

GPS/BDS ARAIM 算法性能测试

王剑¹, 董开琳¹, 刘瑞华^{1,2}

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;
2. 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300)

摘要: 针对高级接收机自主完好性监视 (ARAIM) 算法的适航性, 基于实测数据, 对 GPS/BDS ARAIM 算法故障检测与排除的性能和可用性预测的性能进行了测试。结果表明: GPS/BDS 组合系统下 ARAIM 算法故障检测与排除的性能良好, 对大于 100 m 的阶跃型故障, 正确检测与排除的效率达到 99.9%; GPS/BDS 组合系统下 ARAIM 的单点可用性良好, 完全满足 LPV-200 的完好性性能要求, 中国范围内的可用性覆盖率达到 99%, 世界范围内的可用性覆盖率达到 90% 以上。由此可知, GPS/BDS ARAIM 算法性能良好。

关键词: GPS/BDS 组合系统; 完好性; ARAIM 算法; 故障检测与排除; 可用性预测

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2020)03-0001-07

0 引言

完好性作为评估导航卫星系统的四个核心指标之一, 受到了民航领域的高度重视, 是保证民航安全运行的重要条件。为了积极响应《国务院关于促进民航业发展的若干意见》所指出的: 推动北斗卫星导航系统 (BDS) 在民航领域的应用^[1], 必须对系统的完好性进行监视, 通过确保系统的完好性来保证飞机飞行的安全。高级接收机自主完好性监视 (ARAIM) 是接收机自主完好性监视 (RAIM) 的进一步提高和拓展, 最多可以支持将飞机以规定的所需导航性能 (RNP) 引导至距地面 200 英尺 (60 m) 的高度, 即 LPV-200 (Localizer Performance with Vertical guidance-200 feet)^[2]。

随着 BDS 不断向着标准化迈进, 对 BDS 接收机 ARAIM 算法的性能进行测试评估, 检验其是否满足适航标准的要求就成了一个急需解决的问题。当前, 国内外对这方面的研究绝大多数是基于全球定位系统 (GPS) 和伽利略 (Galileo) 组合系统进行的, 很少涉及我国自主研发的 BDS。因此, 为了弥补 ARAIM 在 BDS 下仿真研究的空白, 为了给 ARAIM 在民航领域应用做一定的铺垫, 本文对 ARAIM 算法故障检测与排除的性能和可用性预测的性能进行了测试。

1 ARAIM 算法的原理和性能测试

如图 1 所示, ARAIM 的整体架构由卫星部分、地面部分、用户端三部分组成。卫星部分包括多个全球卫星导航系统 (GNSS) 的在轨卫星; 地面部分包括地面监测站、数据处理中心以及数据播发站, 用于确定 GNSS 的完好性支持信息并采用一定的方式播发给用户; 用户端用于接收导航数据和来自地面播发的信息, 并实施完好性监视算法^[3]。

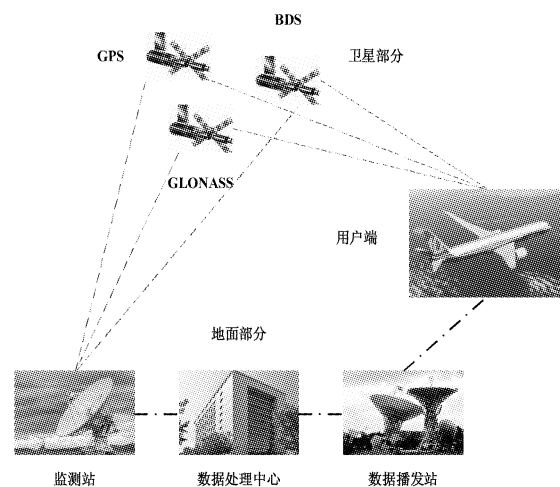


图 1 ARAIM 的整体架构

收稿日期: 2020-03-23

通信作者: 董开琳 E-mail:18382318259@163.com

1.1 基于多假设分组解的 ARAIM 算法

基于多假设分组解(MHSS)的 ARAIM 算法是通过加权最小二乘法来得到定位解的,同时也是无故障全集的位置估计^[4]. 如果经 ARAIM 算法故障检测之后未发现故障,则无故障全集的位置估计就是最终输出的定位结果;如果发现了故障,则需要隔离故障卫星,然后利用剩余的健康卫星重新计算位置估计.

