

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.02.002

北斗高精度高可信 PPP-RTK 服务基本框架

李子申^{1,2}, 王宁波¹, 李亮³, 王志宇¹

- 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
- 齐鲁空天信息研究院, 济南 250132;
- 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

摘要:北斗高精度高可信定位是实现无人系统自动驾驶的重要基础。近年来发展的实时动态精密单点定位(PPP-RTK)技术,融合了网络RTK和PPP的技术优势,逐渐成为学术和工业界关注的焦点。PPP-RTK以状态域改正信息为核心,可同时提供精准可信的时空信息服务,因而获得了自动驾驶等高生命安全领域应用的一致青睐。然而,目前国内外对PPP-RTK技术的研究主要聚焦于高精度技术,在高可信方面尚未形成可行的理论基础和服务框架。针对此,以PPP-RTK高精度定位理论体系为基础,探讨了北斗/GNSS PPP-RTK高精度高可信服务的用户需求、基本概念、理论方法与技术框架,同时给出了部分关键技术的代表性解决思路,为北斗/GNSS高精度高可信PPP-RTK技术体系和服务架构的建立奠定基础。

关键词:高精度高可信;基本框架;PPP-RTK;多源融合

中图分类号:P2-0 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)02-0007-09

Basic framework of BDS-based high-precision and high-credibility PPP-RTK service

LI Zishen^{1,2}, WANG Ningbo¹, LI Liang³, WANG Zhiyu¹

- Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
- Qilu Aerospace Information Research Institute, Jinan 250132, China;
- Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: High-precision and high-credibility positioning based on BeiDou navigation satellite system (BDS) is an important basis for realizing the automatic driving of unmanned systems. The precise point positioning-real time kinematic (PPP-RTK) technology developed in recent years, which combines the technical advantages of network RTK and PPP, has gradually become the focus of academic and industrial circles. PPP-RTK takes the state domain correction information as the core and can provide accurate and reliable spatio-temporal information services at the same time, so it has won the unanimous favor of applications in high-life safety fields such as autonomous driving. However, the current research on PPP-RTK technology at home and abroad mainly focuses on high-precision technology and has not yet formed a feasible theoretical basis and service framework in terms of high credibility. In view of this, based on the PPP-RTK high-precision positioning theory, this paper discusses the user requirements, basic concepts, theoretical methods

收稿日期:2023-01-06;**修订日期:**2023-02-14

基金项目:国家重点研发计划和山东省重点研发计划(2021YFB3901300);国家自然科学基金(42122026,42074043,42174038,42104027);中国科学院青年创新促进会

作者简介:李子申(1984-),男,研究员,主要从事北斗精准可信定位与智能导航方面的研究。

and technical framework of BDS/global navigation satellite systems (GNSS) PPP-RTK high-precision and high-credibility services, and gives representative solutions to some key technologies. This idea lays the foundation for the establishment of BDS/GNSS high-precision and high-credibility PPP-RTK technology system and service architecture.

Key words: High-precision and high-credibility; Basic framework; PPP-RTK; Multi-source fusion

0 引言

2020年7月31日,北斗三号全球卫星导航系统正式开通,标志着北斗系统进入全球化发展新阶段,也标志着我国定位、导航与授时(positioning navigation and timing, PNT)体系朝着更加泛在、智能与可信的方向发展。总体上看,我国PNT体系的建设与发展,首先从以多源传感器融合为主的综合PNT^[1]发展至软硬件弹性化集成与优化的弹性PNT^[2];进而发展为将专家共性知识库转换为计算机知识图谱的智能PNT^[2-3];最终,实现面向用户规定和隐性需求,并不断提升PNT相关服务系统有效性、完好性、安全性及保障性的可信PNT。其中,高精度高可信PPP-RTK(precise point positioning-real time kinematic)技术是实现可信PNT的重要基础^[4]。

高精度定位技术自全球定位系统(global positioning system, GPS)诞生之初便是卫星导航定位领域

的研究与应用热点。随着应用需求的不断发展,卫星导航高精度定位技术也历经了多代更新与发展,形成了包括实时差分动态定位(RTK)^[5]、精密单点定位(PPP和PPP-AR)^[6-7]、基于参考站网的实时动态定位(网络RTK)^[8]以及PPP-RTK等在内的高精度定位技术^[9],以上各定位技术的特点如表1所示。现阶段,各类少人化与无人化装备的精准导航和控制,均主要依赖卫星导航高精度位置信息。目前,地基网络RTK技术基本能够满足小区域范围内的高精度应用需求,但受参考站密度和双向通信安全等多重因素制约,现有以网络RTK为主的技术体系难以适用于未来无人化场景下的规模化应用需求^[10]。特别是对于陆上无人农场、海上海洋牧场等多类应用场景与服务对象,亟需形成统一的精准定位服务平台,提供无缝高效的高精度定位服务。在此条件下,PPP-RTK的技术优势日渐突出,并由区域高精度向广域高精度高可信方向不断深入发展^[11]。

