

引用格式: 宋远, 李锐, 黄智刚. RTK完好性指标分配方法[J]. 航空学报, 2025, 46(16): 331655. SONG Y, LI R, HUANG Z G. Allocation method of RTK integrity indicators[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(16): 331655 (in Chinese). doi:10.7527/S1000-6893.2025.31655

RTK完好性指标分配方法

宋远^{1,2}, 李锐^{1,2,*}, 黄智刚¹

1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191

2. 空地一体新航行系统技术全国重点实验室, 北京 100191

摘要: 实时动态相对定位(RTK)技术作为目前应用最为广泛的全球导航卫星系统(GNSS)高精度定位技术, 针对其完好性的研究一直是工业界和学术界的研究热点, 也是决定其能否用于自动驾驶等生命安全相关领域的难点问题。目前对RTK完好性的研究主要停留在概念讨论和用户端算法层面, 存在性能指标界定不清晰以及算法复杂不具有普适性等问题, 同时缺乏系统性的分析框架和解决方案。通过对航空领域各类增强系统的研究, 发现其完好性解决方案涉及需求分析、风险源分析、完好性指标分配、监测方案设计、验证方案设计等多个环节。其中, 完好性指标分配环节承接用户需求 and 监测器性能要求, 涉及总体分析流程和框架的建立, 是后续进行具体监测器设计及验证的基础, 也是整体完好性解决方案的核心。为此, 通过借鉴地基增强系统(GBAS)中风险分配流程, 提出了RTK完好性指标分配方法, 推导出适用于卡尔曼滤波器的最大可允许测量误差(MERR)计算公式, 从概率指标和误差界限2个层面给出完整的指标分配方案。所提方法和分配示例能为RTK服务提供商构建完好性解决方案以及推进相关服务性能规范的建设提供理论支持和数据参考。

关键词: GNSS; RTK完好性; 完好性增强系统; 风险指标分解; 最大可允许测量误差

中图分类号: V249.3; U666.134

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2025)16-331655-15

提供高精度完好性定位服务是全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)面向未来行业应用的发展方向。在用户层面, 自动驾驶、无人机、海事、铁路等领域对高精度完好性定位技术的需求与日俱增。车辆用户针对不同级别的自动驾驶提出了米级至分米级的告警门限以及 $10^{-6} \sim 10^{-8}/h$ 的完好性风险需求^[1-2]。海事用户针对港口定位场景提出了米级的告警门限以及 $10^{-5}/3 h$ 的完好性风险需求^[3]。对于自动驾驶应用, 卫星导航系统能够提供车辆的绝对位置, 这是后续进行轨迹规划和决策控制的关键, 它在整车定位系统中扮演着

不可或缺的角色。实时动态相对定位(Real-Time Kinematic, RTK)是目前最成熟、应用最广泛的GNSS高精度定位技术, 定位精度能达到厘米级, 且具有良好的动态特性, 相较于精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)、PPP-RTK等高精度定位方式有着不可替代的优势, 也是目前大部分车厂用户使用的定位技术^[4-6]。然而, 卫星导航系统固有的脆弱性限制了其在生命安全领域的应用, 因此对RTK完好性的研究是决定其能否运用于自动驾驶等领域的关键。

目前对RTK完好性的研究主要集中在服务

收稿日期: 2024-12-12; 退修日期: 2024-12-25; 录用日期: 2025-02-19; 网络出版时间: 2025-03-07 08:48

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2025/V46/I16/331655>

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3904302)

* 通信作者: E-mail: lee_ruin@263.net

提供方和学术研究2个方面。RTK运营商积极响应车辆用户需求,但从理论分析层面给出服务完好性指标并对指标进行验证较少,目前也尚未在系统层面建立起完整的理论体系来解决RTK在自动驾驶中的应用问题。此外,国际海事无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM)成立了SC-134小组推进高精度定位服务性能规范的建设,但目前相关标准仍在商讨中^[7]。

学术界对RTK完好性的研究主要集中在用户端算法的研究与改进上,主要包括故障监测与识别方法提升^[8-10]、保护级(Protection Level, PL)优化^[11-12]以及与整周模糊度固定相关的完好性监测^[13-17]。然而其中所使用的风险指标,例如完好性风险概率和告警门限,其数值大都是直接给定的,没有给出具体可靠的来源,也没有考虑电离异常等风险项会随区域和电磁环境的变化具有不同的先验概率,且用户算法复杂,不具有普适性。在完好性指标分配方面,Wu等^[18]基于多故障假设,设计了针对RTK定位的完好性指标分解方案,然而其只考虑了用户端风险,且未对所使用指标的合理性加以分析。在RTK完好性评估方面,Ruwisch等^[19]和Karimidoona等^[20]使用斯坦福图评估了城市环境下及不同类型接收机条件下的RTK定位完好性,指出了设计完好性增强方案的紧迫性,但只选用了短时间的观测数据来进行验证,且使用的风险指标及告警门限过于严苛。在对相关指标进行验证时,大部分研究采用穷举验证的方案^[21],然而所选数据量和完备性不足,无法证明基于所提方法的整体定位完好性能够达到所设定的指标。

综合来看,目前对RTK完好性的研究缺乏系统性的分析框架,缺乏对服务方和用户方的责任划分与界定,缺乏对系统端完好性的研究,包括故障源的定量评估、针对所提供改正数的完好性设计与验证,这使得RTK完好性研究浮于表面且杂乱,无法真正推进其在生命安全领域的实际应用。

当前对完好性的研究更为全面系统的是在航空领域,建设了包含星基增强系统(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)、地基增强

系统(Ground-Based Augmentation System, GBAS)及空基增强系统(Airborne-Based Augmentation System, ABAS)等各类完好性增强系统,并针对不同的应用场景和飞行阶段,从需求分析到软硬件都有完备的解决方案和分析框架^[22-23]。例如,美国航空无线电委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA)发布的性能规范DO-229E介绍了SBAS的系统架构、风险分配、对硬件设备的要求及用户算法^[24]。而性能规范DO-245针对不同的运行阶段,给出了GBAS系统性能指标需求、风险源分析、风险分配方案、完好性监测算法设计以及完好性风险分配的合理性分析^[25]。此外,DO-245指出,对于 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ 的风险概率,只能通过仿真和理论分析来验证,无法通过飞行测试进行穷举验证。因此,GBAS将对整体风险指标的验证分解到故障机理分析、性能指标分配和监测器设计的各个层面,通过设计监测器误警率和漏警率来保证整体风险指标的保守性。

对比来看,当前RTK完好性研究大多是将完好性监测视为一个单独的环节,并未根据实际的应用场景给出从需求分析、指标分配、监测方案设计到验证评估的完整解决方案。考虑到GBAS和RTK本质上都是利用区域监测站的冗余观测信息来提升精度或完好性,具有内在的相似性,因此可以借鉴GBAS中的流程和方法开展RTK完好性研究。其中,风险指标分配包含对风险源的分析、故障的界定、总体流程及框架的设计,将用户所需风险指标和监测器性能紧密连接,是后续进行具体监测器设计及验证的基础,是整体完好性解决方案的关键,也是目前相关研究中容易被忽略的部分。另一方面,对风险指标分配方法的研究是连接现有研究与实际应用需求的桥梁,能为推进服务性能规范的建设提供理论基础和重要参考。

1 GBAS中完好性指标分配方法

本节梳理GBAS中完好性指标的分配方案,包括风险概率指标分配及误差界限分配。

1.1 概率指标分配

DO-245中根据总体的功能要求确定整体完好性指标,将其分配至机载端及空间信号(Signal in Space, SIS)端。对于机载端,在规定其接收机类型、接收机性能指标以及标准算法的条件下,

