

基于 UAV 的 ARAIM 测试技术研究

王士壮, 战兴群, 张 欣, 梅 浩

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要: 为了提升 GNSS 在航空应用中的服务性能, 目前国内外进行了多项关于高级接收机自主完好性监测 (ARAIM) 算法的研究, 这些研究主要基于算法仿真, 但相对缺乏基于实际场景和实际测量数据的测试性研究。研究基于无人机 (UAV) 的 ARAIM 测试技术, 以测试在实际场景下 ARAIM 的可用性, 同时验证 ARAIM 仿真算法的正确性。根据 ARAIM 的理论研究成果, 改写机载端 ARAIM 用户算法; 搭建 8 旋翼无人机 ARAIM 测试硬件平台并进行了典型场景测试; 分析测试数据并说明测试中 ARAIM 的可用性情况。结果表明搭建的基于 UAV 的 ARAIM 测试平台可以完成测试任务, 飞行测试验证了 BDS + GPS ARAIM 的机载可用性。

关键词: ARAIM; 北斗; GPS; UAV; 飞行测试

中图分类号: TP319; P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2018)05-0024-05

Research on Airborne ARAIM Algorithm Testing Technology Based on UAV Platform

WANG Shi-zhuang, ZHAN Xing-qun, ZHANG Xin, MEI Hao

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Advanced receiver autonomous integrity monitoring (ARAIM) algorithm is used to improve GNSS service quality in aviation applications. Previous researches mostly focused on the Matlab simulation of the algorithm. This research is about ARAIM algorithm testing based on real flight data. An airborne ARAIM algorithm testing technology based on UAV platform was studied, and the feasibility of airborne ARAIM algorithm was verified. The UAV platform was built to carry the receiver and airborne computer. The real-time airborne software was based on the ARAIM algorithm and the raw measurements were obtained from ComNav M300-G Mini GNSS receiver. The results show that the ARAIM test platform can accommodate the test of the airborne ARAIM algorithm in various scenarios, and the flight test verifies the availability of BDS + GPS airborne ARAIM algorithm.

Key words: ARAIM; BDS; GPS; UAV; flight test

完好性定义为卫星导航系统不能使用及时向用户发出告警的能力。高级接收机自主完好性监测 (Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring, ARAIM) 算法是常规接收机自主完好性监测 (RAIM) 算法的拓展和升级, 传统 RAIM 算法考虑水平定位误差保护限值 (Horizontal Protection Level, HPL), 仅支持 LNAV 引导, 而 ARAIM 算法相较于 RAIM 算法而言, 还会考虑垂直定位误差保护限值 (Vertical Protection Level, VPL) 的要求, 能够满足更严格的完好性要求, 对

于航空用户而言, 双频多星座 ARAIM 将能够满足 LPV-200 进近对完好性的要求^[1]。

近年来, 国内外开展了很多关于 ARAIM 算法的研究, Blanch J 等人研究了基于解分离的 ARAIM 算法, 并基于此算法利用计算机仿真分析了 GPS/Galileo 的 ARAIM 全球可用性^[2-3]。国内学者也研究了 LPV-200 下中国区域内双频多星座 ARAIM 的可用性^[4-5]。但是这些研究都是通过计算机仿真进行的, 而缺少利用实际飞行场景和实测数据的测试^[6]。Rippl M 等人使用民航飞机进行了 ARAIM 机载性能的测试^[7], 但其成本较昂贵。Chen Y H 等人开始考虑使用无人机平台采集实测数据进行机载 ARAIM 性能的测试^[8]。考虑到实际飞行过程中由于环境因素和飞行器运动而对

