

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.03.014

北斗三号系统精密单点定位服务解析与应用

唐 斌¹, 李金龙², 贾小敏¹, 苏冉冉¹, 王 璇¹

(1. 中国人民解放军 32021 部队, 北京 100094;

2. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要:为提高北斗三号系统在高精度应用领域的竞争力,规划并设计了精密单点定位服务。基于精密单点定位服务信号接口控制文件,对北斗三号精密单点定位服务的信号设计进行解析,并提出了一种用户应用算法,最后给出了北斗三号精密单点定位服务的试验验证结果。试验结果表明,北斗三号精密单点定位服务水平定位精度优于 0.3m,高程精度优于 0.6m,收敛时间小于 30min。

关键词:北斗三号;精密单点定位服务;解析;应用

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2021)03-0103-06

Analysis and Application of Precision Point Positioning Service of Beidou-3

TANG Bin¹, LI Jin-long², JIA Xiao-min¹, SU Ran-ran¹, WANG Xuan¹

(1. Unit 32021 of PLA, Beijing 100094, China;

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

Abstract: In order to improve the competitiveness of the Beidou-3 system in the field of high-precision applications, a precision point positioning service is planned and designed for the Beidou-3 system. Based on the interface control document of precision point positioning (PPP) service, the signal of Beidou-3 PPP service is analyzed, and a user application algorithm is proposed in this paper. At last, the experimental verification results of the Beidou-3 PPP service are given. The test results show that the horizontal positioning accuracy of the Beidou-3 PPP service is better than 0.3m, the elevation accuracy is better than 0.6m, and the convergence time is less than 30 minutes.

Key words: Beidou-3; PPP service; Analysis; Application

0 引言

精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)服务在精准导航、国土测绘和海洋开发等领域具有广泛应用需求。目前,国内外已建立的代表性精密定位系统包括:美国喷气推进实验室研制的用于卫星定轨和科学研究的全球差分定位系统

(Global Differential GPS, GDGPS)^[1]、提供商业服务的 Navcom 公司的 StarFire 系统^[2]、Trimble 公司的 OmniSTAR 系统和 RTX 系统^[3],以及北京合众思壮科技股份有限公司构建并运营的“中国精度”全球星基精密定位系统^[4]等。各个商用精密定位系统在系统架构、服务模式和服务精度等方面基本类似,信号播发基本采用 Inmarsat 海事卫星的 L

收稿日期:2021-04-05;修订日期:2021-04-21

作者简介:唐斌(1978-),男,博士,高级工程师,主要从事卫星导航信号处理与应用等方面的研究。

波段,但其服务产品的播发协议与格式则采用不同设计,且出于商业保密原因,未公开具体播发格式内容。在世界各卫星导航系统中,欧洲的 Galileo 系统与日本的准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)已开始提供广域精密定位服务。Galileo 系统提供免费的高精度定位服务,具体播发协议在部分文献中有少量介绍,未发布正式接口控制文件(Interface Control Document, ICD), Galileo 系统近期开展了大量精密定位服务测试,定位精度达 0.2m^[5]。QZSS 可提供厘米级高精度实时定位增强服务(Centimeter-Level Augmentation Service, CLAS),采用自定义压缩版的 RTCM SSR 格式,具备对日本及周边区域提供精密定位服务的能力^[6]。北斗三号系统具备导航定位和通信数传两大功能,可提供定位导航授时、全球短报文通信、区域短报文通信、国际搜救、星基增强(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)和地基增强等服务^[7]。为进一步完善北斗增强体系建设,提高北斗三号系统在高精度应用领域的竞争力,为其规划并设计了 PPP 服务,并于 2020 年 8 月 3 日在北斗官方网站上发布了 PPP 服务信号(PPP-B2b)ICD^[8]。本文主要基于该 ICD,解析了北斗三号 PPP 服务的信号与设计,并提出了一种用户应用算法,最后给出了北斗三号 PPP 服务的试验验证结果。