在基于 MHSS 的 ARIAM 算法中,需要在东北天三个方向上进行阈值检测,只要有一次检测没有通过,则意味着存在未通过检测的定位解所对应的故障模式,需要对故障进行排除,而对应的故障子集是没有故障的,所以也就成为排除故障后的无故障全集. 从本质上讲,针对每个故障子集的阈值检测实质上是针对连续性风险的监测,连续性风险概率首先被平均分配到每个故障模式的子集当中,然后又被平均分配到定位解的东北天三个方向上^[5].

如式(1)所示,当东北天三个方向上的检验统计量小于检测阈值时,说明没有故障.

$$|\mathbf{x}_q^{(k)} - \mathbf{x}_q^{(0)}| \leq T_{k,q}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为用户状态矢量; $q=1,2,3$ 代表东北天三个方向上的分量; $T_{k,q}$ 为检测阈值,定义为

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{N_{\text{faultmodes}}} p(|\Delta_k| > T_k | H_0) = P_{FA}, \\ \Delta_k \sim N(0, \sigma_k^2). \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δ_k 为检验统计量; H_0 表示无故障场景; P_{FA} 为连续性风险概率. 将连续性风险概率平均分配到每个子集定位解的分量上,可得:

$$\begin{cases} T_{k,q} = K_{fa,q} \sigma_{ss,q}^{(k)}, \\ K_{fa,1} = K_{fa,2} = Q^{-1} \left(\frac{P_{FA_HOR}}{4N_{\text{faultmodes}}} \right), \\ K_{fa,3} = Q^{-1} \left(\frac{P_{FA_VERT}}{2N_{\text{faultmodes}}} \right). \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_{fa,q}$ 为标准正态分布的阈值; $N_{\text{faultmodes}}$ 为故障模式的数量; P_{FA_HOR} 和 P_{FA_VERT} 分别为连续性风险概率在水平和垂直方向上的分量.

1.2 垂直保护级的计算

在计算保护级(PL)时需要满足危险误导信息概率(PHMI)的指标要求,PHMI 规定了定位误差超过告警限值但系统未及时向用户发出告警的概率^[6],即首先要满足以下不等式:

$$P_{\text{nofault}}^{(1)} + P_{\text{nofault}}^{(2)} + \sum_{k=1}^{N_{\text{faultmodes}}} P_{\text{fault},k}^{(1)} +$$

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{faultmodes}}} P_{\text{fault},k}^{(2)} \leq P_{\text{HMI}(\text{new})}, \quad (4)$$

式中, $P_{\text{HMI}(\text{new})}$ 为基于未监测风险概率更新过的 PHMI,计算公式为

$$P_{\text{HMI}(\text{new})} = P_{\text{HMI}} - P_{\text{not,monitored}}, \quad (5)$$

式中, $P_{\text{not,monitored}}$ 为未监测风险概率.

式(4) 的左边由四部分构成,分别对应无故障全集和各故障子集的概率密度函数超出保护级的概率,这四部分的表达式分别为

$$\begin{cases} P_{\text{nofault}}^{(1)} = P(\epsilon_0 < -P_L | H_0) P_{\text{nofault}}, \\ P_{\text{nofault}}^{(2)} = P(\epsilon_0 > P_L | H_0) P_{\text{nofault}}, \\ P_{\text{fault},k}^{(1)} = P((\epsilon_0 < -P_L) \cap (|\epsilon_0 - \epsilon_k| < T_k) | H_k) P_{\text{fault},k}, \\ P_{\text{fault},k}^{(2)} = P((\epsilon_0 > P_L) \cap (|\epsilon_0 - \epsilon_k| < T_k) | H_k) P_{\text{fault},k}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{nofault} 和 $P_{\text{fault},k}$ 为无故障全集和第 k 个子集的故障先验概率; P_L 为保护级; ϵ_0 为检验统计量.

