

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.03.010

基于选星预处理的改进随机抽样一致性 RAIM 方法

田斌鹏¹, 方乐², 曾文轩^{1,2}, 张且且², 赖际舟², 殷皓天²

(1. 航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089;

2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 多星座导航能够增加可视卫星数量, 改善卫星几何构型, 已成为卫星导航定位领域发展的重要方向之一。多星座导航接收机自主完好性监测(RAIM)技术对提高导航系统的完好性具有重要作用。面向多星座导航的完好性监测需求, 分析了传统随机抽样一致性(RANSAC)故障检测方法不足, 提出了一种基于最小样本集选星预处理的改进 RANSAC RAIM 算法。该算法基于最大四面体法和 GDOP 值贡献度的选星方法选取具有较好构型的卫星构成卫星子集, 取代了传统 RANSAC RAIM 方法通过遍历构成卫星子集, 可有效避免卫星子集中存在较差卫星几何构型的情况, 减少子集数量, 提升故障检测的准确率。静态和动态仿真实验表明, 改进的 RANSAC RAIM 算法在检测效率和检测准确率等方面明显优于传统方法。

关键词: 随机抽样一致性(RANSAC); 接收机自主完好性监测(RAIM); 选星预处理; 最大四面体积分法

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)03-0101-08

Improved random sampling consensus RAIM algorithm based on satellite selection preprocessing

TIAN Binpeng¹, FANG Le², ZENG Wenxuan^{1,2}, ZHANG Qieqie², LAI Jizhou², YIN Haotian²

(1. The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Multi-constellation navigation, which can increase the number of visible satellites and improve satellite geometry, has become one of the important directions for the development of satellite navigation and positioning. The receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) technology for multi-constellation navigation receivers plays an important role in improving the integrity of navigation systems. The paper focuses on the integrity monitoring requirements of multi-constellation navigation, analyzes the shortcomings of traditional random sample consensus (RANSAC) fault detection methods, and proposes an improved RANSAC RAIM algorithm based on minimum sample set satellite selection preprocessing. Based on the maximum tetrahedral volume method and the satellite selection method of GDOP value contribution, this algorithm selects four satellites with good satellite configurations to form a satellite subset, replacing the traditional RANSAC RAIM method by traversing the combination of four satellites to form a satellite subset. It can ef-

收稿日期: 2023-11-22; 修订日期: 2024-01-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62203216); 江苏省自然科学基金(BK20220886); 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U2233215)

作者简介: 田斌鹏(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事航电任务总体设计方面的研究。

通信作者: 张且且(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事卫星导航技术方面的研究。

fectively avoid the situation of poor satellite geometry in the satellite subset, reduce the number of subsets, and improve the precision of fault detection. Static and dynamic simulation experiments have shown that the improved RANSAC RAIM algorithm is significantly superior to traditional methods in terms of detection efficiency and precision.

Key words: Random sample consensus (RANSAC); Receiver autonomous integrity monitoring (RAIM); Satellite selection preprocessing; Maximum tetrahedral volume method

0 引言

随着四大全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的逐步建成和发展,多星座融合导航已成为当前的主要发展方向。目前多频多星座 GNSS 接收机可以接收来自各个系统的上百颗导航卫星,相较于单系统具有更好的卫星几何构型,并且定位精度和可用性得到改善^[1]。然而,可见卫星数量的增加,也会增大多颗卫星同时发生故障的概率。接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)是一种用于卫星故障检测和识别的技术,用户接收机基于冗余卫星观测信息,检测和排除可能导致不准确位置估计的故障卫星^[2]。传统的 RAIM 检测算法主要有伪距比较法、最小二乘残差法及奇偶空间矢量法等^[3],这些算法基于单故障检测理论,主要适用于单颗卫星故障情况,而在面对多星故障时会出现较大的漏检率和误警率。

针对多星故障的情况,研究人员在传统 RAIM 方法的基础上提出了各种改进的方法,主要有最优奇偶矢量法、最大解分离法以及多假设解分离法(multiple hypothesis solution separation, MHSS)等^[4-6]。除此之外,文献[7]提出了一种基于相关距离的 RAIM 算法对粗差进行探测,不仅可以提高响应速度,还能对多个粗差进行探测。文献[8]提出了一种基于几何可分性检测的多星座多故障卫星 RAIM 算法。文献[9]提出了一种基于稳健 MM 估计的鲁棒卡尔曼滤波 RAIM 算法,能较好地解决双星故障时的检测与识别问题。