收稿日期: 2017-06-16

作者简介: 王士壮 (1996—), 男, 山东泰安人, 本科生, 主要从事卫星导航以及 GNSS 完好性相关的研究。

Journal Electronic Publishing House and China Electronic Publishing House

测量数据带来的影响,计算机仿真与静态测试都不足以说明 ARAIM 算法的机载可用性。为了更准确地研究实际场景下机载 ARAIM 算法的可用性,本文进行了基于 UAV 的 ARAIM 算法测试技术研究,论证了基于 UAV 的 ARAIM 测试技术的可行性,搭建了机载 ARAIM 软件和 ARAIM 测试硬件平台,实现了 ARAIM 算法的机载测试。该测试技术不仅能够检验计算机仿真结果的可靠性,可以用于测试民航飞机低空垂直进近阶段的 ARAIM 可用性,未来也能用于 INS + ARAIM 等算法的测试,具有重要的实践和学术意义。

1 基于 UAV 的 ARAIM 测试技术可行性

国内外对于 ARAIM 算法的理论研究多采用计算机仿真进行,而对 ARAIM 算法的实际测试采用静态测试或者民航飞机实际飞行进行。计算机仿真研究或者静态测试由于忽略了环境因素、飞行器运动等因素对测量数据的影响而不具有足够的说服力和可靠性;基于民航飞机实际飞行过程的测试,虽然测试结果可靠性高、说服力强,但其测试成本昂贵。介于计算机仿真

与民航测试之间的基于 UAV 的测试,采用真实接收机和真实的飞行过程,基本接近机载 ARAIM 算法的真实工作情况。民航飞机与多旋翼无人机在相关方面的对比如表 1 所示。

天线的性能、天线的姿态、飞行平台的动态特性以及信号环境会对接收机的数据采集有明显影响,而接收机的数据采集会直接影响 ARAIM 算法的结果。飞行平台的型号、气动特性、飞行速度、高度等对接收机的工作无显著影响,所以虽然小型无人机系统在气动特性、飞行速度、飞行剖面上与民航飞机存在较大的差异,但在飞行姿态、动态特性、飞行时所经历的信号环境等影响 ARAIM 结果的关键因素上,UAV 和民航飞机在起飞降落阶段可以保持较高的相似度,因此预期可以用于各种型号民航飞机(尤其是具有类似“低小慢”飞行特征的活塞式及涡桨动力飞机)起降阶段 ARAIM 算法性能的初步测试,同理可以应用于 LPV-200 标准下的 ARAIM 性能测试。同时,UAV 平台还可以进行机动飞行,因此也可用于军机机载 ARAIM 性能的测试。

表 1 无人机与民航飞机的对比

| 对比项 | 内容 | 相似程度 |
|-----|---|------------------------|
| 相同点 | 均采用真实的多频点、多星座接收机,天线性能相似 | 很相似(考虑到民航未来装备多频多模接收机) |
| | 飞行时的卫星导航信号环境相似 | 基本相似,仅多路径特征可能不同 |
| | 多旋翼飞行时的姿态与民航飞机的各飞行过程相似 | 一定程度(接近平飞状态) |
| | 多旋翼飞行时的动态特性可与民航飞机的动态过程相似 | 一定程度(接近平飞状态) |
| | ARAIM 算法均可具有实时性,数据更新频率相同,算法工作过程相同 | 很相似 |
| 不同点 | 气动特性:无人机采用的多旋翼结构,民航飞机采用固定翼、旋翼机等气动结构,气动特性不同 | 差别较大 |
| | 飞行速度:无人机飞行速度慢于民航飞机 | 差别较大 |
| | 飞行剖面:民航飞机飞行距离长,范围大,高度高,而无人机飞行范围小,距离短,高度低,飞行剖面不同 | 仅在起飞降落段距地面高度值类似,其余差别较大 |

相对于较昂贵和较复杂的民航飞机测试,基于无人机的 ARAIM 测试硬件平台搭建仅需 3 万元人民币左右,包含飞行平台、机载电脑、接收机、天线等各部件,且试验场地选取方便,试验要求相对低于民航飞机飞行测试。

使用 UAV 平台代替各种型号的民航飞机平台进行 ARAIM 算法性能的测试,在 ARAIM 机载可用性的研究以及含有 ARAIM 算法的机载接收机设计中发挥重要作用。该测试技术基本满足 ARAIM 算法性能测试的要求,同时成本较低,测试方便,能够有效降低研究与测试的费用。