可以对其进行无故障假设,忽略其对整体完好性的影响。对于SIS完好性,根据故障假设将其分为H0/H1和H2两大类,再逐项进行细分。H0为无故障假设,H1为单故障假设,H2为多故障假设。图1给出了针对一类精密进近(CAT-I)服务的SIS完好性风险指标分配示意图^[25]。

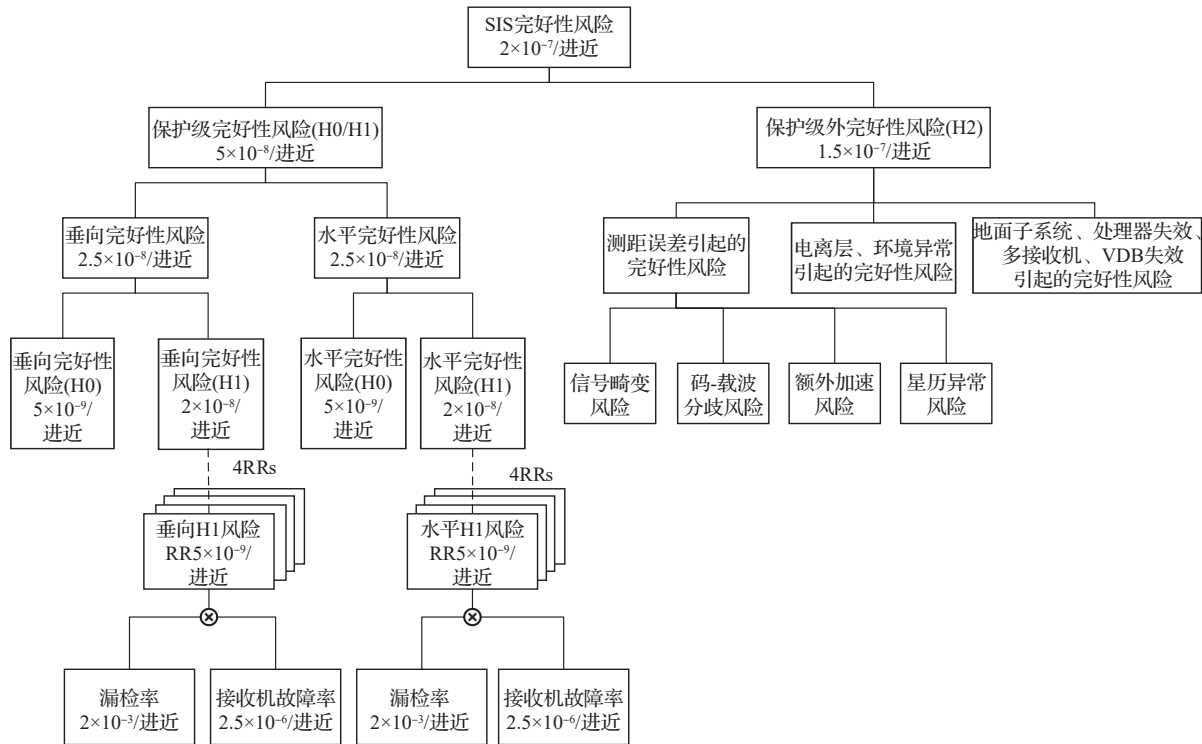


图1 GBAS空间信号完好性风险指标分配示意图(CAT-I服务)^[25]

Fig. 1 SIS integrity risk allocation for GBAS CAT-I service^[25]

根据GBAS的分配流程及图1,可以归纳总结出其进行风险概率分配的核心思路:

1) 从实际需求出发对完好性风险进行分解,对用户和增强系统所应承担的责任进行清晰地界定,并针对不同服务阶段的性能指标设计不同的分配方案。

2) 从故障来源与故障机理开展细致分解,设定区分正常误差和故障偏差的准则,根据历史数据建立故障风险库,作为具体指标数值分配的依据。

3) 针对各类风险的实际特征设计系统性的监测方案,将各类故障对应的风险最终分解为先验故障率和漏检率的乘积,并将对完好性指标的验证转化为对监测器漏检率的验证。

4) 使用冗余接收机和监测设备,保障监测网络的可靠性,在指标分配时也进行保守处理。

1.2 误差界限分配

由于完好性指标不仅涉及风险概率,还涉及告警门限,因此需要考虑对误差界限的分配。综合相关标准和文献的内容,本文将误差界限分配归纳为定位域、测量域及检测域3个部分。

其中,定位域误差界限主要对应H0/H1假设,包括告警门限和保护级。告警门限由性能指标直接给出,保护级由用户算法提供,保障实际定位误差超过所计算保护级的概率小于分配给H0/H1假设的完好性风险。

测量域误差界限对应H2类假设,也称为最大

可允许测距误差(Maximum Allowable Range Error, MERR),当测距误差超过MERR而未被地面监测器及时检测到时,该测距误差所引起的用户定位误差可能超过定位域误差界限。

检测域误差界限涉及阈值门限和最小可检测误差(Minimum Detectable Error, MDE)2个参数。阈值门限的选取需要在误检率和漏检率之间寻求平衡,MDE表示在保障连续性风险的情况下能够同时满足漏检率要求的最小偏差。若MDE小于MERR,则测量误差在超过误差界限前就能够被监测器识别并排除,不会影响定位完好性。MERR与MDE的差值为监测器的性能裕度,二者与阈值门限的关系如图2所示^[26]。

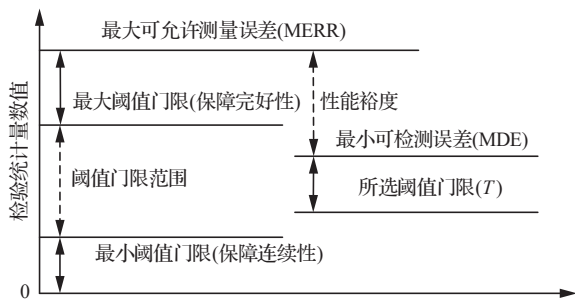


图2 监测器阈值、MDE与MERR关系示意图

Fig. 2 Relationship between threshold, MDE and MERR

在实际应用中,概率指标分配与误差界限分配有很强的关联,二者结合才能保障性能指标从整体到局部的完备性、合理性和保守性。

2 RTK风险指标分配

在前文所述GBAS指标分配方法及核心思路的基础上,本节首先提出RTK完好性风险分配及验证的整体流程,其次选取完好性指标并进行合理性分析,进一步详细阐述概率指标分配和误差界限分配的具体方法和流程,最后简要阐述指标分配方案的验证思路。

2.1 RTK完好性风险分配与验证流程

RTK风险指标分配的详细流程如图3所示,其大致可分为4个部分:①确定来源于行业标准或用户的所需性能指标并分析其合理性;②充分考虑RTK定位过程中各个阶段的风险来源,基于实际误差特性分配相应的概率指标与

