

引文格式:于合理,孙晓东,贾赞杰,等.限制环境下的 GNSS 精密授时方法研究综述[J].海洋测绘,2024,44(2):46-50.
DOI:10.3969/j.issn.1671-3044.2024.02.011

限制环境下的 GNSS 精密授时方法研究综述

于合理,孙晓东,贾赞杰,武智佳,代桃高

(63883 部队,河南 洛阳 471003)

摘要: GNSS 精密授时技术在国防军事领域得到了广泛的应用,但卫星导航信号具有先天的脆弱性,极易受到各种有意和无意干扰,为了提升 GNSS 精密授时的稳健性和安全性,亟需发展限制环境下的授时技术。介绍了 GNSS 授时应用存在的问题,分析了 GNSS 精密授时方法研究现状,给出了在无地面通信网络条件下利用北斗三号 PPP-B2b 信息进行实时 PPP 授时,在信号遮挡条件下利用惯性导航辅助 PPP 瞬时重新收敛和附加钟差模加快 PPP 重新收敛,以及在复杂电磁环境下利用多阵元抗干扰天线提高 GNSS 授时性能的发展对策建议,为拓展 GNSS 授时技术在时频领域的应用提供借鉴。

关键词: GNSS 精密授时;抗干扰算法;精密单点定位;重新收敛模型;钟差模型

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-3044(2024)01-0046-05

1 引言

精密时间是国家的重要战略参数和资源,具有十分重要的军事意义。2017 年美国空军战略和技术中心提出了“授时战”的概念,时间的军事价值已经受到世界各国的肯定和认可,并将在未来战争中发挥重要的作用。2020 年美国弹性导航授时基金会发布了《国家弹性授时体系架构》报告,美国越来越重视授时系统的弹性与安全,着重提升复杂战场环境下的授时服务能力。当前众多武器装备对授时的需求越来越高,以微波功率合成技术为例,参与功率合成的分布式节点的时间同步精度要达到纳秒甚至亚纳秒量级^[1]。全球卫星导航系统的快速发展,为高精度授时应用提供了新的契机。精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术提出以来迅速成为 GNSS 授时领域的前沿代表技术^[2-3]。但在国防和军事领域存在诸多限制环境,众多武器装备系统与国际互联网实行物理隔绝,无法获得实时数据流产品,显著制约了 PPP 授时在高精度时间服务领域的实时应用;且授时设备面临的环境也会更加复杂,既有山地、建筑等自然环境和电台、移动基站等电磁辐射设备,造成在时域、空域、频域存在数量繁多、分布密集影响授时设备发挥的限制环境,更是有敌方各种各样的压制式干扰和欺骗式干扰环境,进一步增加了授时终端使用环境的复杂性,极易造成

卫星观测信号中断,导致 PPP 频繁重新收敛或无法完成授时解算,现有 GNSS 授时设备难以保证限制环境下授时的可用性和可靠性。因此,如何提高限制环境下的 GNSS 精密授时的精度和可靠性,对于解决当下国防军事需求,着眼未来科学发展,拓展 GNSS 授时技术在国防和军事领域的应用具有重要意义。

本文阐述了 GNSS 精密授时技术在国防和军事领域应用面临的限制环境,分析了实时 PPP 授时、惯性导航(inertia navigation system, INS)辅助 PPP 快速重新收敛、附加钟差模型加快 PPP 重新收敛,以及 GNSS 授时抗干扰技术研究现状,并就提高 GNSS 精密授时在无地面通信网络支持、信号瞬时遮挡和复杂电磁干扰等限制环境下的可用性和可靠性给出了发展对策建议,以期拓展 GNSS 精密授时技术在国防和军事领域的应用提供参考。

2 国内外现状

2.1 实时 PPP 授时

自 PPP 技术提出以来,众多学者将 PPP 技术应用于时间传递领域,取得了诸多研究成果^[4],但受限于事后卫星精密轨道和钟差产品,其应用主要局限在事后处理模式上^[1]。随着实时应用需求的不断增多,2013 年 IGS 实时服务通过互联网播发实时卫星轨道误差和钟差改正数^[5],文献[6]对 IGS 实