2 ARAIM 用户算法

2.1 LPV-200 性能要求

具有垂直引导满足航向指标——LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance) 的进近是一种新的

垂直进近方式,LPV-200 能将飞机以规定的导航性能精度——RNP (Required Navigation Performance) 引导至距地面 200 ft (60 m) 的高度,LPV-200 定义的完好性要求主要包括:

- ① 在 99.9999% 的时间内,保护水平小于告警阈值。即 $VPL < VAL$ 且 $HPL < HAL$ 。在 LPV-200 中, $VAL = 35\text{ m}$, $HAL = 40\text{ m}$ 。这个要求是 LPV-200 的完好性要求中安全等级最高的,也是最为重要的要求。
- ② 在 99.999% 的时间内,有效监视门限 (Effective Monitoring Threshold, EMT) 小于 15 m。
- ③ 在 99.99999% 的时间内,无故障定位精度优于 10 m;
- ④ 在 95% 的时间内,定位精度优于 4 m。

2.2 完好性支持信息和 ARAIM 算法流程

完好性支持信息 (Integrity Support Message, ISM) 是地面参考接收机收集并发送给航空用户用于计算保

护水平信息的一部分,它主要给出的是卫星导航系统的具有极高可靠性的安全判定信息。ISM 中主要包括以下内容:

- ① 每颗卫星的先验故障概率($P_{sat,i}$);
- ② 每个星座的先验故障概率($P_{const,j}$);
- ③ 用户测距精度/空间信号精度(User Range Accuracy/Signal In Space Accuracy,URA/SISA);
- ④ 用户测距误差/空间信号误差(User Range Error/Signal In Space Error,URE/SISE);
- ⑤ 完好性偏差($b_{nom,i}$)。

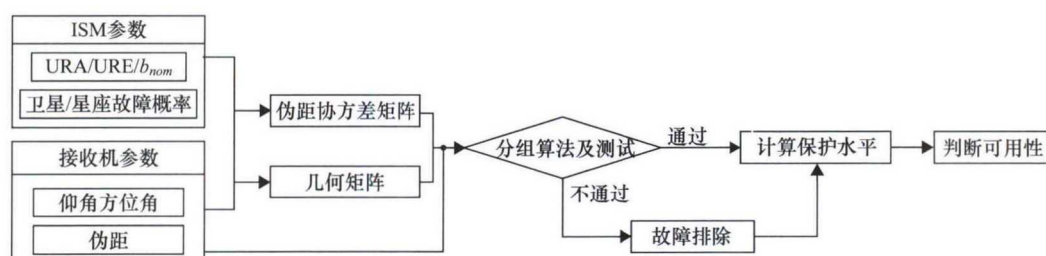


图1 ARAIM 算法流程

3 基于 UAV 的 ARAIM 测试平台设计与实现

3.1 ARAIM 机载软件的实现

ARAIM 机载软件的主要功能为基于接收机输出

的原始数据和 ISM 提供的完好性支持数据,计算当前的 VPL、HPL、EMT 及 accuracy (95%) 值,并判断当前的 ARAIM 可用性。ARAIM 机载软件的实现框图如图 2 所示,主要由输入部分、ARAIM 算法部分、结果输出部分三部分组成。

