

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.05.018

北斗三号系统 PPP-B2b 信号定位服务模型及性能分析

田先才¹, 张龙平¹, 原亮¹, 徐君毅², 孙伟杰¹

(1. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100094;

2. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要:给出了 PPP-B2b 信号定位的观测模型和随机模型, 详细阐述了 PPP-B2b 增强改正模型和参数估计模型, 并进行了静态和动态定位实验。结果表明: 对于单系统, 在 30min 的收敛时间内, 北斗三号定位精度可以达到水平 0.118m(静态)、0.176m(动态), 高程 0.208m(静态)、0.423m(动态)以内, GPS 定位精度可以达到水平 0.113m(静态)、0.163m(动态), 高程 0.206m(静态)、0.377m(动态)以内; 对于北斗三号/GPS 双系统, 在 20min 的收敛时间内, 定位精度可以达到水平 0.092m(静态)、0.122m(动态), 高程 0.158m(静态)、0.312m(动态)以内。无论是收敛性还是定位精度, 均能满足北斗三号精密单点定位服务指标的要求。

关键词:北斗三号; 精密单点定位; PPP-B2b; 增强改正模型; 定位精度; 收敛性

中图分类号: P228.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2022)05-0162-09

Model and Performance Analysis for BDS-3 PPP-B2b Signal Positioning Service

TIAN Xian-cai¹, ZHANG Long-ping¹, YUAN Liang¹, XU Jun-yi², SUN Wei-jie¹

(1. Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China;

2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In this paper, the observation model and random model of PPP-B2b signal of positioning are given, the enhanced correction model and estimation model of PPP-B2b are described in detail, and the static and dynamic positioning experiments are carried out. The results show that for single system, within 30 minutes of convergence, BDS-3 positioning accuracy can reach 0.118m (static) and 0.176m (dynamic) in horizontal direction, and 0.208m (static) and 0.423m (dynamic) in vertical direction. GPS positioning accuracy can reach 0.113m (static) and 0.163m (dynamic) in horizontal direction, and 0.206m (static) and 0.377m (dynamic) in vertical direction. For BDS-3/GPS dual system, within 20 minutes of convergence, the positioning accuracy can reach 0.092m (static) and 0.122m (dynamic) in horizontal direction, and 0.158m (static) and 0.312m (dynamic) in vertical direction. Both convergence and positioning accuracy can meet the requirements of BDS-3 precise point positioning service index.

Key words: BDS-3; Precise point positioning; PPP-B2b; Enhanced correction model; Positioning accuracy; Convergence

收稿日期: 2021-11-26; **修订日期:** 2022-02-01

作者简介: 田先才(1994-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 GNSS 精密定位算法方面的研究。

通信作者: 张龙平(1988-), 男, 高级工程师, 主要从事 GNSS 精密定轨与定位方面的研究。

0 引言

北斗三号系统(BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3)由空间段的卫星星座,地面段的主控站、监测站、上行注入站和用户终端等三部分组成,设计星座由 30 颗卫星组成,包括 3 颗地球同步轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)卫星、3 颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星和 24 颗中圆地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星^[1-3]。BDS-3 融合了导航定位与通信数传的技术优势,与国外其他卫星导航系统相比,在提供基本定位导航授时(Positioning, Navigation, and Timing, PNT)服务功能的基础上,更加突出了高精度服务、短报文和位置服务,可以为全球用户提供定位导航授时、全球短报文通信和国际搜救三种服务,同时,还能为中国及周边地区用户提供星基增强、地基增强、精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)和区域短报文通信等四种区域服务^[4-6]。其中,PPP-B2b 信号作为数据播发通道,通过 BDS-3 地球静止轨道(GEO)卫星播发 BDS-3(24 颗 MEO 卫星与 3 颗 IGSO 卫星)及其他全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)精密轨道和钟差等改正参数,为我国及周边地区用户提供 PPP 服务,覆盖区域如图 1 所示^[7-8]。

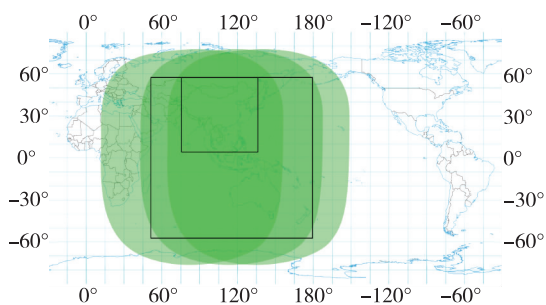


图 1 PPP-B2b 覆盖区

Fig. 1 Service area of PPP-B2b

近年来,PPP 技术逐渐发展成为 GNSS 相关技术领域的热点研究方向之一,促使其在广域精密实时定位、低轨卫星定轨、水汽实时反演和电离层实时监测、精密授时等方面显现出广阔的应用前景^[9-11]。对于传统 PPP 技术,最初只能依靠国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)分析中心提供滞后一个星期的精密星历做事后处理,时效性受到了很大限制。近年来,由于用户对实时产品的迫切需求,国内外众多研究及商业机构陆续提供实时服务,2002 年