收稿日期:2023-05-29 修回日期:2023-11-25

基金项目:国家自然科学基金(41804135)。

作者简介:于合理(1989-),男,河南郸城人,工程师,博士,主要从事 GNSS 时频传递和导航对抗方法研究。

时产品用于 PPP 授时的精度进行了分析,结果表明利用 IGS 实时产品计算站间时间同步精度可达 0.3 ns,但由于 IGS 实时卫星钟差产品的参考时间基准频繁调整,获得的单站钟差解存在跳变现象^[6]。文献[1]、文献[5]使用 BNC 软件通过互联网接收 IGS 分析中心播发的多系统实时卫星轨道和钟差产品,并将其用于多系统 GNSS 授时/时间传递,利用 IGS 实时产品可以实现高精度的实时时间传递。文献[3]在 PPP 时间传递技术的基础上,结合实时卫星钟差估计、接收机时钟调控及硬件延迟标校技术,建立了基于北斗卫星导航系统的广域高精度时间服务系统,试验结果表明,单天授时精度优于 1ns。目前北斗三号卫星导航系统已经提供基于 B2b 信号的精密单点定位服务,文献[7]对 PPP-B2b 服务的定位性能进行分析,结果表明,北斗三号 PPP-B2b 信号满足中国区域 PPP 服务的要求,但基于 B2b 信息的实时 PPP 授时技术的研究还未充分开展。

研究实时 PPP 授时的文献可以看出,现有实时 PPP 授时技术需要依赖地面通信网实时接收精密轨道和钟差产品,还未有成熟的不受地面通信网络限制的实时 PPP 精密授时方法。但在国防和军事领域,无地面通信网络支持的条件下,如何实现实时 PPP 授时,仍需更深入的研究与实验分析。目前北斗三号卫星已经使用 PPP-B2b 信号作为数据广播信道播发卫星轨道和钟差改正数等信息,亟需开展基于北斗三号 PPP-B2b 信息的实时 PPP 授时研究。

2.2 INS 辅助 PPP 快速重新收敛

为了弥补 PPP 技术易受外界环境遮挡和信号干扰的影响,许多研究人员考虑借助 INS 的优点来辅助 PPP 进行导航定位,提供更加可靠的导航位置服务。文献[8]利用战术级的 INS 与 GPS 组合实现了分米级的定位精度。文献[9]研究了基于 MEMS IMU 的 PPP/INS 紧组合算法,并利用 INS 短时高精度信息辅助 GNSS 进行周跳探测。文献[10]对多模 GNSS PPP/INS 紧组合算法进行了研究,分析结果表明,该算法能有效提高 PPP 的定位精度,缩短收敛时间。文献[11]对多模多频 GNSS/INS 深组合架构下的接收机跟踪关键技术进行了深入的研究。但对于 PPP/INS 组合而言,如何有效处理 GNSS 信号中断引起的 PPP 重新收敛是用户最为关心的问题,若能够充分利用 INS 短期导航精度高的约束条件,挖掘相关信息来探测修复周跳,便不再需要重新初始化模糊度参数,有望实现 PPP 授时的快速重新收敛。文献[12]对 INS 辅助 PPP 周跳探测修复进行了深入的研究,通过建立星间单差相位新息和星间

单差电离层残差修复周跳,实现了 PPP 的瞬时重新收敛,但是随着中断时间变长,修复能力会逐渐减弱。因此,如何有效的解决 INS 累积误差问题,成为了 INS 辅助 PPP 周跳探测和修复的关键。文献[13]提出了一种利用 INS 辅助宽巷周跳探测的新策略,可以消除宽巷组合中的站星几何位置,削弱码伪距噪声及多路径误差的影响,试验表明,该方法可以精确识别各种宽巷小周跳,但无法探测特殊比例周跳,需将该方法与无几何距离组合方法相结合使用。

综上所述可以看出,卫星信号中断后,单独的 PPP 授时需要花费十几分钟甚至更长的时间将模糊度重新初始化,现有 GNSS/INS 组合导航的研究多集中在提高导航定位精度和可靠性上,针对 INS 辅助 PPP 授时加快重新收敛速度的研究还不够深入,在非差 PPP/INS 紧组合中,未能充分挖掘利用 INS 短期导航精度高的约束条件来辅助周跳探测与修复,以加快 PPP 授时的重新收敛速度。