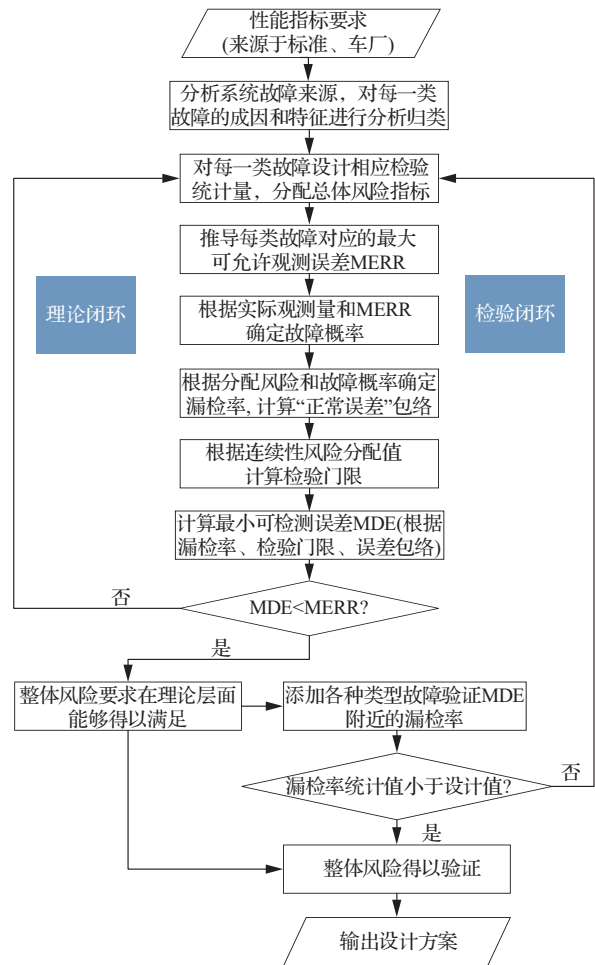


图3 RTK完好性风险分配与验证流程

Fig. 3 Allocation and evaluation procedure of RTK integrity risk

误差界限;③进行各项监测器的设计,若所有监测器性能裕度都大于0,则说明所需的完好性能够在理论设计层面得以满足,即设计方案达成了理论闭环,否则需要反复迭代各项参数以达到要求;④通过仿真实验或实测数据开展验证工作,若各监测器实际漏检率小于所需漏检率,或者从小到大添加故障时,实际的MDE小于理论MDE,均证明该监测器能够实现所分配的完好性指标,则说明设计方案达成了检验闭环。

2.2 RTK完好性需求及合理性分析

本文面向自动驾驶领域RTK应用的完好性风险分配方法开展研究。目前自动驾驶领域目前尚未有统一的行业标准来界定GNSS定位的完好性,只有部分车厂用户提出了各自的性能指

标要求,例如宝马汽车及XONA^[1-2]。本文综合现有的用户指标要求,给出了针对RTK定位的性能指标,如表1所示,预期实现的环境感知等级为车道级。

表1 自动驾驶领域RTK定位完好性指标要求
Table 1 RTK integrity requirement in autonomous driving

性能指标	95%水平精度/m	完好性风险	服务端告警时间/s	告警门限/m
数值	0.6	$1 \times 10^{-5}/\text{h}$	10	3

其中,对水平定位精度和水平告警门限的合理性分析为:根据《公路工程技术标准》^[27],中国各类车道宽度设计标准为3~3.75 m,小客车总宽为1.8 m,0.6 m的95%水平精度可以保障正常条件下车辆在特定车道内行驶,而3 m水平告警门限保障在极端和异常条件下的定位误差不偏离整条道路,即最差情况允许自动驾驶汽车在临近车道无车辆行驶的条件下定位到临近车道。

对完好性风险指标 $1 \times 10^{-5}/\text{h}$ 的合理性分析为:① 日本准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)所提供厘米级增强服务(Cen-

timeter Level Augmentation Service, CLAS)的完好性指标为 $1 \times 10^{-5}/\text{h}$,说明该指标在实际系统建设中能够实现;② 通过对不同地区不同观测站组合的RTK初始完好性开展相关分析与评估,得到未采取任何监测手段的RTK定位完好性风险概率等级为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ ^[28],若为其设计合理有效的监测方案,则有望实现 $1 \times 10^{-5}/\text{h}$ 的风险指标。

由于目前尚未有针对RTK连续性指标的研究分析,所以本文保守选取连续性风险为 $10^{-5}/15 \text{ s}$,其中15 s为服务端向用户播发改正数的间隔。

对服务端10 s告警时间的合理性分析为:假设驾驶速度为最大值120 km/h,正常驾驶条件下其侧向分速度为总体速度的0.5%,则10 s内的侧向偏差最大为1.7 m,小于3 m侧向告警门限。

综上,本文选取前述指标作为开展指标分配方案的一个示例,需要说明的是,实际应用中还应以官方标准或用户需求为主,但是可以参考本文中的思路及方法。

2.3 概率指标分配

考虑RTK定位过程中特有的故障源,绘制出总体完好性风险分配故障树如图4所示。

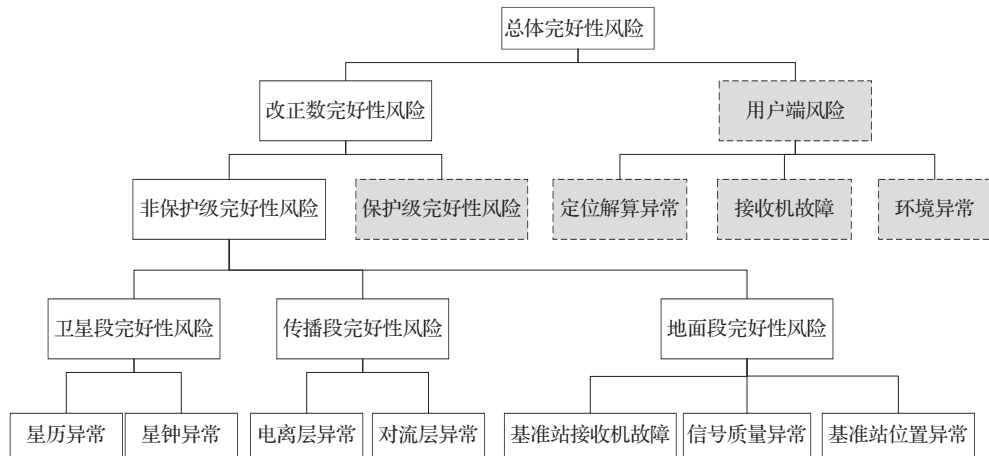


图4 RTK完好性风险分配故障树

Fig. 4 Fault tree for RTK integrity risk allocation

本文假定用户端使用理想无故障接收机,且不考虑定位算法对完好性的影响,即不考虑图4中虚线框中的风险项,因此全部故障来源于基准站所提供的改正数完好性。

进一步,确定各个风险项的先验故障概率,将

完好性风险分配至服务端的每一个误差项。每一类故障引起的完好性风险概率 $P_{\text{req}}(\text{HMI}|\text{fault}_i)$ 可以表达为先验故障概率 $P(\text{fault}_i)$ 与监测器漏检率 $P(\text{MD}|\text{fault}_i)$ 的乘积,即

$$P_{\text{req}}(\text{HMI}|\text{fault}_i) = P(\text{MD}|\text{fault}_i) P(\text{fault}_i) \quad (1)$$

在实际进行指标数值的分配时,本文在参考GBAS中平均分配的原则上,依照各项故障的先验概率大小做相应的调整。根据文献[28],电离层异常和基准站数据质量是影响RTK定位完好性的主要因素,因此可以为相关故障分配更大的风险数值。为了进一步验证该结论,选取2020年3月1日—30日(电离层平静期)、2024年5月1日—30日(电离层活跃期),中国香港地区HKPC、HKLT、HKCL、HKMW站观测数据,其中前2个观测站接收机型号为Leica GR50,基线长度为15.3 km,后2个观测站接收机型号为Trimble NetR9,基线长度为10.8 km。使用双频GPS观测数据进行RTK定位,除周跳探测外不添加其他故障监测方案,统计其定位误差,以评估电离层异常及接收机数据质量对定位完好性的影响。4组定位解误差分位数统计结果如表2所示。

