



综述

ARAIM 技术研究进展

王尔申^{1,2}, 杨迪¹, 宏晨³, 曲萍萍¹, 蓝晓宇¹, 王传云⁴, 庞涛¹

(1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学辽宁省通用航空重点实验室, 辽宁 沈阳 110136;

3. 北京联合大学机器人学院, 北京 100101; 4. 沈阳航空航天大学计算机学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 随着多星座卫星导航系统和双频技术的发展, 高级接收机自主完好性监测 (ARAIM) 技术应用于更高阶段的精密进近成为可能。首先介绍了与 ARAIM 相关的 3 个重要内容: 完好性性能要求、完好性支持信息、威胁类型及缓解方法。然后, 对 ARAIM 国内外相关技术研究进行了综述, 从故障分类、星座配置和 ARAIM 可用性及其预测 3 个方面。最后, 结合 ARAIM 现阶段的发展, 对未来的研究进行展望。

关键词: 多星座组合导航; ARAIM; 可用性; 双频技术

中图分类号: V249.3, P228.4

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019172

Research progress of ARAIM technology

WANG Ershen^{1,2}, YANG Di¹, HONG Chen³, QU Pingping¹, LAN Xiaoyu¹, WANG Chuanyun⁴, PANG Tao¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. General Aviation Key Laboratory of Liaoning Province, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

3. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100101, China

4. School of Computer Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract: With the development of multi-constellation satellite navigation systems and dual-frequency technology, it has become possible to apply advanced receiver autonomous integrity monitoring (ARAIM) to higher-level vertical precision approaches. Firstly, three important contents related to ARAIM were introduced: integrity performance requirements, integrity support information, threat types and mitigation methods. Then, ARAIM related technologies research at home and abroad were summarized: fault classification, constellation configuration and ARAIM availability. Finally, combined with the current development of ARAIM, the future research was expected.

Key words: multi-constellation integrated satellite navigation, advanced receiver autonomous integrity monitoring, availability, dual-frequency technology

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571309, No.61703287); 辽宁省自然科学基金面上项目 (No.L2019251); 辽宁“百千万人才工程”项目 (No.04021407); 辽宁省教育厅项目 (No.L201705, No.L201716, No.UPRP2018198); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目 (No.LR2016069); 北京市教育委员会科技计划一般项目 (No.KM201811417005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571309), The Natural Science Foundation of Liaoning Province (No.L2019251), Liaoning BaiQianWan Talents Program (No.04021407), Scientific Study Project for Liaoning Province Ministry of Education (No.L201705, No.L201716, No.UPRP2018198), Liaoning Excellent Talents in University (No.LR2016069), Beijing Municipal Education Commission Science and Technology Project (No.KM201811417005)

1 引言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)性能指标主要包括精度、完好性、连续性和可用性。其中,完好性是指当系统提供的导航服务无法满足规定的导航任务,或者解算结果的误差超过允许限值时,系统能够及时地向用户发出告警^[1]。为了保障卫星导航系统向用户提供可靠的导航定位服务,完好性监测技术成为卫星导航技术的研究重点之一,并受到广泛的关注。全球导航卫星系统完好性监测方法主要分为三大类:一是卫星自主完好性监测,该方法不依靠其他设备辅助^[2];二是外部完好性监测,在基本的系统之外,使用地基或者空基的监测系统来实现完好性监测;三是内部完好性监测^[3]。RAIM(receiver autonomous integrity monitoring)是在冗余观测量的基础上,通过一致性检验来实现故障的检测和排除。RAIM成本较低、实时性强,能够对故障做出迅速的判断,因此,其得以广泛应用。目前,各类航空精密进近对卫星导航系统的完好性需求非常高,但RAIM仍不具备垂直导航的能力^[4]。近年来,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)专门建立了一个GPS专家顾问委员会^[5],旨在利用GPS在全球范围内提供LPV-200(localizer performance with vertical guidance, LPV)级别的航空导航服务,其中正在考虑的一个可行方案就是高级接收机自主完好性监测(advanced RAIM, ARAIM)。

当前,随着美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯(GLONASS)、欧盟的伽利略(Galileo)以及中国的北斗(BeiDou)卫星导航系统的发展,可用的卫星数目显著增加,这些星座的组合将使接收机可见卫星的几何结构得到改善。从2010年开始,所有新GPS卫星将为民用用户广播频率分别为L1(1 575.42 MHz)和L5(1 176.45 MHz)的测

距信号,两个频率的使用将消除电离层对GNSS定位精度产生的影响。多星座组合和多频技术的使用能够使RAIM的性能得到很大的提升,同时,在未来十多年来,GPS的快速发展能够为民用航空提供较好的导航能力,因此GNSS发展架构研究小组(GNSS Evolutionary Architecture Study, GEAS)^[6-7]提出利用RAIM达到LPV-200阶段完好性的要求。LPV是指能够达到垂直引导的定位功能,LPV-200是指决断高度在地面上的60.96 m处。GEAS发展了高级接收机自主完好性监测算法,其能够满足LPV-200阶段的完好性要求。