1981年,Fischler等^[10]为解决视觉领域模型参数的优化求解问题,提出了随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)算法。该算法假设正常数据符合某一模型参数分布,首先构造一个目标函数,然后从一组包含外点和内点的观测数据集中,在保证内点率的情况下通过迭代的方式估计数学模型,最后使用所有估计内点重新计算和估计函数的参数。RANSAC算法的提出为多个异常值的检测提出了一

种新的解决思路。2008年,Schroth等^[11]将 RANSAC 算法应用于 GNSS 的完好性监测中。然而,常规的 RANSAC RAIM 算法由于使用穷举法确定样本子集,存在运算量较大的问题,同时在样本子集的选取上由于未考虑卫星构型对定位结果的影响,存在较大的漏检和误检的概率。针对 RANSAC RAIM 算法存在较大运算量的问题,文献[12]提出了一种基于预检验 RANSAC 算法的 RAIM 算法,通过预先筛选剔除对完好性监测无意义的卫星组合,从而提高整体算法的实时性;文献[13]提出了一种改进 RANSAC 的多故障 RAIM 算法,通过对传统 RANSAC 的评价函数进行改进优化,并综合考虑各种影响定位精度的因素,从而提升多星故障下的检验效率和准确率。总之,RANSAC RAIM 算法虽然在多个异常点的检测和识别中存在一定的优势,但针对多星故障的检测还存在检测效率低、误检率及漏检率高的问题。

本文针对 RANSAC 故障检测方法开展研究,分析传统基于 RANSAC 的 RAIM 算法的不足,从样本子集选取与处理的角度,提出了一种基于最小样本集预处理的改进 RANSAC RAIM 算法。该算法基于最大四面体体积法和 GDOP 值贡献度的选星方法选取具有较好卫星构型的卫星构成卫星子集,取代了传统 RANSAC RAIM 方法通过遍历获取卫星子集,可有效避免卫星子集中存在较差卫星几何构型的情况,减少子集数量,提升故障检测的准确率。

1 传统的 RANSAC RAIM 算法

基于 RANSAC 的 RAIM 算法,从当前历元的所有观测量中随机选取一个最小样本集 S_k ($k = 1, \dots, M$),其中 $M = C_n^{N+3}$ 表示最小样本集的个数, N 为星座数, n 为卫星数量,对于单星座 $M = C_n^4$ 。基于选取的最小样本集,采用最小二乘法求解接收机的位置

$$\hat{\mathbf{x}}_k = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{y}_k \quad (1)$$

式中, \mathbf{y}_k 和 \mathbf{H}_k 为子集 S_k 对应的观测向量和观测矩阵。

利用当前子集 S_k 解算的接收机位置 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 计算剩余 $n - 4$ 颗卫星的预测残差

$$\mathbf{v}_i = \hat{y}_i - y_i = h_i \hat{x}_k - y_i, \quad (y_i \notin S_k \mid i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

式中, \hat{y}_i 为第 i 个伪距观测量的预测值; h_i 为对应的测量系数。采用预测残差矢量 \mathbf{v}_i 构造渐进无偏一致性检验统计量 $\text{Var}(\mathbf{v})$, 通过与设定的残差阈值门限进行比较, 初步判断选定的最小集合 S_k 是“内点”还是“外点”

$$\begin{cases} \text{outlier:} & \text{Var}(\mathbf{v}) \geq T_v \\ \text{inliers:} & \text{Var}(\mathbf{v}) < T_v \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{var}(\mathbf{v}) = \sqrt{\frac{1}{n - N - 3} \sum_{i=1}^{n-N-3} (\mathbf{v}_i)^2} \quad (4)$$