表2 定位误差分位数统计结果
Table 2 Results of positioning error quantiles

观测站组合(日期)	方向	定位误差分位数/m		
		95%	99.9%	99.999%
HKLT/HKPC(2020)	E	0.037 3	0.068 6	0.215 2
	N	0.022 5	0.050 8	0.401 1
	U	0.078 0	0.136 2	0.284 4
HKMW/HKCL(2020)	E	0.028 4	0.220 6	0.411 1
	N	0.025 6	0.057 4	0.062 2
	U	0.077 2	0.105 0	0.141 6
HKLT/HKPC(2024)	E	0.085 4	0.356 2	0.879 5
	N	0.078 8	0.195 8	0.309 4
	U	0.155 6	0.360 6	1.559 9
HKMW/HKCL(2024)	E	0.091 3	0.412 0	2.141 7
	N	0.072 6	0.168 4	2.898 6
	U	0.121 8	0.347 9	2.610 4

从表2中统计结果可以看出,相同的接收机组合在电离层平静期与活跃期定位解的差异主要体现在95%之外的定位误差上,存在“厚尾特性”,对应较差的完好性。在电离层平静期,不同接收机组合定位解差异较小;而在电离层活跃期,虽然95%和99.9%定位误差差异较小,但是HKLT/HKPC组合99.999%定位误差明显优于HKMW/HKCL组合,体现了接收机数据质量对定位完好性的影响。图5为不同接收机组合东向

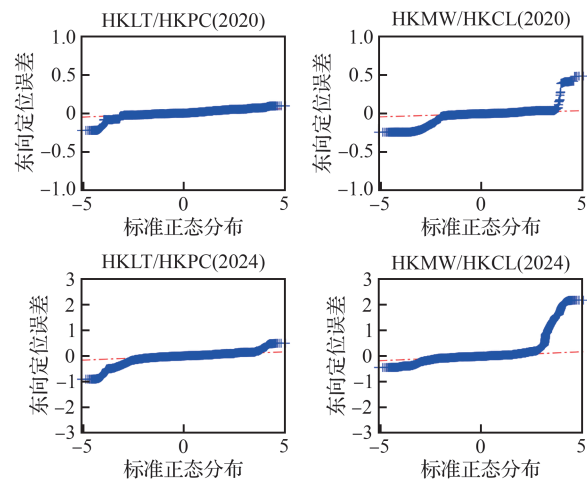


图5 不同接收机组合东向定位误差Q-Q图
Fig. 5 Q-Q plot of eastern positioning error for different receiver combinations

定位误差的Q-Q图,同样可以体现出电离层异常和接收机数据质量对RTK定位完好性的影响。

先验故障率的选取可以参考系统规范、评估报告以及基于实测数据的统计。本文的卫星段星历和星钟故障先验故障率取 $10^{-3}/\text{h}$ 。GPS与BDS在国际民航组织发布的标准及建议措施(Standards and Recommended Practices, SARPs)附件10中承诺卫星单星故障率均为 $10^{-5}/\text{h}$ ^[29],根据其中对卫星故障率的定义,当瞬时SIS误差超过4.42倍URA时认为该卫星出现故障。由于URA通常取为2,因此当SIS误差超过8.84 m时才会给出故障告警。而在实际RTK定位中,对定位精度、告警门限及完好性概率的要求较高,小于该故障门限的测距误差也可能会引起定位误差超出告警门限。为此,本文将卫星故障率取保守值 $10^{-3}/\text{h}$,同时通过对监测器及流程的设计保证足够的漏检率,从而使得卫星段风险足够保守。

传播段风险包括电离层和对流层异常,其先验故障率会随时间和区域不同呈现各异性,且难以根据其对RTK定位的影响建立明确的阈值边界。本文参考WAAS更新报告^[30]中提到的2024年引发WAAS电离层异常监测器告警的时段(分别为3月3日至4日、5月2日、5月10日—12日、8月12日、8月28日、8月31日、9月17日、10月6日—8日、10月10日—11日),保守假设所提到的时段内全天均出现电离层异常事件,可以得到电离层异常事件

次数与全年总时长的比值为 $4.66 \times 10^{-2}/\text{h}$,根据该结果,本文将电离层异常先验故障率保守取为 $10^{-1}/\text{h}$ 。对流层异常对水平定位的影响较小^[31],但区域不确定性更强,为了保守起见,也将其概率取为 $10^{-1}/\text{h}$,通过提高对监测器漏检率的要求来保障为其分配的完好性风险。

地面段风险包括基准站接收机故障、基准站位置异常以及信号质量异常,例如多径、干扰等。接收机故障率可以通过出现载波周跳与伪距粗差的概率来评估,其与接收机类型及电离

层异常情况相关。本文使用文献[28]中的评估方法,选取香港 CORS 站 2024 年 5 月 1 日—30 日的观测数据,统计不同类型接收机对应的故障率。由于该时段出现多起电离层异常事件,其中 5 月 10 日—12 日有特大地磁暴发生,因此可将该时间内的统计结果作为接收机先验故障概率的上限值。所选取的观测站、接收机类型以及对应的接收机故障率如表 3 所示。根据该结果,接收机故障先验概率可以保守取为 $2 \times 10^{-2}/\text{h}$ 。

表 3 香港 CORS 站接收机故障率统计

Table 3 Statistical results of receiver fault rate of HK CORS

观测站	接收机类型	载波周跳率/ h^{-1}	伪距粗差率/ h^{-1}	接收机故障率/ h^{-1}
HKPC	Leica GR50	3.2×10^{-3}	1.7×10^{-3}	4.9×10^{-3}
HKLT	Leica GR50	3.6×10^{-3}	8.54×10^{-4}	4.5×10^{-3}
HKCL	Trimble NetR9	1.67×10^{-2}	2.6×10^{-3}	1.93×10^{-2}
HKMW	Trimble NetR9	1.07×10^{-2}	9.2×10^{-3}	1.99×10^{-2}

基准站位置异常包括基准站处地质沉降以及人为等因素干扰引起的天线移位,该项概率无法预测,本文将其保守取为 $10^{-1}/\text{h}$ 。异常多径和干扰等发生概率也无法预测,但基准站在建设时一般会充分考虑该误差项,且二者对观测数据的

影响也体现在载波周跳和伪距粗差上,因此同样将其发生概率保守取为 $2 \times 10^{-2}/\text{h}$ 。

最终,RTK 服务端根据故障因素、先验故障概率,拟采用的监测方法以及对漏检率与完好性风险的分配数值如表 4 所示。

表 4 RTK 服务端完好性指标分配

Table 4 Allocation of integrity indicators for RTK server-side

故障来源	故障分类	先验故障率/ h^{-1}	漏检率	完好性风险/ h^{-1}
卫星段	星历异常	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-6}
	星钟异常	1×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-6}
传播段	电离层异常	1×10^{-1}	2×10^{-6}	2×10^{-6}
	对流层异常	1×10^{-1}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
地面段	基准站接收机故障	2×10^{-2}	1×10^{-4}	2×10^{-6}
	基准站位置异常	1×10^{-1}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
	信号质量异常	2×10^{-2}	1×10^{-4}	2×10^{-6}

2.4 误差界限分配

根据第 1 节的内容可知,误差界限包括定位域、测量域和检测域 3 个部分。本文主要针对基准站端完好性指标进行分配,更关注测量域和检测域内的误差界限分配,对于定位域内误差界限只考虑告警门限,据此进行后续误差界限的推导。

2.4.1 测量域误差界限

测量域误差界限 MERR 为观测值中允许存在的最大误差,当测量误差超过该数值时,会导致实际定位误差超出定位误差界限。本文暂时不对用户端定位及保护级算法加以设计,直接以告警门限求解 MERR。

MERR 的计算方法由 Shively 首先提出^[32],

通过几何精度因子(Dilution of Precision, DOP)将定位域内误差与测量域内误差相连接,推导了2类最大可允许测量误差偏差,包括可能同时影响所有卫星的故障,如射频干扰,以及被假定只会一次影响一颗卫星的故障,例如接收机回路中卫星相关函数的失真。在此基础上,Rife提出了时变MERR推导方法^[33],Soualle结合2种方法提出了一种等效线性度量方法,并进行了信号异常监测器SQM的指标设计^[34]。本文后续也将在Shively方法的基础上,推导适用于RTK定位服务的MERR。