2 ARAIM技术

2.1 ARAIM基本原理

ARAIM是指在利用双频技术时,通过多星座或者卫星接收到的冗余信息实现一致性监测,使得能够利用尽可能少的地面基础设施来实现全球空中无缝导航的目的,是RAIM方法的改进与扩展。在参考文献[7]中,GEAS考虑将GPS与其他卫星导航系统进行组合,例如欧洲的Galileo、俄罗斯的GLONASS和中国的BeiDou。截至2017年12月12日,Galileo拥有了26颗卫星,即4颗IOV卫星、18颗FOC卫星。2018年7月25日,再次发射4颗卫星^[8]。俄罗斯的GLONASS,经过多年的衰落,最近开始复兴,截至2018年6月21日,GLONASS系统在轨卫星26颗,其中24颗GLONASS-M处于运行状态、1颗退役卫星用于主开发商测试、1颗GLONASS-K进行飞行参数测试^[8]。截至2018年11月19日,中国的BeiDou已经发射43颗卫星,其中,GEO卫星8颗、IGSO卫星9颗、MEO卫星26颗。我国计划在2020年前后,建成北斗全球系统,向全球提供服务。利用多星座的ARAIM不仅可改善单故障假设下的可用性,而且将把ARAIM设计为能够检测到星座宽故障的存在。当前利用ARAIM的增强系统,因其能够利用更多的GNSS星座,从而有更多的



可用信号用于精准定位,发生故障的概率大大降低,且能节省地面设施的维护费用,受到更多研究人员的关注。

随着 ARAIM 的不断发展,许多性能得以实现,但是仍然存在许多问题需要解决,主要有:构建精确的 ARAIM 风险模型需要大量数据才能实现;ISM (integrity support message) 中各个参数的确定;ARAIM 在各个飞行阶段的可用性等。

2.2 LPV-200 的性能要求

为了能够准确评估 ARAIM 应用于具有垂直导航的 LPV-200 阶段中的可能性,需要确定 LPV-200 需要满足的性能要求。基于现有相关标准,给出 LPV-200 的完好性要求^[7]。

(1) 保护限值必须小于告警门限

垂直保护限值 (vertical protection level, VPL) 必须小于垂直告警门限 (vertical alert limit, VAL), 即 $VPL \leq VAL = 35 \text{ m}$; 水平保护限值 (horizontal protection level, HPL) 小于水平告警门限 (horizontal alert limit, HAL), 即 $HPL \leq HAL = 40 \text{ m}$ 。此要求与国际民航组织标准规定的垂直告警限值为 35 m、水平告警限值为 40 m 相同。并且,此要求在 LPV-200 定义的完好性要求中最为重要。

(2) 有效监视门限 (effective monitor threshold, EMT)

垂直定位误差 (vertical position error, VPE) 的最大值即 EMT, 而 VPE 应满足 $P(VPE \geq 15 \text{ m} | \text{fault}) \cdot P_{\text{fault}} \leq 10^{-5}$ 进近的要求, 其中, P_{fault} 为单颗卫星的故障率。对于 VPE 应满足的要求, GNSS 标准与建议措施 (GNSS standards and recommended practice, SARP) 指出当系统发生故障时,系统是在误差超过 15 m 的概率低于 10^{-5} 的情况下设计的。其中, 10^{-5} 的概率是故障发生的概率与垂直定位误差超过 15 m 的概率的乘积。因此,若要满足该条件,则卫星故障率应低于 10^{-5} 。

(3) 垂直精度 (95%)

垂直导航系统误差 (vertical navigation system

error, VNSE) (95%) 应不超过 4 m, 且当无卫星故障时, VNSE 大于或等于 10 m 的概率不超过 10^{-7} 。

(4) 危险误导信息概率 (probability of hazardous misleading information, HMI)

当水平定位误差 (HPE) 大于水平保护级 (HPL) 或垂直定位误差 (VPE) 大于垂直保护级 VPL 时, 超过告警时间 (time-to-alert, TTA), 则此时存在危险误导信息概率。同时, 如果要满足 LPV-200, 对于完好性的要求是危险误导信息概率 $P_i\{\text{HMI}\}$ 不超过 10^{-7} 进近。在标称条件下, 垂直误差超过 10 m 的概率须低于 10^{-7} 。

(5) 误警率

对于 LPV-200, GEAS 为机载算法假设的总的误警率要求是 $4 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

(6) 告警时间

告警时间不超过 6 s。

当利用 ARAIM 技术实现 LPV-200 进近阶段完好性监测时, 不用满足 6 s 告警时间的要求。ARAIM 并没有在地面上进行全部的运算, 而是在航空设备中进行, 因此不用地面在 6 s 内给用户告警。并且, ARAIM 具有完好性的可用性预测功能, 是指在飞行开始前, 就可以针对整个飞行阶段的完好性做出预测。如果完好性性能无法达到此要求, 则不再采用卫星导航而采用陆基导航。

如果能够满足前 3 个完好性要求, 则说明该 ARAIM 算法是可用的。可以通过最小化 VPL 来实现 ARAIM 可用性的最大化。

2.3 完好性支持信息

完好性支持信息 (integrity support message, ISM) 阐述了每个卫星所具有的标称误差以及卫星发生故障的概率。标称误差是通过两个标准偏差以及最大误差集来给出的, 标准偏差是针对完好性提出的, 而最大误差是针对精度和连续性提出的。参考文献[9]针对满足航空完好性风险需求的 ISM 提出了一些建议, 评估了 ISM 的地面监测算法。同时, 描述了 ISM 框架设计, 主要包括内

容：用于计算 ISM 内容的监控网络、ISM 传送到用户的传播网络和 ISM 时延。参考文献[10]引入地面监测框架验证飞机使用 ARAIM 的 ISM，主要研究两个关键的 ISM 参数：卫星故障的先验概率(P_{fault})和测距域限值(b_{max})，验证结果表明，监测性能可以用来验证对于 ARAIM 特定的 P_{fault} 和 b_{max} 。参考文献[11]引入地面监测框架验证飞机使用 ARAIM 的 ISM，主要研究两个关键的 ISM 参数：卫星故障的先验概率(P_{fault})和测距域限值(b_{max})，验证结果表明监测性能可以用来验证特定的 P_{fault} 和 b_{max} 。参考文献[12]通过改变截止高度角和用于计算保护水平的误差模型参数 URA (user range accuracy, 用户测距精度)、URE (user range error, 用户测距误差) 和标称偏差来研究可用性的灵敏度分析，并在澳大利亚的西部和东部两个地区利用 GPS 和 BeiDou 进行测试，得出了实现 LPV-200 的可能性。这些参考文献对 ISM 中的不同参数进行了研究，主要研究这些参数对 ARAIM 可用性的影响以及如何提高 ARAIM 的可用性。