2.3 附加钟差模型加快 PPP 重新收敛

传统的 PPP 算法通常将接收机钟差看作相互独立的白噪声逐历元进行估计,未能充分利用接收机钟差参数历元间变化较为平稳的约束信息。文献[14]通过在 PPP 模型中增加接收机钟物理模型约束,提高了 PPP 的定位精度和收敛速度。文献[6]利用原子钟的物理特性对接收机钟差建模,提出一种附加原子钟物理模型的 PPP 时间传递算法,避免了传统 PPP 接收机钟差在初始阶段收敛的问题。文献[15]提出了一种顾及测站钟特性随机模型的多系统 PPP 时间传递模型,可以提高 PPP 时间传递的精度。文献[16]提出利用接收机钟模型来增强 PPP 时间传递,实验结果表明,利用接收机时钟模型可以提高时间传递性能,消除或削弱 PPP 时间传递中的天跳变现象。文献[17]针对观测数据中断不连续的情况,对接收机钟差进行拟合预报,并利用预报结果约束接收机钟差,可以加快数据恢复后的 PPP 收敛速度。

综上所述可以看出,现有利用接收机钟差建模改善 PPP 模型的研究,主要集中在提高精度、加快收敛速度、消除或减弱天跳变上。但实际应用环境中,经常会面临信号遮挡及频繁有意或无意的瞬时干扰条件,导致信号中断。针对信号遮挡或瞬时干扰环境下,GNSS 信号失锁而导致 PPP 授时钟差参数重新收敛问题的研究还不够深入,且未充分考虑数据中断时间对 PPP 授时随机模型的影响。

2.4 GNSS 授时抗干扰

卫星导航系统因具有全球、全天候、高精度的特

点,已经被广泛应用于国防和军事领域,并在伊拉克、阿富汗、叙利亚等一系列局部战争中发挥了重要的作用。但卫星导航信号具有先天的脆弱性,易受干扰和欺骗,2008年英国政府在北海开展了相关的干扰测试,仅使用两个低成本的干扰器就干扰了30 km范围内的GPS信号^[18]。近年来,针对卫星导航干扰与抗干扰之间的电子战愈演愈烈,2022年俄乌冲突期间,美国商业SIGINT卫星公司就探测到东乌克兰地区GPS干扰信号激增,武器装备在现代化战争中面临着严峻的安全使用风险。因此,对于如何提升卫星导航系统在复杂电磁环境下的抗干扰能力尤为重要。文献[19]对卫星导航接收机抗干扰技术进行了系统的研究,但在GNSS授时抗干扰领域开展的研究相对较少,文献[18]针对授时接收机特点提出了多层次的授时接收机加固架构,提升了复杂环境下GNSS授时的可靠性。文献[20]基于阵列天线技术提出了一种在复杂干扰环境下基于GNSS的高精度授时技术。

综上所述可以看出,现有针对GNSS抗干扰的研究主要集中在导航定位领域,针对GNSS授时抗干扰技术的研究较少,未能充分挖掘阵列天线技术在GNSS授时抗干扰中的作用,也未对能否利用INS信息达成多阵元抗干扰天线进行PPP授时的可行性进行验证。

3 限制环境下GNSS精密授时技术发展趋势

随着全球卫星导航系统的发展,GNSS精密授时技术在时频领域得到了广泛的应用,近年来受到国内外学者广泛关注。结合GNSS精密授时技术的研究现状,总结了限制环境下GNSS精密授时技术发展趋势和对策建议,见图1,主要包括3个方面:①在无地面通信网络条件下研究基于北斗三号PPP-B2b信息的实时PPP授时技术;②在信号遮挡、瞬时干扰条件下,研究利用INS辅助PPP授时快速重新收敛和附加钟差模型加快PPP授时重新收敛的数据处理策略;③在复杂电磁干扰环境下,研究GNSS增强授时抗干扰策略,利用多阵元抗干扰天线提高GNSS在复杂电磁干扰环境下的授时能力。