然而,上述方法都是针对GBAS系统的,用户端使用最小二乘方法进行定位解算,可以直接使用投影因子来评估测量域误差在定位域内的投影。而RTK定位中通常使用EKF进行连续滤波解算,且算法中包括模糊度固定,导致测量误差与定位误差不存在线性投影关系。

为了给出一套通用的分析评估方法,本文推导EKF中测量域至定位域投影因子的保守上界,在Shively方法的基础上推导测量域内MERR表达式,称为EKF-MERR方法。随后,根据2.2节中的指标给出RTK服务端具体的MERR数值分配。

1) EKF-MERR方法

在使用EKF滤波器进行滤波定位时,不仅要考虑当前时刻测量误差对定位解的影响,还要分析历史时刻测量误差的影响。根据卡尔曼滤波状态更新公式:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1}^+ \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+$ 为 $k-1$ 历元状态变量后验估计值; $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 为 k 历元状态变量先验估计值; $\mathbf{A}_k$ 为 k 历元状态转移矩阵; $\mathbf{P}_{k-1}^+$ 为 $k-1$ 历元后验估计误差协方差阵; $\mathbf{P}_k^-$ 为 k 历元先验估计误差协方差阵; $\mathbf{Q}_k$ 为 k 历元过程噪声方差阵。

若 $k-1$ 历元存在未检测出的测量误差导致定位偏差 $\mathbf{b}_{k-1}$ 出现,但未超出定位域内误差界限,则当前时刻定位解估计值可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}_k (\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + \mathbf{b}_{k-1}) = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{A}_k \mathbf{b}_{k-1} \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+$ 为 $k-1$ 历元状态变量后验估计值真值; $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 为 k 历元状态变量后验估计值真值。

根据测量更新公式:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (7)$$

式中: $\mathbf{H}_k$ 为 k 历元观测矩阵; $\mathbf{R}_k$ 为 k 历元观测噪声方差阵; $\mathbf{K}_k$ 为 k 历元卡尔曼滤波增益矩阵; $\mathbf{y}_k$ 为 k 历元观测向量。

如果当前历元同时存在测量粗差 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$,则可以得到测量更新后的定位解为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^+ &= \mathbf{A}_k (\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + \mathbf{b}_{k-1}) + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k) - \\ &\quad \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{A}_k (\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + \mathbf{b}_{k-1}) = \\ &\quad \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^-) + \\ &\quad (\mathbf{A}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{A}_k) \mathbf{b}_{k-1} + \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k \end{aligned} \quad (8)$$

由于在实际定位中,状态变量的初值通过观测数据求解得到,其误差通过连续滤波传入后续历元,因此状态量中的偏差来自于前一时刻的观测误差,即

$$\mathbf{b}_{k-1} = \mathbf{K}_{k-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k-1} \quad (9)$$

同时,对于位置状态量,其状态转移矩阵通常为单位阵 $\mathbf{I}_{n \times n}$,将上述条件代入式(8),可以得到

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^+ &= \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-) + \\ &\quad (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{K}_{k-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k-1} + \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)相较于式(6)多出的项为当前历元状态量偏差,即 $\mathbf{b}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{K}_{k-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k-1} + \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k$ 。其中系数 $\mathbf{K}_k$ 的范围为 $[\mathbf{0}, \mathbf{H}_k^+]$, $\mathbf{H}_k^+ = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T$ 为观测矩阵 $\mathbf{H}_k$ 的伪逆,因此有 $\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \leq \mathbf{I}$,据此可以得到状态量偏差的上限为

$$\mathbf{b}_k \leq \mathbf{K}_{k-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k-1} + \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (11)$$

将其代入下一历元,则有

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^+ &= \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-) + \\ &\quad (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \mathbf{b}_k + \mathbf{K}_{k+1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} \end{aligned} \quad (12)$$

其状态量偏差满足

$$\mathbf{b}_{k+1} \leq \mathbf{K}_{k-1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k-1} + \mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k + \mathbf{K}_{k+1} \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} \quad (13)$$

根据上述推导,从首历元到历元 k 的综合状态量偏差及其上限可以表示为

$$\mathbf{b}_k = \sum_{i=1}^k \delta_i \mathbf{K}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i \leq \sum_{i=1}^k \delta_i \mathbf{H}_i^+ \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (14)$$

当历元 i 存在测量偏差时 $\delta_i = 1$,反之 $\delta_i = 0$ 。

此外,由于RTK定位中需要进行模糊度固定,因此需要考虑模糊度固定错误的影响,该影

响与模糊度求解方法相关。根据前文,完好性风险指标的分配离不开对用户端算法的标准化,因此本文选定LAMBDA算法为标准算法^[35],在此基础上推导出最大可允许的模糊度偏差周数以及对应的模糊度完好性风险指标。

考虑到模糊度是否固定、是否固定正确均会影响误差的估计,因此对于浮点解,可以直接通过投影关系来预估,而固定解则需要考虑模糊度固定错误对定位解的影响。在完成测量更新后,可以得到包含定位解及模糊度浮点解的状态量 $\hat{\mathbf{r}}$ 和 $\hat{\mathbf{N}}$ 以及相应的协方差矩阵。对模糊度浮点解 $\hat{\mathbf{r}}$,使用LAMBDA算法进行固定后,再根据模糊度状态量方差阵 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{N}}}$ 以及定位解-模糊度协方差阵 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{N}}}$,更新定位解 $\check{\mathbf{r}}$,即

$$\check{\mathbf{r}} = \hat{\mathbf{r}} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{N}}}^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \check{\mathbf{N}}) \quad (15)$$

当模糊度固定错误时,即存在模糊度偏差 $\Delta\check{\mathbf{N}}$,代入式(15)可以得到该偏差引起的定位域误差为

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{N}}}^{-1} \Delta\check{\mathbf{N}} \quad (16)$$

根据上述表达式可以推导模糊度偏差对定位解的影响,然而在实际应用中,由于协方差矩阵会因实际观测条件有较大的变化,其规律难以分析。为此,本文从测量域角度考虑模糊度的影响,若模糊度固定错误,可以将其视为载波测量值中存在偏差,该偏差随其余误差项共同投影到定位域中,即有

$$\mathbf{y}_j = \mathbf{y}_j^* + \lambda \Delta\mathbf{N}_j \quad (17)$$

式中: λ 为对应频点的波长,偏差项 $\lambda\Delta\mathbf{N}_j$ 对定位解的影响与式(14)中的 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 一致。据此,可以将模糊度固定错误偏差作为测量误差项推导其对应的最大可允许偏差,为后续设计用户端监测算法判别模糊度固定正确性的阈值提供理论支持。

至此,完成了基于EKF的RTK定位中测量域及模糊度固定偏差对定位解影响的推导,式(14)给出了从首历元到历元 k 的综合状态量偏差上限。但在实际使用时,通常会逐一历元进行故障检测,因此误差延续至多个历元但未被检测的概率较低,本文按照单一历元测量误差的投影关系来推导针对单颗卫星的最大允许误差MERR。根据前述假设条件,以水平方向为例,当卫星 j 存

在未探测的测量误差 ε_j 时,其引起的定位域内偏差 $b_{h,j}$ 为

$$b_{h,j} = H_{h,j}^+ \varepsilon_j \quad (18)$$

假设正常条件下定位误差服从正态分布 $N(0, \sigma_h^2)$,则当偏差 $b_{h,j}$ 存在时,为保障定位误差小于告警门限HAL,需要满足:

$$b_{h,j}^{\max} + K_{\text{MD}} \sigma_h \leq \text{HAL} \quad (19)$$

则下式成立,即

$$H_{h,j}^+ \varepsilon_j + K_{\text{MD}} \sigma_h \leq K_{\text{HAL}} \sigma_h \quad (20)$$