ISM 主要包含以下几方面：①用户测距误差/空间信号误差 (user range error/signal-in-space error, URE/SISE) 值；②用户测距精度/空间信号精度 (user range accuracy/signal-in-space accuracy, URA/SISA) 值；③评估完好性的偏差(b_{max})，是指在没有卫星故障时最大值的偏差；④评估精度和连续性的偏差(b_{cont})；⑤卫星故障概率(P_{fault})；⑥FLAG 信息，用来表示 ISM 所包含的信息中是否含有以上 5 种信息。在民航空管部门批准将 ARAIM 应用于 LPV-200 进近阶段前，必须对上面 6 个参数的值进行验证，使得能够对多星座 ARAIM 的性能实现正确的评估。在参考文献[13]中则明确了上述参数的确定方法。

2.4 威胁类型及威胁缓解

LPV-200 对导航性能指标的要求中所指的威胁是指任何可能导致 95%定位误差超过 4 m 或定

位误差大于保护水平的情况。威胁可能影响 LPV-200 所需的性能要求，需要对这些威胁进行分析并采取相应的措施进行处理。全球导航卫星系统 (GNSS) 接收机测量值容易受到包括卫星和星座故障在内的故障的影响，这可能会导致用户的主要完好性受到威胁。参考文献[14]中把威胁分为 3 种类型，分别是标称误差、窄故障误差和宽故障误差。威胁模型分为单卫星故障、多卫星故障和星座宽故障。对每种类型包括的误差及其产生的原因进行了介绍。在确定了威胁之后，提出利用卫星星座的地面监测站和卫星星座本身、独立的地面段和用户接收机 3 部分缓解威胁。通常认为对威胁的缓解比分析威胁的产生更重要。

3 ARAIM 技术研究现状

GPS 进化框架研究 (GEAS) 在 GEAS 阶段 II 报告中明确了 ARAIM 的定义，工作组 C-ARAIM 技术分组 (Working Group C-ARAIM Technical Subgroup, WG C-ARAIM TSG) 在原有的基础上进一步发展了 ARAIM 架构。欧盟和美国的研究者正在研究将 ARAIM 用于飞行的垂直引导^[15-17]。参考文献[15]确定了有关性能需求，定义了 ARAIM 参考用户算法，首次评估了 ARAIM 的可实现性能并对 ARAIM 威胁进行了描述。参考文献[16]发展了 3 种支持导航目标的 ARAIM 架构：水平 ARAIM、离线 ARAIM 和在线 ARAIM，利用 ARAIM 风险分配、必要的地面设施、架构内的风险缓解、ISM 内容以及潜在的 ISM 广播设施这几个方面对各架构及其存在的风险进行了详细描述。针对参考文献[16]的开放论述，研究机构给予了反馈意见，参考文献[17]提出了 ARAIM 路线图，对参考文献[16]中的内容进行了完善和补充。这些参考文献对 ARAIM 的性能要求和组成架构进行了相关研究，详细介绍和分析了研究 ARAIM 需要考虑的具体内容，也为 ARAIM 的研究梳理出一个清晰的脉络。参考文献[18]利用卡尔



曼滤波器 (KF) 作为基础定位方法, 提出了一种适用于城市环境完好性监测的高级接收机自主完整性监测 (ARAIM) 算法, 该方法可在多路径的影响下保持良好的性能。

根据目前的研究成果来看, ARAIM 算法的研究还不够成熟, 且现有的 ARAIM 算法大多是经典 RAIM 算法的推广。

3.1 ARAIM 研究内容

RAIM 和 ARAIM 两种算法都是基于测距域和定位域进行的一致性检测, 研究者们对这两种算法进行了不断的扩展。现在的 ARAIM 算法主要包括多假设分组解 (multiple hypothesis separation solution, MHSS)、最优加权平均解 (optimally weighted average solution, OWAS) 算法、新颖的完好性优化算法 (novel integrity-optimized RAIM, NIORAIM) 和卡方检验法^[19-22]。

3.2 不同故障下的 ARAIM

3.2.1 多故障下的 ARAIM

为使用户可见卫星几何结构得到改进, 可把多个卫星导航系统组合应用到 ARAIM 中。但是也带来一些问题, 卫星的增多将使得多颗卫星发生故障的概率变大, 此时需要考虑多个卫星发生故障的情况。GEAS 阶段 II 报告中描述的用户算法仅仅包括单故障的情况。尽管此用户算法可以推广到多故障下, 但是还没有明确如何准确地实施。参考文献[23]总结了多故障下的完好性算法、保护限值和可用性方面的研究进展。参考文献[24-26]描述了利用多故障的威胁模型计算保护级的方法。参考文献[8]根据参考文献[24-26]详细地描述了 ARAIM 用户算法以及满足 ARAIM 用户算法的性能要求和 ARAIM 中用到的主要参数, 总结了当前基本算法中未包含的可能改进。参考文献[27]针对 ARAIM 算法正确检测排除卫星故障的性能, 通过实测数据进行评价。参考文献[28]提出组合粗差探测的 MHSS ARAIM 算法, 在双故障假设下, EMT 的精度分别提高了 80.85%、29.88%, VPL

