

GNSS 接收机加权 RAIM 算法研究

孔龙涛, 王文丽

(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对接收机使用加权最小二乘定位算法时的故障检测与识别问题, 对加权 RAIM 算法进行了研究。首先, 给出了一种卫星权值的计算方法, 指出其主要取决于卫星星历误差、电离层延迟误差和对流层延迟误差。然后, 通过在构造统计量时加入权值矩阵, 得到加权 RAIM 算法的故障检测和故障识别模型。最后, 基于 BDS 试验数据, 对比验证了传统不加权 RAIM 算法和加权 RAIM 算法的性能。试验结果表明: 故障检测方面, 加权 RAIM 算法的性能与故障卫星的权值有关, 而故障识别方面, 两种方法性能相同。

关键词: 加权 RAIM; 加权最小二乘法; 卫星权值; 仰角; BDS

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)06-0071-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20200717001

引用格式: 孔龙涛, 王文丽. GNSS 接收机加权 RAIM 算法研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 71-77.

Research on algorithm of weighted RAIM for GNSS receiver

KONG Longtao, WANG Wenli

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the problem of fault detection and identification when the receiver uses the weighted least squares position solution, a weighted RAIM algorithm is researched. First of all, the expression of satellite weights is introduced. It is pointed out that the satellite weights mainly depend on the satellite ephemeris error, ionosphere and troposphere delay error. Then the fault detection and fault identification model of weighted RAIM is obtained by adding weight matrix when constructing statistics. Finally, based on BDS data, the performance of traditional un-weighted RAIM algorithm and proposed weighted RAIM algorithm is verified by comparison. The test result shows that: in terms of fault detection, the performance of the weighted RAIM algorithm is related to the weight of the faulty satellite, while in fault identification, both methods are the same.

Key words: Weighted RAIM; Weighted least square method; Satellite weight; Elevation; BDS

DOI: 10.12347/j.ycyk.20200717001

Citation: KONG Longtao, WANG Wenli. Research on algorithm of weighted RAIM for GNSS receiver[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 71-77.

引 言

全球卫星导航系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 除了提供定位、导航和授时 PNT (Position Navigation Timing) 功能之外, 还须具有在系统不能使用时及时向用户告警的能力, 这种能力称为系统的完好性^[1]。接收机自主完好性监测 RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) 算法利用用户接收机接收到的卫星冗余数据来实现对 GNSS 故障的监测和报警, 具有反应迅速、无需外界干预等优点, 是一种广泛应用的完好性监测方法^[2]。

国际民用航空组织 ICAO (International Civil Aeronautics Organization) 的国际民用航空公约附件 10 中明确要求, 用于精密进近的 GNSS 接收机定位时必须使用加权最小二乘算法^[3]。航空无线电技术委员会 RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) 的 DO-229D 标准则进一步要求 GNSS 接收机在航路和终端区使用加权的故障检测与识别算法^[4]。同时, 在 ICAO 导航系统专家组第六次会议上, 我国

北斗三号全球卫星导航系统 189 项性能指标技术验证全部通过, 这表明北斗三号即将加入 ICAO 标准为全球民航提供服务。因此, 研究加权 RAIM 算法具有较高的现实意义, 有利于指导工程实践应用。目前, 文献研究主要集中于传统不加权的单星和多星 RAIM 算法^[5,6], 对加权 RAIM 算法的性能研究较少。文献[7]介绍了加权 RAIM 算法故障检测和卫星权值选择方法, 但没有与传统不加权 RAIM 算法进行比较。文献[8]通过人为加入多种类型的故障, 对比了传统 RAIM 算法和加权 RAIM 算法的性能, 但结论略显单一。文献[9]则侧重于比较加权 RAIM 算法在单系统和组合系统下的性能。

本文给出一种卫星权值计算方法, 基于加权最小二乘定位算法, 详细说明了加权 RAIM 算法的原理。最后, 基于我国的北斗卫星导航系统 BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 试验数据比较了传统 RAIM 算法和加权 RAIM 算法的性能。

1 加权最小二乘算法

假设当前时刻共有 N 颗可见卫星, 定位模式为单系统, 伪距测量值线性化后的观测方程为

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{W} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 为各卫星伪距残差的观测矢量; $\mathbf{G} \in \mathbf{R}^{N \times 4}$ 为几何矩阵, 由各卫星至接收机的方向余弦构成; $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$ 为待估计的状态向量, 包括接收机三维位置和钟差; $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 为各卫星伪距测量值的观测误差; $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为各卫星观测矢量的权值矩阵。设 N 颗卫星权值之间互不相关, 则

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & w_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

对式 (1) 方程两边乘以权值矩阵并运用最小二乘算法, 可得接收机状态的解为^[10]

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{y} \quad (3)$$

各卫星权值 w 的选择关系到加权算法的有效性。 w_i 的选择与实际情况越相符, 加权算法越有效。卫星的测量误差越小, 则其所对应的权重应越大。因此, 一种卫星权值的计算方法为