式中: K_{HAL} 为水平定位风险概率对应的正态分布分位数; K_{MD} 为该测量误差的漏检系数,即所设计监测器漏检率的正态分位数。由此可以得到测量偏差 ε_j 的范围为

$$\varepsilon_j \leq (K_{\text{HAL}} - K_{\text{MD}}) \frac{\sigma_h}{H_{h,j}^+} \quad (21)$$

由于

$$\frac{\sigma_h}{H_{h,j}^+} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n H_{h,r}^{+2} \sigma_r^2}{H_{h,j}^{+2}}} \geq \sigma_j \quad (22)$$

式中: σ_j 为卫星 j 的测量误差标准差,因此可以取该卫星最大可允许测量偏差为

$$\text{MERR}_j = (K_{\text{HAL}} - K_{\text{MD}}) \sigma_j \quad (23)$$

此外,若忽略定位误差的正态分布特性,则可以直接根据式(18)估算测量偏差 ε_j ,即

$$\varepsilon_j \leq \frac{\text{HAL}}{H_{h,j}^+} \quad (24)$$

由于 $H_{h,i}^+ \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n H_{h,i}^{+2}} = \text{HDOP}$,所以可以取最大可允许测量偏差为

$$\text{MERR}_j = \frac{\text{HAL}}{\text{HDOP}_{\max}} \quad (25)$$

前述2种MERR计算方法中,式(25)的方法可以在监测器设计的初始阶段对MERR进行初步估算,而式(23)的方法涉及各个卫星测量误差标准差的具体数值,更适用于方案迭代阶段进行性能指标的细化。

2) RTK服务端MERR数值分配

本小节依据式(25)进行RTK服务端MERR数值的初步设计。根据GPS标准定位服务规范^[36],使用单GPS导航定位时,全球范围内水平精度因子(Horizontal Dilution of Precision, HDOP)最大值为2.5。为了保守起见,本文取HDOP最大为3,据此可得到MERR为1 m。需

要注意的是,该阈值是包含改正数偏差、用户端测量偏差的综合阈值。由于本文重点关注服务端的监测方案设计,因此假设用户端使用理想无故障接收机,不考虑用户端测量和模糊度固定算法引入的偏差项,故将所得MERR全部分配给改正数误差。此外,需要说明的是,该假设同样可以扩展至用户端观测值存在异常的情况,此时用户端需要设计相应的故障检测和保护级计算方法,使得包括改正数偏差在内的综合偏差小于MERR,对用户端完好性算法的研究将在后续研究中开展。

对于服务端故障监测方案,MERR分配有2种思路。第1种是对各个风险项各自分配相应的门限,根据2.2节中的风险指标分配,服务端需

要保证MERR以 10^{-5} 的概率(P_{MERR})包络住改正数误差标准差,因此改正数误差标准差最大值为

$$\sigma_{j,\text{cor}} = \frac{\text{MERR}_j}{K_{\text{MERR}}} \quad (26)$$

式中: K_{MERR} 为 P_{MERR} 对应的标准正态分位数。

由于改正数误差中包含各个风险误差项,因此该分配方法需要保障整体误差标准差的平方和相加为综合改正数误差标准差,具体数值需要根据各个误差项实际的统计特征加以调配,表5为对这种方法的分配示例。

然而,该方法存在的问题是,监测器的MDE要足够小才能保障监测完好性,而每一项误差的MERR都较小,使得监测器的设计存在困难,难以实现对所有监测器的可靠设计,所以可能需要反复迭代MERR数值。

表5 测量域误差界限分配示例(方法1)

Table 5 Example of MERR allocation (method 1)

风险误差项	误差标准差/m	95% 误差/m	风险概率指标	MERR/m
卫星段测距误差	0.10	0.15	2×10^{-6}	0.47
电离层测距误差	0.12	0.23	2×10^{-6}	0.57
对流层测距误差	0.08	0.15	5×10^{-7}	0.40
接收机故障测距误差	0.07	0.13	2×10^{-6}	0.33
基准站位置异常	0.10	0.19	1×10^{-6}	0.48

为此,本文使用第2种阈值分配方法,使用分级监测方案,各项风险误差项的MERR均取为最大值1 m,使各个分监测器的MDE均小于1,实现第1级的监测;在生成改正数后,再使用新的监测器来监测整体改正数的误差,保证综合监测器MDE同样小于MERR,实现第2级的监测。该方法能使得各个监测器有较大的性能裕度。

完好性指标的分配与设计是分级监测方案中的要点,为了保障总体改正数完好性风险概率为 10^{-5} ,首先,需要各个分监测器均能保障 10^{-5} 的完好性,即漏检率与故障概率的乘积。其次,对于综合监测器,其预期实现的完好性也为 10^{-5} ,因此综合监测器先验故障概率由分监测器失效概率决定,可知每个故障的先验故障率均为 10^{-5} ,由于可能存在多个分监测器漏检导致综合偏差超过1 m的情况,因此需要考虑多故障情景。本文借鉴ARAIM中完好性监测思

路,分配未监测的风险概率 $P_{\text{unmonitored}}$ 用以确定最大需要考虑的故障个数,再设计相应的故障检测及保护级算法。该算法得到的保护级小于MERR时,即能保证MERR以 10^{-5} 的概率包络综合改正数误差,使整体完好性指标得以实现。

图6为本文所使用方法2的流程示意图。由于本文主要讨论风险指标分配方法,因此暂时只给出分配思路,具体的监测器设计及验证会在后续的研究中进行详细的阐述。

2.4.2 检测域误差界限

检测域误差界限的计算与监测器的设计紧密相关,根据前文推导出的详细性能指标及1.3节所述内容,在监测器设计时需要保障MDE小于所分配的MERR,即保障性能裕度大于0。由于MDE由检验统计量误差分布特性、所分配

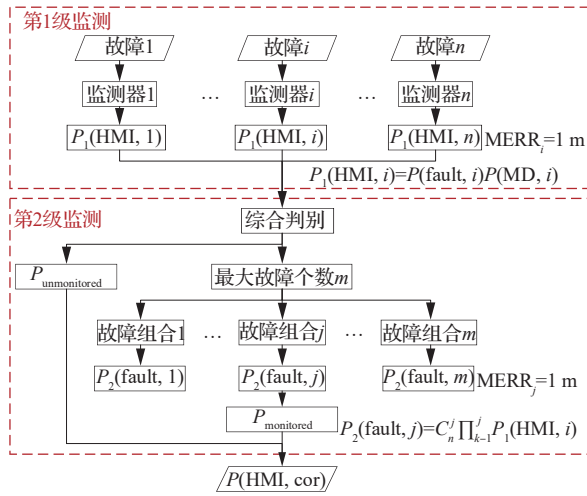


图6 基准站分级监测流程

Fig. 6 Schematic diagram of hierarchical monitoring process for reference stations

的误检率及漏检率确定,而本文主要关注完好性指标分配方案的实现,因此不再逐一介绍具体的监测器设计及性能分析,仅以服从正态分布的检验统计量为例介绍相应参数的计算方法,每一项监测器的选取及分析工作将在后续研究中详细阐述。