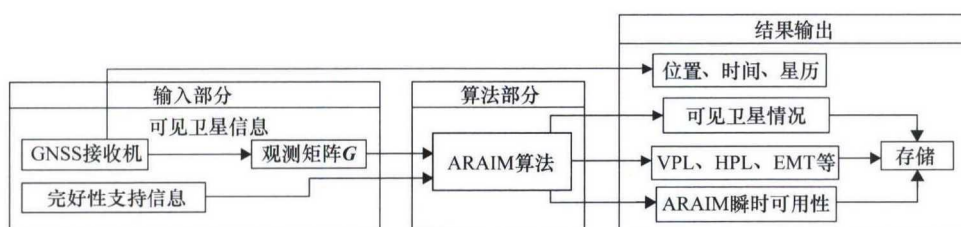


图2 ARAIM 机载软件实现框图

在图2中,采集和获取来自接收机的卫星测量数据及 ISM 提供的信息,实时计算出观测矩阵,并输入到 ARAIM 算法中,ARAIM 算法将计算得到的 VPL、HPL 等数据连同接收机输出的星历、位置、时间等信息写入文件,用于测试完成后的性能评估和数据分析。由于 ARAIM 机载软件采用实测数据和实际飞行场景,并具有实时数据采集与计算的功能,因此 ARAIM 机载软件相较于仿真而言更能够反映未来 ARAIM 算法用于接收机自主完好性监测的真实工作情况。

3.2 UAV 测试平台硬件系统的实现

UAV 测试平台硬件系统主要由数据采集子系统、动力系统、飞行控制系统、电气系统及机载计算单元 5 部分组成。硬件系统结构示意图如图 3 所示。

在 UAV 硬件平台中,动力系统、飞行控制系统及电气系统共同构成飞行平台,作为搭载机载计算单元

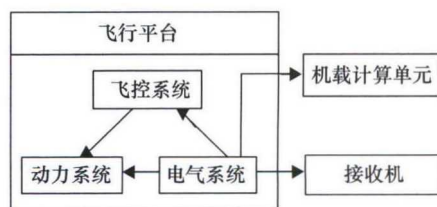


图3 硬件系统结构示意图

和 GNSS 接收机的载体,本文采用大疆 S1000 + 飞行平台;GNSS 接收机作为数据采集前端,实时采集卫星测量数据,输入到机载计算单元,本文采用司南 M300-G Mini 接收机;机载计算单元作为 ARAIM 算法的载体,负责运算和结果的存储。经预估,以通用处理器为主体的微小型计算机完全可以胜任计算及人机交互任务,因此本文选用 Intel NUC 作为机载计算单元。图 4 给出了组装完成的无人机测试平台实物图片。



图4 硬件系统实物图

4 实验结果及分析

4.1 实验过程设计

为测试 ARAIM 的机载性能,特别是测试在 LPV-

200 下 ARAIM 的机载可用性,制定航线时应包含 UAV 的进近过程;为测试 VPL、HPL 随空间位置的变化情况,航线也应包含水平运动的过程。考虑到民航飞机在垂直进近时基本无大的姿态变化这一特点,UAV 在飞行过程中也应尽量保持水平,防止因姿态变化而引起的测量数据的变化。基于以上考虑,飞行航线图采用图 5 所示的方案。

在图 5 所示航线中,最高相对海拔(相对地面的高度)大约为 50 m,飞行时间约 5 min,其中垂直进近的飞行时间约 2 min,水平飞行时间约 3 min。另外静态测试时间约 10 min。另外,飞行时要求天气晴朗,基本无风,前者为保证对流层延迟处于正常范围且有利于飞行,后者为保证飞行过程中的姿态平稳。

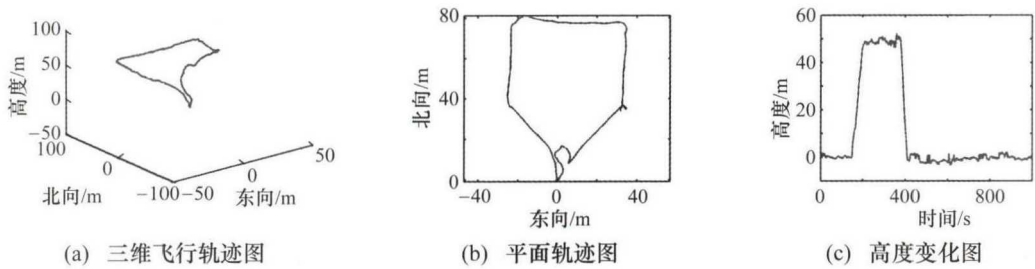


图5 飞行航线图示(ENU 坐标系)