IGS 成立了实时工作组,进行实时产品的相关研究;2007 年,IGS 开始运行 IGS-RTPPP 项目,实时估计卫星轨道和钟差;Furgo 公司于 2009 年开始启动全球精密定位服务,采用分布在全球的监测站进行实时轨道、钟差的估计与解算,并通过 GEO 卫星向用户播发实时增强信息改正数;Trimble 公司从 2011 年 9 月开始在全球范围内提供实时 GNSS 定位服务,其水平精度可以达到厘米级;2011 年,状态空间域(State Space Representation, SSR)信息格式正式成为海事无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Marine, RTCM)推荐的开放格式之一,多个国际分析中心采用 SSR 信息格式播发包含实时轨道、钟差改正的 NTRIP 数据流^[12-13]。

自 BDS-3 开通后,PPP-B2b 信号开始逐步提供服务,用户最快可以实时获取高精度的轨道和钟差等误差改正信息。目前,关于 PPP-B2b 全套定位算法和技术要点的介绍还不太全面,本文从 PPP-B2b 的观测模型、随机模型、增强改正模型及参数估计模型等关键算法模型进行了推导和研究,并重点阐述了 PPP-B2b 定位与增强改正的方法。最后,采用多模 GNSS 跟踪网(Multi-GNSS Experiment, MGEX)和国际 GNSS 监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)站观测数据,对 BDS-3、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、BDS-3/GPS 静态与动态 PPP 性能进行了验证与分析。

1 PPP-B2b 定位数学模型

1.1 观测模型

常用的 PPP 模型有无电离层组合模型、UofC(半和)模型和非差非组合模型等^[14-18]。为了消除电离层的影响,本文结合无电离层组合模型,即通过对双频伪距和载波相位观测量的线性组合,消除一阶电离层延迟的影响,构建 PPP-B2b 观测模型

$$\begin{aligned} P_{r,IF}^{S,s} &= \alpha P_{r,m}^{S,s} + \beta P_{r,n}^{S,s} \\ &= \rho_r^{S,s} + c(\delta t_r^S - \delta t^{S,s}) + Trop_r^{S,s} + \\ &\quad (I_{r,IF}^S - I_{IF}^{S,s}) + \kappa_{r,IF}^{S,s} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{r,IF}^{S,s} &= \alpha \Phi_{r,m}^{S,s} + \Phi P_{r,n}^{S,s} \\ &= \rho_r^{S,s} + c(\delta t_r^S - \delta t^{S,s}) + Trop_r^{S,s} + N_{r,IF}^{S,s} + \\ &\quad (\vartheta_{r,IF}^S - \vartheta_{IF}^{S,s}) + \psi_{r,IF}^{S,s} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha = f_m^2 / (f_m^2 - f_n^2), \beta = -f_n^2 / (f_m^2 - f_n^2) \quad (3)$$

式中, s, S 为卫星导航系统 S 的第 s 颗卫星; P, Φ 分别为无电离层组合伪距和载波相位观测值;

$\delta t_r^S, \delta t^{S,s}$ 分别为接收机和卫星钟差; $Trop_r^{S,s}$ 为对流层延迟误差; $l_{r,IF}^S, l_{IF}^{S,s}$ 分别为接收机、卫星伪距硬件延迟; $\vartheta_{r,IF}^S, \vartheta_{IF}^{S,s}$ 分别为接收机、卫星相位硬件延迟; $N_{r,IF}^{S,s}$ 为整周模糊度; $\kappa_{r,IF}^S, \psi_{r,IF}^{S,s}$ 分别为伪距、载波观测噪声; f_m, f_n 分别为信号 m 与 n 的频率。

由于上述模型部分参数间存在很强的相关性,因此不能直接估计这些参数,通常是将相关的参数进行合并或者当作已知量以消除观测方程秩亏问题,可以进一步写成

$$\begin{cases} P_{r,IF}^{S,s} = \rho_r^{S,s} + c\delta\tilde{t}_r^S - c\delta\tilde{t}^{S,s} + \\ \quad Trop_r^{S,s} + \kappa_{r,IF}^S \\ \Phi_{r,IF}^{S,s} = \rho_r^{S,s} + c\delta\tilde{t}_r^S - c\delta\tilde{t}^{S,s} + Trop_r^{S,s} + \\ \quad \tilde{N}_{r,IF}^{S,s} + \psi_{r,IF}^{S,s} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} c\delta\tilde{t}^{S,s} = c\delta t^{S,s} + l_{IF}^{S,s} \\ c\delta\tilde{t}_r^S = \delta t_r^S + l_{r,IF}^S \\ \tilde{N}_{r,IF}^{S,s} = N_{r,IF}^{S,s} + (\vartheta_{r,IF}^S - \vartheta_{IF}^{S,s}) \end{cases} \quad (5)$$

