

北斗三号实时精密定位授时系统设计与实现

周志行¹ 夏文龙¹ 宋剑鹏¹ 廖本钊¹ 郭庆功¹

ZHOU Zhihang XIA Wenlong Song Jianpeng Liao Benzha0 Guo Qinggong

摘要

针对传统定位授时设备单机作业能力弱、定位授时精度低、GNSS 动态授时接收机研究少等问题,设计实现了基于北斗三号精密单点定位服务信号(PPP-B2b)的实时精密定位与授时设备,所设计的设备通过全球卫星导航系统(GNSS)接收机接收北斗卫星信号,将卫星观测值、卫星广播星历以及 PPP-B2b 改正数输出给 ZYNQ 信号处理平台,ZYNQ 的 ARM 端进行 PPP-B2b 接收机位置与钟差解算,输出接收机钟差到 FPGA 端,FPGA 端通过外接的高精度 10 MHz 铷钟,结合实时精密钟差解算结果,生成驯服后同步到北斗时间基准的秒脉冲(1PPS)。通过设计实现静态、动态测试系统对设备进行性能测试。实验结果表明,设计的定位授时设备可以实现静态厘米级、动态分米级的定位精度,静态授时精度优于 1 ns,动态授时精度优于 3 ns。

关键词

北斗三号;精密单点定位服务信号;高动态;实时精密单点定位;授时;全球卫星导航系统

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.040

0 引言

近年来,随着无人机、国防、无人驾驶等领域的飞速发展,对于多个传感器之间的时间和空间基准维持精度要求也越来越高^[1]。精确的时空基准维持要求获取系统中的各个传感器的准确位置坐标,并且将系统中的各个传感器同步到统一的时间基准^[2]。目前,基于全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的高精度定位和授时技术在军事、民用中使用广泛。

传统的 GNSS 定位授时设备通常使用伪距单点定位的方法进行定位和授时,其中使用伪距单点定位的方法解算位置和时间信息,能够实现米级的定位精度和 20 ns 级的授时精度^[3]。但是,上述方法不能满足分米级的定位和纳秒级的授时需求。而基于载波相位和精密星历的精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术可以实现静态厘米级、动态分米级的定位精度^[4]以及亚纳秒量级的授时精度^[5]。

北斗三号精密单点定位服务信号(PPP-B2b)信号于 2020 年正式提供 PPP 服务,为基于 PPP 的实时定位授时技术带来了新的解决方案,其通过北斗三号卫星实时播发卫星轨道和钟差改正数。使用 PPP-B2b 信号的定位授时精度与传统 PPP 技术相当,并且有无需连接网络的优势。本文基于北斗三号 PPP-B2b 信号,设计实现了基于 PPP-B2b 信号和 PPP 技术的定位授时设备,并测试分析了定位授时设备实现的精度指标。

1 PPP-B2b 精密定位授时原理

1.1 PPP 观测值

本文中的 PPP 算法使用双频无电离层组合,用于消除电离层延迟的高阶误差项,其观测方程可以表示为^[6-7]:

$$P_{IF} = \rho + cdt_r - cdt^s + d_{r,IF} - d_{IF}^s + M_w \cdot Z_w + \varepsilon_{IF} \quad (1)$$

$$L_{IF} = \rho + cdt_r - cdt^s + D_{r,IF} - D_{IF}^s + \lambda_{IF} N_{IF} + M_w \cdot Z_w + e_{IF} \quad (2)$$

式中: r 表示接收机, s 表示卫星; P_{IF} 表示双频无电离层组合伪距观测值(m); L_{IF} 表示双频无电离层组合载波相位观测值(m); ρ 表示接收机天线相位中心与卫星天线相位中心之间的几何距离(m); c 表示光速; dt_r 和 dt^s 表示接收机和卫星时钟相对于卫星系统的时钟差值; $d_{r,IF}$ 和 d_{IF}^s 表示双频无电离层组合的接收机伪距硬件延迟和相应卫星的伪距硬件延迟; $D_{r,IF}$ 和 D_{IF}^s 表示双频无电离层组合的接收机相位硬件延迟和相应卫星的相位硬件延迟; M_w 表示通过全球投影函数获取的湿投影函数; Z_w 表示接收机天顶方向对流程延迟湿分量(m); λ_{IF} 表示双频无电离层组合波长; N_{IF} 表示双频无电离层组合整周模糊度; ε_{IF} 和 e_{IF} 表示伪距和载波相位的误差噪声(m)。