1 PPP 服务设计解析

获取卫星导航服务,首先需要接收处理卫星信号,解调卫星导航电文。北斗三号 PPP 服务信息通过 3 颗地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星 B2b 信号播发,称为 PPP-B2b,提供 PPP 服务, B2b 信号载波频率为 1207.14 MHz,调制方式为 BPSK(10)。PPP-B2b 信号包括 I 支路和 Q 支路分量,北斗三号 3 颗 GEO 卫星目前仅播发 I 支路分量。PPP-B2b 电文信息速率为 500bit/s,经纠错编码后符号速率为 1000sps,播发卫星精密轨道和钟差等改正参数,具备为我国及周边地区用户提供 PPP 服务的能力。PPP-B2b 信号结构如表 1 所示^[8],下面分别对北斗三号 PPP 服务的信号与电文设计进行解析。

表 1 PPP-B2b 信号结构

Tab. 1 PPP-B2b signal structure

信号	支路	载波频率/MHz	调制方式	数据速率/(bit/s)
PPP-B2b	I	1207.14	BPSK(10)	500
	Q	1207.14	TBD	TBD

1.1 播发信号分量选择

北斗三号系统由 3 颗 GEO 卫星、3 颗倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星和 24 颗中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星组成,通过 B1、B2、B3 三个频点播发卫星导航信号,包括 B1C、B2a、B2b 等新体制公开信号,同时还保留了北斗二号系统重点信号 B1I 和 B3I,为北斗二号用户提供平稳过渡服务^[9]。北斗三号 IGSO/MEO 卫星播发的 B1C 和 B2a 信号主要用于与 GPS L1C、L5, Galileo E1OS、E5a 互操作, B2b 信号用于全球短报文通信出站服务;北斗三号 GEO 卫星播发的 B1C 和 B2a 为 SBAS 信号^[7]。因此,北斗三号系统选择 GEO 卫星的 B2b 信号播发 PPP 服务信息,为我国及周边地区提供 PPP 服务。

1.2 信号功率设计

北斗三号 GEO 卫星 B2 频点包括 B2a 和 B2b 两个信号分量。其中, B2a 信号规划用于北斗星基增强系统(BeiDou SBAS, BDSBAS)服务, BDSBAS 服务需要满足国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)最小落地电平标准要求(-158.5dBW)^[10]。因此, GEO 卫星 B2b 信号需要不影响 B2a 信号 ICAO 标准要求的前提下,播发改正信息和提供 PPP 服务。

目前, BDSBAS 服务 B2a 的空间信号 ICD 尚未发布,从 BDSBAS 服务 B1C 的 ICD 看, B1C SBAS 信号落地电平在 -161~-153dBW 之间^[11]。BDSBAS 服务 B2a 的落地电平应该至少与 B1C 相当。因此,提供 PPP 服务的 B2b 信号功率不会太高, PPP 服务 ICD 给出的 B2b 信号最小落地电平为 -160dBW^[8],也验证了这一点。

1.3 电文播发速率设计

在卫星播发信号功率确定的情况下,电文播发速率需要依据卫星播发信号的功率进行设计,电文播发速率越高,接收机最低解调门限功率越高。PPP-B2b 电文信息速率选择 500bit/s,是为确保满足用户接收机最低解调门限要求。

PPP 服务最小落地电平为 -160dBW,按照卫星信号落地电平与接收机接收载噪比关系式为

$$C/N_0 = \frac{P \cdot G/T}{k} \quad (1)$$

其中, C/N_0 为接收载噪比; P 为卫星信号到达接收机天线口面的功率;取最小落地电平为 -160dBW,高精度测量型接收机典型 G/T 值为

-32.7dB/K ; k 为玻尔兹曼常数, 值为 $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$; 取 dB 约为 -228.6dB/K , 对应接收机接收载噪比为 35.9dBHz 。再考虑 PPP 电文采用 64 进制低密度奇偶校验 (Low Density Parity Check, LDPC)(162,81) 信道编码, 编码增益约为 7.5dB , 实现损耗约为 2dB , 则对应接收机接收载噪比为 41.4dBHz 。

表 2 PPP 信号接收机处理链路预算

Tab. 2 The link budget for processing PPP signal

项目	链路预算
接收机天线口面功率/ dBW	-160
接收机典型 G/T 值/ (dB/K)	-32.7
玻尔兹曼常数/ (dB/K)	-228.6
设计编码增益/ dB	7.5
实现损耗/ dB	2
接收机接收载噪比/ dBHz	41.4