式中,卫星伪距硬件延迟 $l_{IF}^{S,s}$ 可以根据 B2b 信号播发的码间偏差进行转化改正,具体改正方法将在 1.3 节作详细介绍。

1.2 随机模型

PPP 中通常采用的随机模型方法有卫星高度角法、信噪比法和方差分量估计法等^[19-21]。本文采用基于高度角法的随机模型,其表达式为

$$\sigma^2 = f(\theta) = \frac{\sigma_0^2}{\sin^2\theta} \quad (6)$$

式中, θ 为卫星高度角; σ_0 为观测噪声的标准差; σ^2 为观测量的方差。

当高度角大于一定阈值时,影响效果将显著减小,为了避免高度角高于阈值时对应观测量的权重占比不合理,在实际数据处理过程中常采用分段定权法,得到的伪距和载波相位观测量的方差为

$$\sigma_p^2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin^2\alpha}, \theta > \alpha \\ \frac{\sigma_{P,0}^2}{\sin^2\theta}, \theta \leq \alpha \end{cases} \quad \sigma_\phi^2 = \begin{cases} \frac{\sigma_{\phi,0}^2}{\sin^2\alpha}, \theta > \alpha \\ \frac{\sigma_{\phi,0}^2}{\sin^2\theta}, \theta \leq \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\sigma_{P,0}^2, \sigma_{\phi,0}^2$ 分别为伪距和载波相位观测量的先验方差,在 PPP-B2b 随机模型中,对于 GPS 卫星分别取 $0.09\text{m}^2, 9 \times 10^{-6}\text{m}^2$,对于北斗的 IGSO、MEO 卫星分别取 $0.09\text{m}^2, 3.6 \times 10^{-5}\text{m}^2$; α 为高度角阈值,设为 30° 。

1.3 增强改正模型

BDS-3 PPP 服务信息在 PPP-B2b 信号中播发,包括卫星掩码(Type1)、卫星轨道改正数及用户测距精度指数(Type2)、码间偏差改正数(Type3)、卫星钟差改正数(Type4)、用户测距精度指数(Type5)、钟差改正数与轨道改正数-组合 1(Type6)、钟差改正数与轨道改正数-组合 2(Type7)、预留(Type8-62)、空信息(Type63)。目前稳定正常播发的类型有 Type1、Type2、Type3 及 Type4,其与广播星历与钟差之间的联系如图 2 所示。

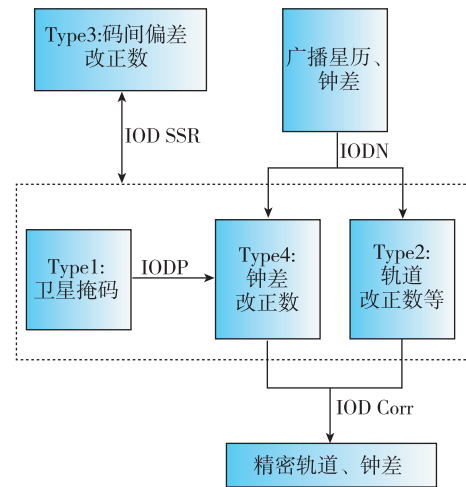


图 2 PPP-B2b 电文间的联系

Fig. 2 Links between messages of PPP-B2b

(1) 卫星轨道改正

轨道改正信息包括的参数为轨道改正向量 $\delta\Theta$ 在径向、切向和法向的分量。轨道改正值用于计算卫星位置改正向量 $\delta\mathbf{X}$, 同时还要联合利用广播星历计算出的卫星位置向量 \mathbf{X}_b , 改正的计算公式为

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_b - \delta\mathbf{X} \quad (8)$$

式中, \mathbf{X}_p 为经过轨道改正电文改正得到的卫星位置; \mathbf{X}_b 为广播星历计算得到的卫星位置; $\delta\mathbf{X}$ 为卫星位置改正数。

其中,卫星位置改正数 $\delta\mathbf{X}$ 的计算方法为

$$\delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \delta\Theta_r \\ \delta\Theta_a \\ \delta\Theta_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_r & e_a & e_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, e_r, e_a, e_c 分别为径向、切向和法向单位矢量; $\delta\Theta$ 为 PPP 信息中获得的轨道改正矢量。

(2) 卫星钟差改正

钟差改正电文包括的参数是相对于广播星历钟差的改正参数, 具体改正方法为

$$t_p = t_b - \frac{\delta T}{c} \quad (10)$$

式中, t_p 为经过钟差改正电文改正得到的卫星钟差; t_b 为广播星历计算得到的卫星钟差参数; c 为光速; δT 为 PPP-B2b 电文中获得的钟差改正参数。