1.2 B2b 精密星历恢复

目前北斗三号 PPP 服务通过北斗三号新频点 B2b 播发北斗三号卫星系统和其他 GNSS 卫星系统的改正参数,包括卫星轨道、钟差、差分码间偏差等改正项^[8]。其通过对应卫星播发广播星历,首先依照广播星历和卫星观测值计算出卫星

的位置和卫星钟差，然后从 PPP-B2b 改正数中获取卫星轨道和钟差改正项，最后修正广播星历中获取的卫星实时位置和钟差，恢复出 B2b 精密星历。具体流程如图 1 所示。



图 1 B2b 精密恢复流程

图 1 中，IODC 为 PPP-B2b 钟差改正数与轨道改正数匹配号，IODN 为卫星广播星历与 PPP-B2b 轨道改正数匹配号，SSR 为改正数版本号，只有各项匹配号匹配才能使用对应改正数改正相应的广播星历。单颗卫星精密星历具体恢复流程如下。

(1) 判断是否有 B2b 改正数，是否超过标称可用龄期，若可用则进入步骤 (2)。(2) B2b 改正数信息类型 2 和信息类型 4 的 IODC 是否匹配，版本号 SSR 是否匹配，若匹配则进入步骤 (3)。(3) 根据信息类型 2 中的星历 IODN 匹配号，判断该卫星是否有广播星历中 IODC 号和 IODN 相匹配的星历，若有则进入步骤 (4)。(4) 依据广播星历的数据，确定该卫星的位置和卫星钟差。(5) 根据 B2b 结构体中记录的改正数，和 PPP-B2b 空间接口文件中介绍的轨道和钟差修正算法，恢复出 B2b 精密星历，并且将解算的该卫星位置坐标记录下来。(6) 根据信息类型 2 中的 URA 指数指标，确定卫星定位精度，给该颗卫星分配相应的权重。

2 精密定位与授时系统设计

2.1 定位授时设备总体设计

依照 PPP 观测值观测方程解算要求以及 B2b 精密星历恢复原理，设计如图 2 所示的定位授时设备。

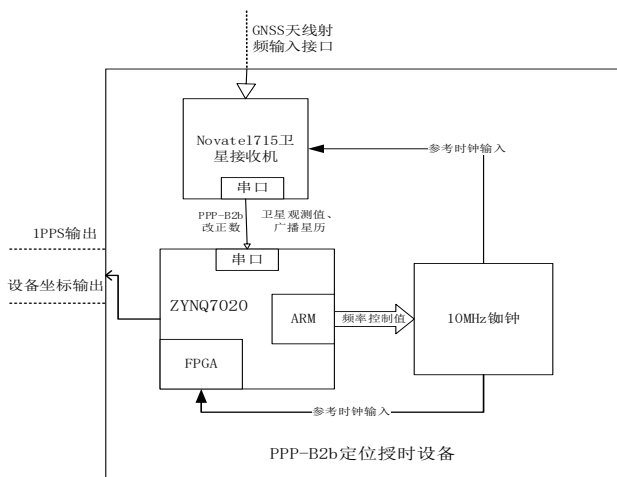


图 2 PPP-B2b 定位授时设备原理图

PPP-B2b 定位授时设备由 ZYNQ7020、诺瓦泰 (Novatel) OEM729 卫星接收机和 10 MHz 铷原子钟组成。ZYNQ7020 是赛灵思 (Xilinx) 的一款片上芯片，结合了现场可编程逻辑门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 芯片和 ARM 处理器核，可以进行高性能的数字信号处理和控制任务。诺瓦泰 (Novatel) OEM729 接收机接收卫星射频信号，其可以跟踪北斗卫星导航系统 (Beidou navigation satellite system, BDS) / 全球定位系统 (global positioning system, GPS) 卫星并通过串口实时输出观测值和导航电文。10 MHz 铷原子钟为标称频率为 10 MHz 的原子频标，其短期稳定度最高可达 10^{-12} 量级，用于给 ZYNQ7020 芯片和 Novatel 接收机提供高精度的外频标输入。