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (4)$$

式 (4) 中, σ_i^2 为卫星 i 的伪距观测噪声方差。

按来源不同, 伪距测量值误差可分为以下三个方面: 与卫星有关的误差, 主要包括卫星时钟误差和卫星星历误差; 与信号传播有关的误差, 包括电离层延迟和对流层延迟两部分; 与接收机有关的误差, 包括多路径效应、热噪声等。综合以上误差, σ_i^2 表达式为^[4]

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,\text{URA}}^2 + \sigma_{i,\text{iono}}^2 + \sigma_{i,\text{tropo}}^2 + \sigma_{i,\text{mp}}^2 + \sigma_{i,\text{tcvr}}^2 \quad (5)$$

以 BDS 为例, 本文对式 (5) 中各分量的定义和取值见表 1。

表 1 BDS 卫星伪距观测噪声各分量的定义和取值

Table 1 Definition and value of BDS satellite pseudorange observation noise

分量	定义	取值
$\sigma_{i,\text{URA}}^2$	卫星时钟误差和卫星星历误差方差	修正参数包含在卫星播发的星历中
$\sigma_{i,\text{iono}}^2$	电离层延迟误差方差	$(0.2 \times \rho_{\text{iono}})^2$, ρ_{iono} 表示电离层延迟, 根据卫星播发的电离层参数, 按 ICD 提供的 Klobuchar 公式计算, 同卫星仰角相关
$\sigma_{i,\text{tropo}}^2$	对流层延迟误差方差	$0.3/(\sin(E_i) + 0.1)$, E_i 是卫星的仰角, 单位为弧度
$\sigma_{i,\text{mp}}^2$	多路径误差方差	$(0.13 + 0.53e^{-E_i/10})^2$, E_i 是卫星的仰角, 单位为度
$\sigma_{i,\text{tcvr}}^2$	接收机热噪声方差	$(0.1)^2$

从表1中可以看出,除卫星时钟误差和卫星星历误差方差外,电离层延迟误差、对流层延迟误差和多路径误差的方差均与卫星仰角有关,仰角越低,方差越大,该卫星的权值越小。同时,接收机热噪声的方差相对较小,可忽略不计。

2 加权 RAIM 算法

基于加权最小二乘算法的加权 RAIM 算法包含故障检测和故障识别两部分。

2.1 故障检测算法

式(3)状态解后卫星伪距的验后残差向量为

$$\mathbf{v} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}} \quad (6)$$

式(6)中, $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 为伪距残差。将式(3)代入上式,可得

$$\mathbf{v} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \right) \mathbf{y} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \right) \boldsymbol{\varepsilon} \quad (7)$$

记 $\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}$, 则 $\mathbf{v} = \mathbf{S}\boldsymbol{\varepsilon}$ 。

最小二乘残差法在故障检测时使用伪距残差的平方和作为检测统计量,定义为

$$r = \mathbf{v}^T \mathbf{W} \mathbf{v} \quad (8)$$

r 的大小体现了各个测量值之间的一致性程度。假设无故障时观测误差 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 服从正态分布,则 r 应服从自由度为 $N-4$ 的 χ^2 分布。

给定误警率 P_{FA} , 检测门限 T 的计算公式为

$$\Pr(r < T^2) = \int_0^{T^2} f_{\chi^2(N-4)}(x) dx = 1 - P_{FA} \quad (9)$$

将检测统计量 \sqrt{r} 与检测门限 T 进行对比,若超过门限,则测量值相互之间不一致,也就是说有测量值是错误的,当前卫星中存在故障卫星;否则,不存在故障卫星。

2.2 故障识别算法

如果当前卫星中只存在一个故障卫星,则故障识别使用最大似然估计算法的效果较好^[11]。定义各卫星的故障识别统计量为:

$$d_i = \frac{v_i^2}{\mathbf{Q}_{ii}}, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

其中, d_i 为识别统计量; v_i 为伪距残差向量 \mathbf{v} 中的第 i 个分量; \mathbf{Q}_{ii} 为 $N \times N$ 维协因数矩阵 \mathbf{Q} 的主对角元素, $\mathbf{Q} = \mathbf{W}^{-1} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T$ 。

取 d_i 最大值对应的卫星,识别为故障卫星。

3 试验分析

3.1 试验条件

使用我所自研的 GNSS 接收机于北京静态采集原始测量数据,数据时长 19 h,天线位于实验室楼顶。利用采集到的原始测量数据进行事后重定位处理,定位频率为 1 Hz。在事后定位时,对某颗卫星的各观测历元伪距人为加入斜坡偏差,偏差值从 0 m 递增至 500 m,步长为 10 m,如图 1 所示。分别使用传统不加权 RAIM 算法和本文的加权 RAIM 算法对斜坡偏差进行检测和识别,比较两种算法在不同故障大小下的性能。

