引文格式:王柳淇,李亮,陈雷,等.实时精密卫星钟轨完好性服务初步性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(7):1372-1383.DOI:10.13203/j.whugis20240396

Citation:WANG Liuqi,LI Liang,CHEN Lei,et al.Preliminary Performance Evaluation of Integrity Service for Real-Time Precise Satellite Orbit and Clock[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(7):1372-1383.DOI:10.13203/j.whugis20240396

实时精密卫星钟轨完好性服务初步性能评估

王柳淇[1] 李 亮[1] 陈 雷[2] 王宁波[3] 李子申[3,4] 马卫天华[1]
李 敏[1] 刘 学[1]

1 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨,150001
2 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094
3 中国科学院空天信息创新研究院,北京,100094
4 齐鲁空天信息创新研究院,山东 济南,250132

摘 要:实时精密卫星钟轨修正产品是实时精密单点定位(real-time precise point positioning,RT-PPP)的基础支撑信息,卫星钟轨修正产品异常将导致RT-PPP导航定位结果不再可靠,严重制约RT-PPP在生命安全相关领域的应用。传统针对RT-PPP完好性监测的研究主要关注于用户终端,要求用户终端承担较多的完好性预算并具备较强的计算能力,未完全发挥云端主控站在实时完好性监测层级的作用。针对此,构建播发前-播发后协同的实时精密卫星钟轨完好性服务架构,通过多站联合的异常检测与完好性边界评估,生成满足完好性风险与连续性风险需求的完好性信息,并实时播发给服务用户,形成实时精密卫星钟轨完好性服务。基于所构建山东省完好性监测站网实时数据流,提供实时精密卫星钟轨完好性服务,并以欧洲定轨中心产品为参考,评估完好性服务性能。实验结果表明,播发实时卫星钟轨质量标识可有效刻画实时卫星钟轨修正产品误差,完好性监测的可用性优于99.99%。

关键词:实时精密单点定位;完好性监测;实时精密卫星钟轨修正产品;完好性信息;可用性

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-27

DOI:10.13203/j.whugis20240396 **文章编号**:1671-8860(2026)07-1372-12

Preliminary Performance Evaluation of Integrity Service for Real-Time Precise Satellite Orbit and Clock

WANG Liuqi[1] *LI Liang*[1] *CHEN Lei*[2] *WANG Ningbo*[3] *LI Zishen*[3,4] *MA Weitianhua*[1]
LI Min[1] *LIU Xue*[1]

1 College of Intelligent System Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2 Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China
3 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
4 Qilu Aerospace Information Research Institute, Jinan 250132, China

Abstract: **Objectives**: Integrity monitoring is essential for ensuring the reliability of real-time precise point positioning. Traditional studies mainly focus on user-level integrity monitoring, whereas the master station is primarily responsible for determining the integrity parameters required for user-level integrity monitoring. This approach places a substantial integrity-monitoring burden on users and requires considerable computational resources, thereby failing to fully exploit the role of the master station in integrity monitoring. Currently, several analysis centers publicly provide real-time precise satellite orbit and clock correction products. The standard defined by radio technical commission for maritime services (RTCM) has reserved message fields for broadcasting the integrity information of satellite orbit and clock correction products. However, to the best of our knowledge, no analysis center currently provides public integrity services for real-time precise

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3901300);国家自然科学基金(62373117)。

第一作者:王柳淇,博士生,研究方向为GNSS空间信号误差完好性监测。wangliuqi@hrbeu.edu.cn

通信作者:李亮,博士,教授。liliang@hrbeu.edu.cn

satellite orbit and clock correction products. **Methods:** This paper develops a pre- and post-broadcast integrity monitoring architecture for real-time precise satellite orbit and clock correction products. First, a quality indicator is determined using the cumulative distribution function overbounding approach. Then, a multi-station cooperative monitoring strategy, including fault detection and integrity bound evaluation, is developed. The quality indicator is evaluated to ensure compliance with the required integrity and continuity risk requirements. Finally, the integrity information is encoded into RTCM messages and broadcast to users through networked transport of RTCM via internet protocol. **Results:** Based on the data stream from the integrity monitoring network established in Shandong Province and the real-time correction products provided by Centre National d′Études Spatiales, integrity services for real-time precise satellite orbit and clock correction products are generated. The performance of the proposed integrity service is preliminarily evaluated using the final satellite orbit and clock products provided by Center for Orbit Determination in Europe as the reference. The experimental results show that the availability of integrity monitoring for real-time precise satellite orbit and clock correction products exceeds 99.99%. **Conclusions:** The quality indicator provided by the proposed integrity service can effectively characterize the errors in real-time precise satellite orbit and clock correction products.

Key words: real-time precise point positioning(RT-PPP); integrity monitoring; real-time precise satellite orbit and clock correction product; integrity information; availability

实时精密单点定位(real-time precise point positioning,RT-PPP)通过云端主控站与用户终端的协同配合实现实时高精度导航定位,云端主控站接收处理全球基准站网数据,实时生成并向用户播发精密卫星轨道、卫星钟等状态空间(state space representation,SSR)修正产品。用户终端依托独立接收机接收SSR修正产品,通常可在半小时内收敛,实现厘米级的高精度定位,达到诸如自动驾驶、无人农场等生命安全相关领域的定位精度要求[1-5]。生命安全相关领域应用除了对定位精度需求外,还需要保障导航定位的可靠性。完好性监测是保障导航定位可靠性的核心关键[6-7],传统针对RT-PPP完好性监测的研究主要关注于用户终端,云端主控站通常用于离线评估确定终端完好性监测所需的完好性参数[8-10]。这种处理策略要求用户终端承担较多的完好性预算并具备较强的计算能力,并未充分发挥云端主控站在实时完好性层级的作用。相比用户终端,云端主控站拥有坐标精确已知的监测站、先进的硬件设施、强大的计算资源以及更少的信号干扰风险等优势,可获取更为精确的实时卫星钟轨修正产品误差信息,有利于提升实时卫星钟轨修正产品完好性监测灵敏度,从而保障导航定位服务的完好性。尽管目前已有多家分析中心公开提供实时精密卫星钟轨修正产品服务,例如法国国家空间研究中心(Centre National d′Études Spatiales,CNES)、武汉大学、中国科学院、欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe,CODE)等,且在海事无线电技术委员会(radio technical commission for maritime services,RTCM)标准协议中也预留了实时精密卫星钟轨修正产品的完好性信息位,但暂无机构公开提供实时精密卫星钟轨完好性服务[11]。因此,越来越多的研究关注于在云端主控站开展实时精密卫星钟轨修正产品完好性监测[12-18]。

作为RT-PPP的基础服务信息,实时精密卫星钟轨修正产品异常将直接影响RT-PPP导航定位的可靠性。实时精密卫星钟轨修正产品异常可被多重因素触发,例如实时精密卫星轨道产品用于修正由广播星历解算获取的卫星轨道,卫星非计划的机动与广播星历参数错误将降低实时精密轨道产品的可靠性[19-20]。实时精密轨道产品通常基于轨道动力学模型预测获取,地影期的存在及卫星机动期间的动力学模型失准,将可能导致实时精密轨道产品异常[13]。实时精密卫星钟产品通常以实时精密卫星轨道作为输入进行估计获取,低可靠性的卫星轨道产品以及卫星异常钟漂将损害实时卫星钟产品的可靠性[17]。此外,实时精密卫星钟轨修正产品通过处理来自全球的基准站实时观测数据生成,基准站异常、数据时延过大等也有可能造成修正产品可靠性降低[4]。事后全球定位系统(global positioning system,GPS)实时精密卫星钟轨修正产品完好性评估结果表明[21],实时精密卫星钟轨修正产品的单星与多星异常概率分别在1×10^{-4}和1×10^{-5}量级,远高于生命安全相关领域1×10^{-7}量级的完