表1 现有主流高精度定位技术对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of current mainstream high-precision positioning technologies

定位技术 对比要素	RTK	网络 RTK	PPP	PPP-AR	PPP-RTK
增强信息	观测域	观测域	A:轨道、钟差、伪距偏差	状态域 B:A+相位偏差	C:B+电离层+对流层
观测组合	单差、双差、非差	单差、双差、非差	非组合、消电离层组合	非组合、消电离层组合(宽窄巷)	非组合、消电离层组合
通信方式	双向无线电通信	双向互联网通信		广播式、单向通信	
定位精度	2~5 cm	2~3 cm	10 cm	2~5 cm	2~3 cm
收敛时间	优于 10 s	优于 10 s	20~30 min	10~15 min	优于 3 min
站间距离	3~5 km	30~70 km	500~1 000 km	500~1 000 km	100 km

少人/无人化场景下精准导航与控制作业中,精准定位的可信性保障不可或缺。针对卫星导航高精度定位的可信性监测,可参考经典的完好性监测理论与方法^[12]。其相关技术体系及标准起源于民用航空领域^[13],大致经历了从单频单系统的接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)^[14]发展至多频多系统联合的高级接收机自主完好性监测(advanced receiver autonomous integrity monitoring, ARAIM)^[15-16];从广域增强、可信性服务等级较低的星基增强系统(satellite-based augmenta-

tion system, SBAS)^[17]发展至局域增强、可信性服务等级较高的陆基增强系统(ground-based augmentation systems, GBAS)^[18]。同时,可信性监测技术经历了从单故障监测到多故障联合监测,从终端自主到服务端与用户端协同,对风险源的控制从单边置信度到误警与漏检双重检验的发展过程。对比来看,目前主流的卫星导航定位可信性监测技术,均是面向米级与亚米级伪距增强定位需求提出的,难以满足以载波相位和状态域改正信息为核心的 PPP-RTK 高可信监测需求^[19]。

随着卫星导航的应用领域逐渐向自动驾驶、无人农场及智能牧场等领域拓展,用户对高精度与高可信的需求同步提升,高精度与高可信集成的卫星导航定位技术将是卫星导航领域的发展趋势^[20]。在高精度 PPP-RTK 的基础上,本文提出了高精度高可信 PPP-RTK 概念,即:PPP-RTK 系统端与用户端精准定位性能超出告警极限及时告警的能力,融合精确性(accuracy)、完好性(integrity)、连续性(continuity)以及可用性(availability)等多项指标,综合表征 PPP-RTK 服务的用户可信赖程度。

1 高可信 PPP-RTK 基本框架

PPP-RTK 技术是近几年才兴起的一种高精度定位手段,目前国内外基于载波相位层级的高精度定位研究主要围绕 PPP-RTK 技术体系开展^[9]。PPP-RTK 技术融合了 PPP 广域覆盖和 RTK/RTD 快速收敛的特点,通过布设全球稀疏观测站和局域稠密观

测站,生成卫星精密轨道、精密钟差、精密信号偏差、空间电离层及空间对流层参数等改正信息,以状态域表达方式播发给用户,为用户提供厘米级差分定位服务^[21]。相比传统的 PPP/PPP-AR 技术,PPP-RTK 增加了空间电离层和对流层精密改正信息的播发,大大加快了终端用户高精度定位的收敛速度^[22];相比网络 RTK 技术,PPP-RTK 改正信息以状态域参数的形式表达,对影响定位的各类风险源进行矢量化与精细化处理,扩大了高精度定位的服务范围,并对定位结果的可信性具有分析预判的能力^[23-24]。

与民航广泛采用的卫星导航定位技术相比,PPP-RTK 技术在基础理论、技术体系及风险源处理策略等方面均存在较大差异^[25]。民航 GBAS 等基于伪距差分设计的完好性监测技术并不适配 PPP-RTK 技术体系^[23],因此,本文设计了面向载波相位层级的北斗/GNSS PPP-RTK“云-边-端”多重风险源可信监测总体技术方案,如图 1 所示。