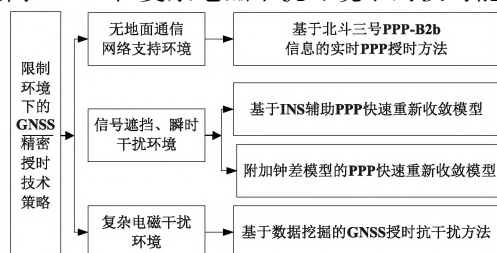


图1 不同限制环境下策略示意图

3.1 基于北斗三号PPP-B2b信息的实时PPP授时方法

基于北斗三号PPP-B2b信息的实时PPP授时方法的关键在于如何利用PPP-B2b信号提高卫星轨道、钟差和码间偏差的改正精度。首先需利用北斗三号PPP-B2b信号卫星轨道、钟差等改正信息,将其恢复成高精度的卫星轨道和卫星钟差,并对GEO、IGSO和MEO不同卫星的实时轨道和钟差精度进行分析。建立可靠的基于北斗三号PPP-B2b信息的实时静态和动态授时模型。同时,需重点设计PPP时钟驱动过程钟数据预处理、驱动参数生成办法,分析制定合适的时钟控制策略。最后,在实时PPP授时模型和时钟驱动理论的基础上,构建基于北斗三号PPP-B2b信息的实时PPP授时接收机硬件平台,实现在无地面通信网络支持条件下实时高精度精密授时服务,见图2。

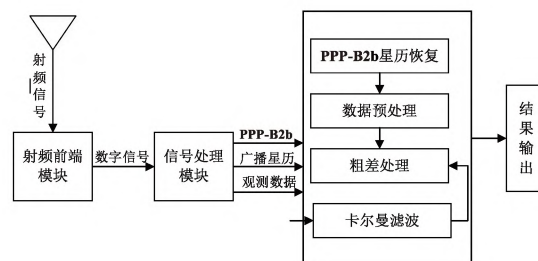


图2 基于北斗三号PPP-B2b信息的实时PPP授时示意图

3.2 利用INS辅助PPP授时快速重新收敛

研究GNSS观测数据和INS导航信息进行融合处理的方法,构建PPP/INS紧组合卡尔曼滤波模型,包括观测模型和状态模型。可利用INS的短时高精度位置信息消除PPP观测方程中的几何位置关系,结合星间差、历元间差、无电离层组合模型等观测量线性组合,实现周跳探测与修复,进而实现INS辅助PPP快速重新收敛。其过程如下:

(1)计算INS辅助的宽项(WL)组合周跳探测量,首先构建宽巷组合观测量 L_{WL-INS} :

$$L_{WL-INS} = L_{WL} - \rho_{INS} = cdt_r + T - I_{WL} + \lambda_{WL} N_{WL} + \varepsilon(L_{WL}) + \varepsilon_{INS} \quad (1)$$

式中, L 为相位观测;下标 WL 为宽项组合; ρ_{INS} 为用INS定位结果和精密星历计算的卫星与用户的距离; c 为光速; dt_r 为接收机钟差; T 、 I 分别为对流层和电离层延迟; λ 和 N 分别为波长和模糊度; ε 为相位观测噪声。然后选择相应的参考卫星进行星间差分,消除接收机钟差等参数。

$\Delta L_{WL-INS} = \Delta T - \Delta I_{WL} + \lambda_{WL} \Delta N_{WL} + \Delta \varepsilon(L_{WL}) + \Delta \varepsilon_{INS} \quad (2)$
式中, Δ 为星间差,最后再进行历元间差分得到双差宽项组合观测量方程:

$$\delta\Delta L_{WL-INS} = \lambda_{WL} \delta\Delta N_{WL} + \delta\Delta\epsilon(L_{WL}) + \delta\Delta\epsilon_{INS} \quad (3)$$

式中, δ 为历元间差。

(2) 建立 INS 辅助的无电离层组合 (IF) 周跳探测模型, 构建无电离层组合双差观测方程:

$$\delta\Delta L_{IF-INS} = \lambda_{IF} \delta\Delta N_{IF} + \delta\Delta\epsilon(L_{IF}) + \delta\Delta\epsilon_{INS} \quad (4)$$

(3) 采用 INS 辅助的宽项组合周跳探测量和无电离层组合周跳探测量, 联合解算得到两频点观测量的实数整周 $\delta\Delta N_1$ 、 $\delta\Delta N_2$, 并分别取整, 若解算的整周跳变量通过检验即可恢复模糊度参数, 缩短重新收敛的时间。

在此基础上, 需重点研究设计周跳探测修复量的质量控制准则和修复策略, 避免修复错误, 以充分利用 INS 信息短时精度高的特点, 缩短 PPP 授时重新收敛的时间。