好性风险需求。为扩展RT-PPP在生命安全相关领域的应用,有必要在云端主控站开展实时精密卫星钟轨修正产品完好性监测研究,生成并向用户播发完好性信息,形成实时精密卫星钟轨完好性服务,以保障实时精密卫星钟轨修正产品的可靠性。

目前大多数实时精密卫星钟轨修正产品完好性监测方法可分为状态域监测、测距域监测和定位域监测3类,状态域监测法关注于构建状态空间卫星轨道或卫星钟修正产品误差对应的异常监测器与保护水平[22-24],然而状态空间异常与测距域及定位域异常并不等价,例如状态域卫星轨道误差在测距域的映射与卫星及接收机位置密切相关,当卫星轨道误差与视距方向接近垂直时,状态域异常对测距的影响较小。因此,测距域监测法与定位域监测法受到了更多关注[11-13,15,25]。测距域监测围绕实时卫星钟轨等效测距误差的提取与控制开展,对幅值较大、单星的修正产品异常有较高的检测灵敏度[25]。定位域修正产品监测重点在于控制多重并发且幅值较小的异常,由于监测盲区的存在,这类异常通常难以被测距域监测器有效控制。通过测距域监测器与定位域监测器的紧密配合,可实现完备的修正产品异常控制[26]。因此,本文采用测距域监测与定位域监测相结合的方法严密保障实时精密卫星钟轨修正产品完好性。

广域增强系统(wide area augmentation system,WAAS)码观测量层级的用户差分距离误差(user differential range error,UDRE)监测方法最高可支持民航带垂直引导的航向道定位所需的导航性能[27-28],但难以满足RT-PPP分米至厘米级定位精度所需的监测灵敏度。现有载波相位层级的实时精密卫星钟轨修正产品测距域监测法主要为质量监测,其核心在于异常检测与排除[11-13,19]。质量监测主要侧重于抑制修正产品异常以避免定位精度降级,通常仅需考虑95%概率的异常控制,而完好性监测则需满足1×10^{-7}量级的完好性风险需求,二者对异常控制需求的差异使得质量监测并未充分考虑修正产品的完好性边界。从完好性监测的角度,云端主控站应在完好性风险与连续性风险约束下,有效监测修正产品异常并精确刻画修正产品误差,卫星钟轨修正产品的完好性边界应得到保守量化。此外,天宝等公司或机构虽已提供精密卫星钟轨的完好性服务,其公开文档也披露播发前-播发后协同的实时完好性服务架构[15],但由于商业限制与专利保护,其技术细节尚不明确。综上所述,现有实时精密卫星钟轨完好性监测方法存在完好性边界缺失以及完好性监测架构不明确的问题,实时卫星钟轨修正产品全链路风险源尚未得到有效控制,导致严苛的完好性风险与连续性风险需求难以满足。

本文构建播发前-播发后协同的实时精密卫星钟轨完好性服务架构,在云端主控站基于无电离层组合提取实时卫星钟轨测距残差,并据此生成实时精密卫星钟轨质量标识;播发前完好性监测通过多站联合开展实时精密卫星钟轨修正产品异常检测与完好性边界评估,保障实时精密卫星钟轨质量标识在完好性风险与连续性风险需求下,有效表征实时精密卫星钟轨修正产品误差;播发后完好性监测通过评估定位域保护水平,监测多重并发且幅值较小的修正产品异常,并完成通信链路的回环校验,控制实时精密卫星钟轨修正产品的全链路风险源。采用RTCM标准格式编码所生成的完好性信息,通过网络传输RTCM协议(networked transport of RTCM via internet protocol,NTRIP)实时播发给服务用户,形成实时精密卫星钟轨完好性服务。最后,基于所构建的山东省完好性监测站网实时数据流,提供实时精密卫星钟轨完好性服务,并以最终卫星钟轨修正产品为参考评估所提供完好性服务的性能。

1 精密卫星钟轨完好性服务架构

精密卫星钟轨完好性服务架构是形成严密完好性服务的前提。针对实时卫星钟轨误差传播的全链路风险源,本文在WAAS、天宝等监测架构的基础上构建播发前-播发后协同的实时精密卫星钟轨完好性服务架构,通过测距域监测与定位域监测的紧密配合,实现实时卫星钟轨修正产品异常的完备控制,实时精密卫星钟轨完好性服务架构如图1所示。

具体而言,实时精密卫星钟轨完好性服务依赖于独立完好性监测站网数据与云端主控站开展,主要包括播发前完好性监测与播发后完好性监测两部分内容。其中,播发前侧重于测距域完好性监测,云端主控站接收完好性监测站网的原始观测数据,通过并行无电离层组合精密单点定位提取实时卫星钟轨测距残差,确定精密卫星钟轨质量标识。在此基础上,开展多站联合的异常

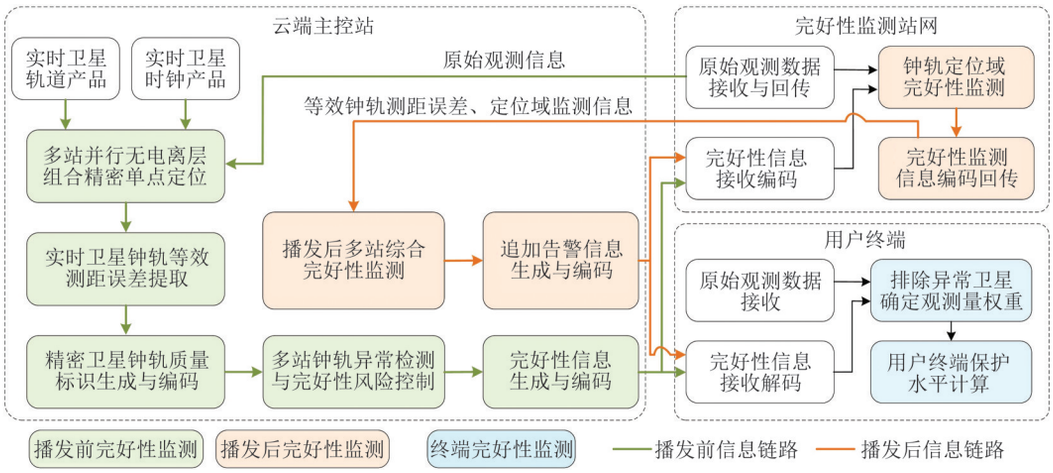


图 1　实时精密卫星钟轨完好性服务架构

Fig. 1　Architecture for Integrity Service of Real-Time Precise Satellite Orbit and Clock