式中, T_v 为检验阈值, 可基于卡方检验理论确定该阈值。

遍历所有的最小样本集合 $S_k (k = 1, \dots, M)$, 根据“外点”集合里各颗卫星出现的频次判断卫星是否为故障星

$$\begin{cases} \text{fault:} & f_i \geq T_{sv} \\ \text{health:} & f_i < T_{sv} \end{cases} \quad (5)$$

式中, f_i 表示“外点”集合里第 i 颗卫星出现的频次; T_{sv} 为内外点判别阈值, 具体设置参见文献[1]。将所有检测出来有故障的卫星构成卫星“外点”子集 S_{out} 。

可以看出, 在多星座完好性监测中, 传统的 RANSAC RAIM 算法由于使用穷举法进行完好性监测, 从 n 颗可见星中随机选择 $N + 3$ 颗卫星进行组合, 排列组合为 C_n^{N+3} 。在多模多频系统中, 可见卫星数目增大, 导致算法运算量呈几何级数增大。此外, 在选取 $N + 3$ 颗卫星进行解算时, 卫星相互重叠导致 GDOP 值大大增加, 在子集中卫星无故障的情况下也会出现较大的定位误差, 从而影响伪距残差。因此, 将伪距测量正常但几何构型差的子集纳入外点中, 影响最终定位结果的准确度。

2 改进的 RANSAC RAIM 算法

针对传统算法在多星座卫星完好性监测中应用的不足, 本文提出了一种基于选星预处理的 RANSAC RAIM 算法。改进的方法通过选取具有较好卫星构型的 $(N + 3)$ 颗卫星构成卫星子集, 取代了传统方法通过遍历 4 颗卫星的组合构成卫星子

集, 可以避免卫星子集中存在较差卫星构型的情况, 不仅可以减少子集数量, 降低计算量, 还可以提升故障检测的准确度, 降低误检率。

改进的方法基于一定选星策略对子集中 $(N + 3)$ 颗卫星进行选取, 主要为减少遍历次数, 快速筛选出无故障和有故障嫌疑的卫星, 以便在利用无故障卫星解算后进行残差检测, 进而识别出故障卫星。为了防止由于单个卫星故障影响多个子集定位解算结果的情况发生, 在选星过程中考虑将每颗卫星只选入到一个子集中。此外, 由于各卫星间故障事件相互独立, 同时发生超过 3 颗卫星故障的概率很小, 因此不对 3 星以上的故障进行检测。根据以上原则, 改进的 RANSAC RAIM 算法各子集选星的具体策略可概况如下:

首先根据当前历元的卫星数量确定最小样本子集的数量 $M = \lfloor n / (N + 3) \rfloor$, 式中符号“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”表示向下取整, 然后基于最大四面体积法确定各子集 $S_k (k = 1, \dots, M)$ 的 4 颗卫星。最大四面体积法是基于 GDOP 值与用户和卫星之间的单位矢量所构成的四面体体积之间成反比关系^[6], 即

$$G_{\text{DOP}} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}} = \frac{\sqrt{\text{tr}(\text{adj}(\mathbf{H}^T \mathbf{H}))}}{\det |\mathbf{H}|} \quad (6)$$

式中, $\text{adj}(\cdot)$ 表示矩阵的伴随矩阵; $\det |\mathbf{H}|$ 表示计算矩阵 \mathbf{H} 的行列式, 代表四面体的体积。基于式(6)可得到最小样本子集的选星策略, 即选出可以围成最大四面体的 4 颗卫星, 以保证最小样本子集卫星集合是所有 4 颗卫星集合中 GDOP 值最小的。重复上述过程依次从剩余的卫星中选取 4 颗卫星构成最小样本子集。

在确定 M 个样本子集 S_k 的 4 颗卫星后, 根据谢尔曼-莫里森公式计算剩余卫星对各子集星座 GDOP 值的贡献度, 即

$$\Delta G_{\text{DOP}, i}^2 = \text{tr} \left(\frac{\mathbf{G}_{s-1} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^T \mathbf{G}_{s-1}}{1 + \mathbf{h}_i \mathbf{G}_{s-1} \mathbf{h}_i^T} \right) \quad (7)$$