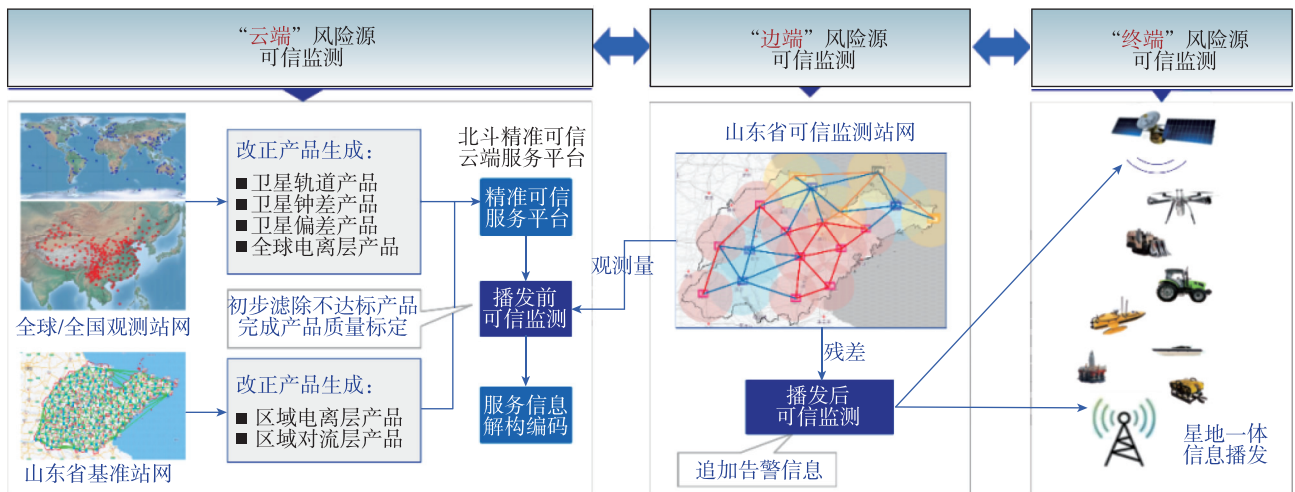


图 1 北斗/GNSS PPP-RTK“云-边-端”全链条风险源可信监测技术方案

Fig. 1 Credible monitoring technology scheme for risk sources across the cloud-edge-end of BDS PPP-RTK full chain

其中,“云端”风险源可信监测主要是对卫星精密轨道、精密钟差、码偏差、相位偏差及空间大气精密信息等改正产品进行可信概率分布与信号解构编码的监测^[26];“边端”风险源可信监测主要是依托北斗/GNSS 区域加密站,对计算的区域电离层与对流层产品进行空间大气活动异常监测;“终端”风险源可信监测主要是针对用户终端^[27],开展多源融合应用为主的用户端定位风险自主监测^[28]。

2 高可信 PPP-RTK 核心技术思路

按照高可信 PPP-RTK“云-边-端”服务框架设

计,高可信 PPP-RTK 核心技术主要包括以下几个方面:1)多重风险源可信概率分配体系;2)PPP-RTK 改正产品概率域可信监测及预警技术;3)可信监测服务信息的参数表达及播发策略;4)用户终端多源融合自主可信监测方法。

2.1 面向“云-边-端”多重风险源的可信概率分配体系

针对北斗/GNSS PPP-RTK 可信服务多重风险源权威指标体系缺乏以及风险源统筹监测可用性难以保障等问题,在充分了解“云-边-端”所有潜在风险源的基础上,构建基于北斗/GNSS PPP-RTK“云-边-端”可信

监测故障树模型,设计多重风险源并发态势下可信概率分配调整方案,以提升高精度高可信服务的可用性,建立标准化 PPP-RTK 可信监测技术指标体系。

PPP-RTK 定位故障源的确定是建立可信概率分配

体系的基础。研究 PPP-RTK“信号采集-数据处理-通信播发-终端定位”导航定位全过程,对各类可能诱发定位故障的风险源进行集中梳理,构建了北斗/GNSS PPP-RTK“云-边-端”可信监测故障树模型,如图 2 所示。