设备共有三个输入接口和两个输出接口，分别是：(1) GNSS 天线射频输入接口：GNSS 天线通过 SMA 接头连接到 novatel 接收机的馈电输入端口；(2) 1PPS 输出端口：FPGA 端驯服同步之后的 1PPS 输出端口，可用于给其他设备提供时间基准；(3) 设备坐标输出端口：通过串口输出解算出的设备实时坐标和时间信息。

本设备中使用 ZYNQ 的 ARM 端从卫星接收机实时接收观测值和导航电文，恢复出 B2b 精密星历，解算第一节中的 PPP 观测方程，输出设备的实时坐标和接收机钟差，其中接收机钟差用于计算产生 10 MHz 铷钟频率控制值和 FPGA 端秒脉冲 (1 pulse per second, 1PPS) 相位调整值。FPGA 端接收 10 MHz 铷钟参考时钟输入，并倍频到 100 MHz，以此时钟计数生成 1PPS，FPGA 端接收 ARM 端解算输出的接收机钟差，并以此作为 1PPS 相位调整量，将输出 1PPS 调整到北斗卫星时间基准。

传统 GNSS 接收机只需要在信号帧同步的瞬间，将接收机时钟相位同步到参考时间基准，没有进行频率校正，并且由于成本原因，一般使用的是石英晶振，频率稳定度只有 10^{-10} 量级，不适用于高精度授时使用。本文中设计的定位授时设备，其较之传统接收机输出 1PPS，使用了驯服之后的高精度铷原子钟作为接收机外参考时钟输入并生成 1PPS，频率稳定性和守时特性均更佳。

2.2 测试系统设计

为测试设计的定位授时设备的定位授时精度，设计搭建了如图 3 所示的测试系统。

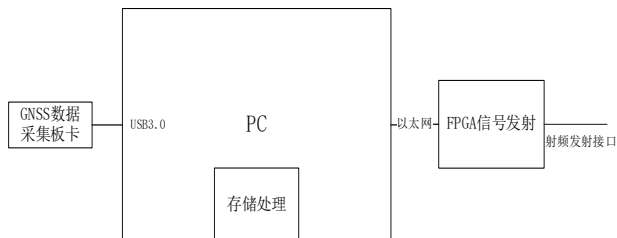


图 3 定位授时设备测试系统原理图

由于设计的定位授时设备使用场景包含静态和高动态场景,为了测试高动态下的授时精度,需要将移动设备采集的原始 GNSS 中频数据记录下来,在事后回放进行定位授时处理,测量设备定位授时精度。该测试系统通过 GNSS 数据采集板卡采集原始的 GNSS 中频数据并保存在板卡自带的存储器中,PC 端通过 USB3.0 接口从存储器中读取采集的 GNSS 中频数据,并截断处理为测试要求的开始时间和结束时间的中频数据,之后通过以太网将原始 GNSS 数据发送到 FPGA 端,FPGA 将中频数据发送给射频发射单元,分别从两个射频通道将采集的 GNSS 原始数据调制到射频发送出来。

3 设备定位与授时精度测试

设备定位授时精度测试要求测试设备在静态和高动态场景下的定位授时精度,制定的测试方案为使用 GNSS 数据采集板卡,分别采集载体在静态和高动态下运动的原始 GNSS 中频数据,并通过 PC 端将数据截断处理为时长为 8 h 的数据,数据通过 FPGA 板卡处理后进行原始 GNSS 数据回放,分析设备在时长约 8 h 的定位授时精度。

3.1 定位精度分析

为了分析设备定位精度,必须有接收机跟踪卫星输出观测值时的参考坐标作为参考,测试中使用 IGS (international GNSS service, IGS) 数据中心公布的精密星历以及接收机输出观测值进行事后 PPP 解算作为参考坐标。

将设备输出的实时坐标与事后精密星历解算的坐标做差,在东 (E)、北 (N)、天 (U) 三个方向的定位误差结果如图 4、图 5 所示。由图 4 和图 5 可以看到,在大约 50 min 以后,PPP-B2b 定位收敛(定位收敛定义为定位精度收敛到官方文件中理论的定位精度),在 E 、 N 、 U 三个方向的定位精度均收敛到厘米级,较之文献 [9] 中时长 20 min 的 PPP 收敛速度明显降低。其原因是 PPP-B2b 定位授时设备在进行 PPP 定位解算的同时,也在进行接收机的外接参考时钟的频率调整和相位调整,这样会导致 PPP 计算时的参数估计准确性降低,从而降低 PPP 收敛速度。