式中, s 表示样本子集 S_k 在加入卫星 i 后的卫星总数; $\Delta G_{\text{DOP}, i}^2$ 可看作是卫星 i 对样本子集 S_k 的 GDOP 值的贡献度。 $\mathbf{G}_{s-1} = (\mathbf{H}_{s-1}^T \mathbf{H}_{s-1})^{-1}$, \mathbf{h}_i 代表增加的卫星所对应的测量矩阵的行向量。根据剩余卫星的贡献度大小, 依次为各子集添加 GDOP 值贡献度最高的卫星, 直至所有可见星都加入子集。

在确定最小样本子集后, 对各子集 S_k 的卫星进行定位解算, 得到估计位置 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 。根据式(2)计算除各子集 S_k 外剩余卫星的伪距预测残差 v_i , 得到残差

矢量 v , 并根据式(3)判断 S_k 是“外点”还是“内点”。

若判断子集 S_k 为内点, 则故障星应在除去内点集合的剩余卫星中, 根据式(8)判断故障嫌疑卫星

$$\begin{cases} \text{fault:} & v_i \geq T_r \\ \text{health:} & v_i < T_r \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_r 为检验门限, 可根据正态分布假设检验进行确定。对于伪距预测残差大于 T_r 的卫星认为是故障卫星进行剔除。

需要说明的是, 改进的 RANSAC RAIM 算法需要满足最小卫星数量条件。对于单卫星系统, 如果要实现 3 颗故障星的检测和识别, 则需要至少 4 个样本子集确保有 1 个样本子集中不包含故障卫星, 即至少需要 16 颗卫星, 对于双卫星系统则至少需要 20 颗卫星。改进的 RANSAC RAIM 算法的流程如图 1 所示。

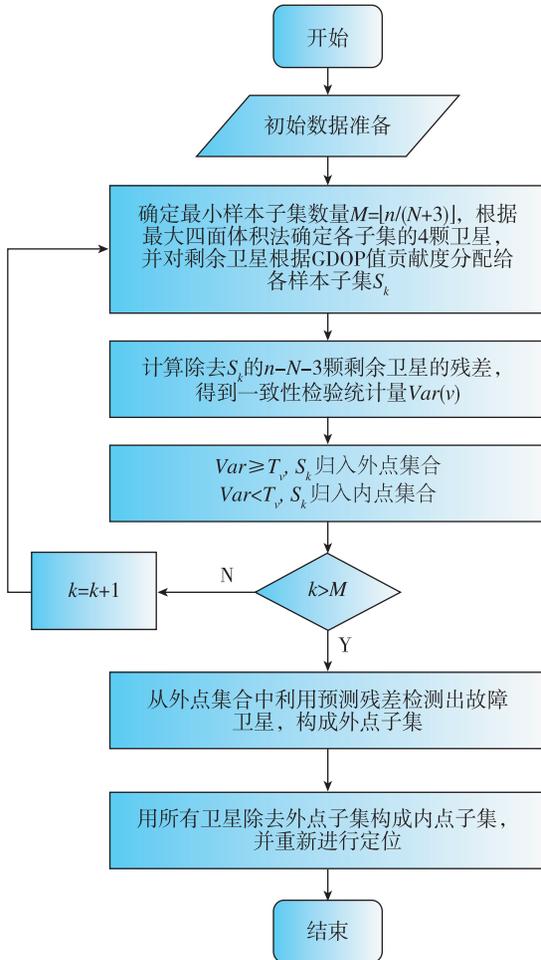


图 1 改进的 RANSAC RAIM 算法流程图

Fig. 1 Improved RANSAC RAIM algorithm flow chart

从图 1 可以看出, 与传统的 RANSAC RAIM 算法相比, 改进的算法通过对最小样本子集进行选

星预处理, 进而构造具有较好卫星构型的最小样本子集, 其数量仅为 $M = \lfloor n/(N+4) \rfloor$, 与传统方法最小样本子集数量 C_n^{N+3} 相比, 能够显著减少最小样本子集的数量, 提高运算效率。

3 实验测试与分析

3.1 基于静态实测数据的性能测试

为验证本文提出的基于改进的 RANSAC RAIM 算法在多导航星座下对单卫星故障和多卫星故障的检出效果, 采用 IGS JFNG 测站 2022 年 2 月 2 日当天的 GPS/BDS 双星座观测数据开展测试。各历元时刻 GPS 和 BDS 卫星数量如图 2 所示。