经过化简最终可得:

$$\begin{aligned} & P_{\text{nofault}}^{(1)} + P_{\text{nofault}}^{(2)} + \sum_{k=1}^{N_{\text{faultmodes}}} P_{\text{fault},k}^{(1)} + \\ & \sum_{k=1}^{N_{\text{faultmodes}}} P_{\text{fault},k}^{(2)} < 2P(\epsilon_0 > P_L | H_0) + \\ & \sum_{k=1}^{N_{\text{faultmodes}}} P(P_L < T_k + \epsilon_k | H_k) P_{\text{fault},k}. \end{aligned} \quad (7)$$

垂直保护级(VPL)的计算公式为

$$\begin{aligned} & 2Q\left(\frac{V_{\text{PL}} - b_3^{(0)}}{\sigma_3^{(0)}}\right) + \\ & \sum_{k=1}^{N_{\text{faults}}} P_{\text{fault},k} Q\left(\frac{V_{\text{PL}} - T_{k,3} - b_3^{(k)}}{\sigma_3^{(k)}}\right) \\ & = P_{\text{HMI}(\text{new}), \text{VERT}}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: V_{PL} 为垂直保护级; $P_{\text{HMI}(\text{new}), \text{VERT}}$ 为更新过的 PHMI在垂直方向上的分量; $T_{k,3}$ 、 $b_3^{(k)}$ 、 $\sigma_3^{(k)}$ 分别为第 k 个子集的连续性检测阈值、最大偏差、位置估计的方差在垂直方向上的分量. Q 函数为标准正太分布的右尾函数.

1.3 ARAIM 算法的性能测试

1.3.1 故障检测与排除性能测试

ARAIM 算法故障检测与排除性能测试的流程如图 2 所示.

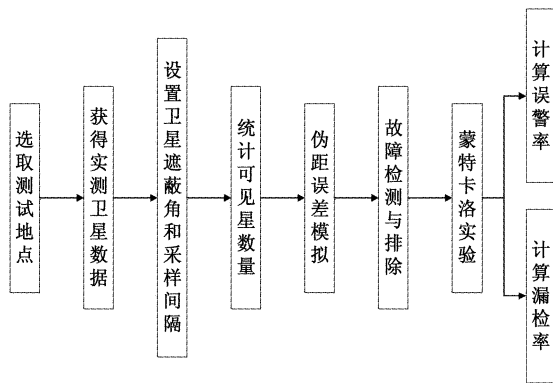


图2 ARAIM 算法故障检测与排除性能测试流程

1) 选取测试地点

本文选择在亚太范围内进行 ARAIM 算法故障检测与排除性能测试,因此,在亚太范围内选取有代表性和说服力的 12 个测试地点,如图 3 所示。

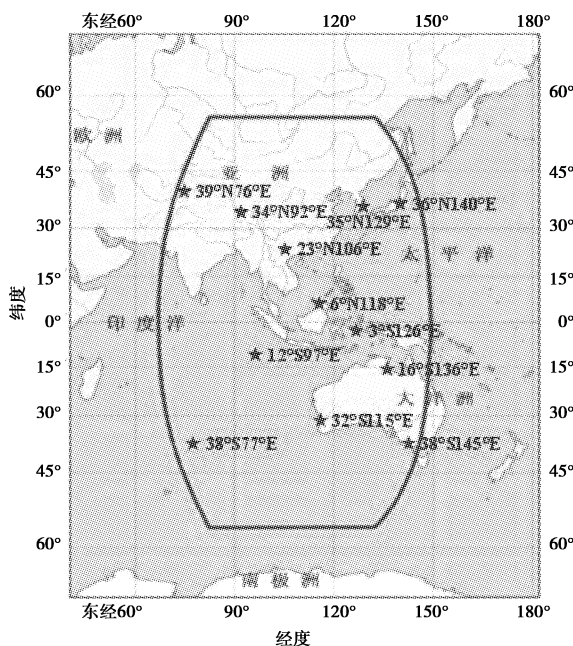


图3 测试地点位置分布

2) 获取实测卫星数据

实测卫星数据是指 GPS 和 BDS 历书数据,它们主要用于解算卫星位置和用户位置。本文所使用的 GPS 历书来自 <http://celestrak.com> 网站上下载的最新历书数据,BDS 历书来自中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心的最新历书数据。