PPP 服务电文采用二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 调制方式, 解调误码率与输入信噪比的关系式为

$$P_{\text{BPSK}} = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{E/N_0}) \quad (2)$$

其中, P_{BPSK} 为 BPSK 调制误码率; erfc 为误差函数; E/N_0 为每比特信号能量与噪声功率谱密度之比。为保证电文准确接收, 取误码率 P_{BPSK} 不大于 10^{-6} , 根据式(2)算出 E/N_0 为 10.53dB 。 E/N_0 与接收机接收载噪比 C/N_0 的关系式为

$$[C/N_0] = [E/N_0] + [R] \quad (3)$$

其中, R 即为电文播发速率; $[X]$ 表示 X 取 dB 。在接收机接收载噪比为 41.4dBHz 时, 电文速率 $[R]$ 要求不超过 30.87dB 。在电文速率为 500bit/s 时, $[R]$ 为 26.99dB , 有 3.88dB 解调余量; 在电文速率取 1000bit/s 时, $[R]$ 为 30dB , 几乎没有解调余量, 接收机接收解调压力较大。因此, 在目前卫星播发功率下, PPP 电文速率按照 500bit/s 进行设计。

2 PPP 服务应用解析

北斗三号 PPP 服务以双频组合载波为主要服务模式, 采用单台双频接收机, 利用伪距与载波相位组合可以消除电离层延时的影响; 利用 GEO 卫星播发的高精度改正数结合相关模型可以消除轨道误差和卫星钟差; 选择地心地固系表示卫星轨道, 计算的参考框架同为地心地固系, 可以消去观

测方程中的地球自转参数。因此, 只要给定卫星的精密轨道和精密钟差, 就可以采用精密的观测模型, 像伪距定位一样, 单站计算出接收机的精确位置、钟差、载波相位模糊度以及对流层延时参数, 实现 PPP^[12]。具体计算过程如下:

首先, 建立双频无电离层组合伪距和载波相位观测量模型^[13]

$$\begin{aligned} p_{r,IF}^s &= \rho_r^s + dt_{r,IF} - dt_{\text{eph}}^s + \text{GDD}_{IF}^s + v_r^s + e_{r,IF}^s \\ \phi_{r,IF}^s &= \rho_r^s + dt_{r,IF} - dt_{\text{eph}}^s + \text{GDD}_{IF}^s + v_r^s + \text{bias}_{r,IF}^s + \epsilon_{r,IF}^s \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $p_{r,j}^s$ 和 $\phi_{r,j}^s$ 分别为接收机 r 接收卫星 s 播发的测距信号 j 测量得到的原始伪距与载波相位观测量; ρ_r^s 为地心地固系下信号发射时刻卫星天线相位中心与信号接收时刻接收机天线相位中心之间的几何距离; $dt_{r,IF} = dt_r + d_{r,IF}$, dt_r 和 $d_{r,j}$ 分别为信号接收时刻接收机钟差和接收机码硬件延迟; dt_{eph}^s 为根据导航电文中钟差参数计算得到的卫星钟差; GDD_{IF}^s 为卫星码群延迟 (Group Delay Differential, GDD); v_r^s 为对流层延迟误差; $\text{bias}_{r,IF}^s$ 为模糊度偏差项, 包含接收机和卫星的载波相位延迟; $e_{r,j}^s$ 和 $\epsilon_{r,j}^s$ 分别为伪距和载波相位观测量未建模误差。

PPP 解算的具体步骤如下:

1) 计算信号发射时刻的码相位时间 t_{sv}

$$t_{sv} = t_{rv} - \frac{p_{r,IF}^s}{c} \quad (5)$$

2) 根据电文信息 IODN (基本导航电文版本号) 值查找相应卫星广播星历参数, 计算信号发射时刻 t_s 和相应卫星钟差 Δt_{sv} (输入参数: t_{oc} 、 a_0 、 a_1 、 a_2) 并更新信号发射时刻

$$t_s = t_{sv} - \Delta t_{sv}(t_s) \quad (6)$$

3) 利用根据电文信息 IODN 值查找得到的卫星广播星历参数, 计算信号发射时刻 t_s 时北斗坐标系下卫星天线相位中心坐标 $\mathbf{r}^s(t_s)$ 和相对论效应改正项 Δt_r 。