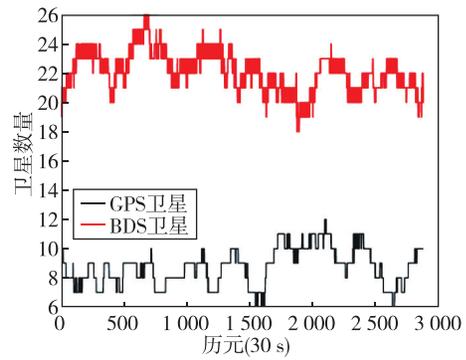


图 2 JFNG 测站各历元时刻 GPS/BDS 卫星数量

Fig. 2 Number of satellites at each epoch of JFNG station

分别基于 GPS、BDS 单星座和 GPS/BDS 双星座观测数据进行测试, 随机向卫星伪距观测测量中注入粗差, 模拟不同数量的故障卫星, 分别采用典型的奇偶矢量法、传统的 RANSAC RAIM 算法以及本文提出的改进 RANSAC RAIM 算法对故障进行检测和识别。伪距单点定位的参数设置如表 1 所示。

表 1 伪距单点定位参数设置

Tab. 1 Test parameter setting of pseudo-range single point positioning

参数	数值
定位模式	伪距单点定位
卫星星座	GPS+BDS
参数估计方法	加权最小二乘估计
加权模型	$\sigma^2 / \sin^2(eI)$
卫星截止高度角	5°
对流层延迟	采用 Saastamoinen 模型进行修正
电离层延迟	采用无电离层组合模型修正
历元个数	2 880
卫星星历	广播星历

3.1.1 单星座下的性能测试

在 GPS 单星座和 BDS 单星座情况下,由于卫星数量较少,发生 2 个及以上故障的概率较低,因此对单颗卫星进行故障注入。根据 DO-236C 中的要求,对卫星服务故障的定义是从非“不健康”的卫星处接收到大于 150 m 的伪距误差^[14]。向卫星伪距中注入 150 m 的故障伪距偏移,并进行 GPS 与 BDS 单星座故障检测。通过比较漏检数(有故障但未检测出来的历元数)、误检数(检测到有故障但未准确识别的历元数)和准确率(正确检测并识别故障的历元所占总历元的百分比)3 个统计指标,对比 3 种故障检测方法的性能。图 3 和图 4 为各历元时刻 3 种故障检测和识别方法的检测结果,图中状态“0”表示正确检出,状态“1”表示漏检,状态“2”表示误检。

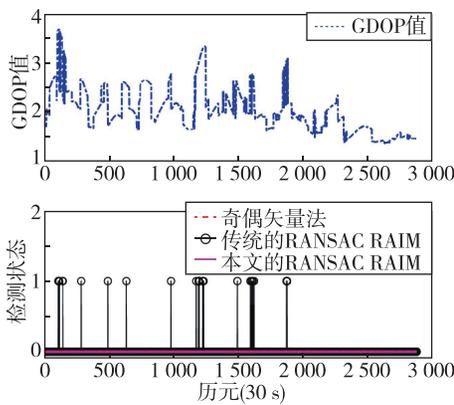


图 3 GPS 单星座各历元时刻故障卫星检测结果

Fig. 3 GPS fault satellites detection results at each epoch

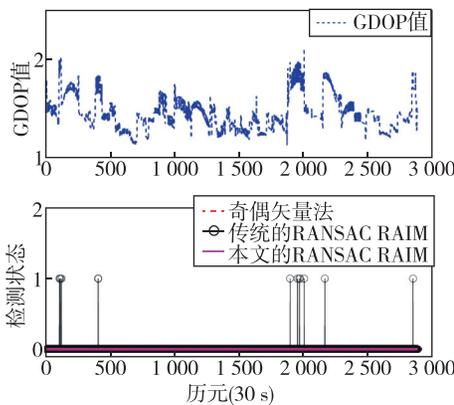


图 4 BDS 单星座各历元时刻故障卫星检测结果

Fig. 4 BDS fault satellites detection results at each epoch

从表 2 可以看出,在单星故障环境下奇偶矢量法和本文提出的改进的 RANSAC RAIM 算法都能

准确地检测出故障卫星,传统的 RANSAC RAIM 算法存在漏检,从图 3 和图 4 的检测结果可以看出该漏检主要存在于 GDOP 值较大的历元时刻。

表 2 单星座下 3 种故障检测方法的检测结果统计

Tab. 2 Statistics of detection results of three fault detection methods in a single constellation system environment