3) 统计可见星数量

在故障检测与排除之前,首先需要根据不同的

测试要求设置卫星遮蔽角和采样间隔,并对可见星的数量进行统计和分析。根据导航定位原理可知:对于单星座来说,4 颗卫星即可进行导航定位,5 颗卫星可以进行故障检测,6 颗卫星才能进行故障排除;而对于双星座来说,由于包含两个时钟误差,所以至少需要 5 颗卫星才能进行导航定位。因此,当可见星数量达到 7 颗时才能进行 ARAIM 算法故障检测与排除。

4) 伪距误差模拟

在计算出卫星与接收机之间的伪距后,在该伪距上添加误差便可以模拟卫星发生故障。通常情况下,卫星的故障类型有以下三种:阶跃型故障、斜坡型故障、脉冲型故障。本文主要模拟阶跃型故障对 ARAIM 算法故障检测与排除的性能进行测试。

当前,并没有官方标准对 ARAIM 算法故障检测与排除给出确切的要求,但是,在技术标准文件 RTCA DO-208 中明确给出了 RAIM 算法故障检测与排除的要求。具体规定为:要求机载接收机 RAIM 算法能够在 10 s 内检测出大于 1 000 m 的阶跃型故障^[7]。因此,仿照 RAIM 算法故障检测与排除的要求,建议 ARAIM 算法故障检测与排除的要求如下:要求机载接收机 ARAIM 算法能够在 6 s 内检测出大于 100 m 的阶跃型故障。

5) 故障检测与排除

在步骤 1) 中所选的测试地点进行 ARAIM 算法故障检测与排除的性能测试。测试结果显示:当导航系统的卫星存在大于 100 m 的阶跃型故障时,在 6 s 内用户的定位误差明显变大,随着 ARAIM 算法故障检测与排除,重新计算得到的定位误差回归正常,这说明故障卫星已经被正确检测与排除。

6) 蒙特卡洛实验

对步骤 5) 中的测试过程做蒙特卡洛实验,实验结果表明:ARAIM 算法对大于 100 m 的阶跃型故障进行检测与排除时,1 000 次蒙特卡洛实验中,误警次数和漏检次数均未超过 1 次,误警率和漏检率不超过 0.1%,正确检测与排除的概率超过 99.9%。

1.3.2 可用性预测性能测试

在飞机起飞前,需要对 ARAIM 的可用性进行预测,确定其是否满足 LPV-200 的完好性性能要求,如果不能满足,则放弃卫星导航而使用陆基导航^[8]。RAIM 的可用性预测主要考虑水平保护级(HPL)的要求,而 ARAIM 的可用性预测不仅要

考虑 HPL 的要求,更重要的是考虑 VPL 的要求。

本文对 ARAIM 可用性预测性能的测试分为两个部分,分别是单点 ARAIM 可用性预测和区域 ARAIM 可用性预测。

ARAIM 的可用性是针对 LPV-200 的完好性性能要求进行的,基于现有的相关标准,LPV-200 的完好性性能要求如下^[9]:

1) VPL 小于垂直告警门限 (VAL); HPL 小于水平告警门限 (HAL)。

2) 有效监视门限 (EMT) 小于等于 15 m。

3) 垂直导航系统误差 ($VNSE$) 在 95% 的时间小于 4 m。

4) 告警时间小于 6 s。

但是,ARAIM 有一个明显的优点就是不用满足告警时间小于 6 s 的要求。因为 ARAIM 算法没有将全部的计算都放在地面,而是分配到航空设备当中,因此,不要求地面在 6 s 内给用户告警^[10]。