检测与完好性边界估计,监测幅值较大的卫星钟轨异常以及监测站数据异常等风险源,生成实时精密卫星钟轨完好性信息并编码播发给用户。完好性监测站网接收云端主控站所播发的完好性信息,开展播发后定位域完好性监测,确保完好性信息编码、通信时延以及测距域多重并发小偏差等风险源不会导致定位误差超限,并将监测信息回传给云端主控站综合决策是否播发追加告警信息。用户终端接收播发前与播发后完好性服务信息,排除异常观测信息并利用质量标识确定观测量权重,构建终端保护水平,确保用户终端导航定位完好性。由于云端主控站已严密监测修正产品异常,用户终端仅需监测用户本地的风险源,需监测的风险源数目与异常模式均减少,从而减少用户终端需承担的完好性预算并降低其计算负担。

2　实时精密卫星钟轨质量标识生成

实时精密卫星钟轨完好性服务需在卫星钟轨修正产品异常情况下及时向用户发出告警,并在无异常情况下有效刻画卫星钟轨修正产品误差,生成卫星钟轨质量标识播发给服务用户。有效提取实时精密卫星钟轨等效测距误差是卫星钟轨质量标识生成与完好性监测的基础,本文基于无电离层组合(ionosphere-free,IF)从误差源互相耦合的观测量中剥离提取实时卫星钟轨测距残差[13,15]:

$$r_i^s=\phi_{\mathrm{IF}}-\left\|X_{\mathrm{CP}}^s-X_{\mathrm{IMS},i}\right\|-c\Delta t_{\mathrm{IMS},i}+c\Delta t_{\mathrm{CP}}^s-Z_{w,i}m\left(\theta_i^s\right)-A_{\mathrm{IF},i}^s \tag{1}$$

式中,上标 s 和下标 i 分别表示不同卫星和完好性监测站;下标 CP 表示实时卫星钟轨修正产品(correction product,CP);IMS 表示完好性监测站(integrity monitoring station,IMS);ϕ_{IF} 为 IF 载波相位观测量;X_{CP} 为经实时精密卫星轨道产品修正后的卫星位置;X_{IMS} 为精确已知的完好性监测站位置;c 为真空中的光速;Δt_{IMS} 为完好性监测站钟差;$c\Delta t_{\mathrm{CP}}$ 为经实时精密卫星钟产品修正后的卫星钟差;Z_w 为天顶对流层湿延迟;$m(\theta)$ 为对流层映射函数;θ 为卫星高度角;A_{IF} 为无电离层组合浮点模糊度。相对论效应、地球潮汐、相位缠绕等其余误差源均通过已有的模型进行修正。

由于式(1)中的误差源均被有效修正或抑制,r 为有效敏感实时卫星钟轨产品测距误差变化量[13],因此可用于生成卫星钟轨质量标识。卫星钟轨质量标识应有效刻画实时精密卫星钟轨误差,受日食、监测站本地误差等因素影响,实时精密卫星钟轨误差呈现厚尾等典型非高斯特征[8],需通过高斯化包络补偿卫星钟轨非高斯特征,确定精密卫星钟轨质量标识。经典 Sigma 包络方法要求样本具备良好的单峰与对称性,在面对具有非高斯特征的实时精密卫星钟轨误差样本时,包络结果往往过于保守,可用性较低。为保障修正产品可用性,本文采用对偶包络方法[29],在完成周跳探测与粗差剔除后,采用滑动窗的形式对一段时间内的实时卫星钟轨测距残差数据进行包络,生成不同卫星的标准差(σ_U)与偏差(bias)作为卫星钟轨质量标识。采用 RTCM 标准格式对卫星钟轨质量标识进行编码[30]:

$$\alpha\leqslant 3^{E_{\mathrm{class}}}\left(1+\frac{E_{\mathrm{value}}}{4}\right)-1 \tag{2}$$

式中,α 表示满足式(2)约束的最小幅值卫星钟轨质量标识,包括 σ_U 和 bias;E_{class} 和 E_{value} 为卫星钟

轨质量标识α编码后的表征值,取值为0~7范围内的整数,每颗卫星钟轨质量标识编码后的数据量共计为12 bit。基于式(2)将σ_U与bias分别表征为E_{class}和E_{value},由于E_{class}与E_{value}取值范围固定且为整数,可采用循环遍历的方式确定满足式(2)约束的最小E_{class}与E_{value}值。用户接收到表征为E_{class}与E_{value}的卫星钟轨质量标识后,同样基于式(2)解码计算获取实际的σ_U与bias,与RTCM标准格式保持一致。考虑完好性服务的保守性及编码的精度损失,需将卫星钟轨质量标识转换为毫米量级进行编码,并保障编码后由E_{class}与E_{value}计算获取的σ_U与bias不低于编码前的对应值。

3 实时精密卫星钟轨完好性监测

为保障所生成卫星钟轨质量标识在给定完好性风险与连续性风险约束下,有效表征实时精密卫星钟轨修正产品误差,需进一步开展实时精密卫星钟轨修正产品完好性监测。在精密卫星钟轨完好性服务架构中,通过播发前测距域完好性监测与播发后定位域完好性监测的紧密配合,实现完备的实时精密卫星钟轨修正产品异常控制。

3.1 播发前完好性监测

由于式(1)中所构建的r对实时卫星钟轨产品测距误差变化较为敏感,本文将其作为实时精密卫星钟轨完好性监测检验统计量。r主要包含实时卫星钟轨产品测距误差、对流层延迟估计误差、观测量噪声等误差源,其中实时卫星钟轨产品误差理论上应服从均值为bias、标准差为σ_U的高斯分布,对流层延迟估计误差和观测量噪声则通常分别被假设为随机游走噪声和高度角相关的高斯白噪声,即:

$$r_i^s \sim N\left(\text{bias}^s,\left(\sigma_{r,i}^s\right)^2\right) \tag{3}$$

精密卫星钟轨完好性监测重点关注于对实时卫星钟轨产品测距误差的控制,将r的组成划分为实时卫星钟轨产品测距误差与其他误差。式中,$\sigma_{r,i}^s=\sqrt{\left(\sigma_U^s\right)^2+\left(\sigma_{T,i}^s\right)^2+\left(\sigma_{O,i}^s\right)^2}$,其中$\sigma_T$为对流层延迟估计误差标准差,可通过对流层延迟估计误差协方差确定;σ_O为观测量噪声标准差,可通过经验高度角模型确定。基于式(3)的假设模型,在实时精密卫星钟轨修正产品无异常情况下,若检测统计量超过检测阈值,则破坏修正产品连续性:

$$P_{\text{CR}}=\sum_{s=1}^{N}\left\{P_{\text{CR}}^s\right\}=\sum_{s=1}^{N}\left\{P\left(\left|r_i^s\right|>T_i^s\right)\right\} \tag{4}$$

式中,P_{CR}为系统连续性所需风险(required risk, CR);N代表可见卫星数目;P_{CR}^s为分配给卫星s的CR;T为检测阈值。根据检测统计量r的假设模型可确定检测阈值为:

$$T_i^s=K_{\text{CR}}\sigma_{r,i}^s+\text{bias}^s=Q^{-1}\left(\frac{P_{\text{CR}}^s}{2}\right)\sigma_{r,i}^s+\text{bias}^s \tag{5}$$