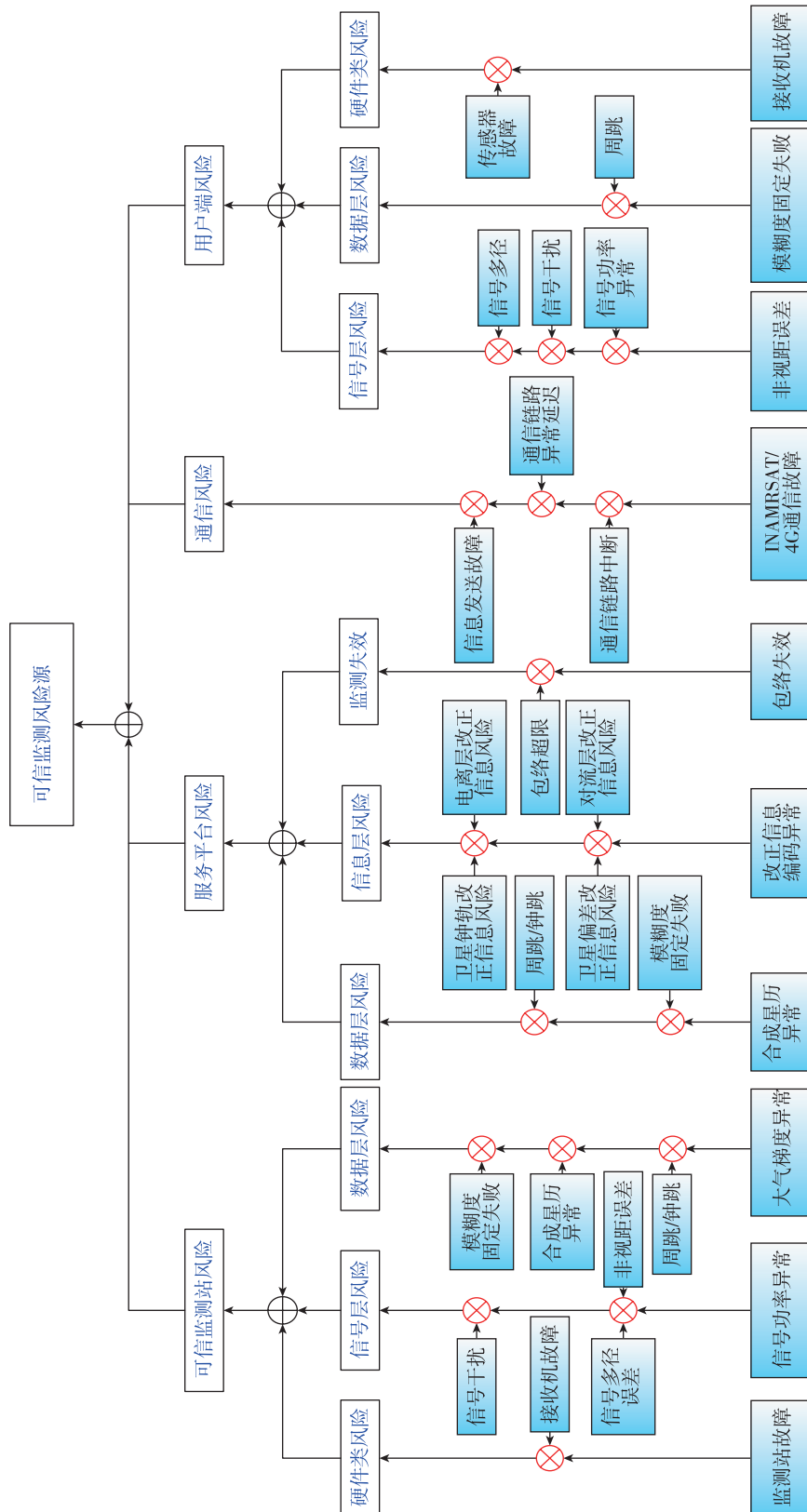


图 2 北斗/GNSS PPP-RTK“云-边-端”可信监测故障树模型示意图

Fig. 2 Fault tree model for credible monitoring of BDS PPP-RTK across cloud-edge-end

在可信监测技术指标方面,目前尚无面向北斗/GNSS PPP-RTK 的可信监测权威技术指标。为建立标准化 PPP-RTK 可信监测技术指标体系,在充分认识 PPP-RTK 故障源的基础上,研究 PPP-RTK 多重风险源可信概率分配方法,深入分析各项风险源的内在机理和影响机制,进而全面把握多重风险源的可信概率控制水平。

2.2 北斗/GNSS PPP-RTK 改正产品概率域可信监测及预警技术

改正信息的可信性是保障无人系统安全作业的关键。传统定位域可信性监测基于各类风险源精确已知的先验故障概率、可信性风险及连续性风险等技术指标,在定位域构建保护水平,开展可信检验。PPP-RTK 的可信监测对象是状态域改正参数,基于定位域的可信监测方法难以适用于 PPP-RTK 服务体系。因此,研究 PPP-RTK 各类状态域改正信息在观测量层面的误差传播规律,构建状态域参数的相关检验统计量;在此基础上开展卫星轨钟与空间大气相互免疫的序贯监测,进行改正信息可信监测风险控制,计算各类改正信息误差达到最大告警极限的危险误导信息概率;根据多类型用户不同等级可信监测的控制要求,实现 PPP-RTK 各类改正信息可信的严密监测。北斗/GNSS PPP-RTK 改正信息概率域可信监测技术流程如图 3 所示。