由此可知,当计算结果满足以下三个条件时,说明 ARAIM 是可用的:

1) $VPL < VAL = 35$ m; $HPL < HAL = 40$ m;

2) $EMT = \max\{D_k\} \leq 15$ m;

3) 95% 的时间里 $VNSE < 4$ m;

其中:条件 1) 是判断 ARAIM 是否可用的主要条件,条件 2) 和 3) 不被强制。因此,在实际仿真和应用时,可以通过最小化 VPL 和 HPL 来最大化满足 ARAIM 的可用性。

单点 ARAIM 可用性预测的结果表明:在 24 h 的预测时长内, VPL 始终小于 35 m, 完全满足 LPV-200 的完好性性能要求, 可用性良好。区域 ARAIM 可用性预测的结果表明:在 24 h 的预测时长内, 中国范围内的 VPL 始终小于 35 m, 完全满足 LPV-200 的完好性性能要求, 可用性覆盖率达到 99%; 世界范围内有部分区域的 VPL 大于 35 m, 不能完全满足 LPV-200 的完好性性能要求, 但是可用性覆盖率达到 90% 以上。

2 测试结果

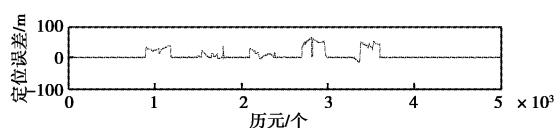
2.1 故障检测与排除性能测试结果

选取喀什市 (39°N , 76°E) 为测试地点, 利用 2019 年 8 月 26 日 8 时的历书数据, 对始终存在于观测时长内的 2 号卫星添加阶跃型故障, 设置卫星遮蔽角为 7.5° , 采样间隔为 1 min, 持续 5 000 min, 统计得到可见星数量始终大于 7 颗, 添加阶跃型故障的具体伪距误差模拟如表 1 所示。

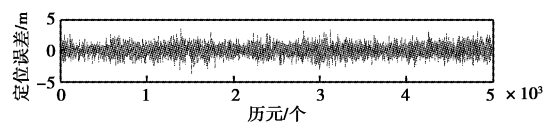
测试结果如图 4~7 所示。

表 1 伪距误差模拟设置

历元	偏差值/m
900—1200	120
1500—1800	150
2100—2400	180
2700—3000	180
3300—3600	200
其它时刻	0