(3) 伪距码间偏差改正

北斗各观测值都包含一个与信号跟踪模式相关的偏差, 在同步处理各频率各类信号时, 需要首先消除该偏差, 实现各类信号同步处理。如果用户端使用的测距信号为 B1Cp 与 B2ap 信号, 则 PPP-B2b 信号电文中播发的 B1Cp、B2ap 信号码间偏差分别为 l_{B1Cp}, l_{B2ap} , 对于无电离层组合模型的码间偏差改正方法为

$$l_{IF} = \frac{f_{B1C}^2}{f_{B1C}^2 - f_{B2a}^2} l_{B1Cp} - \frac{f_{B2a}^2}{f_{B1C}^2 - f_{B2a}^2} l_{B2ap} \quad (11)$$

式中, f_1, f_2 分别为 B1Cp 和 B2ap 载波中心频率(注: 其他频点信号类似)。

在误差改正上, 本文除了对轨道、钟差误差以及码间偏差进行了改正, 对对流层延迟、地球自转效应等其他误差也进行了改正, 具体改正与数据处理策略如表 1 所示。

表 1 误差改正与数据处理策略

Tab. 1 Error correction and data processing strategy

误差项	处理策略
卫星钟差	PPP-B2b 钟差改正数
卫星轨道误差	PPP-B2b 轨道改正数
伪距码间偏差	PPP-B2b 码间偏差改正数
电离层延迟	消电离层组合
对流层延迟	干延迟; Saastamoinen 模型修正 湿延迟; 随机游走估计
地球自转效应	模型修正
相对论效应	模型修正
潮汐	模型修正
接收机钟差	白噪声估计
整周模糊度	常数估计
模糊度解	浮点解
卫星高度截止角	10°

1.4 参数估计模型

在 GNSS 数据处理中, Kalman 滤波是目前解算效率最高的滤波方法, 由于该方法不用保存当前

历元之前的所有数据, 所以占用内存少, 解算效率高, 非常适用于 PPP 的解算工作, 其状态方程与观测方程为^[22-23]

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \boldsymbol{\omega}_{k-1} & \boldsymbol{\omega}_{k-1} \sim N(0, \mathbf{Q}_{k-1}) \\ \mathbf{L}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k & \mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $k, k-1$ 分别表示当前及前一历元时刻; \mathbf{X}_k 为状态向量; $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵; $\boldsymbol{\omega}_{k-1}, \mathbf{Q}_{k-1}$ 分别为动态噪声向量及其协方差矩阵; $\mathbf{v}_k, \mathbf{R}_k$ 分别为观测噪声向量及其协方差矩阵; $\mathbf{L}_k, \mathbf{H}_k$ 分别为观测向量及设计系数矩阵。

在 PPP-B2b 中, 状态向量包含了接收机位置与速度、接收机钟差、对流层湿延迟以及模糊度等参数, 具体表示为

$$\mathbf{X} = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, dt_r, Trop, N^1, \dots, N^s]^T \quad (13)$$

根据以下步骤计算状态估计值 $\hat{\mathbf{X}}_k$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k,k-1} &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{k,k-1} &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_k &= \mathbf{X}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{L}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k,k-1}) \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k,k-1} \end{aligned} \quad (14)$$

从以上递推公式可以看出, 如果系统的状态初值及其方差矩阵确定后, 仅需确定该时刻的观测方程, 即可计算得到任意时刻的状态估计值 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 。

2 PPP-B2b 实验分析

为了对 BDS-3/GPS 的 PPP 性能进行验证, 实验选择了 2021 年 5 月 1 日—2021 年 5 月 15 日 MGEX 和 iGMAS 站观测数据, 站点均位于 C59 号卫星服务范围内(站点分布如图 3 所示), 定位模式分别采用单 BDS-3、单 GPS 和 BDS-3/GPS 下的静态与动态(静态仿动态)模式。其中, 动态模式定位时将测站坐标当成随机游走过程进行估计, 其余参数的处理方法与静态定位相同。处理流程如图 4 所示。

PPP-B2b 对北斗多个信号播发了改正信息, 为了比较不同信号单系统及不同信号多系统融合的定位差异, 分别对单 BDS-3 的 B1CB2a、B1IB3I, GPS 的 L1L2, BDS-3 的 B1CB2a 与 GPS 的 L1L2 融合, 以及 BDS-3 的 B1IB3I 与 GPS 的 L1L2 融合等五种定位形式进行解算。下面以 2021 年 5 月 10 日 MGEX 中心的 JFNG 站为例, 以 4h 为单位时间进行静态与动态模式下的定位解算, 静态模式下各方向定位误差序列如图 5~图 7 所示, 动态模式下各方向定位误差序列如图 8~图 10 所示。

