导师。zwmwang@whu.edu.cn

球轨道卫星 (Medium Earth Orbit , MEO)、3 颗倾斜地球同步轨道卫星 (Inclined GeoSynchronous Orbit , IGSO) 和 3 颗地球静止轨道卫星 (Geostationary Earth Orbit , GEO)^[4-6]。在轨的 24 颗 MEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星可以播发 5 个频率信号 , 包括 1 575.42 MHz (B1C)、1 561.098 MHz(B1I)、1 268.52 MHz (B3I)、1 207.14 MHz (B2b) 和 1 176.45 MHz (B2a) , 其中 B1I 和 B3I 频率是在 BDS-2 基础上保留下来的 , B1C、B2a 和 B2b 为新增加频率 , 与其他导航系统具有相同频率^[7,8]。BDS-3 系统 B1C 频率与 GPS 系统 L1 频率、Galileo 系统 E1 频率、QZSS 系统 L1 频率相同 , BDS-3 系统 B2a 频率与 GPS 系统 L5 频率、Galileo 系统 E5a 频率、QZSS 系统 L5 频率相同 , BDS-3 系统 B2b 频率与 Galileo 系统 E5b 频率、BDS-2 系统 B2I 频率相同 , BDS-3 系统与 BDS-2 系统 B1I 频率和 B3I 频率相同^[9,10]。BDS-3 设计了与其他系统相互重叠的频率 , 不仅增加了与其他系统组合定位的兼容性 , 也增加了多系统多频组合定位的多样性 , 自 BDS-3 开始建设 , 很多学者对其定位性能进行了研究。

文献[11]发现经过 TGD 校正之后的 BDS 标准单点定位精度得到明显提升 , BDS-2B1I 频率单点定位 (Single Point Positioning, SPP) 精度在水平和垂直方向上均提高了约 50% , B1I/B3I 组合 SPP 精度在水平方向上提高了约 70% , 在垂直方向上提高了 47.4% , BDS-3B1I 和 B1C 均方根 (RMS) 值在水平分量中提高了约 60%–70% , 在垂直分量中提高了约 50% , B2a 频率 SPP 精度在东和北方向分别提升了 60.2% 和 64.4% , 垂直方向提升了约 19.8% , B1I/B3I 和 B1C/B2a 组合 SPP 精度水平方向提升 62.1% 至 75.0% , 垂直方向提升约为 45% , BDS-2/BDS-3 组合定位精度明显高于 BDS-2 或 BDS-3。文献[12]发现 BDS-3 的广播星历轨道误差的均方根(RMS)在径向、沿轨道、跨轨道方向分别提升了 86.30%、89.47%、76.86% , 标准差 (STD) 分别提高了 79.41%、77.00%、76.78% , 同时发现估计系统间偏差 (ISB) 能有效提升 SPP 精度 , 在北、东以及垂直方向分别提升了 20.15%、19.81%、12.76%。文献[13]为进一步减少 SPP 中的系统误差 , 提出了一种“增强 SPP (A-SPP)”解算策略 , 该方法基于

卫星仰角加权 (SEAW) 平均技术, 逐个时间获取流动站观测到的每个 BDS 卫星的码残留误差, 通过校正流动站的伪距观测值而实现 A-SPP, 经验证 A-SPP 水平定位精度优于 0.5 m, 垂直向精度优于 1 m, 可为单频 GNSS 用户提供更好的选择。文献[14]评估了 BDS-3/GNSS 数据质量以及定位性能, 发现 BDS-3 数据完整率在 80% 以上, BDS-3 新信号 B1C 与 B2a 信噪比与旧频率相当, 优于其他系统的信噪比, B2a 信号周跳比高于其他信号, 也高于其他系统, 与 E5b 信号相当, 四个系统每个信号的多路径 RMS 值都在 0.5 m 以内, B2a 信号的多路径较低约为 0.1 m, BDS-3 的单点定位精度低于 GPS 和 Galileo, 但优于 GLONASS。文献[15]为进一步提升 SPP 精度, 提出了多步加权最小二乘 (MWLS) 估计方法, 经过和与海拔相关的加权最小二乘法 (EWLS) 方法对比, 发现在无遮挡观测环境中, MWLS 的水平精度约为 1 m, 位置精度约为 2-3 m, 比 EWLS 提升了约 15%。文献[16]发现在 BDS-3 测试卫星中, B1C 频率伪距测量精度最差, B2a+b 频率伪距测量精度最高, B_s 信号的伪距测量精度低于 B2a+b 频率, 但优于 B1C 频率, BDS-3 多路径效应小于 BDS-2 且没有观测到与卫星高度相关的明显系统误差, B2a+b 频率抗多路径效应最强, B1C 频率最差, 模拟 BDS-3 星座发现 BDS-3 的全球卫星数在 6-13 颗, PDOP 值在 1.3-2.7 之间, HDOP 值在 0.7-1.5 之间, VDOP 值在 1.1-2.4 之间, 预计全球定位精度将达到 1.3-2.7 m, 水平定位精度估计为 0.7-1.5 m, 高程定位精度估计为 1.1-2.4 m。

鉴于当前对全球 BDS-3 多频伪距单点定位性能的分析具有一定意义, 本文基于 MGEX 发布的多频 BDS-3 实测数据, 利用不同频率组合模型, 详细的分析了 BDS-3 单频、双频、三频 SPP 定位精度, 并与 GPS 系统和 Galileo 系统对应频率进行对比。第一部分推导了不同组合 SPP 定位模型, 第二部分介绍了数据来源、BDS-3 的卫星可见情况以及 PDOP 值, 第三部分详细分析了 BDS-3 多频 SPP 定位精度, 第四部分给出了结论。

1 BDS-3 多频伪距单点定位模型

1.1 单频伪距单点定位观测方程

单频 SPP 观测方程一般表示如下^[17]：

$$P_r^s = \rho_r^s + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + d_{r,orb}^s + d_{r,trop}^s + d_{r,ion}^s + b^s + \varepsilon_r^s \quad (1)$$