星座情况	统计指标	奇偶矢量法	传统的 RANSAC RAIM	改进的 RANSAC RAIM
GPS 星座	漏检数	0	0	0
	误检数	0	27	0
	准确率/%	100	99.06	100
BDS 星座	漏检数	0	0	0
	误检数	0	12	0
	准确率/%	100	99.6	100

3.1.2 多星座下的性能测试

为验证本文算法在多星座环境下的性能,分 3 次实验分别随机对 1 颗、2 颗和 3 颗卫星注入故障。分别进行 GPS/BDS 单星故障检测、双星故障检测和三星故障检测,统计结果如表 3 所示。

表 3 3 种故障检测方法的检测结果统计

Tab. 3 Statistics of detection results of three fault detection methods

故障卫星数量	统计指标	奇偶矢量法	传统的 RANSAC RAIM	改进的 RANSAC RAIM
1 颗	漏检数	0	0	0
	误检数	0	9	0
	准确率/%	100	99.69	100
2 颗	漏检数	0	26	6
	误检数	21	49	10
	准确率/%	99.27	97.40	99.44
3 颗	漏检数	0	31	13
	误检数	101	108	38
	准确率/%	96.49	95.17	98.23

从表 3 可以看出,相比传统的 RANSAC RAIM 故障检测算法,本文提出的基于选星预处理的改进 RANSAC RAIM 算法在单星故障和多星故障的漏检率、误检率和准确率方面都大大得到改善。相较于传统的奇偶矢量法,本文提出的改进算法在多星故障,特别是 3 颗卫星故障下的漏检率、误检率和准确率都有所提高。

3.2 基于飞行仿真数据的性能测试

为验证本文提出的改进的故障检测算法在RNP(required navigation performance)标准下全航段的故障检出效果,设计了以下实验将本文提出的改进的故障检测算法与传统 RANSAC RAIM 和奇偶矢量法进行对比。动态仿真实验条件如下:本次仿真采用真实星历,卫星位置速度由真实星历读取获得,均与真实卫星状态相同。详细仿真参数设置如表 4 所示。

表 4 动态仿真实验参数设置

Tab. 4 Dynamic simulation test parameter setting

参数	数值
仿真时长	7 080 s
伪距测量标准差	10.5 m
卫星截止高度角	5°
卫星星座	GPS+BDS
卫星数量	(31+44)颗

本实验以典型 RNP 飞行航迹进行模拟仿真,仿真航迹完全依照从北京首都机场(ZBAA,东经 116°35.9',北纬 40°04.4',高度 35.3 m)起飞到上海虹桥机场(ZSSS,东经 121°20.1',北纬 31°11.8',海拔高度 3 m)着陆的航迹设置,航迹仿真输出如图 5 所示。

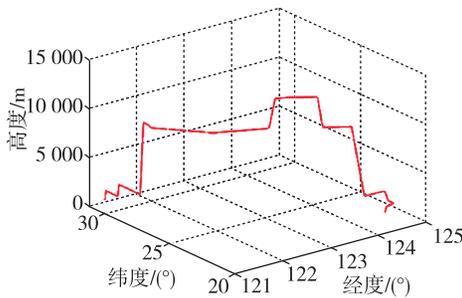


图 5 飞行仿真轨迹

Fig. 5 Flight simulation trajectory

根据 DO-236C 中的要求,对卫星服务故障的定义是从非“不健康”的卫星处接收到大于 150 m 的伪距误差^[14]。在 1~2 000 s 对任意 3 颗卫星注入 150 m 故障伪距误差,在 2 001~4 000 s 对任意 2 颗卫星注入 150 m 故障伪距误差,在 4 001~6 000 s 对任意 1 颗卫星注入 150 m 故障伪距误差,故障注入情况如表 5 所示。