3.3 附加钟差模型辅助 PPP 授时快速重新收敛

GNSS 接收机信号受环境遮挡或瞬时干扰时会发生中断, 导致输出的相位观测量产生整周跳变, 传统的 PPP 算法未充分利用接收机钟差参数在历元间变化较为平稳的约束信息, 模糊度重新初始化需要十几分钟甚至较长时间重新收敛, 影响 PPP 授时的精度和可靠性, 因此研究利用接收机钟的物理特性来加快 PPP 授时的重新收敛, 提高 PPP 授时精度和可靠性。接收机钟钟差模型可表示为:

$$x(t) = a_0 + a_1(t-t_0) + a_2(t-t_0)^2 + \epsilon_x(t) \quad (5)$$

式中, $x(t)$ 为 t 时刻的接收机钟差; a_0 、 a_1 、 a_2 分别为参考时刻 t_0 的初始钟差、钟速、钟漂; $\epsilon_x(t)$ 为随机变化的不确定性分量。

可研究采用铷原子钟搭建实时 PPP 授时硬件平台方法, 通过卡尔曼滤波对 PPP 算法进行解算, 获得历史接收机钟差数据, 因铷原子钟频漂较为明显, 可采用哈达玛总方差来估计过程噪声, 根据时差数据计算出哈达玛总方差。考虑到因受障碍物遮挡、信号干扰, PPP 授时需要重新收敛, 可利用接收机历史钟差数据预报的钟差结果, 作为附加条件来约束接收机钟差参数, 方法流程见图 3。因预报时间越长, 钟差预报精度越差, 需考虑根据预报时间长短和接收机钟差特性动态调整预报钟差权重。

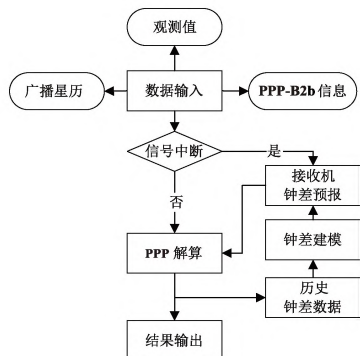


图3 附加钟差模型的 PPP 快速重新收敛模型流程示意图

3.4 基于数据挖掘的 GNSS 授时抗干扰方法

提高复杂电磁环境下 GNSS 授时精度的关键是要获得噪声较小的伪距或较为连续的载波相位观测量。多阵元天线在非干扰条件下, 每个阵元都可作为普通阵元, 可设置为直通工作模式, 由单个阵元进行授时解算。在干扰条件下, 单个阵元观测数据无法使用, 对多阵元天线采用空时、空频等抗干扰处理, 得到基于时变数学相位中心的伪距和载波相位观测量, 此时的载波相位观测量因干扰方位、强度的影响, 跳变明显, 无法直接用于授时解算, 伪距也会因干扰方位、强度的影响提高噪声, 降低精度。但短时间内 INS 的姿态和加速度计信息是准确的, 可研究通过 INS 的状态判定载体的运动情况。若为静态, 可固定前面历元的位置信息, 并以紧耦合技术辅助卫星信号捕获, 由前向信息和伪距探测挖掘模糊度, 由后向历元差分信息得到小数增量部分, 组合得到一个 INS 辅助修正的载波观测量, 从而避免载波观测量频繁出现过大周跳。若为动态, 可首先由可观测的卫星与 INS 紧耦合进行组合解算, 得到准确位置信息后再进行解算。数据处理流程见图 4。

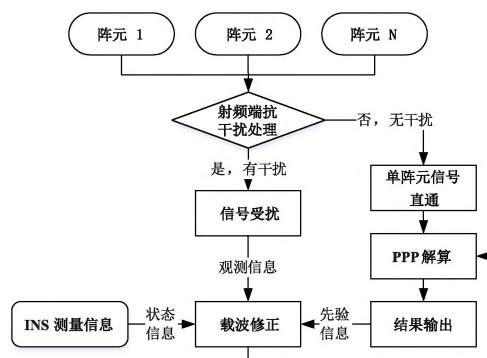


图4 基于数据挖掘的 INS 辅助授时流程示意图

4 结束语

GNSS 技术的发展为高精度授时提供了新的契机, 但卫星导航信号具有先天的脆弱性, 极易受到各种有意和无意干扰, 亟需发展 GNSS 降级、拒止等作战限定环境下的授时技术, 解决限制环境下 GNSS 授时精度低、可靠性差等难题, 提升 GNSS 精密授时的稳健性和安全性。本文介绍了 GNSS 授时在国防和军用授时领域应用存在的问题, 分析了目前 GNSS 精密授时技术研究现状, 从无地面通信网络依托、信号遮挡和瞬时干扰, 以及复杂电磁干扰环境 3 个方面总结了限制环境下 GNSS 精密授时技术发展趋势和预期策略, 后续可对基于北斗三号 PPP-B2b 信息的实时 PPP 授时技术、INS 辅助 PPP 授时快速重新收敛技术、附加钟差模型约束的 PPP 授时快速重新收敛技术, 以及利用多阵元抗干扰天线的 GNSS 增