的精度分别提高了 49.66%、18.24%。但应用于多频多星座观测数据的效果和性能尚待进一步的研究。参考文献[29]设计了一个全向阈值结构, 分析了单故障、双故障和三故障假设的检验统计量的分布。参考文献[30]提出用于北斗区域星座的完好性保护级改进算法, 通过调整危险误导信息概率在各假设分组中的分配, 使保护门限对定位误差形成更紧致的包络, 能有效减少完好性监测的可用性误判。

上述这些参考文献从威胁模型出发, 根据完好性性能要求, 描述了 ARAIM 算法以及改进的算法, 通过对完好性预算进行动态分配优化保护级, 提高 ARAIM 的完好性和可用性。

ARAIM 算法无论是在定位域还是在测距域中, 都是对冗余测量值进行的一致性检测。如果所有的测距测量值都与同一错误卫星位置一致, ARAIM 不能检测这种故障。这种情况被称为“一致性”误差或“一致性”信号故障, 即星座宽故障。例如, 如果所有卫星星历参数都基于地球定向的故障估计, 将存在一致故障。因此, 这种宽故障需要进行检测。下面对宽故障的 ARAIM 进行研究。

3.2.2 宽故障下的 ARAIM

宽故障是指由于地面和人为操作等原因造成几颗卫星甚至整个星座同时发生故障。一般的宽故障形式都是指星座故障。多星座下, 在将 ARAIM 应用于 LPV-200 的过程中需要考虑多颗卫星同时发生故障的情况, 尤其需要考虑星座宽故障情况。

WG C-ARAIM TSG 在里程碑 2 报告中提到星座宽故障是目前 ARAIM 正面临的挑战之一。参考文献[31]研究了多个卫星同时发生故障时的影响, 显示了在卡方检验方法下当假设两颗卫星同时发生故障时, HPL 和 VPL 参数随着更高的双故障要求而显著增加。2006 年, Angus^[32]用不同的方法推导最大斜率, 得到了与 Brown^[33]相同的广

义特征值问题,并且,随着假设同时发生故障的卫星数从1增加到2、3,保护限值(protection limit, PL)迅速增加。参考文献[31-32]的公式适用于任何数量的卫星故障。Lee^[34]于2005年提出了加权平均解算法,确定可能的算法来缓解地球定向参数(earth orientation parameter, EOP)故障。Hwang和Brown^[35]于2008年提出了新颖完好性优化RAIM算法。这两个方法检测故障的发生或基于两个定位解检测其中一个星座发生故障的情况,这些算法无法满足LPV-200的可用性要求。以前用于检测星座宽故障的星座间比较(inter-constellation comparison, ICC)方法不能根据需要提供LPV-200的可用性。参考文献[36]提出了一种应用于星座宽故障(如地球定向参数)的完好性监测方法,提出的新方法可以使用两个独立的星座检测星座宽故障,并检测其LPV-200的可用性,该方法已被证明在检测EOP故障方面非常有效,且能够提供比ICC方法更高的LPV-200可用性。

目前,对宽故障检测提出的一些算法在多星座多故障条件下得到很好的应用,但仍有各自的不足。最优加权平均解算法必须将所有卫星按星座分成两组,此时相当于只有两个卫星星座,同时只能支持一种特殊的多星座故障假设;NIORAIM算法中运用迭代搜索法选取观测值权,但是因为涉及高维矩阵和数值积分等许多问题,不能在线完成;卡方检验法仍无法处理两个以上的故障。针对这些不足,还需要进行进一步的优化和改进。

3.3 不同星座下的RAIM

3.3.1 多星座RAIM算法

RAIM最初是在GPS早期开发的,目的是实现非精密进近(non-precision approach, NPA)飞行阶段的卫星导航定位完好性监测,目前对RAIM的研究目标是为全世界提供LPV-200导航能力。在新的RAIM设计中需要考虑不同星

座同时发生多个卫星故障的可能性以及组合星座的RAIM可用性分析。

参考文献[36]把参考文献[35]中的内容扩展到使用GPS和GLONASS多星座设置中,并且首次用真实的数据验证多星座RAIM,相比单星座,得出了多星座的更多测距资源,更能保证较窄的误差界限,并且多星座RAIM满足LPV-200的要求。参考文献[37]中对危险误导信息概率 $P_r\{HMI\}$ 采用动态分配,对 P_{fa} 采用平均分配方式,通过给定初值减少计算迭代次数得到次优解,改善了危险误导信息概率动态分配方法,实验得出除在部分极地地区外,多星座组合系统下的RAIM算法可提高单星座独立系统的可用性,但理论上的最优解迭代过程过于复杂,更好地分配完好性风险参数有待后续研究。参考文献[38]使用两组数据(模拟数据和真实数据)和两个SIS误差模型分析LPV-200的RAIM可用性,验证可知基于ISM模型的ARIAM法在卫星几何比较差时,仍能满足LPV-200的可用性要求;基于URA的SIS范围误差模型(range error model),因URA模型的保守性而产生相对较高的保护水平,且需依靠好的卫星几何满足LPV-200要求。参考文献[39]将RAIM机载算法应用于GPS L1/L5和Galileo E1/E5,以获得最终的RAIM输出(垂直和水平保护级、有效监测阈值和预测精度),最后对RAIM模拟中假设的模型进行评估。参考文献[40]提出基于同一轨道平面中卫星特征之间关联的方法,在多星座情况下明显减少子集数量和计算时间。参考文献[41]提出一种基于概率累积反馈结构的故障模式确定方法,在概率累积中获得的未监测风险的概率更接近完好性风险要求,并且故障模式的数量显著减少,提高了RAIM的可用性。