式中,K_{CR}为满足P_{CR}^s对应的高斯分位数;$Q^{-1}(\,)$为尾部的高斯逆累积分布函数。通过比较r与T开展异常检测;若$|r|>T$,初步认为对应实时精密卫星钟轨修正产品发生异常。

由于观测量噪声等因素影响,异常检测器存在失效的风险,异常检测通过后,应严密评估卫星钟轨修正产品完好性边界[31]。定义异常检测失效且实时卫星钟轨产品测距误差超过卫星钟轨等效测距完好性边界ζ为完好性风险:

$$P_{\text{IR}}=\sum_{s=1}^{N}\left\{P_{\text{IR}}^s\right\}=\sum_{s=1}^{N}\left\{P\left(\left|r_i^s\right|<T_i^s,\left|e^{\text{IURE}}\right|>\zeta_i^s\right)\right\} \tag{6}$$

式中,P_{IR}为总体所需完好性风险(integrity risk, IR);P_{IR}^s代表分配给卫星s的完好性风险;e^{IURE}为以精度更高的卫星钟轨产品为参考计算得到的瞬时用户测距误差(instantaneous user range error,IURE),用于表征实时卫星钟轨产品的测距误差[10-11,21]。对式(6)右侧项展开并放缩得到:

$$\begin{aligned}P_{\text{IR}}^s=&P\left\{\left(-T_i^s<r_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}>\zeta_i^s\right)\cup\left(-T_i^s<r_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}<-\zeta_i^s\right)\right\}\leqslant\\&P\left(-T_i^s<r_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}>\zeta_i^s\right)+P\left(-T_i^s<r_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}<-\zeta_i^s\right)\end{aligned} \tag{7}$$

定义式(7)右侧两项分别P_1和P_2,则:

$$\begin{aligned}P_1=&P\left(-T_i^s<r_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}>\zeta_i^s\right)=\\&P\left(-T_i^s<e^{\text{IURE}}+\delta_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}>\zeta_i^s\right)=\\&P\left(-T_i^s<e^{\text{IURE}}+\delta_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}+\delta_i^s>\zeta_i^s+\delta_i^s\right)\leqslant\\&P\left(e^{\text{IURE}}+\delta_i^s<T_i^s,e^{\text{IURE}}+\delta_i^s-\zeta_i^s>\delta_i^s\right)\leqslant\\&P\left(T_i^s-\zeta_i^s>\delta_i^s\right)\end{aligned} \tag{8}$$

式中,δ_i^s为除实时卫星钟轨产品测距误差外的其他误差。同理得到:

$$P_2 \leqslant P\left(-T_i^s+\zeta_i^s<\delta_i^s\right) \tag{9}$$

整理式(7)~式(9),得到:

$$P_{\mathrm{IR}}^s \leqslant P\left(T_i^s-\zeta_i^s>\delta_i^s\right)+P\left(-T_i^s+\zeta_i^s<\delta_i^s\right)= 2Q\left(\frac{-T_i^s+\zeta_i^s}{\sigma_\delta}\right) \tag{10}$$

式中,Q为尾部的高斯累积分布函数;σ_δ为除钟轨误差外其他误差的标准差。

基于最差情况保护原则,令式(10)右侧项等于分配的完好性风险P_{IR}^s,得到卫星钟轨等效测距完好性边界ζ为:

$$\zeta_i^s = T_i^s+K_{\mathrm{IR}}\sigma_{\delta,i}^s = T_i^s+Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{IR}}^s}{2}\right)\sqrt{\left(\sigma_{T,i}^s\right)^2+\left(\sigma_{O,i}^s\right)^2} \tag{11}$$

式中,K_{IR}为分配IR对应的高斯分位数。在给定完好性风险需求下,卫星钟轨等效测距完好性边界需有效包络实时卫星钟轨测距误差。通过比较卫星钟轨等效测距完好性边界与可容忍最大等效测距误差l_r,判断异常检测器是否失效,若ζ超过l_r,则初步标记对应卫星为不可用。

一方面,由于完好性监测站位置及接收机所接收观测量噪声存在差异,不同站点针对同一共视卫星的监测结果可能不同;另一方面,完好性监测站也可能存在由异常多径误差、硬件设施异常等因素导致的误警。为提升完好性监测可用性,对多站完好性监测结果进行协同监测,确定播发前告警信息。多站协同监测告警的判决条件为:

$$\xi^s=\sum_{i=1}^{N_m} b_i^s \geqslant l_b^s,\ N_m \geqslant 3 \tag{12}$$

式中,ξ为多站协同的布尔型检测统计量;N_m为共视监测同一颗卫星的监测站数目;b为不同监测站的布尔型告警信息,若对应卫星被初步标记为异常或不可用,则b为1,否则为0;l_b^s为协同监测对应的布尔型告警门限,本文采用投票表决的方式进行确定。若多站协同监测告警,则说明所生成质量标识信息无法在给定完好性风险与连续性风险要求下有效刻画实时精密卫星钟轨修正产品误差,对应卫星钟轨修正产品将被标记为异常,反之则说明对应实时卫星钟轨修正产品正常。若共视监测同一颗卫星的N_m小于3,则对应卫星钟轨修正产品会被标记为未监测。

实时精密卫星钟轨完好性服务针对不同卫星共包含3种监测状态,即未监测、正常和异常,为避免播发前完好性监测播发额外告警信息,保障与RTCM标准协议的兼容,本文利用编码后的质量标识表征值E_{class}与E_{value}代表不同监测状态,其中未监测对应质量标识的E_{class}与E_{value}值均置为0;异常状态对应质量标识的E_{class}与E_{value}值均置为7;其他E_{class}与E_{value}值则表示正常状态,质量标识与不同监测状态的对应关系如表1所示。

表1　质量标识与不同监测状态对应关系

Table 1　Different Monitoring Cases for the Quality Indicator

监测状态	触发条件	E_{class}	E_{value}
未监测	$N_m<3$	0	0
正常	$\xi^s<l_b^s$	0~7	0~7
异常	$\xi^s\geqslant l_b^s$	7	7

将实时精密卫星钟轨质量标识编码生成播发前完好性信息,通过NTRIP播发给服务区域用户和完好性监测站网。完好性监测站接收解码播发前完好性服务信息,开展播发后定位域完好性监测;用户通过挂载点接收所播发的完好性信息,确定观测量权重并排除异常观测量,构建终端保护水平,从而保障终端导航定位的完好性。

3.2　播发后完好性监测

为确保完好性信息编码、通信时延以及测距域多重并发小偏差等风险源不会导致定位误差超限,完好性监测站将接收实时卫星钟轨完好性服务信息,开展播发后定位域完好性监测。本文主要参考WAAS用户位置监测器(user position monitor,UPM)[25],构造播发后定位域完好性监测保护水平,提供基础版播发后完好性监测服务,后续将围绕该部分内容做进一步改进。UPM对应的保护水平可表示为:

$$P=3.5\sqrt{\sum_{k=1}^{n}h_{q,k}^2\times\sigma_{r,k}^2}+\sum_{k=1}^{n}\sqrt{h_{q,k}^2\times\mathrm{bias}_k^2} \tag{13}$$