4.2 参数设置

机载 ARAIM 软件中的卫星、星座参数设置如表 2 所示。

表 2 ARAIM 机载软件参数设置

| 软件参数名称 | 设置内容 | 软件参数名称 | 设置内容 |
|--------|----------------------------------|----------------|------------------------|
| 星座 | GPS/BDS | URA | GPS:1m BDS:2.4m |
| 频率 | L1/L5, B1/B2 | URE | $\frac{2}{3}URA$ |
| 卫星故障概率 | GPS: 10^{-5} BDS: 10^{-5} | 名义偏差 b_{nom} | GPS:0.75m BDS:0.75m |
| 星座故障概率 | GPS: 10^{-4} BDS: 10^{-4} | | |

接收机参数按文献[3]中参数设置。另外,ARAIM 算法中采用的用户误差模型取文献[3]中的误差模型,即式(1)~式(4)所示:

$$\sigma_{n,user} = \sqrt{\frac{f_1^4 + f_2^4}{(f_1^2 - f_2^2)^2}} \sqrt{(\sigma_{MP})^2 + (\sigma_{Noise})^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{MP}(\theta) = 0.13[m] + 0.53[m] \exp(-\frac{\theta}{10}) \quad (2)$$

$$\sigma_{Noise}(\theta) = 0.15[m] + 0.43[m] \exp(-\frac{\theta}{6.9}) \quad (3)$$

$$\sigma_{tropo}(\theta) = 0.12[m] \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + [\sin(\theta)]^2}} \quad (4)$$

式中,θ 为卫星仰角(°)。

4.3 实验结果

基于 4.1 节所述航线,在上海某地区进行基于

UAV 的 GPS/BDS 双频多星座 ARAIM 性能测试。图 6 给出了飞行过程中 GPS/BDS 各星座可见卫星数变化,图 7 给出了 VPL、HPL 值随时间的变化情况,图 8 给出了 DOP(Dilution of Precision)值随时间的变化情况,图 9 给出了测试时间内 ARAIM 可用性情况。为反映 ARAIM 的可用性裕度及不同指标对 ARAIM 可用性的影响,采用归一化处理,垂直保护裕度(Vertical Protection Margin,VPM)、水平保护裕度(Horizontal Protection Margin,HPM)、有效监视门限裕度(Effective Monitoring Threshold Margin,EMTM)、精度裕度(Accuracy Margin,ACCM)值的计算公式如下:

$$VPM = \frac{VAL - VPL}{VAL} \times 100\% \quad (5)$$

$$HPM = \frac{HAL - HPL}{HAL} \times 100\% \quad (6)$$

$$EMTM = \frac{15 - EMT}{15} \times 100\% \quad (7)$$

$$ACCM = \frac{1.87 - \sigma_{acc}}{1.87} \times 100\% \quad (8)$$

式(7)中 15 为 EMT 的阈值,式(8)中 1.87 为垂直位置精度标准差 σ_{acc} 的阈值。

从图 6 中可以看出,在测试时间内,可见卫星数目变化不大,基本在 18 颗左右,其中北斗卫星约占 9 颗, GPS 卫星约占 9 颗。在图 7 中,可以看到在约 270 s 之前的时间内,VPL 处于高值,尤其是在最初几秒内甚至达到 60 左右。但 VPL 值出现了两次明显的向下

跳跃,分别对应可见卫星数在 10 s 和 270 s 处的两次增加,可见,可见卫星数的增加对于降低 VPL 值具有极为重要的作用。270 s 之后,VPL 和 HPL 值分别降低至 VAL 和 HAL 值之下,值均为 30 左右。