对于多星座RAIM,由于完好性风险平均分配导致保护限值估值过于保守,系统可用性降低,且最优解的迭代次数增加,现有算法大多就该问



题进行研究。正如 WG C-ARAIM TSG 在里程碑 2 报告中所提到的那样, ARAIM 算法使用的星座数较多, 除了卫星故障的类型不同以外, 算法也渐趋复杂。在对多星座 ARAIM 算法进行简化计算、提高算法的可用性方面还需进行更加深入的研究。ARAIM 的性能很大程度上取决于可见卫星数目。如果组合使用两个或更多 GNSS 星座, 可以提高 ARAIM 的性能和可用性。因此, ARAIM 需要多个星座。但是, 单独的 GPS 星座可以很好地服务于 ARAIM 的军事用途。下面介绍单星座下的 ARAIM 算法。

3.3.2 单星座 ARAIM 算法

随着全球多个卫星导航系统的迅猛发展, ARAIM 的提出旨在运用多星座组合的方式以提高导航性能, 而对于一些诸如军用飞行器等特殊用户来说, 它们只能利用单星座导航系统进行导航定位。因此, 单星座条件下的 ARAIM 算法及其可用性也成为目前研究的重点。参考文献[42]借助钟差辅助模型设计了一种能够用于垂直精密进近 LPV-250 服务的单星座 ARAIM 算法。该算法引入 Bayesian 方法, 将钟差预测值作为虚拟伪距观测值纳入当前的定位解算中, 以提高单星座 ARAIM 算法的可用性。参考文献[43]中对借助钟差辅助模型的能够用于垂直精密进近 LPV-250 服务的单星座 ARAIM 算法进行了详尽描述, 给出了接收机钟差序列的具体建模流程以及单星座 ARAIM 算法的完好性风险分配, 并选取 14 个国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 观测站对算法进行可用性分析, 验证了钟差辅助能较好地提高单星座 ARAIM 算法的可用性。

目前关于单星座 ARIAM 算法的研究很少, 由于单星座卫星导航无论从可见星几何结构还是导航性能方面都有一定局限, 现有的方法主要是利用辅助算法提高其可用性。对于单星座 ARAIM 算法还有待更多的研究与验证。

3.4 ARAIM 可用性及可用性预测

3.4.1 ARAIM 可用性

在应用 ARAIM 算法时, 需要对 ARAIM 算法的可用性进行判断, 判断 ARAIM 是否满足 LPV-200 的完好性性能要求。优化保护级以保证 ARAIM 算法的可用性, 对保护级的优化从两个方面进行讨论, 一方面是优化危险误导信息和误警率; 另一方面是改变完好性支持信息参数值。参考文献[44]中通过优化危险误导信息来最小化垂直保护级, 通过仿真对比优化前后的算法, 得出了双频 GPS 下的 ARAIM 技术在局部区域可以达到 LPV-200 的要求。参考文献[45]中验证了 ARAIM 算法在预测垂直保护水平、精度、有效监测阈值和连续性风险方面的有效性。参考文献[46]提出基于多假设分组解算法, 仿真得出在全球范围内双星座条件下 ARAIM 并不能完全支持 LPV-200 进近对完好性的要求, 而三星星座则可大大提高 ARAIM 的可用性, 为民航用户提供满足精密进近的导航服务性能。参考文献[47]提出基本的 ARAIM MHSS 算法和这种方法的扩展——Q-MHSS, 对它们进行不同的优化以提高算法的可用性性能。参考文献[48]提出一种基于遗传算法的垂直方向保护级别 (VPL) 优化方法, 优化结果显示此方法有效地提高了 ARAIM 算法在 LPV-200 中的可用性。参考文献[49]提出了星座加权 ARAIM (CW-ARAIM) 位置估计器, 而且双星座下仿真表明, 一次 GPS 卫星中断将使可用性从 91% 降至 50%, 在没有任何卫星中断的情况下, 此方法可有效地将可用性从 91.29% 提高到 98.75%。参考文献[50]提出了一种新方法严格量化卫星中断对航行安全的影响, 该方法允许确定在中断事件之后是否需要排除功能。结果表明, 双星座 H-ARAIM 可以提供高服务可用性, 同时满足完整性和连续性要求。

近年来对 ARAIM 可用性进行了大量的研究, 研究内容主要集中在通过最优危险误导信息、误

警率和完善完好性支持信息参数值来提高 ARAIM 的可用性以及这些因素对 ARAIM 可用性的影响。

3.4.2 ARAIM 可用性预测

由于一些原因导致 RAIM 在某地区、某些时间内不可用,此情况称为“RAIM 空洞”。导致出现 RAIM 空洞的原因有很多,如可视卫星的数目或者接收机可视卫星的几何分布。因此,在飞机飞行前,为了避免 RAIM 空洞问题的存在,对整个飞行阶段进行 RAIM 可用性预测是非常必要的。在预测中,任何飞行阶段中连续失去 RAIM 功能超过 5 min,飞行将被延迟、取消或改变航线。RAIM 可用性预测是指在制定飞行计划时提供机载接收机 RAIM 可用性的预测^[51]。当前很多国家已经建立了自己的 RAIM 可用性监测系统:美国 Volpe Center 开发用于军用机场服务的 RAIM 可用性系统;澳大利亚的 RAIM 预测系统能够在飞行员飞行计划前提供 GPS 失效信息并预测 NPA 阶段的卫星可用性;德国建立可为 42 个机场提供服务的预测系统;EUROCONTROL (European Organization for the Safety of Air Navigation, 欧洲航空安全组织)建立了 RAIM 预测系统 AUGUR。2006 年中国着手研制自己的 RAIM 可用性系统,2009 年中国民航局发布 PBN 实施路线图,同时咨询通告 AC-91FS-01 要求在飞机起飞前使用预测程序对飞机飞行航路和终端区的 RAIM 可用性进行预测。我国的 RAIM 可用性系统可提供 5 种发布模式(NPA 预测、GPS 卫星状态、区域静态预测、区域统计预测和航路分析),目前已具备全国所有航线的预测功能。