针对卫星轨钟、卫星偏差及空间大气之间的误差耦合特性,提取风险源误差去耦合后的改正信息残差,并基于历史长期、大量改正信息残差样本数据,分析不同故障模式下不同改正信息的误差统计分布特性。

针对卫星轨钟以及对流层等频率无关改正信息的可信性监测,在提取卫星轨钟改正信息残差的过程中,对流层干分量延迟通过建模控制,卫星轨钟误差用改正信息修正,将消电离层整周模糊度、接收机钟差及对流层湿分量作为待估参数进行估计;在提取对流层改正信息残差时,对流层延迟不再作为待估参数,改为用对流层改正信息进行修正,其他风险源控制方式与卫星轨钟改正信息一致。通过几何无关组合抑制与卫星和接收机相关的风险源,利用电离层和卫星几何无关偏差改正信息修正电离层延迟误差和几何无关卫星偏差,将几何无关组合整周模糊度和接收机偏差作为待估参数进行求解;最后通过几何无关组合观测量和各项待估参数、修正风险源之间的差和,提取电离层改

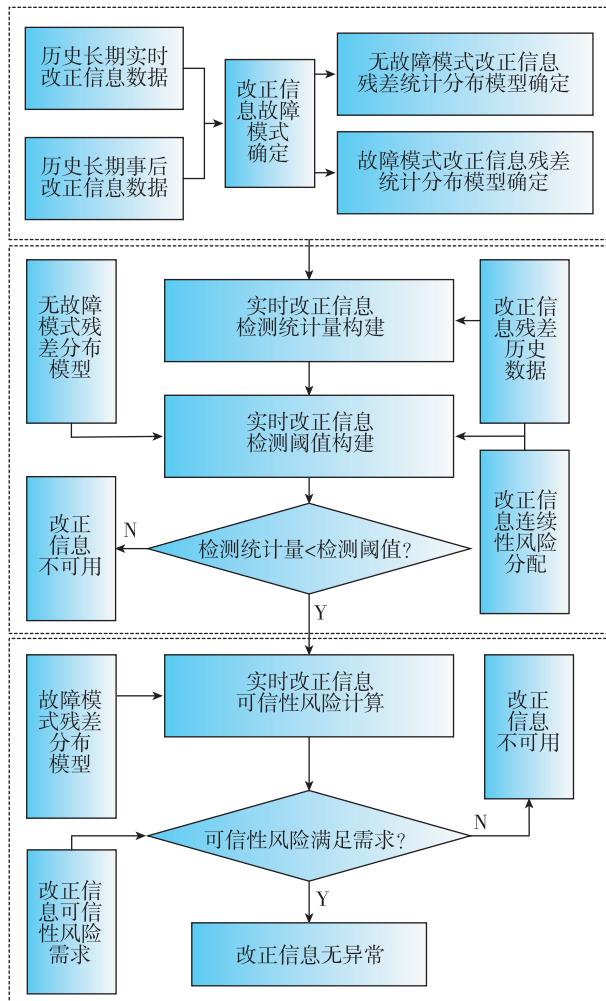


图 3 PPP-RTK 改正信息概率域可信监测技术流程图

Fig. 3 PPP-RTK correction information probabilistic domain credible monitoring technology flowchart

正信息残差^[29-30]。在完成改正信息残差提取后,根据历史长期改正信息残差样本统计分布和方差-协方差获取改正信息误差传播规律,以及无故障模式和故障模式下改正信息残差统计分布特性,设定预期代价函数,选取适配的统计分布模型对改正信息残差进行建模表征,作为改正信息可信监测无故障假设和故障假设下的概率分布模型。

改正信息可信监测风险控制主要包含误警错误约束和漏检错误约束。其中,改正信息误警错误约束主要保障无故障模式下高可信服务对不同应用场景下改正信息的误警率控制需求。根据无故障模式下假设的改正信息残差统计分布模型以及服务平台对不同应用场景下改正信息的误警率需求,求取改正信息检测阈值。通过比较改正信息检测统计量与检测阈值,判断是否需要当前改正信息告警。顾及不同改正信息误差相互耦合以及改正信息可信监测效率,