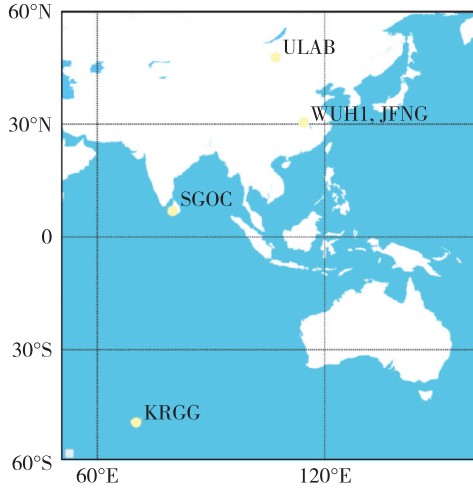


图 3 站点分布图

Fig. 3 Layout of stations

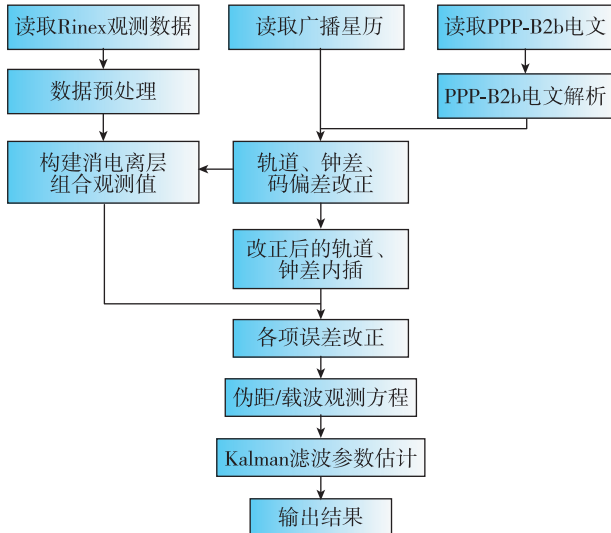


图 4 PPP-B2b 处理流程

Fig. 4 Process of PPP-B2b

从图 5~图 10 可以看出,无论是静态还是动态定位模式,BDS-3 与 GPS 融合的收敛性较任何单一系统都有很大的提升,并且收敛后误差分布比较平稳。为了验证收敛性与定位精度的整体性能,下

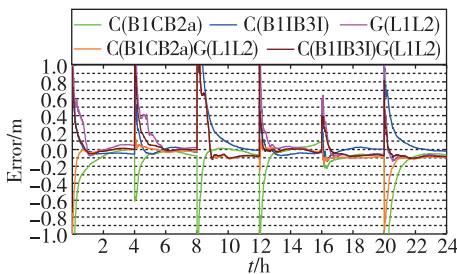


图 5 静态模式 E 方向定位误差

Fig. 5 East positioning error of static mode

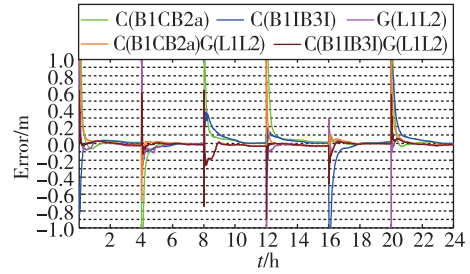


图 6 静态模式 N 方向定位误差

Fig. 6 North positioning error of static mode

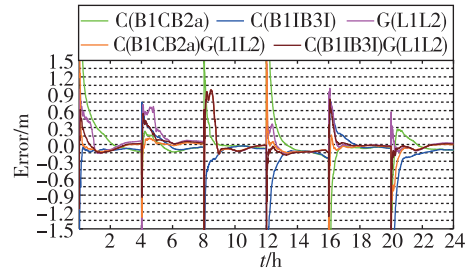


图 7 静态模式 U 方向定位误差

Fig. 7 Up positioning error of static mode

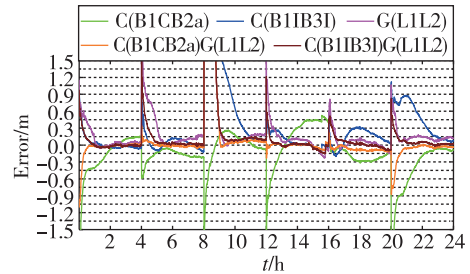


图 8 动态模式 E 方向定位误差

Fig. 8 East positioning error of dynamic mode

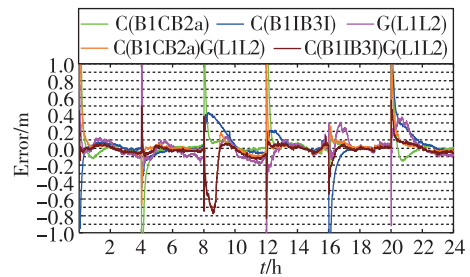


图 9 动态模式 N 方向定位误差

Fig. 9 North positioning error of dynamic mode

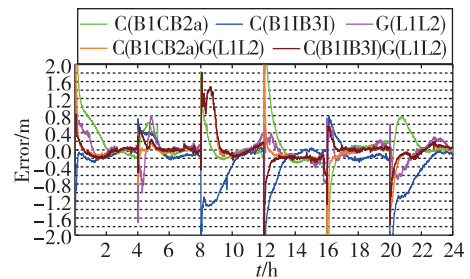


图 10 动态模式 U 方向定位误差

Fig. 10 Up positioning error of dynamic mode

面对 JFNG 站 7 天(5 月 1 日—5 月 7 日)的观测数据进行初步的收敛性实验分析,共得到 42 组(7 天×6 组)结果,并对不同收敛时刻下 42 组定位精度(RMS)求均值,如图 11~图 16 所示。