式中,n为完好性监测站的可见卫星数目;q为不同方向;h为投影矩阵$\boldsymbol{H}=\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}$中的元素,其中$\boldsymbol{G}$为几何矩阵。基础版播发后定位域完好性监测保护水平的构造方法主要针对最小二乘估计器,基于卡尔曼滤波估计器的完好性监测方法可用性较最小二乘估计器更优[32],基础版定位域完好性监测性能相对更加保守。由于幅值较大的修正产品偏差通过播发前测距域监测器被认为得到有效控制,未被控制的小偏差可由修正产品质量标识高斯化表征,因此播发后定位域监测器所构建的保护水平并未考虑由幅值较大的修正产品偏差导致的漏检情况。

由于完好性监测站坐标精确固定,可计算获

取实时定位误差。通过判断定位误差与保护水平是否超限实现播发后定位域完好性监测,当定位误差超过保护水平或保护水平超过告警极限时,播发后完好性监测将进行告警。播发后定位域完好性监测被视为保障实时精密卫星钟轨完好性服务的最终屏障,当播发后定位域监测告警时,对应完好性监测站的所有可见卫星将被标记为不可用。主控站将综合所有完好性监测站的监测结果判断是否向用户播发追加告警信息,通过播发前完好性监测和播发后完好性监测的协同配合,形成严密的实时精密卫星钟轨完好性服务。

4 实验与讨论

基于山东省参考站网及所构建山东省完好性监测站网提供的实时数据流,初步验证实时精密卫星钟轨完好性服务性能。实验时间为2024-07-24—2024-08-06(年积日206—219天),采样间隔设置为1 s,实时处理GPS、Galileo与北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)3个系统观测数据,卫星截止高度角设置为10°。以CNES公开提供的实时卫星钟轨修正产品为例开展实验,接收SSR信息的挂载点为SSRA00CNE0。以CODE提供的最终卫星钟轨产品为参考计算IURE,并评估实时完好性服务性能。实时卫星钟轨修正产品所需承担的完好性风险与连续性风险分别保守设置为5×10^{-8}和5×10^{-6},采用平均分配的方式确定每颗卫星需承担的完好性指标,可容忍最大等效测距误差设置为1 m。所生成的完好性信息通过挂载点IMSA00HEU0实时播发给用户,播发间隔为5 s,与实时卫星钟轨修正产品更新间隔保持一致。选用4个山东省连续运行参考站作为测试站点,为保障数据的独立性,完好性监测站与测试站均未参与实时精密卫星钟轨修正产品生成,同时测试站也未参与完好性信息生成,完好性监测站与测试站的地理位置如图2所示。完好性监测站应冗余覆盖服务区域且独立于实时卫星钟轨修正产品生成,由于实时卫星钟轨修正产品大多基于国际GNSS服务站点实时数据流生成,暂时无法获取全球范围内满足上述条件要求的站点数据,因此本文暂以山东省境内站点数据为例进行实验分析,在具备条件后将进一步开展全球范围内的算法性能评估。

首先评估实时精密卫星钟轨修正产品完好性监测性能,图3和图4分别展示了年积日207天的检测统计量和完好性边界,为便于展示,仅绘制了3个系统部分卫星的数据。由图3可知,本文构建的检测统计量与事后计算获取的IURE基本保持一致,证明所构建统计量的有效性。绝大部分检测统计量位于检测阈值范围内,但受过大观测量噪声等因素影响,部分历元存在检测统计量超过检测阈值的情况,对实时精密卫星钟轨完好性服务的连续性产生威胁。由图4可见,完好性边界可在有效包络IURE的情况下低于可容忍最大等效测距误差,未出现包络失效或完好性边界超限的情况,保障了实时精密卫星钟轨完好性服务的可用性。

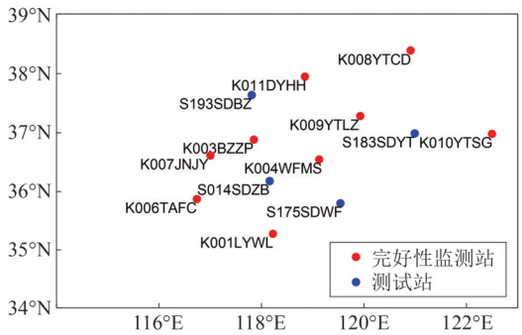


图2 完好性监测站与测试站地理位置

Fig. 2 Geographical Distribution of Integrity Monitoring Stations and Test Stations

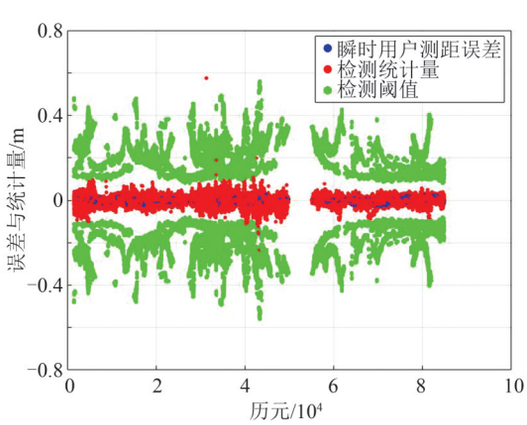


图3 年积日207天的检测统计量时序图

Fig. 3 Time Series of the Test Statistic on Day of Year 207

图5和图6进一步展示了异常检测与完好性边界评估的斯坦福图。在实验期间,未出现漏检及完好性边界包络失效的情况,但异常检测与完好性边界评估分别存在681个误警样本和382个不可用样本,说明通过多站协同监测控制由部分监测站告警产生误警错误的必要性。图7给出了G12号卫星多站协同监测对应的布尔型检测统计量与布尔型告警极限,个别完好性监测站告警