式中， r 为接收机； s 为卫星； P 为伪距观测值； c 为真空中光速； dt_r 为接收机钟差； dt^s 为卫星钟差； $d_{r,orb}^s$ 为轨道误差； $d_{r,trop}^s$ 为对流层延迟； $d_{r,ion}^s$ 为电离层延迟； b^s 为卫星硬件延迟； ε_r^s 为观测噪声与未模型化误差。

1.2 双频伪距单点定位观测方程

1.2.1 双频非组合模型

一般非组合伪距观测方程可以表示如下^[18]：

$$P_r^s = e_r^s \cdot \Delta x + c \cdot (dt_r - dt^s) + uI_r^s + mZTD_r + \varepsilon_p \quad (2)$$

式中， e_r^s 表示接收机到卫星的单位向量； Δx 表示测站改正数； u 表示电离层延迟与频率相关系数； I_r^s 表示电离层延迟； m 表示对流层投影函数； ZTD_r 表示测站天顶对流层延迟，其余符号表示含义与式(1)相同；

1.2.2 双频无电离层组合模型

无电离层组合模型也是定位中常用的模型，在式(1)的基础上可以得到传统双频伪距无电离层组合模型如下^[19]：

$$P_{IF} = \alpha P_{r,1}^s + \beta P_{r,2}^s \quad (3)$$

式中， $\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ ， $\beta = \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ ， f 表示频率，其余符号表示含义与式(1)相同。

1.3 三频伪距单点定位观测方程

1.3.1 三频非组合模型

在进行三频组合定位时，第三个频率上的伪距观测值的码偏差影响数值上不同于前两个伪距观测值，电离层延迟参数不能完全吸收码偏差的影响，需要在第三个频率的伪距上引入一个额外的频间偏差参数 ifb(inter-frequency bias)，表示如下^[20]：

$$\begin{cases} \alpha_{nm} = \frac{f_m^2}{f_m^2 - f_n^2}, \beta_{nm} = -\frac{f_n^2}{f_m^2 - f_n^2} \\ DCB_{r,mm} = d_{r,m} - d_{r,n} \\ DCB^{s,mm} = d^{s,m} - d^{s,n} \\ d_{r,IF_{mm}} = \alpha_{nm}d_{rm} + \beta_{nm}d_{rn} \\ d^{s,IF_{mm}} = \alpha_{nm}d^{rm} + \beta_{nm}d^{rn} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $m, n = 1, 2, 3 (m < n)$ 表示频率号; f 表示频率值; α_{nm} 、 β_{nm} 表示无电离层组合因子; $DCB_{r,mm}$ 、 $DCB^{s,mm}$ 表示接收机端与卫星端码间偏差; $d_{r,IF_{mm}}$ 、 $d^{s,IF_{mm}}$ 表示卫星端、接收机端原始频率硬件延迟 d_r 、 d^s 形成的无电离层组合伪距硬件延迟。

为保持伪距相位观测方程参数定义的一致性, 三频非组合伪距线性观测方程可表示为

[20] :

$$\begin{cases} P_{r,1}^s = \bar{\rho}_r^s + t_{r,12} + \gamma_1 \cdot \bar{I}_{r,1}^s + \bar{T}_r + \varepsilon_{r,1}^s \\ P_{r,2}^s = \bar{\rho}_r^s + t_{r,12} + \gamma_2 \cdot \bar{I}_{r,1}^s + \bar{T}_r + \varepsilon_{r,2}^s \\ P_{r,3}^s = \bar{\rho}_r^s + t_{r,12} + \gamma_3 \cdot \bar{I}_{r,1}^s + \bar{T}_r + \text{ifb}_r^s + \varepsilon_{r,1}^s \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s - \beta_{12}(DCB_{r,12} - DCB^{s,12}), t_{r,12} = t_r + d_{r,IF_{12}} \\ \text{ifb}_r^s = \gamma_3 \cdot \beta_{12} \cdot (DCB_{r,12} - DCB^{s,12}) - d_{r,IF_{12}} + d^{s,IF_{12}} + d_{r,3} - d^{s,3} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\bar{\rho}$ 表示经过误差改正的站星间几何距离; \bar{I} 表示吸收部分伪距码延迟后的电离层延迟; ifb 表示第三个频率上的伪距频间偏差。

1.3.2 三频无电离层两两组合模型

与三频非组合模型一样, 为保持两个无电离层组合中参数定义的一致性, 同样需要引入一个伪距频间偏差参数, 三频无电离层两两组合伪距线性观测方程可表示为 [20] :

$$\begin{cases} P_{r,12}^s = \bar{\rho}_r^s + t_{r,12} + \bar{T}_r + \varepsilon_{r,12}^s \\ P_{r,13}^s = \bar{\rho}_r^s + t_{r,12} + \bar{T}_r + \text{ifb}_{r,IF}^s + \varepsilon_{r,12}^s \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{ifb}_{r,IF}^s = d^{s,IF_{12}} - d_{r,IF_{12}} + d_{r,IF_{13}} - d^{s,IF_{13}} \quad (8)$$

式中, $\text{ifb}_{r,IF}^s$ 表示三频无电离层两两组合模型频间参数; 其余符号表示含义与之前相同。

2 数据来源以处理策略

为详细分析全球 BDS-3 多频伪距定位性能，本文筛选出 16 个 MGEX 跟踪站，这些跟踪站均包含 BDS-3 多颗卫星，且能接收到 BDS-3 多频观测数据，数据由 IGS 中心官网获取 (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>)，多频广播星历由 IGS 中心官网获取 (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/2020/brdc/>)。数据采集时间为 2020 年 9 月 1 日-2020 年至 2020 年 9 月 7 日 00:00:00-24:00:00，采样间隔为 30 s，每天数据采集共计 2880 个历元，所选每个测站都有接收到 GNSS 多频数据，测站位置如图 1，具体信息如表 1。