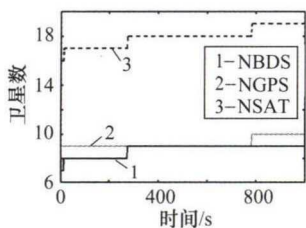


图6 可见卫星数随时间变化情况

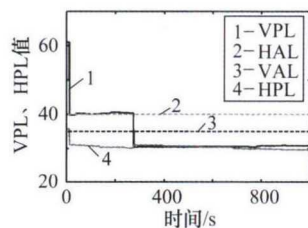


图7 VPL,HPL 值随时间变化情况

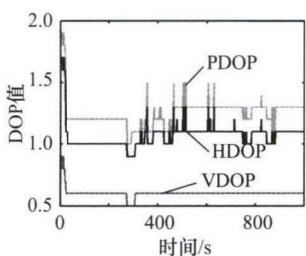


图8 DOP 值随时间变化情况

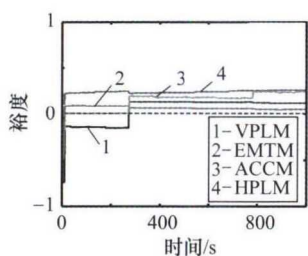


图9 ARAIM 在 LPV-200 中的可用性情况

在图 8 中,展示了 DOP 值在测试时间内的变化情况,可以看出当卫星数增加时,DOP 值也会出现一个下降,而且,在一定程度上,DOP 值的变化也能反映出 VPL 和 HPL 值的变化情况。

图 9 反映了整个测试时间内 ARAIM 的可用性情况。从图中可以看出,在 270 s 左右,各项指标均有一个明显的跳跃,说明可见卫星数目的变化对 ARAIM 算法中的各项指标均有显著作用。在 270 s 之后,各项指标裕度均为正值,这意味着在此之后 ARAIM 可用。图 9 同样反映出,VPL 值是决定 ARAIM 是否可用于 LPV-200 的最关键的因素,当 VPL 值低于 VAL 值时,其他指标值一般也低于其相应阈值。

在测试时间内,也可以发现无人机的运动并没有对整个的测试过程带来明显的影响,整套测试平台工作正常,数据更新频率为 1 Hz,满足实际需求。同时,该测试也验证了 GPS + BDS 双频双星座情况下 ARAIM 的机载可用性,在上海地区,GPS + BDS 可见卫星数约 18 颗,大部分时间内(仅指测试时间内) ARAIM 可用于 LPV-200。另外,当北斗系统的卫星数目增加,URA 值降低后,ARAIM 在 LPV-200 中的可用性情况将得到进一步提升。

5 结束语

本文研究了一种基于 UAV 的 ARAIM 测试技术,设计并实现了 UAV 机载 ARAIM 用户软件,设计并搭

建了 UAV 测试平台,并在上海某地区进行了实飞测试。分析结果表明,该测试平台所得结果与计算机仿真结果相似但略有不同,基于 UAV 飞行实测数据的测试更接近于真实飞行情况。基于本文所提出的基于 UAV 的 ARAIM 测试技术,可以实现对 ARAIM 算法仿真研究的验证。可以验证故障识别与排除算法,也可以测试 ARAIM 在 LPV-200 下的机载可用性,下一步将实现 INS + ARAIM 算法的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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]// Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). 2012:2828-2849.
- [3] WGC ARAIM TSG. EU-U. S. Cooperation on Satellite Navigation, Working Group C-ARAIM Technical Subgroup Milestone 3 Report [R]. 2016.
- [4] 葛奕彬,王志鹏. BDS/GPS 组合的 H-ARAIM PBN 和 ADS-B 应用可用性评估[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(6):1254-1263.
- [5] Zhang X, Mei H, Tu J X, et al. ARAIM with BDS phase 3-assumption, user algorithm and results [C]// Proceedings of the ION 2017 Pacific PNT Meeting. 2017:36-46.
- [6] 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.
- [7] Rippl M, Martini I, Belabbas B, et al. ARAIM operational performance tested in flight [C]// Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. 2014:601-615.
- [8] Chen Y H, Perkins A, Lo S, et al. Demonstrating ARAIM on UAS using software defined radio and civilian signal GPS L1/L2C and GLONASS G1/G2 [C]// Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. 2016:231-238.

□

免费在线阅读电子版期刊
全方位检索测控技术文章

请登录 www.mct.com.cn
或 ckjs.ijournals.cn (测控在线)

投稿、查稿

浏览国内外测控动态

发布企业资讯 了解行业产品