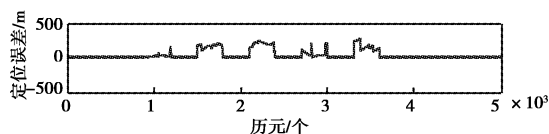


(a) 排除前

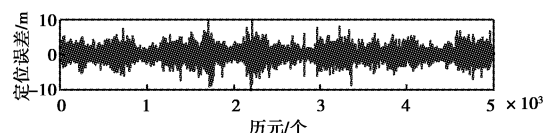


(b) 排除后

图 4 故障排除前后 x 方向的定位误差

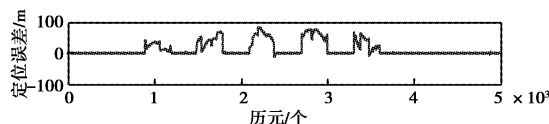


(a) 排除前

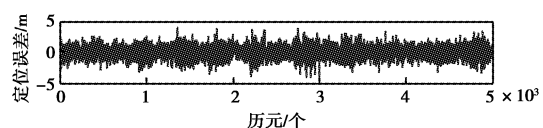


(b) 排除后

图 5 故障排除前后 y 方向的定位误差



(a) 排除前



(b) 排除后

图 6 故障排除前后 z 方向的定位误差

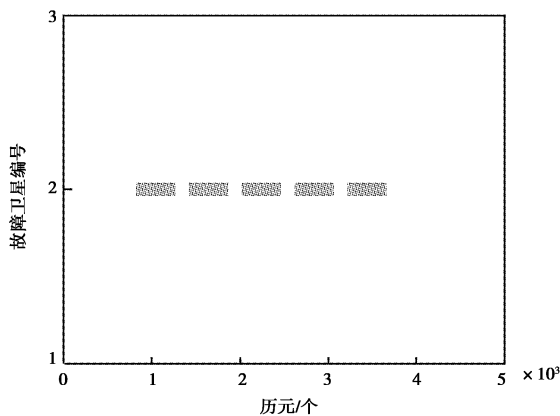


图 7 故障检测与排除的结果

如图 4~6 所示,排除故障卫星后 x 方向和 z 方向的定位误差都在 5 m 以内, y 方向的定位误差在 10 m 以内. 图 7 统计了 5 000 个历元内故障检测与排除的结果,可以看出 ARAIM 算法准确检测并排除了存在故障的卫星.

在其他测试地点也进行同样的测试,并做蒙特卡洛实验. 经统计计算,各个测试地点的误警率和漏检率均不超过 0.1%,正确检测与排除的概率超过 99.9%.

2.2 可用性预测性能测试结果

2.2.1 单点 ARAIM 可用性预测

利用 2019 年 9 月 12 日 8 时的历书数据,设置卫星遮蔽角为 7.5° ,ISM 参数值如表 2 所示,对 2019 年 9 月 12 日 8 时—2019 年 9 月 13 日 8 时这 24 h 内东京市 ARAIM 的可用性进行预测,采样间隔设为 5 min.

表 2 ISM 参数值

参数	取值
用户测距精度 URA	1.0 m
用户测距误差 URE	0.5 URA
连续性偏差 b_{norm}	0.1 m
完好性偏差 b_{max}	0.75 m
卫星故障概率	10^{-5}
星座故障概率	10^{-4}

测试结果如图 8 所示,东京市在 24 h 内的 VPL 始终小于 35 m,完全满足 LPV-200 的完好性性能要求.

在其他的测试地点也进行同样的测试,结果均满足 LPV-200 的完好性性能要求.

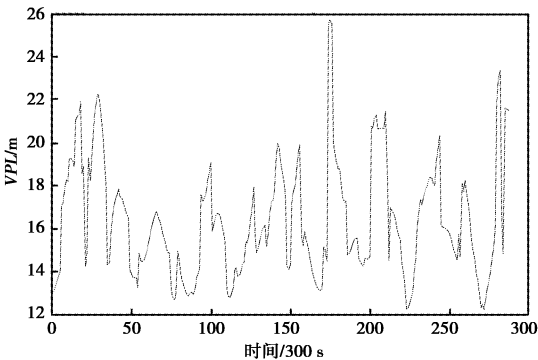


图 8 东京市 24 h 内 VPL 的变化情况

2.2.2 区域 ARAIM 可用性预测

在中国范围内设置经纬度间隔为 $1^\circ \times 1^\circ$,利用 2019 年 8 月 26 日 8 时的历书数据,设置卫星遮蔽角为 7.5° ,ISM 参数值如表 2 所示,对 2019 年 8 月 26 日 8 时—2019 年 8 月 27 日 8 时这 24 h 内中国范围内 ARAIM 的可用性进行预测,采样间隔设为 5 min.

该测试过程共有 288 个采样点,图中的 100% 表示以这 288 个采样点中计算所得的最大值作为作图依据,以此来保证仿真结果的可靠性.

测试结果如图 9~10 所示.