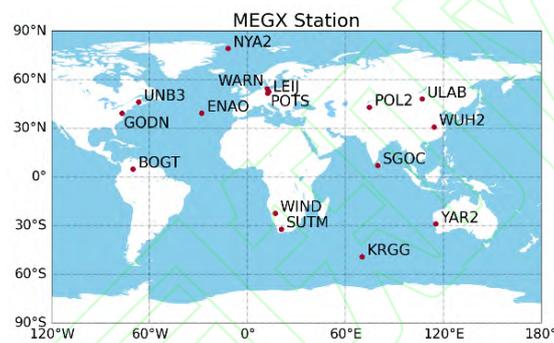


图 1 所选 IGS MGEX 测站位置分布图

Fig.1 Location distribution map of selected IGS MGEX stations

表 1 所选测站信息

Tab.1 Information of selected stations

测站名	接收机类型	天线类型	采样间隔/s	频率
KRGG	TRIMBLE ALLOY	LEIAR25.R4	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
NYA2	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
SGOC	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
SUTM	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
ULAB	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
WIND	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
WUH2	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
POTS	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
WARN	JAVAD TRE_3 DELTA	LEIAR25.R4	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
BOGT	JAVAD TRE_3 DELTA	JAVRINGANT_DM	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
ENAO	JAVAD TRE_3	JAVRINGANT_G5T	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
GODN	JAVAD TRE_3 DELTA	TPSCR.G3	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
LEIJ	JAVAD TRE_3 DELTA	LEIAR25.R4	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
POL2	JAVAD TRE_3 DELTA	TPSCR.G3	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a
UNB3	TRIMBLE ALLOY	TRM57971.00	30	B1C/B2a/B1I/B3I/L1/L2/E1/E5a

在进行 BDS-3 单频、双频以及三频伪距定位精度分析时，由于 BDS-3 系统 B1I 频率与 B1C 频率很接近，因此本文不对 B1I 与 B1C 组合频率进行分析，GPS 系统播发 L5 频率的卫星较少，不将 L5 频率定位性能作为对比，而 Galileo 则选取与 BDS-3 系统 B1C 和 B2a 兼容的 E1 和 E5a 频率进行分析，具体数据处理策略如表 2。利用上海天文台 GNSS 分析中心张益泽博士主持研发的 Net_Diff 软件^[21,22]对筛选的测站进行数据处理，权比策略采用高度角定权，以 IGS 周解算坐标作为真值，在进行数据解算时，对于单频伪距单点定位电离层延迟采用北斗广播电离层模型进行改正，非组合模型伪距单点定位电离层延迟通过估算进行改正，对流层延迟采用 Saastamoinen 模型进行改正^[23]，天线相位中心偏移 (PCO) 和相位中心变化 (PCV) 使用 IGS ANTEX 文件^[24,25]进行更正。

表 2 数据处理策略

Tab.2 Data processing strategy

频率	模型	系统	频率组合
单频	普通模型	BDS-3	B1I、B1C、B2a、B3I
		GPS	L1、L2
		Galileo	E1、E5a
双频	无电离层	BDS-3	B1CB2a、B1CB3I、B1IB2a、B1IB3I、B2aB3I
		GPS	L1L2
		Galileo	E1E5a
	非组合	BDS-3	B1CB2a、B1CB3I、B1IB2a、B1IB3I、B2aB3I
		GPS	L1L2
		Galileo	E1E5a
三频	无电离层两两组合	BDS-3	B1IB2a+B1IB3I、B1CB2a+B1CB3I
		GPS	L1L2+L1L5
		Galileo	E1E5a+E1E5b
	非组合	BDS-3	B1IB2aB3I、B1CB2aB3I
		GPS	L1L2L5
		Galileo	E1E5aE5b

3 试验结果分析

3.1 卫星数与 PDOP 值分析

卫星可见数是指接收机能接收到多少颗卫星发射的信号，是影响定位精度的重要因素，

当卫星数少于 4 颗，不能进行定位^[26]。PDOP(Position Dilution of Precision)是位置精度强弱度，具体表示卫星分布的空间几何强度，一般卫星分布越好时，PDOP 值越小，一般小于 3 为比较理想状态，计算方法如下^[27,28]。

$$PDOP = \frac{\sigma_{(x,y,z)}}{\sigma_{\rho}} \quad (9)$$

式中， $\sigma_{(x,y,z)}$ 为定位三维误差； σ_{ρ} 为伪距测量误差。

根据所选各测站的观测值与广播星历，计算得到不同测站多天 BDS-3、GPS、Galileo 的平均卫星数与 PDOP 值，如图 2-图 4。

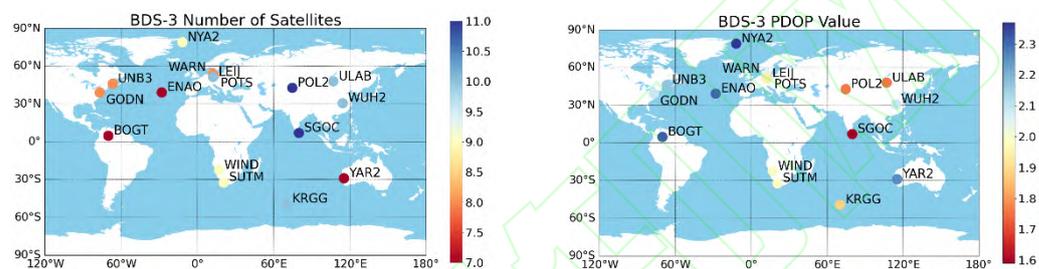


图 2 16 测站多天 BDS-3 平均卫星可见数与 PDOP 值

Fig.2 The average number of visible satellites and PDOP value of BDS-3 in 16 stations