在本文中采取序贯监测方案,即首先对卫星轨钟改正信息进行可信监测,然后再监测对流层改正信息,最后监测电离层改正信息。

改正信息可信监测的漏检错误约束主要保障改正信息超出告警极限及时告警的能力。传统定位域可信监测漏检率约束通过分配的可信风险概率要求构建保护水平,与告警限值比较实现漏检错误的检验。由于目前尚无面向北斗/GNSS PPP-RTK 应用场景的权威可信指标及分配体系,本文采用概率域可信监测方法实现改正信息可信监测漏检错误的约束。针对不同卫星不同改正信息可信风险求和获取总体改正信息可信性风险,并与服务平台需求的改正信息可信性风险进行比对,从而判断总体改正信息可信性风险能否满足云端改正信息的可信监测要求,并解决可信性风险分配体系缺乏的问题。

2.3 可信监测服务信息的参数表达及播发策略

可信监测服务表达与编码播发是实现北斗高精度高可信时空服务的关键环节。北斗高精度高可信时空服务表达主要针对多站信号接收环境差异导致的改正信息对应观测残差服从非零均值与非标称高斯分布等问题,开展非高斯改正信息残差高斯化包络补偿方法的研究,夯实可信监测质量标识高斯分布理论假设基础,保障复杂应用场景下时空信息的高精度与高可信。针对现有 PPP-RTK 信息播发编码协议未能兼容完备可信性监测信息的问题,重点围绕可信服务信息开展解构与重编码工作;面向多用户多任务场景的应用需求,形成分级播发精准可信的改正产品,提高北斗/GNSS PPP-RTK 高可信服务效能。可信监测服务信息的参数表达及播发包含两个主要的技术环节:一是可信监测服务信息的生成与表达方法;二是可信监测信息的编码及播发方法。

(1)可信监测服务信息生成与表达方法

由于北斗/GNSS PPP-RTK 改正产品误差在空-时维度上的相关性以及统计样本数量的限制,改正产品残差分布可能存在非零均值、截断、多峰等多种非标称高斯分布特征。利用传统零均值高斯包络方法需要较大的膨胀系数以包络改正信息残差非高斯特征,将导致改正信息质量标识可用性急剧降低,可信监测产品的可用性难以保障。

针对此,本文提出了基于最优保护水平的对偶包络参数优化方法,实现对实时改正信息残差的有偏包络,保障 PPP-RTK 改正产品的可用性;并通过对比优化后包络参数与传统对偶包络参数的包络边

界以验证算法的有效性。首先,分析非零均值、截断、多峰等对统计特征精度描述的要求,调节时间滑动窗口,采集实时改正信息残差与历史数据;在此基础上,构建单峰包络累积分布函数(cumulative distribution function,CDF),实现改正产品残差的单峰对称包络。通过高斯对偶 CDF 双边包络单峰以及包络统计特征生成相应改正信息偏差与质量标识,实现可信改正产品残差在有偏条件下可信服务信息的再表达,由此补偿改正信息的非高斯特性,降低标准差膨胀系数,提高可信服务的可用性。

(2)可信监测信息编码及播发方法

可信监测信息编码及播发主要分为可信监测服务数据解构重编码以及分级服务信息播发策略两部分,技术路线如图 4 所示。通过开展可信监测服务表达、解构编码与播发方法研究,标定 PPP-RTK 改正产品可信信息,保障 PPP-RTK 高精度高可信服务的连续性和一致性,实现改正产品的分级播发,提高北斗/GNSS PPP-RTK 高精度高可信产品信息的服务性能。

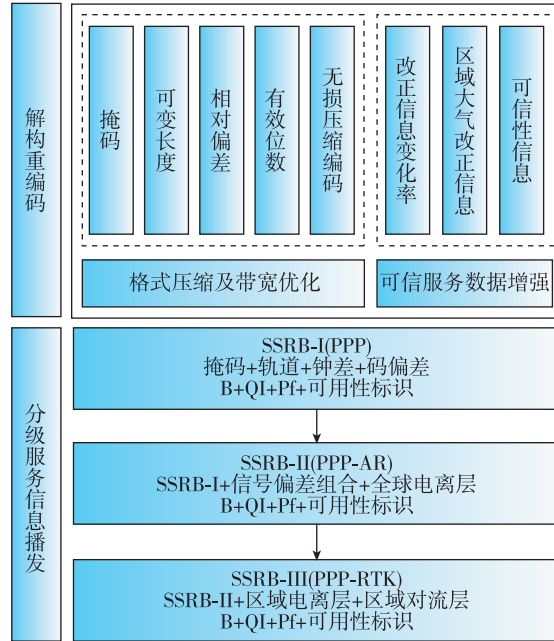


图 4 可信服务信息解构编码与播发技术路线

Fig. 4 Technical route of credible service information deconstruction, encoding and broadcasting