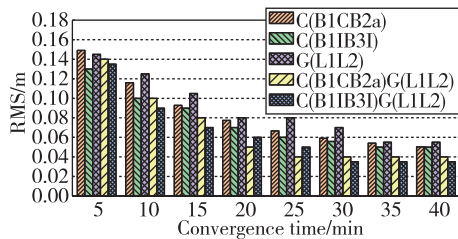


图 11 静态模式 E 方向收敛时间与定位精度
Fig. 11 East convergence time and positioning accuracy of static mode

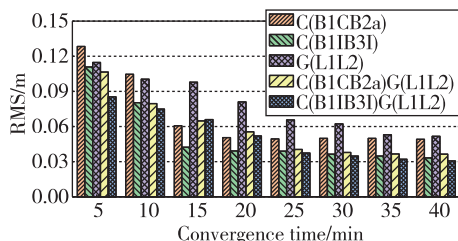


图 12 静态模式 N 方向收敛时间与定位精度
Fig. 12 North convergence time and positioning accuracy of static mode

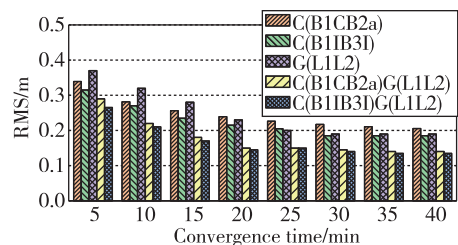


图 13 静态模式 U 方向收敛时间与定位精度
Fig. 13 Up convergence time and positioning accuracy of static mode

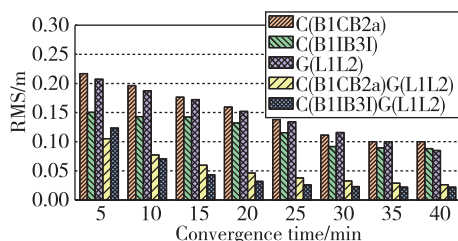


图 14 动态模式 E 方向收敛时间与定位精度
Fig. 14 East convergence time and positioning accuracy of dynamic mode

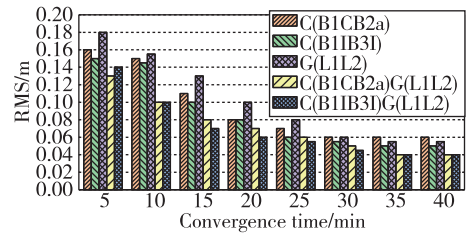


图 15 动态模式 N 方向收敛时间与定位精度
Fig. 15 North convergence time and positioning accuracy of dynamic mode

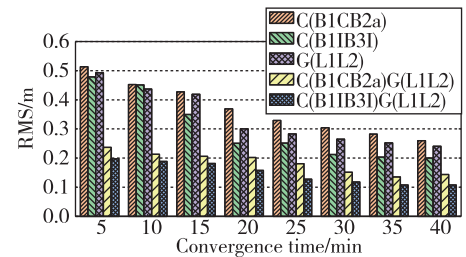


图 16 动态模式 U 方向收敛时间与定位精度
Fig. 16 Up convergence time and positioning accuracy of dynamic mode

从图 11~图 16 收敛时间与定位精度态势可以看出,随着收敛时间的延长,各方向定位精度越来越高,直到完全收敛至一定精度。静态模式下,单、双系统在 30min 内可以达到 E 方向 0.05m 左右、N 方向 0.04m 左右、U 方向 0.15m 左右的精度;动态模式下,单、双系统在 30min 内可以达到 E 方向 0.09m 左右、N 方向 0.06m 左右、U 方向 0.20m 左右的精度。

为了充分验证和分析 PPP-B2b 在服务覆盖区内的定位精度,选取了 iGMAS 的 WUH1 以及 MGEX 的 JFNG、ULAB、SGOC、KRGG 等 5 个站 15 天的观测数据进行实验分析,并统计不同模式下的定位精度(单系统 30min 收敛时间、双系统 20min 收敛时间后的定位精度),最后对每个站在不同定位模式及组合下共 90 组(15 天×6 组)的定位精度(RMS)求均值,如表 2 所示。

从表 2 各个站统计结果可以看出,对于单 GPS,静态水平、高程定位精度均值分别为 0.104m、0.199m,动态水平、高程定位精度均值分别为 0.152m、0.346m;对于 BDS-3 平稳过渡信号,单系统静态水平、高程定位精度均值分别为 0.103m、0.194m,单系统动态水平、高程定位精度均值分别为 0.159m、0.305m;BDS-3/GPS 双系统静态水平、高程定位精度均值分别为 0.080m、0.144m,双系统动态水平、高程定位精度均值分别为 0.105m、0.255m;对于 BDS-3 全球新体制信号,