当前国内对 RAIM 可用性预测主要集中于 GPS、北斗单星座或双星座组合条件下设计的 RAIM 预测系统。参考文献[52]对系统的功能需求、性能需求以及数据模型等进行分析,借鉴以往的 GPS RAIM 预测算法,结合北斗导航特性对不同阶段的 RAIM 可用性进行预测,首次实现全

国机场、航路的北斗 RAIM 预测。参考文献[53]针对列车定位中出现的 RAIM 覆盖空洞问题,实现 RAIM 可用性预测时采用了水平保护级方法,并用 RAIM 预测系统软件预测 RAIM 的可用性,保障行车的安全。参考文献[54]中对 RAIM 预测的原理、民航对 GPS 的性能要求等进行研究,最后对 RAIM 预测算法进行了仿真,对系统软件流程进行了研究。

在 RAIM 可用性预测的基础上,也可以进行 ARAIM 的可用性预测。相同点是它们都是对“空洞”问题进行研究,不同点是它们应用的飞行阶段不同,并且不同的飞行阶段执行不同的导航性能要求。其中,ARAIM 应用于导航要求更高的 LPV-200 阶段;RAIM 应用于航路、终端区和非精密进近阶段。并且,ARAIM 与 RAIM 的可用性预测使用的算法也不尽相同,ARAIM 算法为适应垂直引导的可用性需求,其算法在 RAIM 的基础上进行了很大程度的改进。参考文献[55]基于 MHSS 算法设计 ARAIM 瞬时可用性预测系统,仿真结果显示,该系统在 GPS+GALILEO 双星座双频条件下满足 LPV-200 进近对完好性的需求。

随着北斗卫星导航系统的日趋完善以及 ARAIM 可用性算法的不断优化,将 ARAIM 可用性算法应用到预测系统中已成为重要的研究内容之一。

4 ARAIM 技术研究方向

根据国内外对 ARAIM 的研究现状,ARAIM 还有诸多问题需要研究,如完好性支持信息、ARAIM 的威胁和潜在的缓解等。

(1) 完好性支持信息

对于完好性支持信息可以由星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)或地基增强系统(ground based augmentation system, GBAS)所使用的地理上的参考站集中网络来生



成。当然,也可能由国际民用航空运行维护的共享参考网络生成。ISM 使用 SBAS 导航电文进行播发或使用 GBAS VDB (VHF data broadcast, VDB) 数据广播进行通信。由于 ARAIM 正在发展中,所以,ISM 的播发内容也未形成固定形式。

(2) ARAIM 的威胁和潜在的缓解

ARAIM 考虑的故障类型很多,没有统一,一般把这些故障类型分为单故障、多故障和宽故障。对多故障和宽故障的检测与排除需要大量的研究和探索。另外,完好性风险分配问题仍需深入研究。对 ARAIM 威胁的潜在缓解,分为 3 个部分进行缓解,也是急需解决的问题。

5 结束语

文中对 ARAIM 相关技术的研究现状进行了详细介绍,同时分析阐述了其可用性及其预测。目前对 ARAIM 各项参数的确定、多故障检测与排除以及算法模型的优化已成为多星座组合导航技术的研究热点,但目前仍存在较多问题需要研究,包括:完好性支持消息、故障类型的多样化等。针对用户端自主完好性监测的特点和应用,需进一步深入开展 ARAIM 研究,使其满足 LPV-200 的性能要求,为 ARAIM 架构的实施提供充足的理论基础。

参考文献:

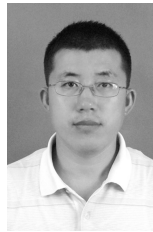
- [1] 秘金钟. GNSS 完备性监测理论与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2012: 1-8.
MI J Z. GNSS completeness monitoring theory and application[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2012: 1-8.
- [2] VIDARSSON L, PULLEN S, GREEN G, et al. Satellite autonomous integrity monitoring and its role in enhancing GPS user performance[C]//ION GPS 2001, September 11-14, 2001, Salt Lake City, UT, USA. [S.l.:s.n.], 2001: 690-702.
- [3] 刘海颖, 王惠南, 陈志明. 卫星导航原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 192-194.
LIU H Y, WANG H N, CHEN Z M. Principle and application of satellite navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 192-194.
- [4] 刘文祥. 卫星导航系统高精度处理与完好性监测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
LIU W X. Study on techniques of accuracy augmenting and integrity monitoring for satellite based navigation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [5] WALTER T, BLANCH J, ENGE P. Future architecture to provide aviation integrity[C]//The 2008 National Technical Meetings of ION, January 28-30, 2008, New York, USA. [S.l.:s.n.], 2008: 394-401.
- [6] GNSS evolutionary architecture study phase I-panel[R]. 2008.
- [7] GNSS evolutionary architecture study phase II report[R]. 2010.
- [8] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18-21.
LIU Y L, ZHANG H P, XU Y T, et al. Status and progress of global satellite navigation systems[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(1): 18-21.
- [9] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, et al. Advanced RAIM user algorithm description: integrity support message processing, fault detection, exclusion, and protection level calculation[C]//The 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, USA. [S.l.:s.n.], 2012: 2828-2849.
- [10] MARTINI I, RIPPL M, MEURER M. Integrity support message architecture design for advanced receiver autonomous integrity monitoring[C]//European Navigation Conference, April 23-25, 2013, Vienna, Austria. [S.l.:s.n.], 2013.
- [11] KHANAFSEH S, JOERGER M, PERVAN F C C B. ARAIM integrity support message parameter validation by online ground monitoring[J]. Journal of Navigation, 2015, 68(2): 327-337.
- [12] EL-MOWAFY A, YANG C. Limited sensitivity analysis of ARAIM availability for LPV-200 over Australia using real data[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(2): 659-670.
- [13] WALTER T, BLANCH J, ENGE P. Evaluation of signal in space error bounds to support aviation integrity[J]. Navigation, 2010, 57(2): 101-113.
- [14] JUAN B, TODD W, PER E, et al. Critical elements for a multi-constellation advanced RAIM[J]. Navigation, 2013, 60(1): 53-69.
- [15] WG-C, EU-U.S. Cooperation on satellite navigation working group C, ARAIM technical sub-group: interim report issue 1.0[R]. 2012.
- [16] WG-C, EU-U.S. Cooperation on satellite navigation working group C-ARAIM technical sub-group: milestone 2 report[R]. 2015.
- [17] WG-C, EU-U.S. Cooperation on satellite navigation working group C-ARAIM technical sub-group: milestone 3 report[R]. 2016.
- [18] RIFE J H. The effect of uncertain covariance on a chi-square integrity monitor[J]. Navigation, 2013, 60(4): 291-303.

