

一种改进的 GNSS 接收机完好性监测算法

陈柯勋^{1,2}, 张雪英¹, 邱伟²

(1. 太原理工大学 信息与计算机学院, 太原 030600; 2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 针对传统 GNSS 接收机完好性监测算法由于可用性判断过程过于保守、误差保护水平值过大而导致算法可用性差的问题, 优化了传统算法的可用性判断过程, 根据卫星故障检测难度给出了漏检率的动态分配方法, 以及相应的 VPL 计算方法。理论分析表明, 上述改进方法可以在不降低总体完好性指标的同时最小化误差保护水平值, 从而提高接收机完好性监测算法的可用性。仿真实验结果表明, 改进后的 GNSS 接收机完好性监测算法的可用性比传统算法提高了 1.5% ~ 2.5%。

关键词: GNSS 接收机; 完好性监测; 垂直保护水平; 可用性

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.03.015

中图分类号: TN859 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2021)03-0103-05

An Improved Integrity Monitoring Algorithm for GNSS Receiver

CHEN Ke-xun^{1,2}, ZHANG Xue-ying¹, QIU Wei²

(1. College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China;

2. Beijing Institute of Strength and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In view of the problem that the availability judgment process of traditional GNSS receiver integrity monitoring algorithm is too conservative, and the error protection level value is too large, resulting in poor availability, the availability judgment process of the traditional algorithm is optimized, the dynamic allocation method of the missed detection rate according to difficulty of satellite fault detection, and corresponding calculation method about VPL are given. Theoretical analysis shows that the above methods can minimize the error protection level value without reducing the overall integrity index to improve the usability of the receiver integrity monitoring algorithm. Simulation experiments results show that the usability of the improved GNSS receiver integrity monitoring algorithm is 1.5% ~ 2.5% higher than traditional algorithm.

Keywords: GNSS receiver; integrity monitoring; vertical protection level; availability

0 引言

完好性是评价全球导航卫星系统(global navi-

gation satellite system, GNSS) 性能的重要指标之一, 它指卫星定位误差超过允许门限时, 系统能够及时给出告警的能力, 通常通过指标危险误导性信息概率(probability of hazardously misleading information,

收稿日期: 2019-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51805036)。

作者简介: 张雪英(1967—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师;

邱伟(1985—), 男, 硕士, 高级工程师。

通信作者: 陈柯勋(1984—), 男, 博士, 高级工程师, E-mail: chenhexun2008@163.com。

PHMI) 进行衡量。完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM) 功能是 GNSS 接收机设计的重要功能模块之一,它利用超定解对卫星测量值进行一致性校验,在接收机发生故障或受影响无法提供导航服务时,具有向用户发出预警信息的重要作用^[1-3],是 GNSS 完好性监测的重要组成部分。随着 BDS、Galileo 和 GLONASS 等系统的快速发展,可用卫星数目不断增加,RAIM 算法的性能得到了快速提升,而 RAIM 算法的可用性作为性能指标之一,不仅与 RAIM 算法本身有关,还与 RAIM 算法的可用性判断方法有关^[3-5],因此有必要针对 RAIM 算法的可用性判断方法开展相关研究。

传统的 RAIM 算法在分配漏检率时没有充分考虑各种因素,对于每颗卫星都分配相同的漏检率,导致传统的 RAIM 算法在判断可用性时,误差保护水平(protection level, PL) 的估计过程过于保守,估计值过大,从而降低了 RAIM 算法的可用性^[6-7]。为了解决该问题,本文在传统的 RAIM 算法可用性判断方法的基础上,改进了漏检率的分配方法,以及垂直保护水平(vertical protection level, VPL) 的计算过程,从而优化 RAIM 算法的可用性判断过程,并设计实验进行了仿真验证,验证了改进方法的有效性。