由于北斗/GNSS PPP-RTK 高可信服务缺乏标准的编码和播发协议,以及偏远山区、海洋等区域通信资源严重受限等问题,导致北斗/GNSS PPP-RTK 定位精度和连续性受到制约。为此,将现有高精度与高可信参数根据编码协议进行整合优化生成紧凑型

式的精准可信产品,实现可信服务数据增强。针对多任务场景的不同导航性能需求,设计 PPP、PPP-AR 和 PPP-RTK 产品分级播发策略,并根据改正信息的后验质量监测,对异常改正信息单独追加可用性告警标识,以满足可信监测服务及时告警时间的要求。

2.4 用户终端多源融合自主可信监测方法

从保障多源传感器融合的用户端导航定位服务的精度、完好性、连续性和可用性角度出发,分别

研究:1)构建多源导航自适应动态重构技术,最大限度保障导航的连续性;2)基于多重假设解分离准则和自主完好性监测外推的多源融合系统完好性监测技术,保障多源融合系统的完好性;3)构建异源异构导航传感器故障树模型,以系统级故障检测性能最优实现多重风险源的完好性风险和连续性风险优化分配,保障多源融合系统服务的可用性。用户端可信监测技术框架如图 5 所示。

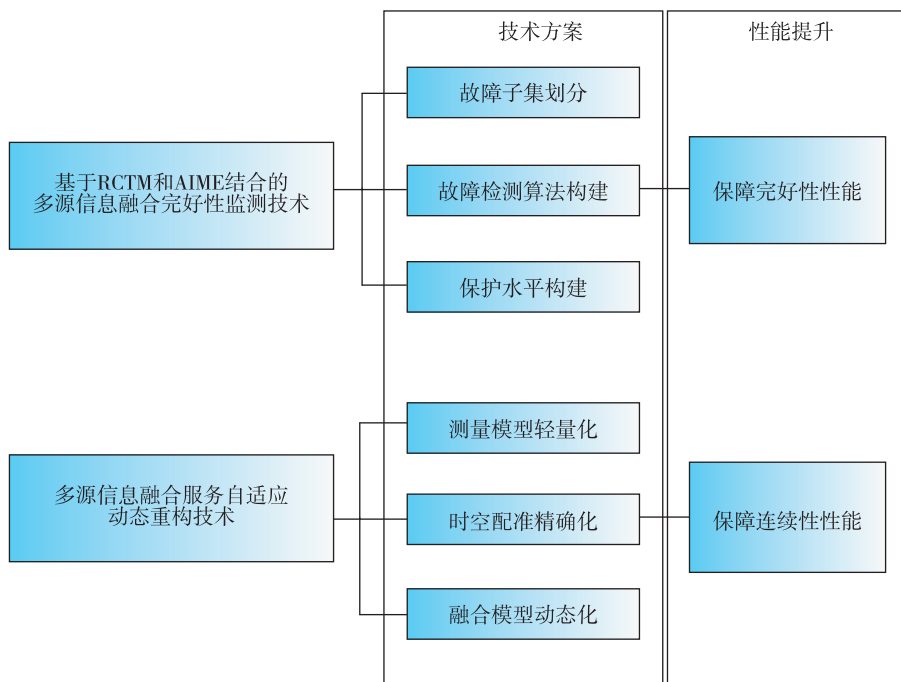


图 5 多源融合定位可信监测技术框架

Fig. 5 Technical framework of credible monitoring for multi-source fusion positioning

3 总结与展望

北斗高精度高可信定位已成为未来 5~10 年的发展趋势,北斗/GNSS PPP-RTK 精准可信定位技术是无人装备实现精准、可靠、连续作业的前提。在推动数字经济发展的进程中,高精度和高可信相互依存,一方面,高精度是实现多重风险源并发态势下北斗/GNSS PPP-RTK 高可信监测的基础;另一方面,高可信是实现北斗/GNSS 高精度时空信息无人化应用的先决条件。目前,高可信包含并依赖北斗等 GNSS 本身的完好性,并在此基础上朝着精细化、矢量化、载波相位层级以及终端与服务端协同的方向拓展。高可信技术除本文提到的数据处理之外,还涉及信号异常、信号干扰以及通信链路等方面内容,仍需要深入研究。

参考文献

[1] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.
 Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510(in Chinese).
 [2] 杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT 智能服务[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1006-1012.
 Yang Yuanxi, Yang Cheng, Ren Xia. PNT intelligent services[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(8): 1006-1012(in Chinese).
 [3] 刘经南, 罗亚荣, 郭迟, 等. PNT 智能与智能 PNT [J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 811-828.
 Liu Jingnan, Luo Yarong, Guo Chi, et al. PNT intelligence and intelligent PNT[J]. Acta Geodaetica et Carto-