- [19] BRENNER M. Integrated GPS/inertial fault detection availability[C]//ION GPS, September 12-15, 1995, Palm Springs, CA, USA. [S.l.:s.n.], 1995: 1949-1958.
- [20] PERVAN B S, PULLEN S P, CHRISTIE J R. A multiple hypothesis approach to satellite navigation integrity[J]. Navigation, 1998, 45(1): 61-71.
- [21] LEE Y C. Two new RAIM methods based on the optimally weighted average solution (OWAS) concept[J]. Navigation, 2007, 54(4): 333-345.
- [22] HWANG P Y, BROWN R G. RAIM-FDE revisited: a new breakthrough in availability performance with NIOAIM(novel integrity-optimized RAIM)[J]. Navigation, 2006, 53(1): 41-51.
- [23] JOERGER M, PERVAN B. Solution separation and chi-squared ARAIM for fault detection and exclusion[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS 2014), May 5-8, 2014, Monterey, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014: 294-307.
- [24] 徐肖豪, 杨传森, 刘瑞华. GNSS 用户端自主完好性监测研究综述[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 451-463.
XU X H, YANG C S, LIU R H. Review and prospect of GNSS receiver autonomous integrity monitoring[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 451-463.
- [25] BLANCH J, ENE A, WALTER T, et al. An optimized multiple hypothesis RAIM algorithm for vertical guidance[J]. Proceedings of the Ion GNSS Fort, 2007: 2924-2933.
- [26] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. RAIM with optimal integrity and continuity allocations under multiple failures[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2010, 46(3): 1235-1247.
- [27] ENE A. Utilization of modernized global navigation satellite systems for aircraft-based navigation integrity[J]. ProQuest LLC, 2009, 70(3): 1776-1790.
- [28] 贺汉平, 吴云. ARAIM 算法多故障检测排除性能初步分析[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(6): 21-24.
HE H P, WU Y. Preliminary analysis of ARAIM algorithm multi-fault detection and elimination performance[J]. Mapping Geographic Information, 2017, 42(6): 21-24.
- [29] 张亚彬, 王利, 范丽红, 等. 组合粗差探测的 MHSS ARAIM 算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(1): 9-17.
ZHANG Y B, WANG L, FAN L H, et al. MHSS ARAIM algorithm for combined gross error detection[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2019, 48(1): 9-17.
- [30] SIDA Z, ZHIPENG W, ZHEN G. Research on exact thresholds for ARAIM MHSS fault monitoring, mathematical problems in engineering[Z]. 2019.
- [31] 杨晓义, 李锐, 黄智刚. BDS 星座的完好性保护级改进算法[J]. 导航定位学报, 2016, 4(2): 67-70.
YANG X Y, LI R, HUANG Z G. BDS constellation integrity protection level improved algorithm[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(2): 67-70.
- [32] ANGUS J E. RAIM with multiple faults[J]. Navigation, 2006, 53(4): 249-257.
- [33] BROWN R G. Solution of the two-failure GPS RAIM problem under worst-case bias conditions: parity space approach[J]. Navigation, 1997, 44(4): 425-431.
- [34] LEE Y C, BRAFF R, FERNOW J P, et al. GPS and Galileo with RAIM or WAAS for vertically guided approaches[C]//The 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS2005), September 13-16, 2005, Salt Lake City, UT, USA. [S.l.:s.n.], 2005: 1801-1825.
- [35] HWANG P, BROWN R G. From RAIM to NIOAIM-a new integrity approach to integrated multi-GNSS systems[J]. Inside GNSS, 2008, 3(4): 24-33.
- [36] LEE Y C. New advanced RAIM with improved availability for detecting constellation-wide faults, using two independent constellations[J]. Journal of the Institute of Navigation, 2013, 60(1): 71-83.
- [37] CHOI M, BLANCH J. Demonstrations of multi-constellation advanced RAIM for vertical guidance using GPS and GLONASS signals[C]//The 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), September 20-23, 2011, Portland, OR, USA. [S.l.:s.n.], 2011: 3227-3234.
- [38] 肖伟. GNSS 多系统自主完好性监测与信号质量评估技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
XIAO W. GNSS multi-constellation autonomous integrity monitoring and signal quality evaluation technology research[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [39] MUHAMMAD B, CIANCA E, SALONICO A M. Multi GNSS advanced RAIM: an availability analysis [C]//2014 IEEE Metrology for Aerospace, May 29-30, 2014, Benevento, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2014: 28-33.
- [40] BLANCH J, PHELTS R E, CHEN Y H. Initial results of a multi-constellation ARAIM airborne proto-type[C]//The Institute of Navigation (ION) International Technical Meeting, January 30-February 2, 2017, Anaheim, CA, USA. [S.l.:s.n.], 2017: 184-209.
- [41] GE Y S, WANG Z P, ZHU Y B. Reduced ARAIM monitoring subset method based on satellites in different orbital planes[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1443-1456.
- [42] MENG Q, LIU J Y, ZENG Q H, et al. Improved ARAIM fault modes determination scheme based on feedback structure with probability accumulation[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 5-11.
- [43] 张倩倩. 单星座 ARAIM 算法可用性分析及其在垂直精密进近中的应用[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(5): 456-459.
ZHANG Q Q. The availability analysis of single constellation ARAIM algorithm and its application in LPV-250[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(5): 456-459.
- [44] 张倩倩. 新型 RAIM 算法的研究及其应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015.
ZHANG Q Q. Research on new algorithms and applications of receiver autonomous integrity monitoring[D]. Zhengzhou: PLA