1 RAIM 算法原理

1.1 最小二乘法求解

GNSS 系统的伪距观测方程如式(1)所示:

$$y = GX + \varepsilon \quad (1)$$

式中, $y \in R^{n+1}$ 代表伪距与近似计算伪距差值的 n 维矢量; n 为可见卫星数目, $G \in R^{n+4}$ 为一个线性化后的观测矩阵; $X \in R^{4+1}$ 代表用户接收机的钟差和位置,为一个四维待解向量; $\varepsilon \in R^{n+1}$ 代表对各个卫星之间的伪距离进行测量时产生的误差。

根据最小二乘原理^[8],式(1)中向量 X 的最小二乘解如式(2)所示。

$$\hat{X} = (G^T G)^{-1} G^T y \quad (2)$$

定义向量 w 描述残差,可以得到伪距残差向量如式(3)所示:

$$w = y - (G^T G)^{-1} G^T y = [I - G(G^T G)^{-1} G^T] \varepsilon \quad (3)$$

令 $S = I - G(G^T G)^{-1} G^T$,则式(3)可简化如式(4)所示。

$$w = S\varepsilon \quad (4)$$

1.2 基于伪距残差平方和的故障检测

从式(4)中可以看出,由于向量 w 包含卫星测距的误差信息,因此可以被用来判断是否存在故障星^[9-10]。通常情况下,采用基于伪距残差平方和 SSE 的方法进行故障检测,如式(5)所示。

$$SSE = w^T w \quad (5)$$

根据统计理论^[11],如果伪距误差向量 ε 中的各个分量相互独立且服从均值为 0、方差为 σ_0^2 的正态分布,则 SSE/σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的 χ^2 分布,若 ε 中的各个分量相互独立且服从均值不为 0、方差为 σ_0^2 的正态分布,则 SSE/σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的非中心化参数为 $E(SSE/\sigma_0^2)$ 的非中心化 χ^2 分布^[12]。

在实际应用过程中,通常使用统计检测量 T_x 进行故障检测, T_x 的计算方式如式(6)所示。

$$T_x = \sqrt{SSE/(n-4)} \quad (6)$$

在接收机定位过程中,将 T_x 与检测门限 T_0 进行对比,如果 $T_x \geq T_0$,则说明有故障星;如果 $T_x < T_0$,则说明不存在故障星。当统计检测量没有超过门限值时,表示此时不存在故障星。采用最大似然估计方法,可以找出发生故障几率最大的卫星。由于 $w = S\varepsilon$,当某颗卫星的 w_i^2/SSE 值达到最大值时,可以判断这颗卫星发生故障的几率较高^[13-14]。故障检测门限有多种方法可以得出,由于本文主要研究 RAIM 算法的可用性,对于故障检测门限确定方法不在此介绍。

2 传统的 RAIM 算法可用性判断方法

在实际应用过程中,在进行接收机故障检测之前,首先要判断 RAIM 算法的可用性,具体的判断方法包括以下两步:

1) 首先判断可视卫星数目,若可视卫星数目少于 5 颗,则没有冗余的观测量,此时 RAIM 算法不可用,若可视卫星数目不少于 5 颗,则进入步骤 2);

2) 计算误差保护水平(PL),并将计算结果与误差保护水平的门限值进行比较,若计算结果大于门限值,则 RAIM 算法不可用。

误差保护水平包括水平误差保护水平(horizontal protection level, HPL) 和 VPL,这两个指标均可以用来判断 RAIM 算法的可用性^[15]。本文采用 VPL 为例介绍传统的 RAIM 算法可用性判断过程(假设可视卫星数目不少于 5 颗)。

假定卫星存在故障,则 SSE/σ^2 服从自由度为 χ^2

的非中心化分布。给定漏检率 P_{MD} , 可以确定非中心化参数 λ 为

$$P(SSE/\sigma^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{x^2(n-4, \lambda)}(x) dx = P_{MD} \quad (7)$$

根据式(4)中对 S 的定义, 令 $A = I - S = G(G^T G)^{-1}G$, 则传统的 VPL 计算方法如式(8)所示。

$$VPL = \max_{i=1:n} \left\{ \frac{A_{3i}}{\sqrt{S_{ii}}} \sqrt{\lambda_{\min}} \right\} \quad (8)$$