对于服从正态分布的检验统计量 $T \sim N(0, \sigma_T^2)$, 根据分配的误检率指标 P_{FA} 和漏检率指标 P_{MD} , 可以计算其对应的分位数 $K_{FA} = Q^{-1}(1 - P_{FA}/2)$ 和 $K_{MD} = Q^{-1}(1 - P_{MD}/2)$, 其中 $Q^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆, 则该检验统计量的 MDE 的计算式为

$$MDE = (K_{FA} + K_{MD}) \sigma_T \quad (27)$$

当 MDE 小于 MERR 时, 说明在测量域误差超过最大可允许界限前, 就能够被监测器识别并排除, 不会影响定位完好性, 否则说明监测器的性能无法保障所需完好性, MERR 超过 MDE 的量则为监测器的性能裕度 η , 即

$$\eta = MERR - MDE \quad (28)$$

2.5 性能指标验证方法

根据 2.1 节中的风险指标分配框架, 以及 2.2 节提出的面向自动驾驶领域 RTK 应用的完好性风险指标, 2.3 节和 2.4 节分别提出了概率指标及误差界限的分配方法, 给出了分配示例,

将整体完好性风险指标分解为各类故障先验概率及监测器漏检率乘积之和, 将告警门限分解至各类故障 MERR 以及监测器 MDE。

基于前述分解, 对整体完好性风险的验证便可以转换为对监测器漏检率的验证。而监测器漏检率的验证涉及各项具体监测器的设计工作, 且可能需要进行反复的论证迭代, 其内容较多, 因此本文仅介绍对其进行验证的思路, 如图 3 所示, 包括理论闭环验证和检验闭环验证 2 个部分。

理论闭环验证是根据各项监测器的统计特性、所分配的漏检率和误警率, 计算得到监测器 MDE, 保障所有监测器的 MDE 均小于对应故障的 MERR 才能保障完好性风险分配实现理论闭环, 否则需要重新迭代推导风险指标分配和误差界限分配的具体数值, 直到实现理论闭环。

检验闭环验证是在各类监测器初步设计完成并通过理论闭环验证后, 基于实测数据, 通过添加仿真故障的方式检验其漏检率及 MDE 是否符合理论设计值, 若不符合则需要对监测器进行重新设计与调整, 甚至重新进行风险概率与误差界限的分配、监测器设计与检验, 直到全部符合要求, 才能完成对漏检率及总体完好性风险的验证。

由于风险指标分配方案并非唯一, 对其合理性的证明是一个重要的问题, 然而目前即使在 GBAS 完好性架构中也未给出对方案的合理性分析, 这是因为指标分配属于顶层方案设计环节, 需要通过各个末端节点的验证来佐证其合理性。为此, 本文提出如下判别准则: ① 整体分配理论与框架全面、合理; ② 对故障模式的选取合理, 故障的先验概率保守。若能实现上述 2 点, 就能从理论层面说明整体分配方案是合理的。

对于第①点, 如图 7 所示, 本文的重点在于提出整体分配的理论框架, 考虑了从完好性风险指标的合理性分析到监测器验证的各个层面, 理论方案具有完备性和可执行性。

对于第②点, 本文在进行风险指标分配时, 通过对比不同时段、不同类型接收机组合 RTK

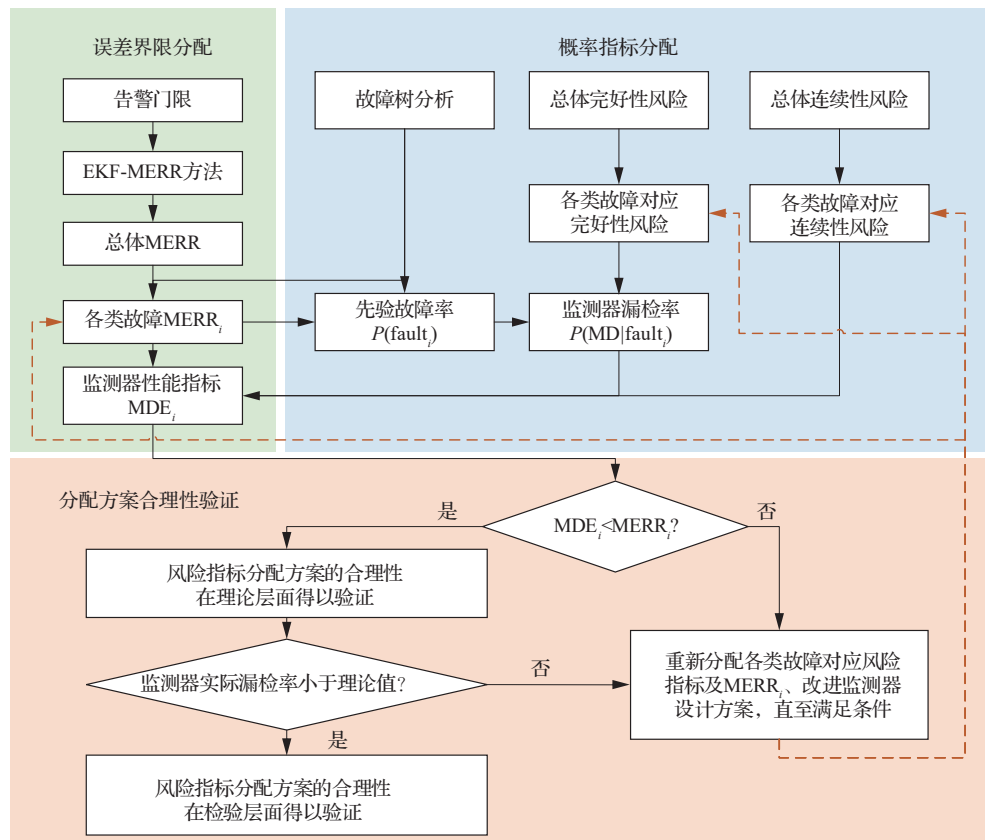


图7 本文研究内容与流程框架

Fig. 7 Research topic and process framework of the paper

定位结果,验证了电离层异常和接收机数据质量是影响RTK定位完好性的主要因素,并统计了不同接收机故障率,选取其最大值作为先验故障率。这保障了故障模式选取的合理性以及先验概率的保守性。

因此,本文所提方法和指标分配方案的合理性得到了初步的验证,在后续的研究中,将以本文所提方法和初步分配结果为基础,进行更为详细的监测器设计及验证。

3 结 论

1) 本文构建了一套完备的RTK完好性指标分配方法,包括指标分配流程、概率指标分配以及误差界限分配3个主要部分。其中概率指标分配包含完好性指标分配和连续性指标分配,误差界限分配包括定位域、测量域和检测域的误差界限分配。

2) 以车辆自动驾驶应用中对卫导的性能要求作为所需RTK完好性指标,针对RTK定位过

程中的故障来源及特征,开展了RTK完好性概率指标分配。

3) 提出了基于EKF滤波器的MERR推导方法,在此基础上设计了2种测量域误差界限分配方案,并给出了具体的分配示例,可为服务商开展RTK增强系统建设提供理论和数据参考。

致 谢

感谢中国香港卫星定位参考站网(SatRef)提供的开源观测数据。

参 考 文 献

- [1] REID T G R, HOUTS S E, CAMMARATA R, et al. Localization requirements for autonomous vehicles[J]. SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, 2019, 2(3):173-190.
- [2] REID T G R, NEISH A, MANNING B. Localization & mapping requirements for level 2+ autonomous vehicles [C]//Proceedings of the 2023 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Manassas :ION,