强授时抗干扰技术进行深入研究,为促进 GNSS 精密授时技术在国防领域中的应用提供新的思路和解决方案。

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, 2020.
- [2] GE Y, QIN W, SU K, et al. A new approach to real-time precise point-positioning timing with International GNSS Service real-time service products [EB/OL]. (2019-09-19) [2023-05-29]. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab2fa5>.
- [3] 施闯, 张东, 宋伟, 等. 北斗广域高精度时间服务原型系统[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 269-277.
- [4] PETIT G. Sub-10-16 accuracy GNSS frequency transfer with IPPP[J]. GPS Solutions, 2021, 25(1):1-9.
- [5] 葛玉龙. 多频多系统精密单点定位时间传递方法研究 [D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
- [6] 于合理. GNSS 载波相位时间传递方法研究 [D]. 郑州:信息工程大学, 2017.
- [7] 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 等. 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 408-415.
- [8] ZHANG Y, GAO Y. Performance comparison between point and differential GPS/INS systems [C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, 2005, 2504-2510.
- [9] DU S. Integration of precise point positioning and low cost MEMS IMU [D]. Calgary: University of Calgary, 2010.
- [10] 柴大师. 多星座 GNSS/INS 组合导航理论与方法研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- [11] 吴谋炎. 多模多频 GNSS/INS 深组合架构下的接收机跟踪关键技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2020.
- [12] 刘帅. 模糊度固定解 PPP/INS 紧组合理论与方法 [D]. 郑州:信息工程大学, 2016.
- [13] 黎蕾蕾, 杨盛, 丁学文, 等. 一种 INS 辅助的 PPP 周跳探测方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(11):1457-1465.
- [14] 张小红, 陈兴汉, 郭斐. 高性能原子钟钟差建模及其在精密单点定位中的应用[J]. 测绘学报, 2015, 44(4):392-398.
- [15] GE Y, ZHOU F, LIU T, et al. Enhancing real-time precise point positioning time and frequency transfer with receiver clock modeling[J]. GPS Solutions, 2018, 23(1):1-14.
- [16] LYU D, ZENG F, OUYANG X, et al. Enhancing multi-GNSS time and frequency transfer using a refined stochastic model of a receiver clock[EB/OL]. (2019-09-30) [2023-05-29]. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab2419>.
- [17] QIN W, GE Y, WEI P, et al. An approach to a clock offsets model for real-Time PPP time and frequency transfer during data discontinuity[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1405-1416.
- [18] 朱祥维, 伍贻威, 龚航, 等. 复杂干扰环境下的卫星授时接收机加固技术[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3):1-9.
- [19] 潘高峰, 王李军, 华军. 卫星导航接收机抗干扰技术 [M]. 北京:电子工业出版社, 2016.
- [20] 徐劲松. 基于 GNSS 的抗干扰高精度授时技术研究 [C]//第十二届中国卫星导航年会. 南昌, 2021.

A review of GNSS precision timing method in restricted environments

YU Heli, SUN Xiaodong, JIA Zanjie, WU Zhijia, DAI Taogao

(63883 Troops, Luoyang 471003, China)

Abstract: GNSS precision timing technology is widely used in the national defense and military fields, but satellite navigation signals are inherently vulnerable to all kinds of intentional and unintentional interference. In order to improve the robustness and security of GNSS precision timing, it is urgent to develop timing technology under restricted environment. The problems existing in the application of GNSS timing are introduced, the research status of GNSS precision timing method is analyzed in this paper. The recommendations for development responses are also presented, including using the Beidou-3 PPP-B2b information for real-time PPP timing under the condition of no ground communication network, using the inertial navigation to assisted PPP instantaneous re-convergence and the additional clock difference mode to accelerate PPP re-convergence under the signal occlusion condition, and using the multi-array anti-jamming antenna to improve GNSS timing performance under the complex electromagnetic environment. It provides a reference for expanding the application of GNSS timing technology in time frequency field.

Key words: GNSS precision timing; anti-jamming algorithm; precise point positioning; re-convergence model; clock offset model