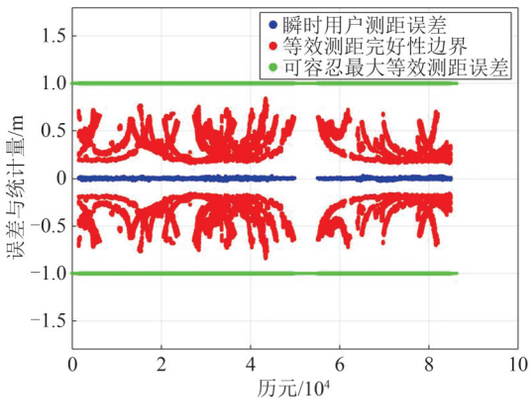


图 4　年积日 207 天的完好性边界时序图

Fig. 4　Time Series of the Integrity Bound on Day of Year 207

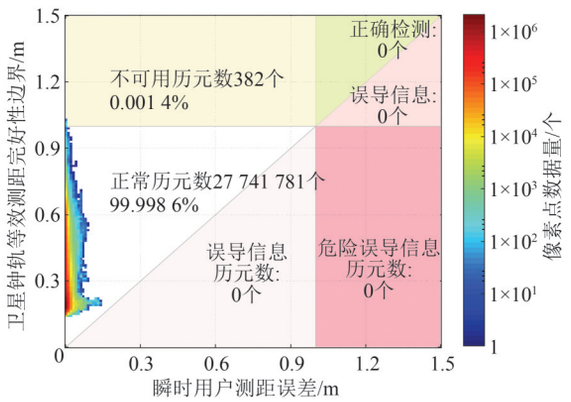


图 6　完好性边界评估斯坦福图

Fig. 6　Stanford Plot of Integrity Bound Evaluation

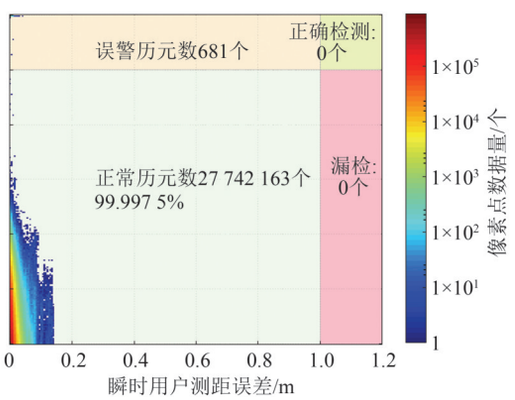


图 5　异常检测斯坦福图

Fig. 5　Stanford Plot of Fault Detection

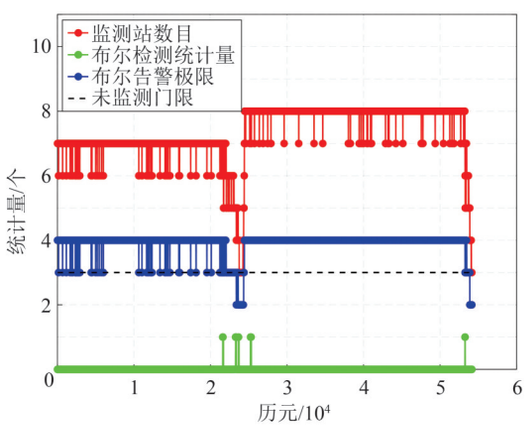


图 7　G12 号卫星对应的布尔型检测统计量与布尔型告警极限

Fig. 7　Boolean Test Statistic and Boolean Alert Limit of Satellite G12

对应的布尔型检测统计量并未超过对应的告警极限,因此并未触发最终告警。表 2 列出了详细的实时精密卫星钟轨修正产品完好性监测统计结果,其中单站监测对应的 GPS、BDS 和 Galileo 连续性风险分别为 4.98×10^{-5}、7.93×10^{-6} 和 7.54×10^{-5},均未达到预期 5×10^{-6} 的连续性风险需求。经多站协同监测后,3 个系统对应的误警样本大幅减少,GPS 与 Galileo 系统的可用性提升至 100%,BDS 最终的连续性风险达到 2.02×10^{-6},满足预期连续性风险要求,证明多站协同监测在控制个别监测站误警错误方面的有效性。

表 2　实时精密卫星钟轨完好性监测统计结果

Table 2　Statistical Results of Integrity Monitoring for Real-Time Precise Satellite Orbit and Clock

监测方式	导航系统	正确检测(告警)样本数/个	误警样本数/个	漏检样本数/个	连续性风险/10^{-5}	完好性风险	可用性/%
单站监测	GPS	0	547	0	4.98	0	99.995 0
	BDS	0	88	0	0.793	0	99.999 4
	Galileo	0	428	0	7.54	0	99.994 4
多站协同监测	GPS	0	0	0	0	0	100
	BDS	0	3	0	0.202	0	99.999 8
	Galileo	0	0	0	0	0	100

实时精密卫星钟轨完好性服务除满足预期完好性风险与连续性风险需求外,还需保障所播发卫星钟轨质量标识有效刻画实时精密卫星钟轨修正产品误差。选用图 2 所示的测试站模拟实时精密卫星钟轨完好性服务用户,接收所播发卫星钟轨质量标识并计算评估其性能。图 8 给出了 3 个系统部分卫星的 IURE 与质量标识的时序图,图中所展示的误差包络边界 U 根据云端主控站

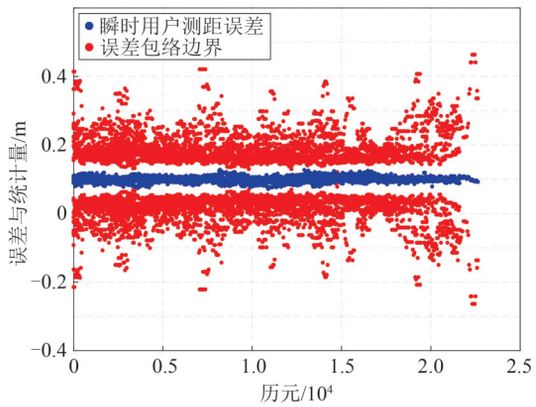


图8 IURE与质量标识

Fig. 8 IURE and the Quality Indicator

所播发的σ_U和bias计算获取[13]:

$$U=|\text{bias}|+K_U\sigma_U \tag{14}$$

式中,K_U为误差包络置信概率所对应的分位数,本文设置为99.9%。误差包络边界应在给定置信概率下有效包络IURE,否则说明所播发卫星钟轨质量标识未有效表征实时卫星钟轨修正产品误差。由图8可知,绝大部分误差包络边界值在0.2 m以内,可有效包络测试站对应的IURE,但同时也存在由实时卫星钟轨测距残差刻画失准所导致的包络失效情况。

图9进一步展示了实时精密卫星钟轨质量标识斯坦福图。由所播发卫星钟轨质量标识计算获取的误差包络边界有效包络IURE的概率达到99.944 2%,优于预期99.9%的包络置信概率。表3给出了3个系统详细的实时精密卫星钟轨质量标识统计结果。表中可见3个系统虽均存在包络失效的情况,但包络失效概率在可允许的范围内,GPS、BDS和Galileo误差包络边界的正常包络概率分别为99.995 6%、99.906 4%和99.919 1%,均达到预期99.9%的包络概率需求,证明所播发卫星钟轨质量标识可有效表征实时精密卫星钟轨修正产品误差。

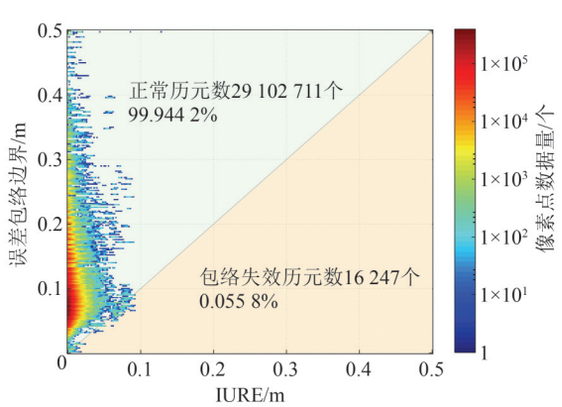


图9 质量标识斯坦福图

Fig. 9 Stanford Plot of the Quality Indicator

表3 实时精密卫星钟轨质量标识统计结果

Table 3 Statistical Results of the Quality Indicator for Real-Time Precise Satellite Orbit and Clock

导航系统	总样本数/个	正常包络样本数/个	包络失效样本数/个	正常包络概率/%	包络失效概率/%
GPS	11 483 226	11 482 726	500	99.995 6	0.004 4
BDS	11 711 943	11 700 986	10 957	99.906 4	0.093 6
Galileo	5 923 789	5 918 999	4 790	99.919 1	0.080 9