- 2023: 107-123.
- [3] IMO. Revised maritime policy and requirements for a future GNSS: A.925(22) [S]. London: IMO, 2001.
 - [4] 蒋爱国, 邹付兵, 刘晓林, 等. 北斗/GPS海上实时PPP完好性监测及性能分析[J]. 测绘通报, 2023(8): 97-101. JIANG A G, ZOU F B, LIU X L, et al. BDS/GPS maritime real-time PPP integrity monitoring and performance analysis[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(8): 97-101 (in Chinese).
 - [5] HOU P Y, ZHA J P, LIU T, et al. Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(5): 051002.
 - [6] LI X X, HUANG J X, LI X, et al. Review of PPP-RTK: Achievements, challenges, and opportunities[J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1): 28.
 - [7] CAPUA R, PULLEN S, JOERGER M, et al. Development of RTCM SC-134 messages for high-integrity precise positioning [C]//Proceedings of the 37th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2024). Manassas: ION, 2024: 654-668.
 - [8] GAO Z, ZHAN X Q, YANG R. RTK ramp faults detection and exclusion by the hybrid control chart[J]. Advances in Space Research, 2024, 73(3): 2060-2079.
 - [9] FENG S J, OCHIENG W, MOORE T, et al. Carrier phase-based integrity monitoring for high-accuracy positioning[J]. GPS Solutions, 2009, 13(1): 13-22.
 - [10] BARFORD T, LACAMBRE J B, GREER R. Optimizing GNSS time-differenced carrier phase measurements for high-integrity inertial navigation GNSS sensor fusion without ambiguity resolution[C]//2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 793-804.
 - [11] GAO Y T, JIANG Y, GAO Y, et al. Solution separation-based integrity monitoring for RTK positioning with faulty ambiguity detection and protection level [J]. GPS Solutions, 2023, 27(3): 140.
 - [12] EL-MOWAFY A, XU B, HSU L T. Integrity monitoring using multi-GNSS pseudorange observations in the urban environment combining ARAIM and 3D city models[J]. Journal of Spatial Science, 2022, 67(1): 91-110.
 - [13] WANG Z P, HOU X P, DAN Z Q, et al. Adaptive Kalman filter based on integer ambiguity validation in moving base RTK[J]. GPS Solutions, 2022, 27(1): 34.
 - [14] VERHAGEN S, TEUNISSEN P J G. The ratio test for future GNSS ambiguity resolution [J]. GPS Solutions, 2013, 17(4): 535-548.
 - [15] TEUNISSEN P J G, VERHAGEN S. The GNSS ambiguity ratio-test revisited: A better way of using it [J]. Survey Review, 2009, 41(312): 138-151.
 - [16] KHANAFSEH S, PERVAN B. New approach for calculating position domain integrity risk for cycle resolution in carrier phase navigation systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(1): 296-307.
 - [17] HOU Y Q, VERHAGEN S, WU J. An efficient implementation of fixed failure-rate ratio test for GNSS ambiguity resolution[J]. Sensors, 2016, 16(7): 945.
 - [18] WU S W, PECK S R, FRIES R M, et al. Geometry extra-redundant almost fixed solutions: A high integrity approach for carrier phase ambiguity resolution for high accuracy relative navigation[C]//2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2008: 568-582.
 - [19] RUWISCH F, SCHÖN S. Performance assessment of GNSS RTK positioning in urban environments: Outlier detection versus 3DMA-FDE [C]//Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022). Manassas: ION, 2022: 2649-2663.
 - [20] KARIMIDOONA A, SCHÖN S. Integrity monitoring of commercial RTK receivers in static open sky and kinematic urban environments scenarios[C]//Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Manassas: ION, 2022: 819-84.
 - [21] WANG K, EL-MOWAFY A, RIZOS C, et al. Integrity monitoring for horizontal RTK positioning: New weighting model and overbounding CDF in open-sky and suburban scenarios[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1173.
 - [22] 喻思琪, 张小红, 郭斐, 等. 卫星导航逼近技术进展[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 022200. YU S Q, ZHANG X H, GUO F, et al. Recent advances in precision approach based on GNSS[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 022200 (in Chinese).
 - [23] LI R, ZHENG S Y, WANG E S, et al. Advances in Beidou navigation satellite system (BDS) and satellite navigation augmentation technologies[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 12.
 - [24] RTCA. Minimum operational performance standards (MOPS) for global positioning system/satellite-based augmentation system airborne equipment: RTCA DO-229[S]. Washington, D.C.: RTCA, 2020.
 - [25] RTCA. Minimum aviation system performance standards for local area augmentation system (LAAS): RTCA DO-245A[S]. Washington, D.C.: RTCA, 2004.
 - [26] BRAFF R, SHIVELY C A. Derivation of ranging source integrity requirements for the local area augmentation

- tion system (LAAS)[J]. *Navigation*, 2000, 47(4): 279-288.
- [27] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准: JTG B01—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014[S]. Beijing: China Communications Press, 2015 (in Chinese).
- [28] 宋远, 黄智刚, 李锐, 等. 基于风险概率分解的RTK完好性评估方法研究[J/OL]. *北京航空航天大学学报*. (2024-05-08)[2024-12-04]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024-0134>.
SONG Y, HUANG Z G, LI R, et al. An RTK integrity evaluation method based on risk probability decomposition [J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. (2024-05-08) [2024-12-04]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024-0134> (in Chinese).
- [29] ICAO. Annex 10-Aeronautical telecommunications-Volume I-Radio navigational aids[S]//International Standards and Recommended Practices. Montreal: ICAO, 2023.
- [30] ICAO. Navigation system panel(NSP), Agenda Item 2: WAAS Status [R]. 2024.
- [31] GALLON E, JOERGER M, PERVAN B. Robust modeling of GNSS tropospheric delay dynamics [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(5): 2992-3003.
- [32] SHIVELY C A. Derivation of acceptable error limits for satellite signal faults in LAAS[C]//Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). Manassas: ION, 1999: 761-770.
- [33] RIFE J, PHELTS R E. Formulation of a time-varying maximum allowable error for ground-based augmentation systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(2): 548-560.
- [34] SOUALLE F, MINK M, BRAUN R, et al. Methodology for the design of integrity barriers in a regional augmentation satellite system [C]//Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2015). Manassas: ION, 2015: 1551-1564.
- [35] TEUNISSEN P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1): 65-82.
- [36] DOD. Global positioning system standard positioning service performance standard: 5th edition [S]. Washington, D.C.: DOD, 2020.

(责任编辑: 李丹)

Allocation method of RTK integrity indicators

SONG Yuan^{1,2}, LI Rui^{1,2,*}, HUANG Zhigang¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. State Key Laboratory of CNS/ATM, Beijing 100191, China

Abstract: As the most widely used high-precision positioning technology of the Global Navigation Satellite System (GNSS), the integrity of Real-Time Kinematic (RTK) relative positioning remains a hot topic in the industry and academia area. It is also a critical challenge that determines whether RTK can be used in life safety-related fields such as autonomous driving. However, current research on RTK integrity mainly focuses on the level of conceptual discussion and user-end algorithms, with issues such as unclear performance indicators, complex and unclear algorithms, and a lack of systematic analysis framework and solutions. By studying various augmentation systems in the aviation field, this paper identifies key elements in integrity solution, including multiple stages such as demand analysis, risk source analysis, integrity indicator allocation, monitoring scheme design, and verification scheme design. Among them, the integrity indicator allocation stage undertakes user needs and monitor performance requirements, involving the establishment of an overall analysis process and framework, forming the basis for subsequent specific monitor design and verification, and thus becomes the core of the overall integrity solution. To address this, this paper proposes an RTK integrity indicator allocation method inspired by the risk indicator allocation process in the Ground-Based Augmentation System (GBAS). Then, deriving the Maximum Allowable Measurement Error (MERR) calculation formula applicable to the Kalman filter is derived, and a complete indicator allocation scheme from both probabilistic and error-bound perspectives is presented. The proposed method and allocation examples can provide theoretical support and data reference for RTK service providers in developing integrity solutions and promoting relevant service.

Keywords: GNSS; RTK integrity; integrity augmentation system; risk indicator allocation; maximum allowable measurement error

Received: 2024-12-12; **Revised:** 2024-12-25; **Accepted:** 2025-02-19; **Published online:** 2025-03-07 08:48

URL: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2025/V46/I16/331655>

Foundation item: National Key R&D Program of China (2022YFB3904302)

* **Corresponding author.** E-mail: lee_ruin@263.net