表 2 PPP-B2b 定位精度(RMS,单位:m)
Tab. 2 Positioning accuracy of PPP-B2b (RMS, unit: m)

站	系统(信号)	静态			动态		
		East	North	Up	East	North	Up
JFNG	BDS(B1CB2a)	0.071	0.063	0.195	0.124	0.079	0.332
	BDS(B1IB3I)	0.069	0.060	0.191	0.120	0.071	0.219
	GPS(L1L2)	0.078	0.062	0.192	0.116	0.073	0.307
	BDS(B1CB2a)GPS(L1L2)	0.047	0.061	0.153	0.052	0.071	0.228
	BDS(B1IB3I)GPS(L1L2)	0.046	0.060	0.151	0.050	0.069	0.217
WUH1	BDS(B1CB2a)	0.068	0.074	0.202	0.144	0.101	0.423
	BDS(B1IB3I)	0.068	0.070	0.189	0.139	0.086	0.382
	GPS(L1L2)	0.065	0.067	0.193	0.125	0.086	0.377
	BDS(B1CB2a)GPS(L1L2)	0.046	0.054	0.136	0.088	0.077	0.312
	BDS(B1IB3I)GPS(L1L2)	0.042	0.055	0.128	0.079	0.071	0.278
ULAB	BDS(B1CB2a)	0.072	0.078	0.200	0.140	0.097	0.386
	BDS(B1IB3I)	0.076	0.070	0.195	0.131	0.087	0.302
	GPS(L1L2)	0.076	0.065	0.197	0.122	0.088	0.344
	BDS(B1CB2a)GPS(L1L2)	0.048	0.059	0.147	0.083	0.081	0.271
	BDS(B1IB3I)GPS(L1L2)	0.045	0.066	0.143	0.078	0.083	0.249
SGOC	BDS(B1CB2a)	0.085	0.078	0.208	0.143	0.099	0.384
	BDS(B1IB3I)	0.076	0.079	0.199	0.142	0.086	0.309
	GPS(L1L2)	0.084	0.075	0.206	0.131	0.086	0.353
	BDS(B1CB2a)GPS(L1L2)	0.056	0.073	0.156	0.085	0.088	0.277
	BDS(B1IB3I)GPS(L1L2)	0.057	0.068	0.149	0.066	0.082	0.259
KRGG	BDS(B1CB2a)	0.083	0.084	0.206	0.148	0.096	0.387
	BDS(B1IB3I)	0.084	0.077	0.197	0.145	0.089	0.311
	GPS(L1L2)	0.085	0.075	0.205	0.136	0.089	0.348
	BDS(B1CB2a)GPS(L1L2)	0.061	0.069	0.158	0.081	0.087	0.281
	BDS(B1IB3I)GPS(L1L2)	0.061	0.064	0.151	0.078	0.081	0.274
均值		0.066	0.068	0.178	0.110	0.084	0.312

单系统静态水平、高程定位精度均值分别为 0.107m、0.202m,单系统动态水平、高程定位精度均值分别为 0.169m、0.382m;BDS-3/GPS 双系统静态水平、高程定位精度均值分别为 0.082m、0.150m,双系统动态水平、高程定位精度均值分别为 0.112m、0.274m。

3 结论

首先,构建了 PPP-B2b 数学模型,并详细阐述了 PPP-B2b 技术要点。然后,根据 BDS-3 C59 号卫星播发的轨道、钟差等改正信息,进行了定位精度与收敛性的验证分析。最终分析结果可以归纳为

以下几点:

1) 无论是静态还是动态定位模式, BDS-3/GPS 融合的收敛性较任何单一系统都有很大的提升, 并且收敛后误差分布比较平稳;

2) 对于单系统, BDS-3 平稳过渡信号与全球新体制信号及 GPS 的 L1L2 信号定位精度基本一致, 对于双系统, BDS-3 平稳过渡信号/GPS 融合与 BDS-3 全球新体制信号/GPS 融合定位精度基本一致;

3) 在 30min 收敛时间内, 单系统静态水平、高程定位精度均值分别为 0.105m、0.198m, 动态水平、高程定位精度均值分别为 0.160m、0.344m, 在 20min 收敛时间内, 双系统静态水平、高程定位精度均值分别为 0.105m、0.198m, 动态水平、高程定位精度均值分别为 0.160m、0.344m, 收敛性和定位精度均满足 BDS-3PPP 服务指标要求。