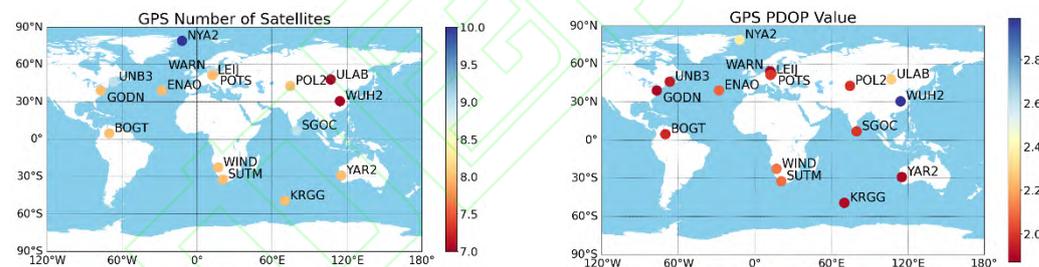


图 3 16 测站多天 GPS 平均卫星可见数与 PDOP 值

Fig.3 The average number of visible satellites and PDOP value of GPS in 16 stations

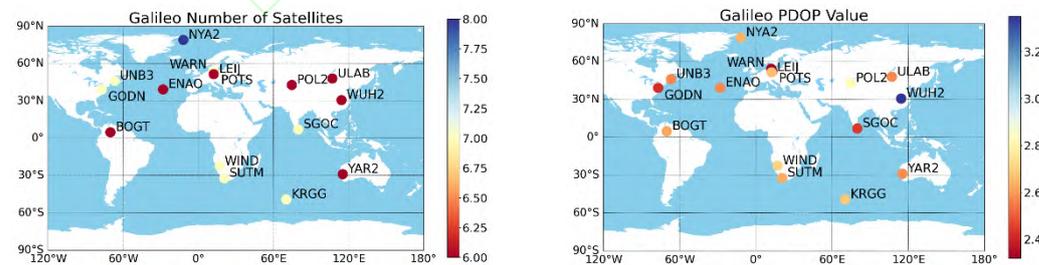


图 4 16 测站多天 Galileo 平均卫星可见数与 PDOP 值

Fig.4 The average number of visible satellites and PDOP value of Galileo in 16 stations

如图 2-图 4 所示，在所选 16 个包含 BDS-3/GPS/Galileo 多频数据 MGEX 测站中，BDS-3 平均卫星可见数在 7-11 颗之间，GPS 平均卫星可见数在 7-10 颗之间，Galileo 平均卫星可见

数在 6-8 颗之间。同时发现 BDS-3 在亚太地区的卫星数多于欧洲、美洲和非洲地区，BDS-3 在亚太地区平均卫星数在 10 颗左右，在欧洲地区平均卫星数在 8 颗左右，在美洲地区平均卫星数在 8 颗左右，在非洲地区平均卫星数在 9 颗左右，而 GPS 和 Galileo 在欧洲、美洲和非洲地区的平均卫星数则多于亚洲地区。BDS-3 平均 PDOP 值在 1.6-2.4 之间，GPS 平均 PDOP 值在 1.8-4 之间，Galileo 平均 PDOP 值在 2.2-3.4 之间。同时发现 BDS-3 在亚太地区的平均 PDOP 值小于欧洲、美洲和非洲地区，而 GPS 和 Galileo 在亚太地区的平均 PDOP 值大于欧洲、美洲和非洲地区。进一步表明，在亚欧非地区，BDS-3 的卫星空间几何构型与卫星数优于 GPS 和 Galileo，BDS-3 在亚太地区的空间卫星几何构型优于欧洲和非洲地区。

3.2 单频伪距单点定位

根据表 2 的数据处理策略，计算得到 E 方向、N 方向、U 方向的定位精度 (Root Mean Square , RMS)，如图 5。

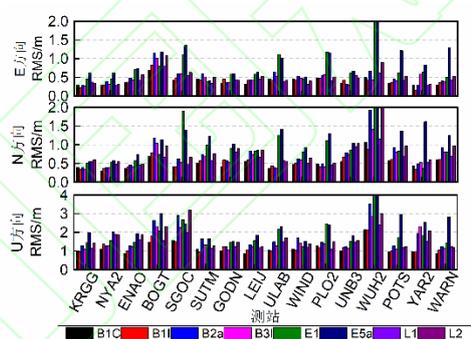


图 5 16 测站多天 BDS-3 单频伪距单点定位精度平均值

Fig.5 Average value of BDS-3 single-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy for multiple days at 16 stations

如图 5 所示，除个别测站外，BDS-3 四个频率 B1I、B1C、B2a、B3I 单频伪距单点定位 E 方向定位精度优于 0.5 m，N 方向定位精度差别较大，部分测站精度优于 0.5 m，部分测站精度优于 1 m，而对于 U 方向定位精度，B1I 和 B1C 定位精度相当，除个别测站外，定位精度在 1 m 左右，B2a 定位精度相比其他三个频率精度较差，除个别测站外，定位精度优于 2 m 左右，B3I 定位精度处于四个频率定位精度中间，除个别测站外，定位精度优于 1.5 m。对于 GPS 系统 L1、L2 伪距单点定位精度，除个别测站外，E 方向定位精度优于 0.5 m，N

方向定位精度优于 1 m ,U 方向定位精度优于 1.5 m。对于 Galileo 系统 E1、E5a 伪距单点定位精度，除个别测站外，E 方向和 N 方向定位精度优于 1 m，E1 频率 U 方向定位精度优于 1.5 m，E5a 频率定位精度优于 2 m。

由于测站环境、接收机硬件、数据质量等影响，可能导致部分测站定位精度过差，在进行定位精度平均值统计时，发现 16 个测站中只有 1 个测站部分频率组合定位精度过差，因此需要进行剔除，剔除率为 6.25%，不影响定位精度统计，在接下来双频和三频伪距定位精度统计时，依旧采取此策略。

统计得到 16 个测站多天 BDS-3、GPS、Galileo 单频伪距单点定位 E、N、U 三个方向定位精度的平均值，见表 3。

表 3 BDS-3 单频伪距单点定位精度 (RMS) 平均值统计
Tab.3 BDS-3 single-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy (RMS) average statistics

系统	频率	RMS/m		
		E	N	U
BDS-3	B1C	0.39	0.50	1.07
	B1I	0.44	0.54	1.21
	B2a	0.48	0.70	1.61
	B3I	0.49	0.63	1.53
GPS	L1	0.47	0.64	1.38
	L2	0.49	0.78	1.72
Galileo	E1	0.69	0.76	1.74
	E5a	0.82	0.99	2.14