其中: A_{3i} 为矩阵 A 的第3行的第 i 个元素, S_{ii} 为矩阵 S 的第 i 行的第 i 个元素, $\lambda_{\min}$ 为式(7)中非中心化参数 λ 的最小值。

从式(7)和式(8)中可以看出, 漏检率 P_{MD} 通常是在完好性检测进行以前就已经被确定, 该方法没有考虑不同卫星所导致定位误差不同这一因素, 对那些很难探测到故障的卫星和较易探测故障的卫星分配相同的漏检率 P_{MD} , 导致 VPL 的估计太过保守, 从而降低了接收机 RAIM 的可用性^[16-17]。

3 改进的 RAIM 算法可用性判断方法

针对传统的 RAIM 算法可用性判断方法存在的问题, 本文的 RAIM 算法可用性判断方法改进思路是改进 VPL 的计算过程, 通过对故障检测难易程度分配不同的漏检率, 难度较大的卫星则分配较大的漏检, 这种分配方法可以保证在总体完好性指标不会发生变化的同时, 还能够精确的估计出 VPL 的值, 从而提高接收机完好性监测的可用性。改进的 VPL 计算方式如式(9)所示:

$$VPL_1 = \max_{i=1:n} \left\{ \frac{A_{3i}}{\sqrt{S_{ii}}} \sqrt{\lambda_{\min, \alpha_i P_{MD,i}}} \right\} \quad (9)$$

其中, $\lambda_{\min, \alpha_i P_{MD,i}}$ 表示基于第 i 颗星上分配的漏检率 $P_{MD,i}$ 而得出的非中心化参数, 所以式(9)就转换为一个优化问题, 如式(10)所示:

$$VPL_1 = \min \left\{ \max_{i=1:n} \left[\frac{A_{3i}}{\sqrt{S_{ii}}} \sqrt{\lambda_{\min, \alpha_i P_{MD,i}}} \right] \right\} \quad (10)$$

其中, $\sum_{i=1}^n \alpha_i P_{MD,i} = PHMI$, 其中 α_i 是衡量分配卫星故障检测难易程度的动态参数, 默认状态下可以取加权平均。在满足 $\sum_{i=1}^n \alpha_i P_{MD,i} = PHMI$ 时, 以上优化问题可以在如式(11)所示的情况下求解。

$$\frac{A_{31}}{\sqrt{S_{11}}} \sqrt{\lambda_{\min, \alpha_1 P_{MD,1}}} = \dots = \frac{A_{3n}}{\sqrt{S_{nn}}} \sqrt{\lambda_{\min, \alpha_n P_{MD,n}}} \quad (11)$$

本文提出的改进方法是在 VPL 计算过程中按照算法原理进行不定期更新计算。不过在计算 VPL 时, 由于 BDS 卫星等效测距误差、GPS 系统方面存在一定的差异, 应该要使用等效测距误差大的系统, 以便降低系统目标判断错误的频率^[18]。当存在六个未知数时, 如果想要进行定位, 卫星的数量就必须达到六颗^[19]。随之, 系统自由度也从原来单一系统中的 $n-4$ 减少为 $n-6$ 。因此, 如果想要在双模 GNSS 接收机中使用改进 RAIM 算法进行检测, 观测卫星的数量就必须达到 7 颗; 如果想要利用该算法进行纠错, 卫星数量就必须达到 8 颗^[20]。

4 实验仿真分析

4.1 实验环境

实验过程中选用 GPS/BDS 双模接收机, 该接收机可以同时接收和处理 GPS L1 频点卫星信号和 BDS B1、B2 频点卫星信号。

实验过程中, 利用 18 颗 GPS 卫星和 20 颗 BDS 卫星组成的星座进行仿真分析。利用平均点角、上升节经度、轨道半径与倾角、等参数来区分不同卫星。假设 GPS 轨道倾角 55° , 轨道半径(26 m 560 m 623.69 m), 18 颗卫星平均分布在 $25.7303^\circ \sim 325.7303^\circ$ 的 6 条轨道上, 间隔 60° 。设 BD 星的轨道倾角为 54° , 轨道半径为(29 m 378 m 137 m)。20 颗卫星在 $0^\circ \sim 240^\circ$ 的 3 个轨道平面上, 以 120° 的间隔均匀分布。