4) 从 PPP-B2b 电文解析计算信号发射时刻卫星轨道改正数 $\nabla \mathbf{r}^s(t_s)$ 和卫星钟差改正数 $\nabla t_{sv}(t_s)$ 。

5) 以 PPP-B2b 电文改正信息的对象是北斗三号 B1C 信号为例, 对于 B1C/B2a 双频无电离层组合定位模式

$$\text{GDD}_{IF-B1C/B2a}^s = c \cdot \frac{k_{12} \text{DCB}_{B1C}^s - \text{DCB}_{B2a}^s}{k_{12} - 1} \quad (7)$$

其中, $k_{12} = \left(\frac{f_{B1C}}{f_{B2a}}\right)^2$; f_{B1C} 和 f_{B2a} 分别为北斗三

号 B1C 和 B2a 信号的载波频率; DCB_{B1C}^s 和 DCB_{B2a}^s 可以由 PPP-B2b 电文的信息类型 3 解析得到; c 为真空中的光速。

6) 计算星地几何距离 $\bar{\rho}_r^s$ 、地球自转效应改正 $\Delta\rho_r^s$ 和星地方向向量 $\mathbf{u}_r^s$, 其中接收机近似坐标可取伪距单点定位解

$$\bar{\rho}_r^s = |\mathbf{r}^s(t_s) - \nabla \mathbf{r}^s(t_s) - \bar{\mathbf{r}}_r(t_r)| \quad (8)$$

$$\Delta\rho_r^s = \frac{\dot{\Omega}_e(x^s \bar{y}_r - y^s \bar{x}_r)}{c} \quad (9)$$

$$\mathbf{u}_r^s = \frac{\mathbf{r}^s(t_s) - \nabla \mathbf{r}^s(t_s) - \bar{\mathbf{r}}_r(t_r)}{|\mathbf{r}^s(t_s) - \nabla \mathbf{r}^s(t_s) - \bar{\mathbf{r}}_r(t_r)|} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{r}^s(t_s)$ 为信号发射时刻 t_s 时卫星天线相位中心的位置向量; $\bar{\mathbf{r}}_r(t_r)$ 为信号接收时刻 t_r 时接收机天线相位中心位置近似向量; x^s 和 y_r 分别表示卫星和接收机在地心地固坐标系下位置向量的 x 、 y 方向分量; $\dot{\Omega}_e = 7.2921150 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 为地球自转角速度。

7) 计算对流层延迟干分量 $v_{r,h}^s$ 与湿分量映射函数 $\phi_{r,w}^s$, 天顶方向湿分量延迟初始值 $\bar{v}_{r,w}$ 可取零。

8) 计算模糊度偏差项初值

$$\bar{bias}_{r,IF}^s = \phi_{r,IF}^s - p_{r,IF}^s$$

接收机钟差近似值可取伪距单点定位解算得到的接收机钟差值。

9) 依据双频无电离层组合伪距和载波相位观测量模型, 计算伪距和载波相位观测量预测值

$$\bar{p}_{r,IF}^s = \bar{\rho}_r^s + \Delta\rho_r^s + \bar{dt}_{r,IF} - dt_{eph}^s + GDD_{IF}^s + v_{r,h}^s + \phi_{r,w}^s \bar{v}_{r,w} \quad (11)$$

$$\bar{\phi}_{r,IF}^s = \bar{\rho}_r^s + \Delta\rho_r^s + \bar{dt}_{r,IF} - dt_{eph}^s + GDD_{IF}^s + v_{r,h}^s + \phi_{r,w}^s \bar{v}_{r,w} + \bar{bias}_{r,IF}^s$$

其中, $dt_{eph}^s = c \cdot (\Delta t_{sv}(t_s) + \Delta t_r) - \nabla t_{sv}(t_s)$ 。