如表 3 所示，BDS-3 四个频率 B1I、B1C、B2a、B3I 伪距单点定位 E 方向精度优于 0.5 m，N 方向定位精度优于 1 m，B1I、B1C 频率 U 方向定位精度优于 1.5 m，B2a、B3I 频率 U 方向定位精度优于 2 m。GPS 系统 L1、L2 频率伪距单点定位 E 方向精度优于 0.5 m，N 方向定位精度优于 1 m，U 方向定位精度优于 2 m。Galileo 系统 E1、E5a 频率伪距单点定位 E 方向和 N 方向定位精度优于 1 m，E1 频率 U 方向定位精度优于 2 m，E5a 频率 U 方向定位精度优于 2.5 m。

3.3 双频伪距单点定位

根据表 2 的数据处理策略，首先采用双频非组合模型对 BDS-3 系统 5 种双频组合、GPS 系统 L1L2 组合、Galileo 系统 E1E5a 组合数据进行处理，并且计算得到不同双频组合 E、N、U 三个方向定位精度 (RMS)，见图 6。然后采用双频无电离层组合处理对于双频组合数据，并且计算得到不同双频组合 E、N、U 三个方向定位精度 (RMS)，见图 7。

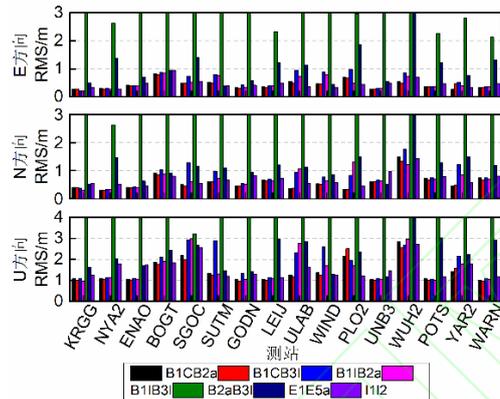


图 6 16 测站多天 BDS-3 双频非组合伪距单点定位精度平均值

Fig.6 Average value of single-point positioning accuracy of BDS-3 dual-frequency non-combined pseudorange over 16 stations

如图 6 所示，对于非组合模型下的 BDS-3 双频伪距单点定位精度，B2aB3I 组合伪距单点定位 E、N、U 三个方向定位精度过差，除个别测站外，B1CB2a、B1CB3I、B1B2a、B1B3I 四种双频组合频率 E 方向和 N 方向定位精度相当，优于 0.6m，U 方向定位精度也相差不大，优于 2 m。GPS 系统 L1L2 组合，E 方向精度优于 0.5 m，N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 1.5 m。Galileo 系统 E1E5a 组合除个别测站外，E 方向和 N 方向精度优于 1.5 m，U 方向精度优于 3 m。

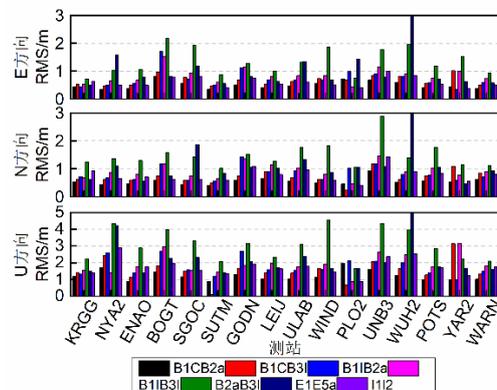


图 7 16 测站多天 BDS-3 双频无电离层组合伪距单点定位精度平均值

Fig.7 Average value of single-point positioning accuracy of BDS-3 dual-frequency ionospheric-free combined pseudorange at 16

如图 7 所示，对于无电离层组合模型下的 BDS-3 双频伪距单点定位精度，B2aB3I 组合定位精度相比其他四种组合精度略差，E 方向和 N 方向精度优于 2 m，U 方向精度优于 3 m。B1CB2a、B1CB3I、B1IB2a、B1IB3I 四种双频组合频率 E 方向和 N 方向定位精度相当，优于 1 m，U 方向定位精度也相差不大，优于 2 m。GPS 系统 L1L2 组合伪距单点定位 E 方向和 N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m。Galileo 系统 E1E5a 组合除个别测站外，E 方向和 N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m。

进一步统计得到 16 个测站多天 BDS-3、GPS、Galileo 不同模型双频伪距单点定位 E、N、U 三个方向定位精度的平均值，见表 4。

表 4 BDS-3 双频伪距单点定位精度 (RMS) 平均值统计

Tab.4 BDS-3 dual-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy (RMS) average statistics

系统	频率	非组合模型			无电离层组合模型		
		E	N	U	E	N	U
BDS-3	B1CB2a	0.45	0.56	1.39	0.55	0.59	1.31
	B1CB3I	0.46	0.54	1.41	0.64	0.77	1.67
	B1IB2a	0.60	0.85	1.98	0.87	0.96	1.91
	B1IB3I	0.56	0.74	1.45	0.94	0.99	1.98
	B2aB3I	3.43	5.19	8.96	1.36	1.49	2.99
GPS	L1L2	0.50	0.68	1.51	0.67	0.79	1.69
Galileo	E1E5a	0.94	1.03	2.12	0.84	0.86	1.87

如表 4 所示，BDS-3 系统 B1CB2a、B1CB3I、B1IB2a、B1IB3I 四种双频组合在非组合和无电离层模型下 E 方向和 N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m。B2aB3I 定位精度相比其他四种组合较差，这是因为 B2a 和 B3I 两个频率比较接近，在进行组合定位时放大了观测噪声，降低了定位精度，非组合模型下 E 方向精度优于 4 m，N 方向精度优于 6 m，U 方向精度优于 9 m，无电离层模型下 E 方向和 N 方向精度优于 2 m，U 方向精度优于 3 m。GPS 系统 L1L2 组合在非组合和无电离层模型下 E 方向和 N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m。Galileo 系统 E1E5a 组合除在非组合模型下 N 方向精度为 1.03 m，其他情况方向和 N 方向在非组合和无电离层模型精度优于 1 m，U 方向精度优于 3 m。同时发