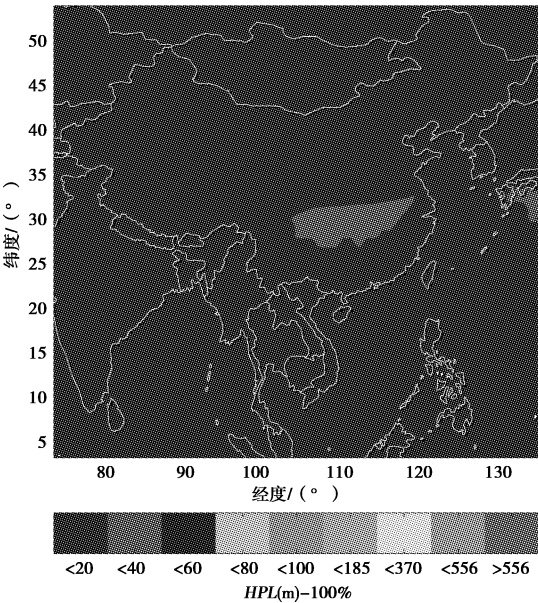


图 9 中国范围内 HPL 的分布

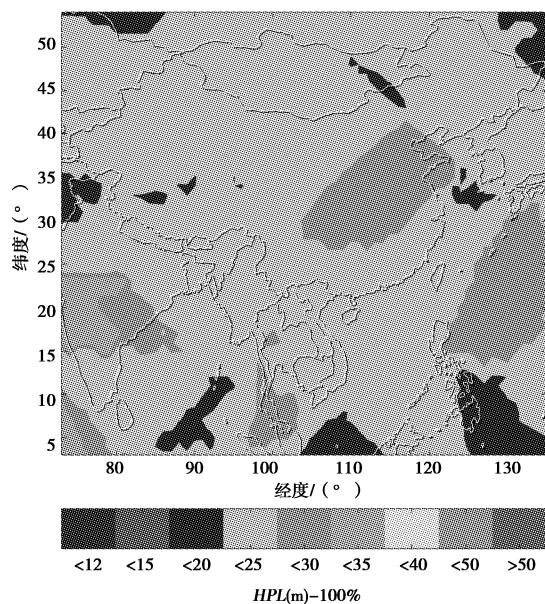


图 10 中国范围内 VPL 的分布

在世界范围内设置经纬度间隔为 $5^\circ \times 5^\circ$, 利用 2019 年 12 月 7 日 8 时的历书数据, 设置卫星遮蔽角为 7.5° , 用户测距精度为 1.4 m, 其它 ISM 参数值的大小如表 2 所示, 对 2019 年 12 月 7 日 8 时—2019 年 12 月 8 日 8 时这 24 h 内世界范围内 ARAIM 的可用性进行预测, 采样间隔设为 5 min.

该测试过程共有 288 个采样点, 图中的 100% 表示以这 288 个采样点中计算所得的最大值作为作图依据, 以此来保证仿真结果的可靠性.

测试结果如图 11~12 所示.