- Information Engineering University, 2015.
- [45] 荆帅, 战兴群, 苏先礼. ARAIM 算法应用于 LPV-200 服务[J]. 测控技术, 2012, 31(11): 75-79.
- JING S, ZHAN X Q, SU X L. Exploration of advanced RAIM to provide LPV-200 service[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(11): 75-79.
- [46] 肖伟, 刘文祥, 徐博, 等. LPV-200 下中国区域内 ARAIM 可用性评估[J]. 全球定位系统, 2014, 39(5): 32-36.
- XIAO W, LIU W X, XU B, et al. The current ARAIM availability in China according to LPV-200[J]. GNSS World of China, 2014, 39(5): 32-36.
- [47] 李彬, 吴云, 李征航. GNSS 接收机自主完备性监测高级算法的有效性验证[J]. 武汉大学学报, 2015, 40(6): 800-809.
- LI B, WU Y, LI Z H. Validation of the GNSS advanced ARAIM algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 800-809.
- [48] 吕宗平, 倪育德, 陈君, 等. 基于 MHSS 算法的 ARAIM 完好性和可用性预测[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(6): 1-8.
- LV Z P, NI Y D, CHEN J, et al. Prediction of ARAIM integrity and availability based on MHSS algorithm[J]. Chinese Space Science and Technology, 2016, 36(6): 1-8.
- [49] KROPP V, EISSFELLER B, BERZ G. Optimized MHSS ARAIM user algorithms: assumptions, protection level calculation and availability analysis[C]//Position, Location and Navigation Symposium-PLANS 2014, May 5-8, 2014, Portland, OR, USA. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [50] 郑学恩, 许承东, 范国超, 等. 应用遗传算法的多星座保护级别优化方法[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1046-1050.
- ZHENG X E, XU C D, FAN G C, et al. Multi-constellation protection level optimization method using genetic algorithm[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10): 1046-1050.
- [51] MENG Q, LIU J T, ZENG Q H, et al. Impact of one satellite outage on ARAIM depleted constellation configurations[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(4): 967-977.
- [52] 吕小平. RAIM 可用性预测系统研究[J]. 中国民用航空, 2010(3): 33-36.
- LV X P. Study on RAIM availability predictive system[J]. China Civil Aviation, 2010(3): 33-36.
- [53] 朱金芳, 倪育德, 王凯, 等. ARAIM 可用性预测系统的设计与实现[J]. 计算机工程, 2013, 39(8): 121-130.
- ZHU J F, NI Y D, WANG K, et al. Design and implementation of ARAIM availability prediction system[J]. Computer Engineering, 2013, 39(8): 121-130.
- [54] 李磊. 基于 GPS/北斗的 RAIM 预测系统研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- LI L. Study and implementation on GPS/BDS RAIM forecast system[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [55] 袁重阳. 基于列车定位应用的北斗导航系统 RAIM 技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- YUAN C Y. Research on RAIM of BDS based on the application of train positioning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [56] 任锴, 杨力. GPS 和 GLONASS 系统下 RAIM 空洞预报[J]. 全球定位系统, 2009, 34(4): 25-28.
- REN K, YANG L. RAIM void prediction under GPS and GLONASS systems[J]. Global Positioning System, 2009, 34(4): 25-28.
- [57] 王鹏飞. 中国民航预测系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- WANG P F. Study of the RAIM prediction program in civil aviation of China[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.

[作者简介]



王尔申(1980—), 男, 博士, 沈阳航空航天大学教授, 主要研究方向为卫星导航、信号处理。

杨迪(1993—), 女, 沈阳航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为接收机自主完好性监测技术。

宏晨(1974—), 男, 博士, 北京联合大学机器人学院讲师, 主要研究方向为机器学习、计算机视觉。

曲萍萍(1979—), 女, 博士, 沈阳航空航天大学电子信息工程学院讲师, 主要研究方向为卫星导航、智能控制。

蓝晓宇(1986—), 女, 博士, 沈阳航空航天大学电子信息工程学院副教授, 主要研究方向为信号处理、无线传感网。

王传云(1984—), 男, 博士, 沈阳航空航天大学计算机学院副教授, 主要研究方向为模式识别、物联网。

庞涛(1976—), 女, 博士, 沈阳航空航天大学电子信息工程学院讲师, 主要研究方向为智能优化算法、机器人控制。