10) 重复 1)~9) 就可以获得 n 颗卫星观测量及计算值 (Observed Minus Computed, OMC) 向量 $\Delta p_{r,IF}^s$ 和 $\Delta \phi_{r,IF}^s$

$$\Delta p_{r,IF}^s = p_{r,IF}^s - \bar{p}_{r,IF}^s \quad (12)$$

$$\Delta \phi_{r,IF}^s = \phi_{r,IF}^s - \bar{\phi}_{r,IF}^s$$

根据以上 PPP 数学模型和计算过程, 利用扩展卡尔曼滤波算法即可获取每个历元接收机坐标、接收机钟差、天顶对流层湿分量延迟和各卫星模糊度偏差项估值及其协方差矩阵, 从而实现 PPP, 具体数据处理策略如表 3 所示。

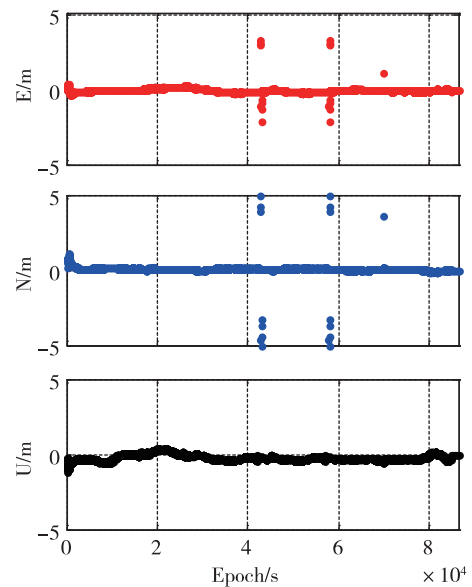
表 3 北斗三号 PPP 数据处理策略

Tab. 3 Data processing strategy of Beidou-3 PPP

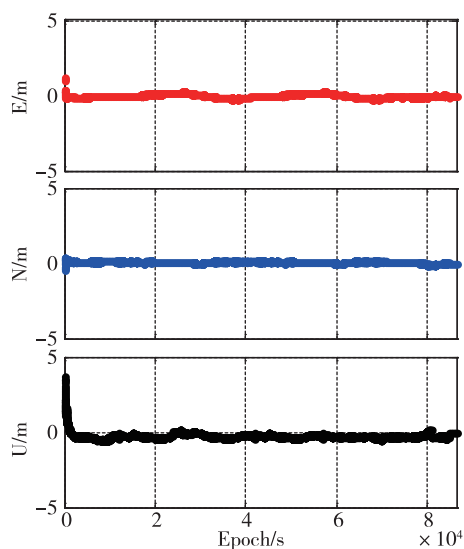
项目	处理策略
观测模型	非差非组合
对流层	随机游走估计
接收机钟差	白噪声估计
采样间隔/s	1
高度截止角/(°)	5
天线相位缠绕	模型改正
参数估计	扩展卡尔曼滤波

3 试验结果

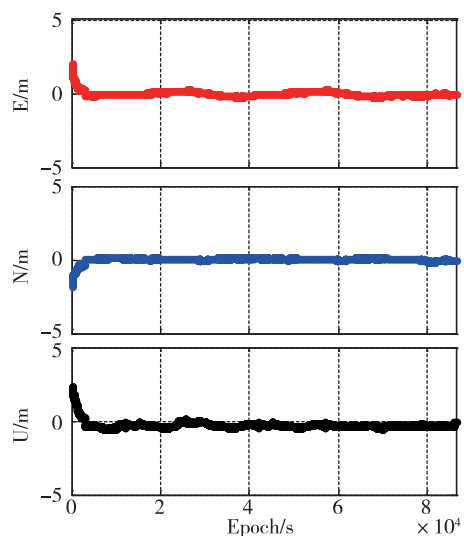
利用北斗三号系统在中国华北、西北、东北以及东南地区 4 个测站^[14] 布设的应用验证终端接收处理 PPP-B2b 信号, 并基于 B1C/B2a 频点伪距和载波相位观测数据、广播电文和 B2b 精密电文分别进行北斗单系统动态 PPP 解算, 对北斗三号系统 PPP 服务的定位精度和收敛时间进行验证和评估。定位精度评估按照上述 PPP 的解算方式, 使用北斗三号播发的 PPP 信息进行轨道、钟差及码间偏差改正, 获取 PPP 结果, 然后将解算结果与验证终端的真实位置作差, 统计水平和高程精度 (95%)。收敛时间的判断按照北斗三号 B1C/B2a PPP 收敛到水平 0.3m 和高程 0.6m 的精度, 并持续超过 10min。图 1 和图 2 所示分别为 2021 年 3 月 22 日各测站验证终端的定位误差与收敛时间, 图 3 进一步给出了华北测站验证终端的误差波动细节。