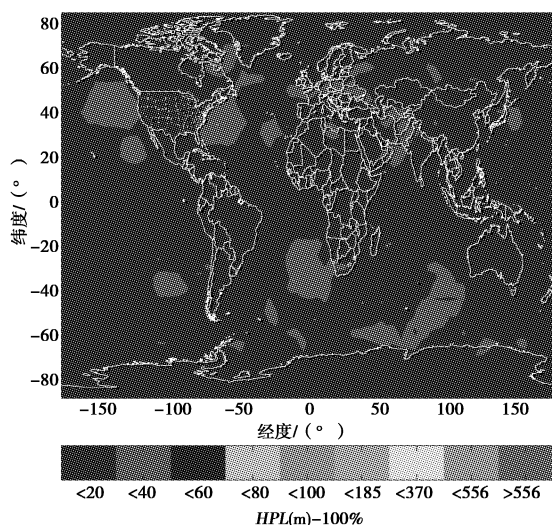


图 11 世界范围内 HPL 的分布

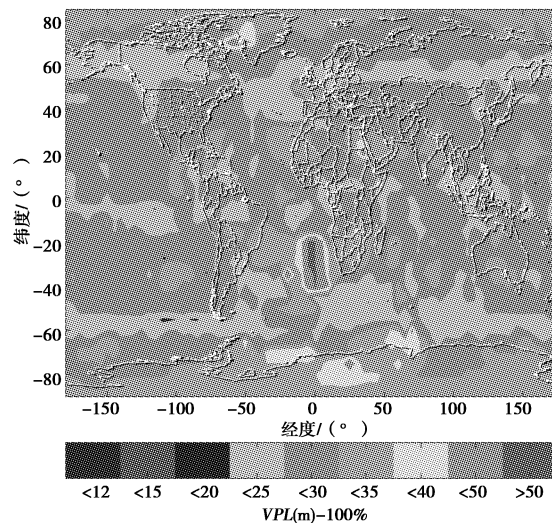


图 12 世界范围内 VPL 的分布

由图 9~12 可以看出, 在 24 h 的测试时长内, 中国范围内和世界范围内的 HPL 均小于 40 m; 中国范围内的 VPL 均小于 35 m, 世界范围内有部分区域的 VPL 大于 35 m.

之所以在世界范围内有部分区域的 VPL 未能满足 LPV-200 的完好性性能要求, 主要原因有以下两点:

1) 一般情况下, 国内外对 ARAIM 算法进行仿真研究时, 将卫星遮蔽角设为 5° , 但是本文为了得到更加严谨的卫星几何构型, 使测试结果更具有说服力, 将卫星遮蔽角设为 7.5° .

2) 对世界范围内 ARAIM 的可用性进行预测时, 设置的用户测距精度是 1.4 m, 比在中国范围内大 0.4 m.

3 结束语

本文基于实测数据, 采用合理的测试方法对 ARAIM 算法的性能进行了测试, 为 ARAIM 适航标准的建立给出了一定的参考.

通过对 ARAIM 算法故障检测与排除性能和可用性预测性能的测试研究, 可以得到以下结论: ARAIM 算法正确检测与排除故障的概率达到 99.9%; ARAIM 算法在世界上 90% 以上的区域内是可用的. 从而验证了 ARAIM 算法的性能非常良好.

综上所述, ARAIM 算法在经过更多更标准的适航性能测试后, 完全可以应用于民航领域, 为民航提供高标准的完好性监视服务.

参考文献

- [1] 国务院. 国务院关于促进民航业发展的若干意见[J]. 综合运输, 2012(8): 84-86.
- [2] 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, 2017, 37(1): 41-48.
- [3] 宋恺. GNSS 自主完好性检测算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [4] 朱金芳. 高级接收机自主完好性监视研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2013.
- [5] 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, 2012:2828-2849.
- [6] 倪育德, 朱金芳. 高级接收机自主完好性监视的可用性预测[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(4): 32-37.
- [7] RTCA SC-159. DO-208 minimum operational performance standards for airborne supplemental navigation equipment using global positioning system[S]. Washington DC: RTCA Inc, 1991.
- [8] 王士壮, 战兴群, 张欣, 等. 基于 UAV 的 ARAIM 测试技术研究[J]. 测控技术, 2018, 37(5): 24-28.
- [9] 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.
- [10] 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): 121-125, 130.

作者简介

王剑 (1961—), 男, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为通信与信息系统.

董开琳 (1995—), 男, 硕士, 研究方向为卫星导航.

刘瑞华 (1965—), 男, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为卫星导航、惯性导航和组合导航.

GPS/BDS ARAIM algorithm performance test

WANG Jian¹, DONG Kailin¹, LIU Ruihua^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Automation, CAUC, Tianjin 300300, China;

2. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Technology, CAAC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the measured data, this paper aims at the airworthiness of the Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring (ARAIM) algorithm, and tests the performance of GPS/BDS ARAIM algorithm fault detection and elimination and the performance of availability prediction. The test results are as follows. The performance of ARAIM algorithm fault detection and elimination is good under the GPS/BDS combined system, and the efficiency of correct detection and elimination of step faults greater than 100m reaches 99.9%. In single point, the availability of ARAIM under the GPS/BDS combined system is good and fully meets the integrity performance requirements of the LPV-200. The availability coverage in China reaches 99%. The availability coverage in the world reaches more than 90%. So, the performance of GPS/BDS ARAIM algorithm is good.

Keywords: GPS/BDS combined system; integrity; ARAIM algorithm; fault detection and elimination; availability prediction