现，BDS-3 系统 B1IB3I 组合、B1CB3I 组合、GPS 系统 L1L2 组合在非组合模型下的定位精度优于无电离层组合，BDS-3 系统 B2aB3I 组合和 Galileo 系统 E1E5a 组合在无电离层组合模型下的定位精度优于非组合模型，而 BDS-3 系统 B1CB2a、B1IB2a 两种双频组合在非组合模型下水平精度优于无电离层组合模型，高程定位低于无电离层组合模型，整体定位精度情况非组合模型下较优。

3.4 三频伪距单点定位

根据表 2 数据处理策略，采用三频非组合模型和三频无电离层两两组合模型对 BDS-3 系统 B1IB2aB3I、B1CB2aB3I 两种三频组合数据进行伪距单点定位进行数据处理，以 GPS 系统 L1L2L5 组合和 Galileo 系统 E1E5aE5b 组合定位性能对比，并且统计筛选出 16 个测站 E、N、U 三个方向定位精度平均值，三频非组合模型见图 8，三频无电离层两两组合模型见图 9。

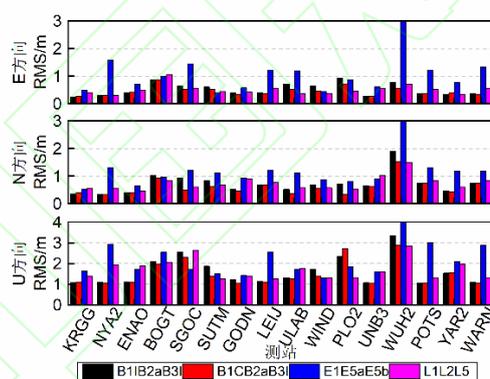


图 8 16 测站多天 BDS-3 三频非组合伪距单点定位精度平均值

Fig.8 Average value of single-point positioning accuracy of BDS-3 three-frequency non-combined pseudorange for 16 stations

如图 8 所示，对于 BDS-3 三频非组合伪距单点定位，除个别测站外，B1IB2aB3I、B1CB2aB3I 组合 E 方向和 N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m。GPS 系统 L1L2L5 组合除个别测站外 E 方向和 N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m。Galileo 系统 E1E5aE5b 组合不同测站定位精度相差较大，整体 E 方向和 N 方向精度优于 1.5 m，U 方向精度优于 3 m。

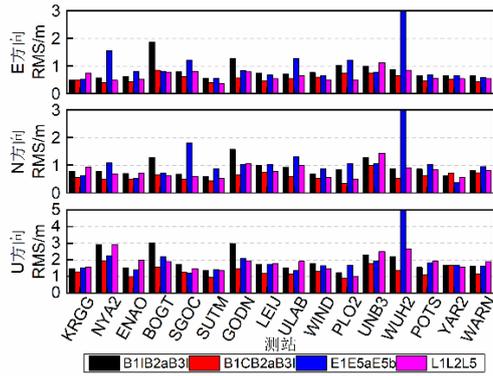


图 9 16 测站多天 BDS-3 三频无电离层两两组合伪距单点定位精度平均值

Fig.9 Average value of single-point positioning accuracy of BDS-3 three-frequency non-ionospheric pairwise pseudorange at 16 stations

如图 9 所示,对于 BDS-3 三频无电离层两两组合伪距单点定位, B1I2aB3I、B1C2aB3I 组合 E 方向和 N 方向精度优于 1 m, 除个别测站外, U 方向精度优于 2 m。GPS 系统 L1L2L5 组合 E 方向和 N 方向精度优于 1 m, U 方向精度优于 2 m。Galileo 系统 E1E5aE5b 组合除个别测站外 E 方向和 N 方向精度优于 1 m, U 方向精度优于 2 m。

进一步统计出 16 个测站多天 BDS-3、GPS、Galileo 不同模型三频伪距单点定位 E、N、U 三个方向定位精度的平均值, 见表 5。

表 5 BDS-3 三频伪距单点定位精度 (RMS) 平均值统计

Tab.5 BDS-3 three-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy (RMS) average statistics

系统	频率	非组合模型			无电离层两两组合模型		
BDS-3	B1I2aB3I	0.51	0.64	1.42	0.97	0.99	1.98
	B1C2aB3I	0.47	0.56	1.49	0.59	0.64	1.54
GPS	L1L2L5	0.54	0.73	1.65	0.67	0.80	1.82
Galileo	E1E5aE5b	0.83	0.96	1.99	0.81	0.84	1.80

如表 5 所示, 两种模型下 BDS-3 系统 B1I2aB3I、B1C2aB3I 组合 E 方向和 N 方向精度优于 1 m, U 方向精度优于 2 m。GPS 系统 L1L2L5 组合 E 方向和 N 方向精度优于 1 m, U 方向精度优于 2 m。Galileo 系统 E1E5aE5b 组合 E 方向和 N 方向精度优于 1 m, U 方向精度优于 2 m。同时发现, BDS-3 系统 B1I2aB3I 组合、B1C2aB3I 组合和 GPS 系统 L1L2L5 组合在非组合模型下的定位精度优于无电离层两两组合模型, Galileo 系统 E1E5aE5b 组

合在无电离层两两组合模型下的定位精度优于非组合模型。

4 结语

本文基于 16 个 MGEX 跟踪站多天多频 BDS-3 数据，首先评估了 BDS-3 正式开通服务后卫星可见数与 PDOP 值情况，然后分析了 BDS-3 单频、双频与三频伪距单点定位精度，并与 GPS 和 Galileo 相同对应频率进行对比，最后分析了非组合模型与无电离层组合模型对组合伪距单点定位解算的适用性。试验结果表明：