为避免完好性信息编码错误、通信链路异常及多重并发小偏差导致所播发完好性信息失效,完好性监测站将接收云端主控站所播发完好性信息,开展播发后定位域完好性监测。以水平方向为例,在定位域告警极限(alert limit, AL)设置为1 m情况下,水平方向定位误差与保护水平斯坦福图如图10所示。由所播发完好性信息计算获取的保护水平可有效包络定位误差,未出现包络失效产生误导信息的情况。同时可以发现,虽整体可用性达到99.997 9%,但部分历元存在保护水平超限的情况,导致播发后定位域完好性监测误警。这种情况对实时精密卫星钟轨完好性服务来说较为危险,因为定位域完好性监测告警将标记对应监测站的所有可见卫星为不可用,可能导致完好性服务中断。图11为不同完好性监测站保护水平时序图,仅个别监测站存在定位域完好性监测误警,未出现播发后完好性监测多站同时告警的情况,经多站协同监测后未播发追加告警信息,有效避免了完好性服务中断。

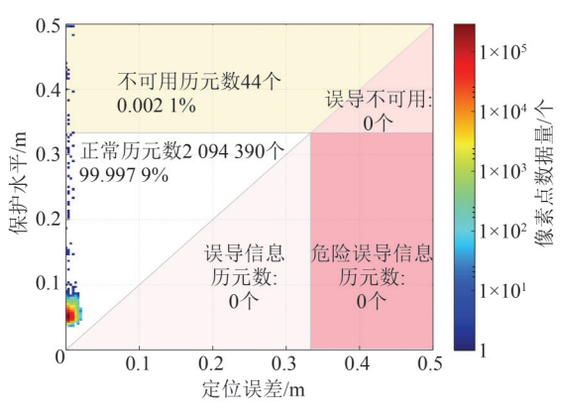


图10 定位域完好性监测斯坦福图

Fig. 10 Stanford Plot of the Integrity Monitoring in the Position Domain

实时精密卫星钟轨完好性服务除保障无异常情况的连续性外,还需有效针对修正产品异常进行监测告警。由于实验期间并未发生修正产品异常情况,本文通过人为注入修正产品异常的

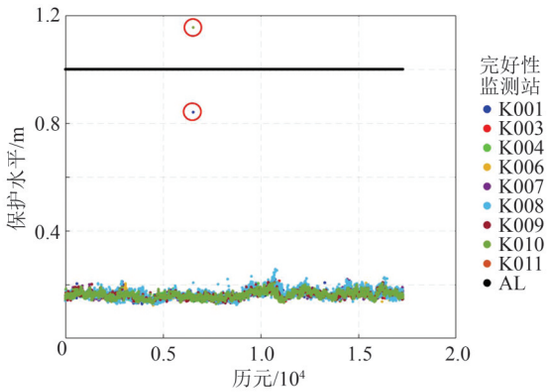


图 11　不同完好性监测站保护水平

Fig. 11　Protection Level from Different Integrity Monitoring Stations

方式验证异常情况下所提供完好性服务的有效性。从2024-12-13T15:00:00开始人为向实时精密卫星钟产品注入缓变、脉冲、阶跃和正弦4种异常,每种异常分别持续0.5 h,异常幅值设置为1.5 m,注入异常的卫星选择为G09,所注入异常幅值如图12所示。

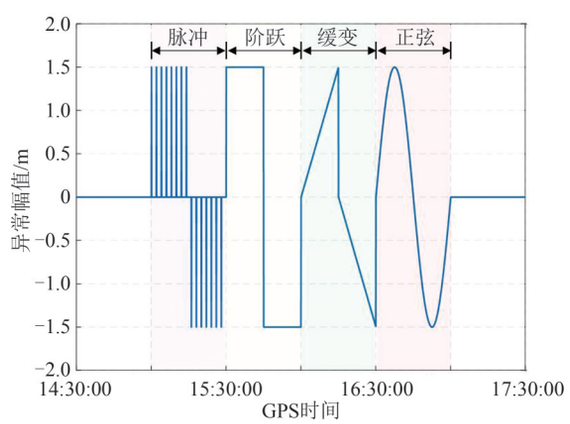


图 12　注入异常幅值时序图

Fig. 12　Magnitude of the Injection Fault

异常情况下G09号卫星的检测统计量如图13所示,其中,完好性监测站K007没有数据。可见本文方法检测统计量可有效敏感修正产品异常,虽由于监测站地理位置差异,不同监测站检测统计量并不完全一致,但所有监测站检测统计量趋势与所注入异常幅值高度吻合,为有效监测修正产品异常奠定了基础。图14展示了G09号卫星对应的布尔型检测统计量,可见监测站均能对脉冲型异常监测告警,个别监测站未能保持对阶跃型异常的持续告警,经多站协同监测后,有效识别出修正产品异常,减少了个别监测站的漏检情况。针对缓变、正弦这两类幅值时变型异常,在异常出现的初期,由于异常幅值较小,多站协同监测无法区分引起个别监测站告警

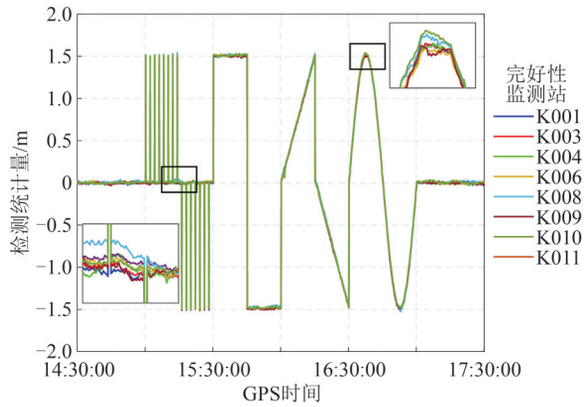


图 13　异常情况下G09号卫星检测统计量

Fig. 13　Test Statistic of Satellite G09 for the Fault Cases

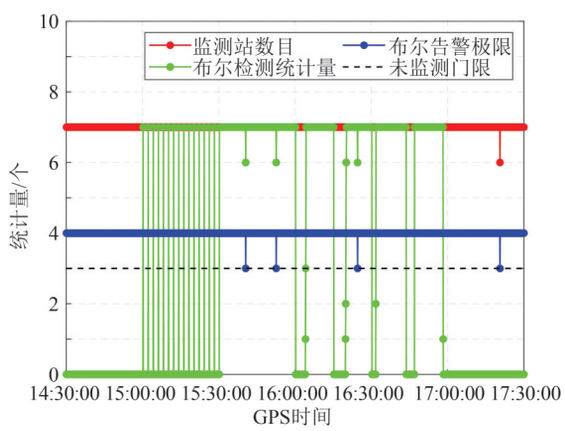


图 14　异常情况下G09号卫星布尔型检测统计量

Fig. 14　Boolean Test Statistic of Satellite G09 for the Fault Cases

的原因是过大观测量噪声还是修正产品异常,因此并未进行告警。随异常幅值的增大,告警监测站数目随之增加,多站协同监测最终有效针对修正产品异常进行告警,说明本文方法虽针对时变型异常存在反应时间,但仍具备有效性。后续将持续提供实时精密卫星钟轨完好性服务,捕捉真实修正产品异常,以进一步评估本文方法性能。