三频(GPS L1 频点和 BDS B1、B2 频点)误差模型采用式(12)进行模拟:

$$\sigma_k^2 = URA_k + \sigma_{k,trop}^2 + \sigma_{k,noise}^2 + \sigma_{k,mp}^2 \quad (12)$$

其中: σ_k^2 表示第 k 个观测量的误差方差; URA_k 表示第 k 个观测量的用户测距精度; $\sigma_{k,trop}$ 表示对流层延迟的标准差; $\sigma_{k,noise}$ 为接收机噪声标准差; $\sigma_{k,mp}$ 为多径效应标准差, 计算方法为

$$\sigma_{k,trop} = \frac{0.12 \times 1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(elev)}} \quad (13)$$

$$\sigma_{k,noise} = 0.04 - 0.02(elev \times 180/\pi - 5)/85 \quad (14)$$

$$\sigma_{k,mp} = 0.13 + 0.153 \exp(elev \times 180/\pi/10) \quad (15)$$

其中 $elev$ 是卫星仰角。

4.2 实验结果分析

本文基于上述实验环境, 对传统的 RAIM 算法可用性判断方法和改进后的 RAIM 算法可用性判断方法进行了对比分析。在 48 h 以内, 每分钟采样 1 次, 共得到了 1 445 个历元结果, 观测量的用户测距

精度统一设置为 1 m。在固定东经 10°, 北纬 25° 的情况下, 图 1 给出了传统方法的卫星个数与 RAIM 可用性的关系, 图 2 给出了改进方法检测的卫星个数与 RAIM 可用性的关系。

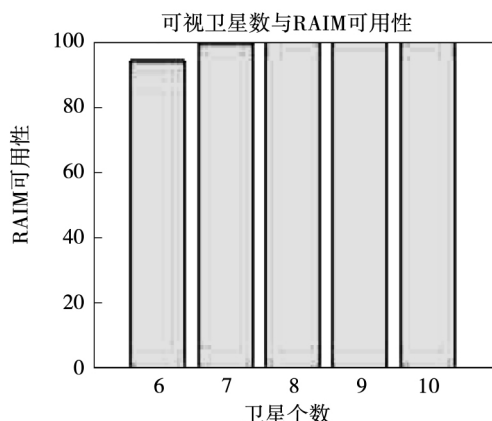


图 1 传统方法可视卫星数与 RAIM 可用性

Fig. 1 The relationship between the number of visible satellites and availability of RAIM of traditional method

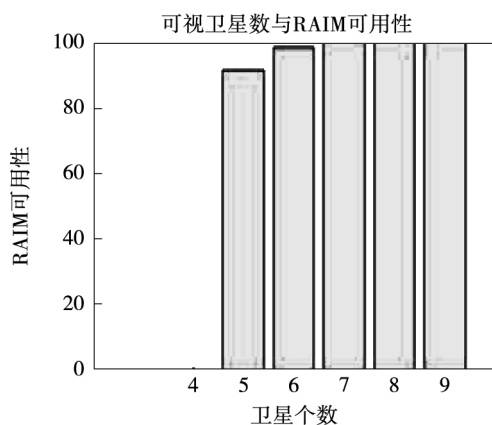


图 2 改进方法可视卫星数与 RAIM 关系

Fig. 2 The relationship between the number of visible satellites and availability of RAIM of improved method