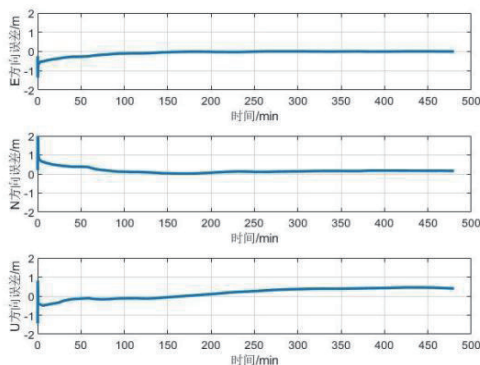


图 4 静态定位误差

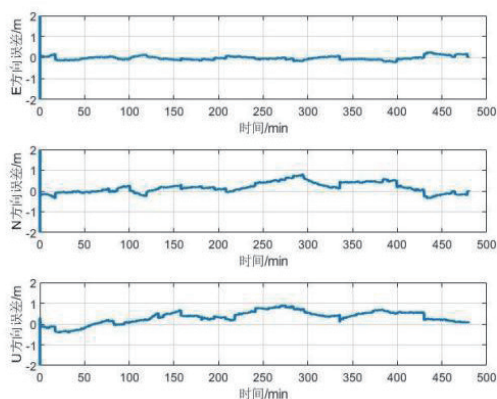


图 5 动态定位误差

由图 4 可见,静态 PPP-B2b 定位收敛以后, E 、 N 、 U 三个方向的定位误差分别优于 2 cm、6 cm、8 cm;定位误差标准差 0.8 cm、2 cm、3 cm;计算三个方向的均方根误差分别优于 15 cm、21 cm、30 cm。由实验定位误差结果,可以认为 PPP-B2b 定位授时设备实现了静态厘米级的定位精度。

图 5 为高动态下 PPP-B2b 定位解算误差,载体为在高动态运动下采集的数据,数据采集时长约 8 h,载体运动空间开阔、卫星可见性良好并且运动轨迹均无遮挡。当动态 PPP-B2b 定位收敛以后, E 、 N 、 U 三个方向的定位误差分别优于 50 cm、70 cm、80 cm;定位误差标准差 10 cm、15 cm、30 cm;计算三个方向的均方根误差分别优于 20 cm、40 cm、45 cm。由实验定位误差结果,可以认为 PPP-B2b 定位授时设备实现了动态分米级的定位精度。

3.2 授时精度分析

为了分析设备的授时精度,需要引入标准时间基准的 1PPS 作为时间基准测量,测试中通过将设备驯服之后同步到北斗时间基准的 1PPS 和北斗时间基准 1PPS 接入高精度示波器,测量两 1PPS 之间的相位差。

分别将 GNSS 数据采集板卡记录的静态、动态原始射频数据输入定位授时设备,进行授时处理,并通过示波器记录 1PPS 相位差测量结果,如图 6、图 7 所示。

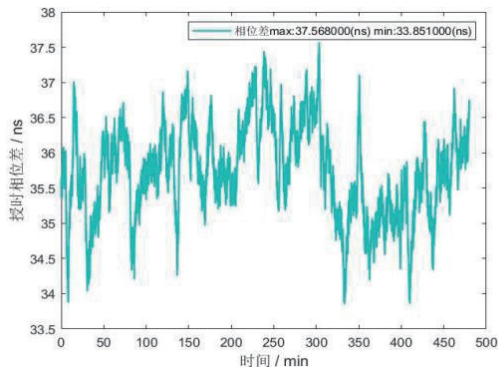


图 6 静态授时 1PPS 相位差

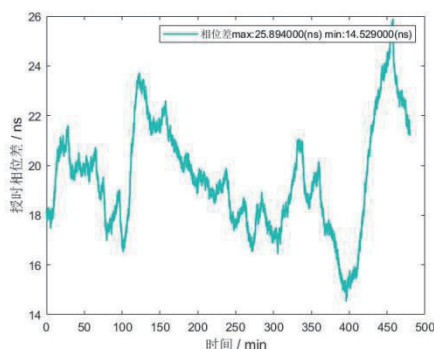


图7 动态授时 1PPS 相位差

由图6、图7可以看到，因为定位授时设备对外接10 MHz 铷钟做了频率和相位调整，1PPS 相位差始终维持在一定的相位峰峰值范围内。由于接收机存在硬件相位延迟，因此1PPS 相位差相位中心不在零值附近，而和零值有固定的常数差值。接收机硬件延迟的标定存在一定的复杂性，实验设备暂不具备条件，因此使用1PPS 相位差峰峰值和标准差评估授时精度（外符合精度）。