表 5 卫星伪距故障注入情况

Tab. 5 The addition of satellite pseudo-range faults

航段设置/s	故障卫星个数	故障伪距误差/m
1~2 000	3	150
2 001~4 000	2	150
4 001~6 000	1	150
6 001~7 081	0	0

将仿真中检测出的故障卫星编号与注入故障卫星编号进行对比统计,各方法在不同故障情况下的漏检数、误检数和准确率统计结果如表 6 所示。

表 6 全航段故障检测结果

Tab. 6 Fault detection results of all segments

仿真时间(故障模式)	统计指标	奇偶矢量法	传统的 RANSAC RAIM	改进的 RANSAC RAIM
1~2 000 s 三星故障	漏检数	0	263	41
	误检数	181	250	35
	准确率/%	90.95	74.35	96.2
2 001~4 000 s 二星故障	漏检数	23	108	17
	误检数	26	207	21
	准确率/%	97.55	84.25	98.1
4 001~6 000 s 单星故障	漏检数	2	4	0
	误检数	1	211	1
	准确率/%	99.85	89.25	99.95
6 001~7 081 s 无故障	漏检数	0	0	0
	误检数	0	2	1
	准确率/%	100	99.8	99.9

计算各故障阶段各故障检测方法的水平位置误差,图 6 为绘制的水平位置误差曲线图,表 7 给出了水平位置误差标准差统计量。图 7 为绘制的垂直位置误差曲线图,表 8 给出了各故障阶段各故障检

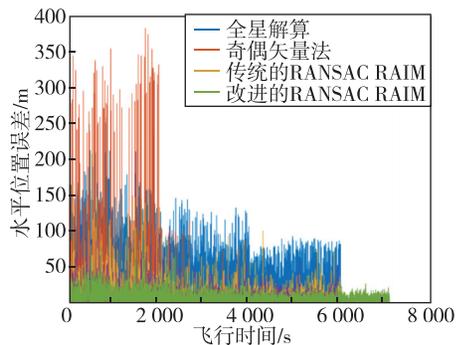


图 6 水平定位误差曲线图

Fig. 6 Horizontal positioning error curve graph

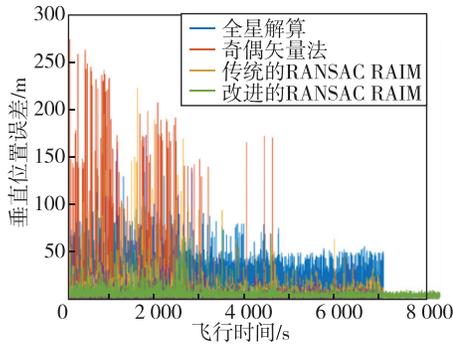


图 7 垂直定位误差曲线图

Fig. 7 Vertical positioning error curve graph

表 7 水平误差统计结果

Tab. 7 Horizontal error statistical results

飞行时间/s	水平定位误差标准差/m			
	全星解算	奇偶 矢量法	传统的 RANSAC RAIM	改进的 RANSAC RAIM
1~2 000	66.47	24.99	55.94	14.92
2 001~4 000	45.09	9.74	13.63	9.40
4 001~6 000	32.55	5.988	10.42	5.992
6 001~7 081	7.39	7.39	7.39	7.39

表 8 垂直误差统计结果

Tab. 8 Vertical error statistics results

飞行时间/s	垂直定位误差标准差/m			
	全星解算	奇偶 矢量法	传统的 RANSAC RAIM	改进的 RANSAC RAIM
1~2 000	15.78	17.56	37.43	9.66
2 001~4 000	12.30	6.71	11.78	6.11
4 001~6 000	11.30	1.824	6.56	1.816
6 001~7 081	1.85	1.85	1.85	1.85

测方法的垂直位置误差统计结果。

对 3 种方法每次故障检测花费时间进行统计,各方法平均解算时间如表 9 所示。

表 9 各方法平均解算时间

Tab. 9 The average solution time of each method

故障检测方法	平均解算时间/s
奇偶矢量法	0.002 14
传统的 RANSAC RAIM 算法	3.871 14
改进的 RANSAC RAIM 算法	0.007 10