1) 在亚欧非地区 BDS-3 平均卫星可见数多于 GPS 和 Galileo，平均 PDOP 值小于 GPS 和 Galileo，且表现出亚太地区卫星可见数与空间几何构型优于欧洲与非洲地区，而在美洲地区，BDS-3 卫星数与卫星空间构型则低于 GPS，但优于 Galileo。

2) 对于 BDS-3 单频伪距单点定位，B1C、B1I、B2a、B3I 四个频率 E 方向精度优于 0.5m，N 方向精度优于 1 m，U 方向精度优于 2 m，定位精度关系为： $B1C > B1I > B3I > B2a$ 。B1C 和 B1I 频率定位精度优于 GPS 系统 L1 和 L2 频率、Galileo 系统 E1 和 E5a 频率定位精度，B3I 定位精度低于 GPS 系统 L1 频率定位精度，但优于 GPS 系统 L2 和 Galileo 系统 E1 和 E5a 频率定位精度，B2a 频率定位精度低于 GPS 系统 L1 频率定位精度，优于 GPS 系统 L2 频率和 Galile 系统 E1、E5a 频率定位精度。

3) 对于 BDS-3 双频伪距单点定位，双频非组合和双频无电离层组合模型下 BDS-3 系统 B1CB2a、B1CB3I、B1IB2a、B1IB3I 四种组合频率 E 方向和 N 方向定位精度优于 1 m，U 方向定位精度为 2 m。双频非组合模型下 B2aB3I 组合三个方向定位精度较差，双频无电离层组合模型下 B2aB3I 组合定位精度略好，E 方向和 N 方向定位精度优于 1.5 m，U 方向精度优于 3 m。B1CB2a、B1CB3I 两种模型下的定位精度要优于 GPS 系统 L1L2 和 Galileo 系统 E1E5a 定位精度，B1IB2a、B1IB3I 两种模型下的定位精度要底于 GPS 系统 L1L2，但

优于 Galileo 系统 E1E5a 定位精度 ,B2aB3I 定位精度低于 GPS 系统 L1L2 和 Galileo 系统 E1E5a 定位精度。

4) 对于 BDS-3 三频伪距单点定位 , 三频非组合和三频无电离层两两组合模型下 B1IB2aB3I、B1CB2aB3I 组合 E 方向和 N 方向定位精度优于 1 m ,U 方向定位精度优于 2 m , BDS-3 两种三频组合定位精度整体上优于 GPS 系统 L1L2L5 组合和 Galileo 系统 E1E5aE5b 组合 ,且无论哪种模型下三频组合伪距单点定位精度都较对应双频模型下的定位精度有所提升。

5) 对于不同模型对 BDS-3 双频与三频组合伪距单点定位的适用性 ,B1CB3I、B1IB3I、B1CB2a、B1IB2a 双频组合适合利用非组合模型进行定位 , B2aB3I 适合利用无电离层模型进行定位 , B1IB2aB3I 和 B1CB2aB3I 都适合利用非组合模型定位。

参考文献

- [1] Li Xiaojie, Liu Xiaoping, Zu Anran, et al. Orbit Accuracy for BDS-3 Satellites During the Earth Eclipsing Period in Basic[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 854-861(李晓杰,刘晓萍,祖安然,徐君毅,刘帅,辛洁,郭靖蕾.基本导航模式下 BDS-3 卫星地影期间的定轨精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(6):854-861)
- [2] Mao Ya, Wang Qianxin, Hu Chao, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 53-61 (毛亚,王潜心,胡超,杨鸿毅,张铭彬.BDS-3 卫星钟差特性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(1):53-61)
- [3] Cai Hongliang, Meng Yinan, Geng Tao, et al. Initial Results of Precise Orbit Determination Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations for BDS-3 Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1493-1500(蔡洪亮,孟轶男,耿涛,谢新.北斗三号卫星星间联合精密定轨初步结果[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(10):1493-1500)
- [4] Shi J, Ouyang C, Huang Y, et al. Assessment of BDS-3 global positioning service: ephemeris, SPP, PPP, RTK, and new signal[J]. *GPS Solutions*, 2020,24(3)
- [5] Lv Y, Geng T, Zhao Q, et al. Initial assessment of BDS-3 preliminary system signal-in-space range error[J].

- [6] Hu C,Wang Q,Wang Z,et al. A New-Generation BeiDou (BDS-3) Experimental Satellite Precise Orbit Determination with an Improved Cycle-Slip Detection and Repair Algorithm[J]. Sensors 2018, 18(5): 1402
- [7] Li J, Yang Y, He H, et al. Benefits of BDS-3 B1C/B1I/B2a triple-frequency signals on precise positioning and ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 1-10
- [8] Zhang X, Wu M, Liu W, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: New-generation navigation signals[J]. Journal of geodesy, 2017, 91(10): 1225-1240
- [9] Jiao G, Song S, Ge Y, et al. Assessment of BeiDou-3 and multi-GNSS precise point positioning performance[J]. Sensors, 2019, 19(11): 2496
- [10] Zhang Y, Wang H, Chen J, et al. Calibration and impact of BeiDou satellite-dependent timing group delay bias[J]. Remote Sensing, 2020, 12(1): 192
- [11] Dai P, Ge Y, Qin W, et al. BDS-3 time group delay and its effect on standard point positioning[J]. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1819
- [12] Jiao G, Song S, Liu Y, et al. Analysis and Assessment of BDS-2 and BDS-3 Broadcast Ephemeris: Accuracy, the Datum of Broadcast Clocks and Its Impact on Single Point Positioning[J]. Remote Sensing, 2020, 12(13): 2081
- [13] Luo X, Lou Y, Gong X, et al. Benefit of sparse reference network in BDS single point positioning with single-frequency measurements[J]. The Journal of Navigation, 2018, 71(2): 403-418
- [14] Mu R, Dang Y, Xu C. BDS-3/GNSS data quality and positioning performance analysis[C]//China Satellite Navigation Conference. Springer, Singapore, 2020: 368-379
- [15] Guan Q, Fan C, Zheng J, et al. Multistep weighted least squares estimation method for improving single-point positioning accuracy[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2019, 13(3): 038503
- [16] Yang Y, Xu Y, Li J, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. Sci. China Earth Sci, 2018, 61(5): 614-624
- [17] Cai C, Pan L, Gao Y. A precise weighting approach with application to combined L1/B1 GPS/BeiDou positioning[J]. The Journal of Navigation, 2014, 67(5): 911-925
- [18] Zhang B C, Ou J K, Yuan Y B, et al. Calibration of slant total electron content (sTEC) and Satellite-Receiver's differential code biases (DCBs) with uncombined precise point positioning (PPP) technique[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2011,40(4): 447-453
- [19] Peng Li, Wang Ling, Huang Wende, Man Xiaosan. Positioning Performance Comparison and Analysis on BDS Dual-and Triple Frequency Static Precise Point Positioning[J]. GNSS World of China,2017,42(1):53-58
(彭利,王玲,黄文德,满小三.北斗双频/三频静态精密单点定位性能比较与分析[J].全球定位系统,2017,42(1):53-58)
- [20] Zhang Xiaohong,Liu Gen,Guo Fei,et al. Model Comparison and Performance Analysis of Triple-frequency BDS Precise Point Positioning[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2018,43(12):2124-2130 (张小红,柳根,郭斐,李昕.北斗三频精密单点定位模型比较及定位性能分析[J].武汉大学学报 信息科学版,2018,43(12):2124-2130)
- [21] Wang A, Chen J, Zhang Y, et al. Evaluating the impact of CNES real-time ionospheric products on multi-GNSS single-frequency positioning using the IGS real-time service[J]. Advances in Space Research,