- graphica Sinica, 2022, 51(6): 811-828(in Chinese).
- [4] 邓中亮, 王翰华, 刘京融. 通信导航融合定位技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 15-25.
Deng Zhongliang, Wang Hanhua, Liu Jingrong. Status and trend of communication-navigation integrated positioning technology[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 15-25(in Chinese).
- [5] Yuan Y, Mi X, Zhang B. Initial assessment of single- and dual-frequency BDS-3 RTK positioning[J]. Satellite Navigation, 2020, 31(1): 338-344.
- [6] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations[J]. Journal of Geodesy, 2007, 82(7): 389-399.
- [7] Liu Y, Zhou W, Ji B, et al. Effect of stochastic modeling for inter-frequency biases of receiver on BDS-3 five-frequency undifferenced and uncombined precise point positioning[J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3595.
- [8] Snay R A, Soler T. Continuously operating reference station (CORS): history, applications, and future enhancements[J]. Journal of Surveying Engineering, 2008, 134(4): 95-104.
- [9] Teunissen P, Odijk D, Zhang B C. PPP-RTK: results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution[J]. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation Series A, 2010, 42(4): 223-229.
- [10] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 1-14.
Yu Baoguo, Bao Yachuan, Yang Menghuan, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 1-14(in Chinese).
- [11] 张宝成, 柯成, 查九平, 等. 非差非组合 PPP-RTK: 模型算法, 终端样机与实测结果[J]. 测绘学报, 2022, 51(8): 1725-1735.
Zhang Baocheng, Ke Cheng, Zha Jiuping, et al. Undifferenced and uncombined PPP-RTK: algorithmic models, prototype terminals and field-test results[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(8): 1725-1735(in Chinese).
- [12] Beech T W, Martínezolagüe M, Cosmenschortmann J. Integrity: a key enabler for liability critical applications[C]// Proceedings of Annual Meeting of the Institute of Navigation, 2005: 1-10.
- [13] Milner C, Ochieng W. ARAIM for LPV-200: the ideal protection level[J]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2010, 7672(6): 3191-3198.
- [14] Li L, Li Z, Yuan H, et al. Integrity monitoring-based ratio test for GNSS integer ambiguity validation[J]. GPS Solutions, 2015, 20(3): 573-585.
- [15] Su X L, Zhan X, Niu M, et al. Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) performances of combined GPS/BeiDou/QZSS in urban canyon[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2014, 9(3): 275-281.
- [16] Wang W, Xu Y. A modified residual-based RAIM algorithm for multiple outliers based on a robust MM estimation[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(18): 5407.
- [17] Heßelbarth A, Wanninger L. SBAS orbit and satellite clock corrections for precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2013, 17(4): 465-473.
- [18] 李亮. 陆基增强系统定位与完好性监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
Li Liang. Ground based augmentation system: positioning and integrity monitoring[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012(in Chinese).
- [19] Du Y, Wang J, Rizos C, et al. Vulnerabilities and integrity of precise point positioning for intelligent transport systems: overview and analysis[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1): 27-48.
- [20] Li Z, Chen W, Ruan R, et al. Evaluation of PPP-RTK based on BDS-3/BDS-2/GPS observations: a case study in Europe[J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 1-12.
- [21] Wang N, Li Z, Yuan Y, et al. BeiDou global ionospheric delay correction model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 1-13.
- [22] Psychas D, Verhagen S, Liu X, et al. Assessment of ionospheric corrections for PPP-RTK using regional ionosphere modelling[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 30(1): 014001.
- [23] Zaminpardaz S, Teunissen P J, Tiberius C C. Risking to underestimate the integrity risk[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 1-16.
- [24] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment-methodology and results[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(12): 3020-3038.
- [25] Li X, Huang J, Li X, et al. Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities[J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1): 28.
- [26] Li Z, Wang N, Liu A, et al. Status of CAS global ionospheric maps after the maximum of solar cycle 24

- [J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 263-277.
- [27] Meng Q, Hsu L T. Integrity monitoring for all-source navigation enhanced by Kalman filter-based solution separation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(14): 15469-15484.
- [28] El-Mowafy A, Kubo N. Integrity monitoring of vehicle positioning in urban environment using RTK-GNSS, IMU and speedometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 055102.
- [29] Li W, Li Z, Wang N, et al. A satellite-based method for modeling ionospheric slant TEC from GNSS observations: algorithm and validation[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(1): 1-13.
- [30] Zhao J, Hernández-Pajares M, Li Z, et al. Integrity investigation of global ionospheric TEC maps for high-precision positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(3): 01487.

(编辑:孟彬)