图6为设备静态授时下的1PPS 相位差测量结果，由图6可见，设备输出1PPS 和时间基准1PPS 之间的相位差最大值37.57 ns，最小值33.85 ns，峰峰值约4.3 ns。计算得到1PPS 相位差标准差为0.95 ns。由静态授时测试结果，可以认为设备的静态授时精度优于1 ns。

图7为设备动态授时下的1PPS 相位差测量结果，由图7可见，设备输出1PPS 和时间基准1PPS 之间的相位差最大值25.89 ns，最小值14.53 ns，峰峰值约11.3 ns。计算得1PPS 相位差标准差为3 ns。综上，由动态授时测试结果，设备的动态授时精度优于3 ns。

动态授时精度明显低于静态授时精度，与理论预期以及已有研究结论一致^[10]。分析原因有以下几点：（1）高动态条件下对于GNSS 接收机捕获速度和跟踪速度要求都更高，在高动态环境下，接收机输出的伪距和载波相位精度都比静态环境下更低，导致PPP-B2b 钟差解算精度降低；（2）高动态环境下，接收机载波跟踪环路可能出现失锁，导致PPP 解算重收敛，此时接收机1PPS 相位误差累计，导致授时精度降低。

4 结语

针对传统定位授时设备单机作业能力弱、定位授时精度低等问题、GNSS 动态授时接收机研究少的问题，本文基于北斗三号PPP 服务信号PPP-B2b 设计实现了基于PPP 技术的精密定位授时设备。该设备具有定位授时精度高、支持高动态授时等优点，设计实现了支持高动态场景测试的定位授时设备测试系统，对PPP-B2b 精密定位授时设备做了静态和动态的性能测试，主要结论如下。

（1）PPP-B2b 定位授时设备可以实现静态厘米级、动态分米级的定位精度，与传统基于PPP 技术的定位设备定位精度相当，与文献[8] 理论精度一致。但是PPP 收敛速度有所下降，因为接收机对时钟相位和频率的调整。

（2）PPP-B2b 定位授时设备可以实现静态1 ns、动态3 ns 的授时精度。

参考文献：

[1] 吕大千. 基于精密单点定位的 GNSS 时间同步方法研究[D]. 长沙：国防科技大学,2022.

[2] ARCEO-MIQUE L,SHMALIY Y S,IBARRA-MANZANO O. Optimal synchronization of local clocks by GPS 1PPS signals using predictive FIR filters[J].IEEE transactions on instrumentation and measurement,2009,58(6):1833-1840.

[3] GENCOGLU M T,ARSLAN H.A novel time synchronization method based on pseudorange single point positioning[J]. IEEE communications letters,2017,21(7):1569-1572, .

[4] 张怀, 聂兆生, 刘刚, 等. 基于 BDS/GPS 融合的精密单点定位解算策略与实测精度[J]. 地球科学与环境学报, 2022,44(5):802-813.

[5] LYU D, DONG T, ZENG F, et al. Time synchronization method based on real-time precise point positioning[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna: Copernicus Publications, 2020:12206.

[6] LEICK A, RAPOPORT L, TATARNIKOV D. GPS satellite surveying[M].Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

[7] KOUBA J, HEROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS solutions, 2001, 5(2):12-28.

[8] 中国卫星导航系统管理办公室. 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) [DB/OL].2020.[2023-03-17].http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20930.html.

[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.

[10] 马祥泰, 史增凯, 钱昭勇, 等. 基于北斗卫星导航系统非组合精密单点定位算法的精密授时精度研究[J]. 电子与信息学报, 2022,44(9):3203-3211

【作者简介】

周志行（1999—），男，四川内江人，硕士研究生，研究方向：卫星导航在无线时间同步中的应用。

郭庆功（1967—），通信作者，男，新疆伊犁人，博士，教授，研究方向：微波技术应用、无线时间同步。

（收稿日期：2023-10-19）