对比图 1 和图 2 可以看出本文所述改进 RAIM 算法在 RAIM 检测效果上更优。

同样的实验环境中, 分别计算两种可用性判断方法的 VPL 值, 可以得出计算结果如图 3 所示。在图 3 中, VPL1 表示传统方法的 VPL 值, VPL2 表示改进方法的 VPL 值。从图 3 中可以看出改进后的 VPL 整体值偏小, 说明改进的 RAIM 算法可用性更优。

相同的实验条件下, 可以得到 VPL 值的累积概率密度分布函数 (CDF) 如图 4 所示, 从图 4 中可以

看出, 改进的 RAIM 算法可用性判断方法使得 VPL 值减小了 10% 左右, 当 VAL = 35 时, 改进的 RAIM 算法可用性得到了 2.5% 的提高。

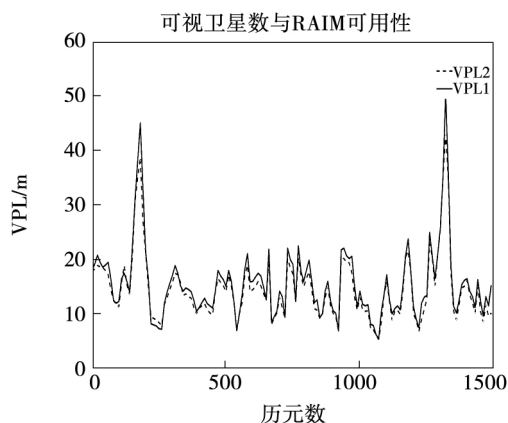


图 3 改进前后的 VPL 值

Fig. 3 VPL value of traditional and improved method

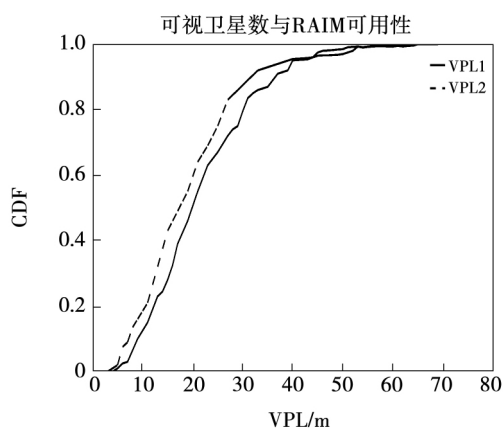


图 4 改进前后的 CDF 值

Fig. 4 CDF value of traditional and improved method

综合以上仿真结果可以看出, 改进 RAIM 算法通过改进 VPL 计算过程, 合理化分配卫星漏检率, 提高了传统 RAIM 算法的可用性。

5 结 论

本文针对传统的 RAIM 算法在分配漏检率时对于每颗卫星都分配相同的漏检率这一缺陷, 通过改进漏检率分配方法, 以及传统的 RAIM 算法可用性判断方法中的 VPL 计算过程, 从而最小化 VPL 值, 达到提高 RAIM 算法可用性的目标, 一系列的实验仿真结果验证了本文所述方法的有效性。随着各个 GNSS 的进一步发展以及人们更加深入的研究, RAIM 算法将会不断被优化, 其可用性也会不断提高。

参考文献:

- [1] 喻思琪, 张小红, 郭斐, 等. 卫星导航近技术进展 [J]. 航空学报, 2019, 40(3): 11.
YU Siqi, ZHANG Xiaohong, GUO Fei, et al. Recent Advances in Precision Approach Based on GNSS [J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 11.
- [2] ZHANG P, CHEN P, SONG D, et al. Research on GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring Method Based on M-Estimation [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, (pt. 4): 1.
- [3] 赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. GNSS 单系统及多系统组合完好性分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 72.
ZHAO Ang, YANG Yuanxi, XU Yangyin, et al. Integrity Analysis of GNSS Single System and Multi-system Combination [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 72.
- [4] ANGRISANO A, GAGLIONE S, CROCIETTO N, et al. PANG-NAV: A Tool for Processing GNSS Measurements in SPP, Including RAIM Functionality [J]. GPS Solutions, 2020, 24(1): 1.
- [5] 邹晓军, 廉保旺. 矢量 GNSS 接收机自主完好性监控性能研究 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(8): 1966.
ZOU Xiaojun, LIAN Baowang. Research on Autonomous Integrity Monitoring Performance of Vector GNSS Receiver [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2019, 41(8): 1966.
- [6] 李彬, 吴云, 李征航. GNSS 接收机自主完好性监测高级算法的有效性验证 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(6): 800.
LI Bin, WU Yun, LI Zhenghang. Validation of the GNSS Advanced ARAIM Algorithm [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 800.
- [7] 葛君霞. 多模 GNSS 接收机 RAIM 技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [8] 林雪原, 范胜林, 宋杰, 等. 北斗导航系统接收机自主完好性监测算法及性能分析 [J]. 海军航空工程学院学报, 2016, 31(6): 619.
LIN Xueyuan, FAN Shenglin, SONG Jie, et al. Beidou Navigation System RAIM Algorithm and Performance Analysis [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2016, 31(6): 619.
- [9] JIANG Y, WANG J. A New Approach to Calculate the Vertical Protection Level in A-RAIM [J]. The Journal of Navigation, 2014, 67(4): 711.
- [10] 宋建材, 侯春萍, 薛桂香. 基于 EKF 的 GNSS 接收机自主完好性监测方法 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017(50): 410.
SONG Jiancai, HOU Chunping, XUE Guixiang. GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring Based on EKF [J]. Journal of Tianjin University, 2017(50): 410.
- [11] ZHANG Q, ZHAO L, ZHOU J. Improved Method for Single and Multiple GNSS Faults Exclusion based on Consensus Voting [J]. The Journal of Navigation, 2019, 72(4): 987.
- [12] 王尔申, 杨福霞, 庞涛, 等. BDS/GPS 组合导航接收机自主完好性监测算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 684.
WANG Ershen, YANG Fuxia, PANG Tao, et al. BDS/GPS Combined Navigation Receiver Autonomous Integrity Monitoring Algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and A, 2018, 44(4): 684.
- [13] HSU L T, GU Y, KAMIJO S. NLOS Correction/Exclusion for GNSS Measurement Using RAIM and City Building Models [J]. Sensors, 2015, 15(7): 17329.
- [14] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. Protection Levels after Fault Exclusion for Advanced RAIM [J]. Navigation, 2017, 64(4): 505.
- [15] 王尔申, 曲萍萍, 庞涛, 等. 粒子群优化粒子滤波的接收机自主完好性监测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2572.
WANG Ershen, YANG Fuxia, PANG Tao, et al. BDS/GPS Combined Navigation Receiver Autonomous Integrity Monitoring Algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and A, 2018, 44(4): 684.
- [16] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, et al. Advanced RAIM User Algorithm Description: Integrity Support Message Processing, Fault Detection, Exclusion, and Protection Level Calculation [J] // Ion Institute of Navigation Global Navigation Satellite Systems Conference, 2012.
- [17] BROWN, GROVER R. Solution of the Two-Failure GPS RAIM Problem Under Worst-Case Bias Conditions: Parity Space Approach [J]. Navigation, 1997, 44(4): 425.
- [18] 阳凯, 郭承军. 基于完好性与连续性风险的最优垂直保护门限计算 [J]. 计算机工程, 2017, 43(1): 50.
YANG Kai, GUO Chengjun. Calculation of Optimal Vertical Protection Level Based on Integrity Risk and Continuity Risk [J]. Computer Engineering, 2017, 43(1): 50.
- [19] PANAGIOTAKOPOULOS D, MAJUMDAR A, OCHIENG W Y. Extreme Value Theory-based Integrity Monitoring of Global Navigation Satellite Systems [J]. GPS Solutions, 2014, 18(1): 133.
- [20] COHENOUR C, GRAAS F V. GPS Orbit and Clock Error Distributions [J]. Navigation, 2011, 58(1): 17.

(编辑: 王 萍)