致谢

感谢 iGMAS、MGEX 提供的数据。

参考文献

- [1] 杨长风. 中国北斗导航系统综合定位导航授时体系发展构想[J]. 中国科技产业, 2018(6): 32-35.
Yang Changfeng. Development concept of PNT system of China Beidou navigation system[J]. Science & Technology Industry of China, 2018(6): 32-35(in Chinese).
- [2] 谢军, 康成斌. 北斗三号导航星座的工程创新与发展[J]. Engineering, 2021, 7(5): 37-49.
Xie Jun, Kang Chengbin. Innovation and development of Beidou-3 satellite constellation[J]. Engineering, 2021, 7(5): 37-49(in Chinese).
- [3] 冉承其. 北斗卫星导航系统运行与发展[J]. 卫星应用, 2016(6): 13-16.
Ran Chengqi. Operation and development of Beidou satellite navigation system[J]. Satellite Applications, 2016(6): 13-16(in Chinese).
- [4] 杨元喜, 刘利, 李金龙, 等. 北斗特色服务及性能分析[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2135-2143.
Yang Yuanxi, Liu Li, Li Jinlong, et al. Beidou characteristic service and performance analysis[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2135-2143(in Chinese).
- [5] GB/T 39473-2020, 北斗卫星导航系统公开服务性能规范[S]. 2020.
GB/T 39473-2020, Open service performance specification of Beidou[S]. 2020(in Chinese).
- [6] 郭树人, 谢新, 蔡洪亮, 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, Xie Xin, Cai Hongliang, et al. Navigation and positioning technology system and service performance of Beidou-3[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821(in Chinese).
- [7] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件-精密单点定位服务信号 PPP-B2b(1.0 版)[S]. 2020.
Space signal ICD of Beidou satellite navigation system-PPP-B2B (version 1.0)[S]. 2020(in Chinese).
- [8] 何旭蕾, 刘成, 陈颖, 等. 北斗三号卫星 B2b 信号解析[J]. 电子技术应用, 2020, 46(3): 7-10+19.
He Xulei, Liu Cheng, Chen Ying, et al. B2b signal decode of Beidou-3 [J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(3): 7-10+19(in Chinese).
- [9] Yao Y, Peng W, Xu C, et al. The realization and evaluation of mixed GPS/BDS PPP ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(6): 01245.
- [10] Hga B, Bl B, Lna C, et al. LEO constellation optimization for LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS)-ScienceDirect [J]. Advances in Space Research, 2020, 66(3): 520-532.
- [11] Gong Y, Cai C, Dai W, et al. Least-squares collocation modeling of regional ionospheric TEC for accelerating real-time single-frequency PPP convergence[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2019, 13(6): 5504.
- [12] 王乐, 解世超, 王浩浩, 等. 利用改正数信息的北斗三号实时精密单点定位及性能分析[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(6): 43-50.
Wang Le, Xie Shichao, Wang Haohao, et al. Real time precise point positioning and performance analysis of Beidou-3 using correction information[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(6): 43-50(in Chinese).
- [13] 赵兴旺, 刘超, 邓健, 等. 一种改进的精密单点定位模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(4): 613-619.
Zhao Xingwang, Liu Chao, Deng Jian, et al. An improved precise point positioning model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(4): 613-619(in Chinese).
- [14] Geng J, Chen X, Pan Y, et al. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution [J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 0888.
- [15] Chen J, Wang J, Zhang Y, et al. Modeling and assessment of GPS/BDS combined precise point positioning [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(7): 1151.
- [16] Wang J, Yang Y, Zhang Q, et al. Analysis of inter-

- system bias in multi-GNSS precise point positioning [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019.
- [17] 王兵浩, 周建华, 陈俊平, 等. 北斗 WADS 分区综合改正数拟合模型及定位分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(4): 94-102.
Wang Binghao, Zhou Jianhua, Chen Junping, et al. The fitting model of Beidou WADS comprehensive correction number of districts and positioning analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(4): 94-102(in Chinese).
- [18] 刘旭春, 易武, 张正禄, 等. 高精度 GPS 系统硬件延迟解算方法研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 310-314.
Liu Xuchun, Yi Wu, Zhang Zhenglu, et al. Research on hardware delay solution method of high precision GPS[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 310-314(in Chinese).
- [19] Zhang Z L, Wang Y G, Teng H L, et al. BDS/GPS integrated precise point positioning algorithm based on high-degree DMCKF[J]. Modern Defence Technology, 2018.
- [20] Fu H, Zhang X, Hu Y. Accuracy analysis of GPS static precise point positioning algorithm[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019.
- [21] Wang R, Chai H, Liu Z, et al. Real-time kinematic precise point positioning based on combined GPS and GLO-NASS[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019.
- [22] 杨元喜. 动态 Kalman 滤波模型误差的影响[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 17-18.
Yang Yuanxi. Influence of dynamic Kalman filter model error[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(1): 17-18(in Chinese).
- [23] 阮仁桂, 郝金明, 刘勇. 正反向 Kalman 滤波用于动态精密单点定位参数估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(3): 279-282.
Ruan Rengui, Hao Jinming, Liu Yong. Forward and backward Kalman filter for parameter estimation of dynamic PPP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(3): 279-282(in Chinese).

(编辑:孟彬)