从表 6 和表 9 可以看出,相比传统的 RANSAC RAIM 故障检测算法,本文提出的改进算法在单星

故障和多星故障的漏检率、误检率和准确率等指标都得到较大改善,并且解算时间也大幅度缩短。相较于奇偶矢量法,本文提出的改进算法在多星故障,特别是三星故障下的漏检率、误检率和准确率方面都有所提高。

4 结论

为了解决多星座导航系统中存在的单星和多星故障,本文研究了基于 RANSAC RAIM 算法的工作机理。针对传统方法存在计算量大和四星集合卫星构型不佳所引起的误检率高的的问题,提出了一种改进的 RANSAC RAIM 算法。改进的方法采用最大四面体选星法和基于 GDOP 贡献度的选星方法选取具有较好构型的卫星构成卫星子集,取代了传统方法通过遍历获取卫星子集。测试结果表明,本文提出的改进的 RANSAC RAIM 算法无论是在检测效率还是检测准确率方面都优于传统的 RANSAC RAIM 算法,并且在多星故障的情况下检测性能明显优于奇偶矢量法。

参考文献

[1] 苏先礼. GNSS 完好性监测体系及辅助性能增强技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
SU Xianli. The research on GNSS integrity monitoring theory and auxiliary performance enhancement technology [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013(in Chinese).

[2] 张洁, 赵琳, 杨福鑫, 等. 面向大众导航应用的精密单点定位完好性监测方法[J]. 航空学报, 2023, 44(13): 196-206.
ZHANG Jie, ZHAO Lin, YANG Fuxin et al. PPP integrity monitoring algorithm for general-purpose applications[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2023, 44(13): 196-206(in Chinese).

[3] TAREK H, AHMED E, KAN W. A review of system integration and current integrity monitoring methods for positioning in intelligent transport systems[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 15(1): 43-60.

[4] HASSAN E, AHMED M E, KAN W. A new method for fault identification in real-time integrity monitoring of autonomous vehicles positioning using PPP-RTK[J]. GPS Solutions, 2023, 28(1): 400-418.

[5] LIN M. Civil aviation satellite navigation integrity monitoring with deep learning[J]. Advances in Computer and Communication, 2023, 4(4): 437-443.

[6] GAO Y, 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): 200-214.
- [7] 秘金钟, 谷守周, 方书山. 基于向量相关距离的新型 RAIM 算法[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40(5): 638-643.
MI Jinzhong, GU Shouzhou, FANG Shushan. A new RAIM method based on vector correlation distance [J]. *Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, 40(5): 638-643(in Chinese).
- [8] BORIO D, GIOIA C. Galileo: the added value for integrity in harsh environments[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 111.
- [9] 王文博, 徐颖. 基于稳健 MM 估计的 REKF RAIM 算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(1): 216-222.
WANG Wenbo, XU Ying. REKF RAIM algorithm based on robust MM-estimation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(1): 216-222 (in Chinese).
- [10] FISCHLER M, BOLLES R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [11] SCHROTH G, ENE A, BLANCH J, et al. Failure detection and exclusion via range consensus[C]// *Proceedings of European Navigation Conference*. France, Toulouse, 2008.
- [12] 陈丹, 陈兵, 冯皓, 等. 基于改进 RANSAC 算法的 BDS 接收机自主完好性监测算法研究[C]// 第十二届中国卫星导航年会, 2021.
CHEN Dan, CHEN Bing, FENG Hao, et al. Research on BDS RAIM algorithm based on improved RANSAC algorithm[C]// *Proceedings of 12th China Satellite Navigation Annual Conference (CSNC)*, 2021(in Chinese).
- [13] 钱小龙. 城市复杂环境下的接收机自主完好性监测算法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
QIAN Xiaolong. Research on receiver autonomous integrity monitoring algorithm in urban complex environment[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022(in Chinese).
- [14] Radio Technical Commission for Aeronautics. DO-236C, minimum aviation system performance standards: required navigation performance for area navigation[S]. Washington DC: RTCA Inc, 2013.

(编辑: 孟彬)