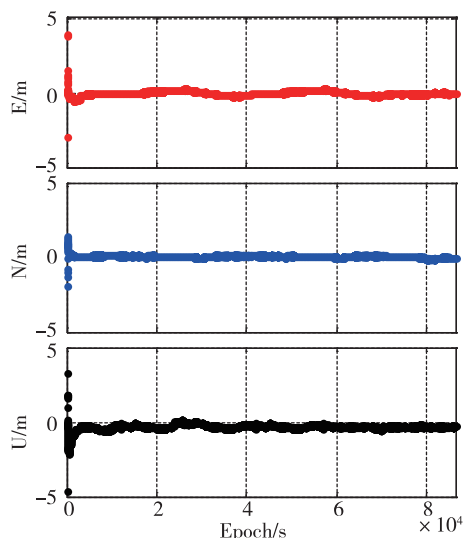
(a) 华北测站



(b) 西北测站



(c) 东北测站



(d) 东南测站

图 1 2021 年 3 月 22 日各个测站验证终端定位误差

Fig. 1 The positioning error of the verification terminal at various stations on March 22, 2021

从图 1、图 2 和图 3 可以看出,国内各地区测站应用验证终端在进行 B1C/B2a PPP 时,可以较快地收敛,且收敛后误差波动较为平稳。对于华北测站出现的少量离散点,主要原因是验证终端采用的是普通测量型天线,终端本身不具备抗干扰或抗多径功能,产生离散点应该是外界无意干扰导致。对 2021 年 3 月中国华北、西北、东北以及东南地区 4 个测站的应用验证终端定位结果和收敛时间进行统计,如表 4 所示。

长期统计结果表明,评估期间中国区域内各测站北斗单系统 PPP 水平精度(95%)均值为 0.21m,高程均值为 0.42m,收敛时间(首次收敛至水平 ≤ 0.3 m 且高程 ≤ 0.6 m 并持续 10min 的时间)均值约为 27min。

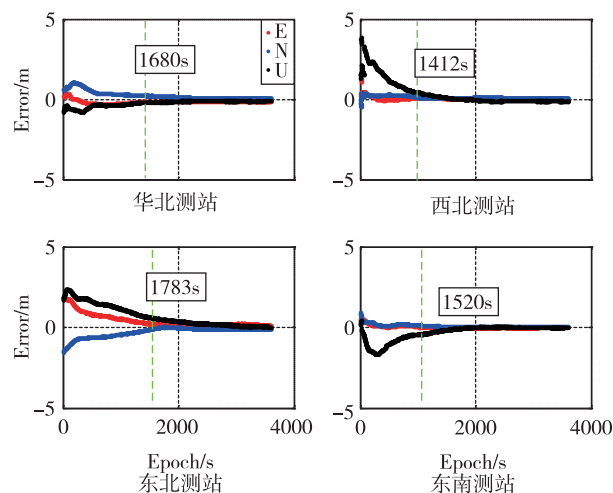


图 2 2021 年 3 月 22 日各个测站验证终端收敛时间

Fig. 2 The convergence time of the verification terminal at various stations on March 22, 2021

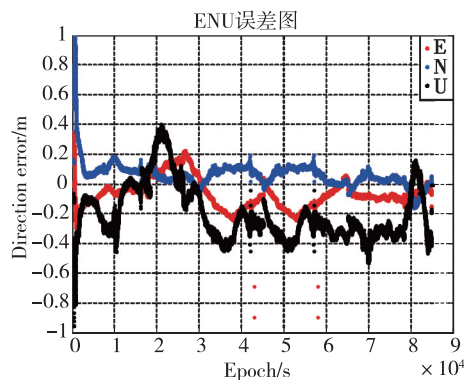


图 3 2021 年 3 月 22 日华北测站验证终端定位误差细节

Fig. 3 The details of the positioning error at the North China station on March 22, 2021