2020, 66(11): 2516-2527

- [22] Zhang Y, Chen J, Gong X, et al. The update of BDS-2 TGD and its impact on positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(11): 2645-2661
- [23] Wang J J, Wang J, Sinclair D, et al. Tropospheric delay estimation for pseudolite positioning[J]. *Positioning*, 2005, 1(9)
- [24] Dawidowicz K. Igs08.atx to igs14.atx change dependent differences in a GNSS- derived position time series[J]. *Acta Geodyn. Geomater.* 2018 : 363–378
- [25] Rebischung P, Schmid R. IGS14/igs14. atx: a new framework for the IGS products[C]//AGU Fall Meeting 2016 , 2016
- [26] Lemmon T R, Gerdan G P. The Influence of the Number of Satellites on the Accuracy of RTK GPS Positions[J]. *Australian surveyor*, 1999, 44(1): 64-70
- [27] Han Y B, Ma L H, Qiao Q Y, et al. Functions of retired GEO communication satellites in improving the PDOP value of CAPS[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(3): 423-433
- [28] D'EON R G, Delparte D. Effects of radio - collar position and orientation on GPS radio - collar performance, and the implications of PDOP in data screening[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2): 383-388

Performance Analysis of BDS-3 Multi-frequency Pseudorange Positioning

LIU Mingliang¹ AN Jiachun¹ WANG Zemin^{1*} ZHANG Baojun¹ SONG Xiangyu^{2,3}

¹ Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

³ Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang 050043, China

Abstract: Objectives: BDS-3 officially opened its global service on July 31, 2020. To evaluate the BDS-3 global positioning performance in detail. Based on multi-day measured data from 16 MGEX tracking stations around the world. **Methods:** Net_Diff software was used to carry out the global BDS-3 single-frequency, dual-frequency non-ionospheric combination and dual-frequency non-combination model under dual-frequency, three-frequency non-combination model and three-frequency non-ionospheric pairwise combination model, three-frequency pseudorange single Point positioning solution experiment. And compare with GPS, Galileo some frequencies. **Results:** The results show that the number of satellites and spatial geometry of BDS-3 in Asia, Europe and Africa are better than GPS and Galileo. For BDS-3 single-frequency pseudo-range single-point positioning, the four frequencies of B1C, B1I, B2a, and B3I have four frequencies of E direction accuracy. It is better than 0.5 m, the accuracy of the N direction is better than 1 m, and the accuracy of the U direction is better than 2 m. Compared with GPS and Galileo, the positioning accuracy relationship is: B1C>B1I>L1>B3I>B2a>E1>L2>E5a. For BDS-3 dual-frequency combined pseudorange single-point positioning, the B2aB3I combined positioning is poor and not suitable for positioning. The B1CB2a, B1CB3I, B1IB2a, B1IB3I combined frequency positioning accuracy in the E and N directions is better than 1m, and the positioning accuracy in the U direction is better 2 m,

compared with GPS and Galileo, the positioning accuracy relationship is: B1CB2a> B1CB3I> L1L2> B1IB3I> B1IB2a> E1E5a> B2aB3I. For BDS-3 triple-frequency combined pseudo-range single-point positioning, the positioning accuracy of B1IB2aB3I and B1CB2aB3I in the E and N directions is better than 1 m, and the positioning accuracy in the U direction is better than 2 m. Compared with GPS and Galileo, the positioning accuracy relationship is: B1CB2aB3I> B1IB2aB3I> L1L2L2> E1E5aE5b. B1CB3I, B1IB3I, B1CB2a, B1IB2a dual-frequency combinations are suitable for positioning using non-combined models, B2aB3I is suitable for positioning using non-ionospheric models, and B1IB2aB3I and B1CB2aB3I are suitable for positioning using non-combined models. **Conclusions:** Combining the experimental results can draw conclusions, BDS-3 has better positioning performance on a global scale. Even some frequency positioning performance is better than GPS and Galileo, which can provide a certain reference for future BDS-3 related research.

Keywords:BDS-3; different models; multi-frequency; pseudo-range single point positioning

First Author: LIU Mingliang, PhD candidate, specializes in high-precision GNSS positioning, polar snow and ice monitoring. E-mail:liuming_liang@163.com

Corresponding author: WANG Zemin, professor. E-mail:zmwang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41941010, 41776195); Polar Science Collaborative Innovation Platform Project of Chinese Arctic and Antarctic Administration (CXPT2020007).