5　结　语

本文构建针对实时精密卫星钟轨修正产品播发前-播发后协同的完好性服务架构,利用独立完好性监测站网数据提取实时卫星钟轨测距残差,包络生成卫星钟轨质量标识。播发前完好性监测通过构建多站联合的测距域异常检测与完好性边界评估,严密监测卫星钟轨修正产品异常;播发后完好性监测通过构建定位域保护水平,控制由通信链路异常、多重并发小偏差等风险源造成的定位异常。通过播发前-播发后的协

同配合,实现完备闭环的修正产品风险源全链条控制。

基于所构建山东省完好性监测站网实时数据流与CNES实时精密卫星钟轨修正产品,提供实时精密卫星钟轨完好性服务,并以CODE最终卫星钟轨修正产品为参考初步评估完好性服务性能。实验结果表明,所提实时精密卫星钟轨完好性监测方法可有效保障修正产品完好性,播发前与播发后完好性监测的可用性均优于99.99%。所播发实时精密卫星钟轨质量标识可在给定置信概率下有效表征实时精密卫星钟轨误差,GPS、BDS和Galileo正常包络实时精密卫星钟轨修正产品误差的概率分别达到99.995 6%、99.910 6%和99.919 1%。在人为注入异常情况下,本文方法可针对修正产品异常进行告警,初步验证所提供完好性服务的有效性。

在后续的研究中,将完善播发后完好性监测部分内容,保障实时精密卫星钟轨完好性服务的业务化运行,并从用户使用的角度进一步评估实时精密卫星钟轨完好性服务性能。

参 考 文 献

[1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[2] GUNNING K, BLANCH J, WALTER T, et al. Design and Evaluation of Integrity Algorithms for PPP in Kinematic Applications[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, Florida, USA, 2018.

[3] 李博峰,苗维凯,陈广鄂. 多频多模GNSS高精度定位关键技术与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1769-1783.
LI Bofeng, MIAO Weikai, CHEN Guang'e. Key Technologies and Challenges of Multi-Frequency and Multi-GNSS High-Precision Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1769-1783.

[4] DU Y J, WANG J L, RIZOS C, et al. Vulnerabilities and Integrity of Precise Point Positioning for Intelligent Transport Systems: Overview and Analysis[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 3.

[5] ZHANG J, ZHAO L, YANG F X, et al. Integrity Monitoring for Undifferenced and Uncombined PPP Under Local Environmental Conditions[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(6): 065010.

[6] LI L, JIA C, ZHAO L, et al. Integrity Monitoring-Based Ambiguity Validation for Triple-Carrier Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 797-810.

[7] LI L, LI R J, WANG L Q, et al. GNSS Integrity Risk Evaluation in the Position Domain Based on the Generalized Pareto Distribution[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(9): 095010.

[8] 李宗义,汪亮,王宁波,等. CAS实时轨道和钟差产品的性能评估及完好性支持信息估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9): 1825-1837.
LI Zongyi, WANG Liang, WANG Ningbo, et al. Performance Assessment and Integrity Support Information Estimation of CAS Real-Time Orbits and Clocks Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(9): 1825-1837.

[9] 苏春阳,舒宝,郑蕾,等. GPS/BDS实时SSR产品质量评估及其PPP性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 714-726.
SU Chunyang, SHU Bao, ZHENG Lei, et al. Quality Evaluation and PPP Performance Analysis of GPS/BDS Real-Time SSR Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(4): 714-726.

[10] WANG S Z, ZHAI Y W, ZHAN X Q. Characterizing BDS Signal-in-Space Performance from Integrity Perspective[J]. *NAVIGATION*, 2021, 68(1): 157-183.

[11] JI R, JIANG X Y, CHEN X H, et al. Quality Monitoring of Real-Time GNSS Precise Positioning Service System[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2023, 26(1): 1-15.

[12] LI X X, LIANG D, LI X, et al. Quality Monitoring of Real-Time PPP Service Using Isolation Forest-Based Residual Anomaly Detection[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(3): 118.

[13] XUE Y, ZHENG F, ZHOU G Y, et al. A New Quality Monitoring Method for Real-Time Precise Orbit and Clock Products[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(3): 125.

[14] LAI Y F, BLANCH J, WALTER T, et al. Prototyping Integrity Monitors for PPP Fault Detections[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Denver, USA, 2023.

[15] WEINBACH U, BRANDL M, CHEN X M, et al. Integrity of the Trimble® CenterPoint RTX Correction Service[C]//International Technical Meeting of the

Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, USA, 2018.

[16] 李亮, 王柳淇, 王宁波, 等. PPP-RTK修正产品矢量化完好性监测方法[J]. 测绘学报, 2024, 53(9): 1777-1789.
LI Liang, WANG Liuqi, WANG Ningbo, et al. Vectorized Integrity Monitoring Method for PPP-RTK Correction Products[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(9): 1777-1789.

[17] DAI X L, GONG X P, LI C L, et al. Real-Time Precise Orbit and Clock Estimation of Multi-GNSS Satellites with Undifferenced Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(10): 73.

[18] WANG Y C, SHEN J. Real-Time Integrity Monitoring for a Wide Area Precise Positioning System [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 24.

[19] HUANG J D, LI X X, LI X, et al. Real-Time Outlier Detection of Satellite Orbit and Clock Products Using Reverse Error Estimation [J]. *GPS Solutions*, 2024, 29(1): 2.

[20] LI L, LIU X S, JIA C, et al. Integrity Monitoring of Carrier Phase-Based Ephemeris Fault Detection [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 43.

[21] HUANG W Q, LI M H, LI L, et al. Characterizing the Fault Performance of Real-Time Precise Satellite Orbit and Clock Correction Products[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(2): 025033.

[22] WANG K, EL-MOWAFY A, RIZOS C. Integrity Monitoring for Precise Orbit Determination of LEO Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2021, 26(1): 32.

[23] ZHAO J J, HERNÁNDEZ-PAJARES M, LI Z S, et al. Integrity Investigation of Global Ionospheric TEC Maps for High-Precision Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(3): 35.

[24] ZHANG J, YANG F X, LI L, et al. Integrity Monitoring for Real-Time Orbit Corrections Based on Prior Statistic Parameters [C]//International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Long Beach, USA, 2023.

[25] WALTER T, BLANCH J. Improved User Position Monitor for WAAS [J]. *NAVIGATION*, 2017, 64(1): 165-175.

[26] WALTER T, SHALLBERG K, ALTSHULER E, et al. WAAS at 15[J]. *NAVIGATION*, 2018, 65(4): 581-600.

[27] WU T, PECK S. An Analysis of Satellite Integrity Monitoring Improvement for WAAS[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2002.

[28] SCHEMPP T, PECK S, FRIES R. WAAS Algorithm Contribution to Hazardously Misleading Information (HMI)[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, USA, 2001.

[29] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. A MATLAB Toolset to Determine Strict Gaussian Bounding Distributions of a Sample Distribution[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation,Portland, USA, 2017.

[30] RTCM Standard 10403.3: 2016 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services Version 3[S].

[31] LI R J, LI L, JIANG J C, et al. Improved Protection Level for the Solution-Separation ARAIM Based on Worst-Case Fault Bias Searching[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(4): 046303.

[32] JOERGER M, PERVAN B. Kalman Filter-Based Integrity Monitoring Against Sensor Faults [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(2): 349-361.