表 4 2021 年 3 月各测站 PPP 定位精度和收敛时间统计
Tab. 4 Statistics of PPP positioning accuracy and convergence
time from each station in March 2021

序号	测站	水平/m	高程/m	收敛时间/min
1	华北	0.18	0.38	26.20
2	西北	0.24	0.48	28.31
3	东北	0.20	0.39	27.52
4	东南	0.23	0.44	28.10
5	均值	0.21	0.42	27.53

4 小结

本文基于北斗系统官方网站发布的 PPP 服务信号 ICD,对北斗三号系统 PPP 服务信号设计进行了解析,并提出了一种用户应用算法。利用北斗三号系统在中国华北、西北、东北以及东南地区设立的 4 个测站的验证终端接收处理 PPP-B2b 信号,试验期间中国区域内各测站北斗单系统 PPP 水平精度(95%)优于 0.3m,高程优于 0.6m,收敛时间均值小于 30min。北斗三号系统 PPP 服务可以在精准导航、国土测绘和海洋开发等高精度应用领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] Bonniksen C. Global Differential GPS (GDGPS) system future[EB/OL]. [2020-06-09]. <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2020-07/bonnixsen.pdf>.
- [2] Dixon K. StarFire™: a global SBAS for sub-decimeter[EB/OL]. http://www.navcomtech.com/navcom_en_US/docs/download_center/white_papers/current/starfire_global_sbas_for_sub_decimeter_precise_point_positioning.pdf.
- [3] Trimble. Trimble correction services for survey[EB/OL]. <http://positioningservices.trimble.com/wp-content/uploads/2019/02/Trimble-Correction-Services-for-Survey.pdf>.
- [4] ChinaCM. China precision-high precision satellite-based augmentation system[EB/OL]. <http://www.chinacm.org.cn/About.asp>.
- [5] Inside GNSS. Galileo's high accuracy service: field experimentation of data dissemination schemes[EB/OL]. [2020-08-03]. <https://insidegnss.com/galileos-high-accuracy-service-field-experimentation-of-data-dissemination-schemes/>.
- [6] 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): 1-4.
- [7] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 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.
- [8] Guo Shuren, Cai Hongliang, Meng Yinan, et al. BD3 RNSS technical characteristics and service performance[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821(in Chinese).
- [9] China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document: precise point positioning service signal PPP-B2b (Version 1.0)[S]. 2020: 07.
- [10] 陈忠贵, 武向军. 北斗三号卫星系统总体设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 835-845.
- [11] Chen Zhonggui, Wu Xiangjun. General design of the third generation BeiDou navigation satellite system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 835-845(in Chinese).
- [12] IWG Members. SBAS L5 DFMC interface control document[S]. 2016: 10.
- [13] China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document: satellite based augmentation system service signal BDSBAS-B1C (Version 1.0)[S]. 2020: 07.
- [14] 王乐, 解世超, 王浩浩, 等. 利用改正数信息的北斗三号实时 PPP 及性能分析[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(6): 37-43.
- [15] Wang Le, Xie Shichao, Wang Haohao, et al. BDS-3 real-time precise point positioning using correction information and performance analysis[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(6): 37-43(in Chinese).
- [16] 周锋, 徐天河. GPS/BDS/Galileo 三频 PPP 模型及性能分析[J]. 测绘学报, 2021, 50(1): 61-70.
- [17] Zhou Feng, Xu Tianhe. Modeling and assessment of GPS/BDS/Galileo triple frequency precise point positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 61-70(in Chinese).
- [18] 蒲俊宇, 李晓杰, 郭睿, 等. 北斗全球系统 GEO 卫星 SBAS 信号质量评估[J]. 天文学进展, 2020, 38(4): 448-456.
- [19] Pu Junyu, Li Xiaojie, Guo Rui, et al. SBAS signal duality assessment of Beidou global system[J]. Progress in Astronomy, 2020, 38(4): 448-456(in Chinese).

(编辑:李瑾)