根据式(9)计算不同卫星数目下加权 RAIM 算法

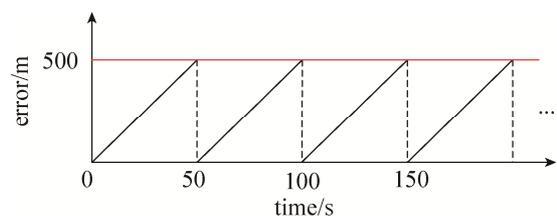


图1 斜坡误差类型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slope error

的检测门限 T , 如表 2 所示, 其中误警率大小按 GNSS 补充导航方式选取, 即 $P_{FA}=1/15\ 000^{[1]}$ 。对于 GNSS 主用导航方式, RTCA DO-229D 规定了误警率大小为 3.33×10^{-7} , 不同检测门限并不影响本文的结论。

将同一时刻所有可见卫星伪距观测噪声标准差的平均值乘以表 2 中的门限, 作为传统最小二乘 RAIM 算法的检测门限, 即

$$T_{LS} = T_{WLS} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2} \quad (11)$$

其中, T_{LS} 是传统 RAIM 算法的检测门限; T_{WLS} 是加权 RAIM 算法的检测门限; σ 是卫星伪距观测噪声的标准差。

结合实际工程应用情况, 为避免 RAIM 算法过于敏感, 试验时将两种算法的门限放大 10 倍进行验证。

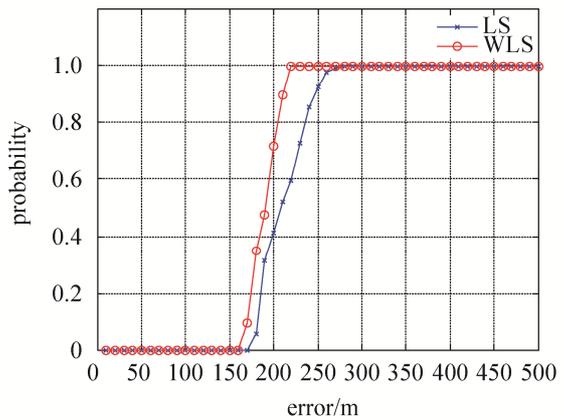
3.2 试验结果

本试验针对 BDS 分析加权 RAIM 算法的性能。观测时段内可见的 BDS 卫星个数如图 2 所示。

可见, 在北京区域 BDS 的可见卫星数已多达 18 颗。BDS 由三种不同轨道类型的卫星组成, 分别是地球静止轨道 GEO (Geostationary Orbit) 卫星、倾斜地球同步轨道 IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit) 卫星和中圆地球轨道 MEO (Medium Earth Orbit) 卫星。试验时, 分别将 GEO 卫星的 3 号、5 号, IGSO 卫星的 9 号和 MEO 卫星的 21 号作为故障卫星, 对其伪距人为加入斜坡偏差, 利用两种方法进行故障检测和识别。

(1) 故障检测结果

故障检测结果及仰角变化曲线如图 3~图 6 所示, 图中“LS”代表传统 RAIM 算法, “WLS”代表加权 RAIM 算法。



(a) 故障检测结果
(a) Fault detection results

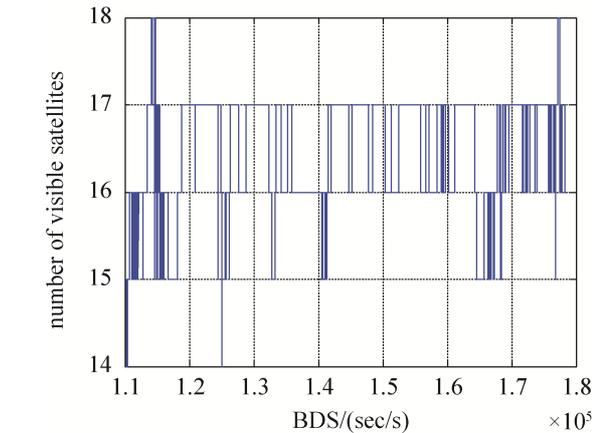
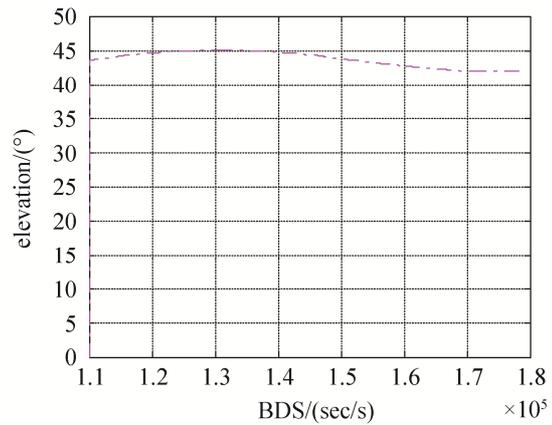


图 2 可见卫星数变化情况
Fig. 2 Changes in the number of visible satellites



(b) 仰角变化曲线
(b) Elevation change curve

图 3 3 号星故障检测结果
Fig. 3 Fault detection results of PRN 3

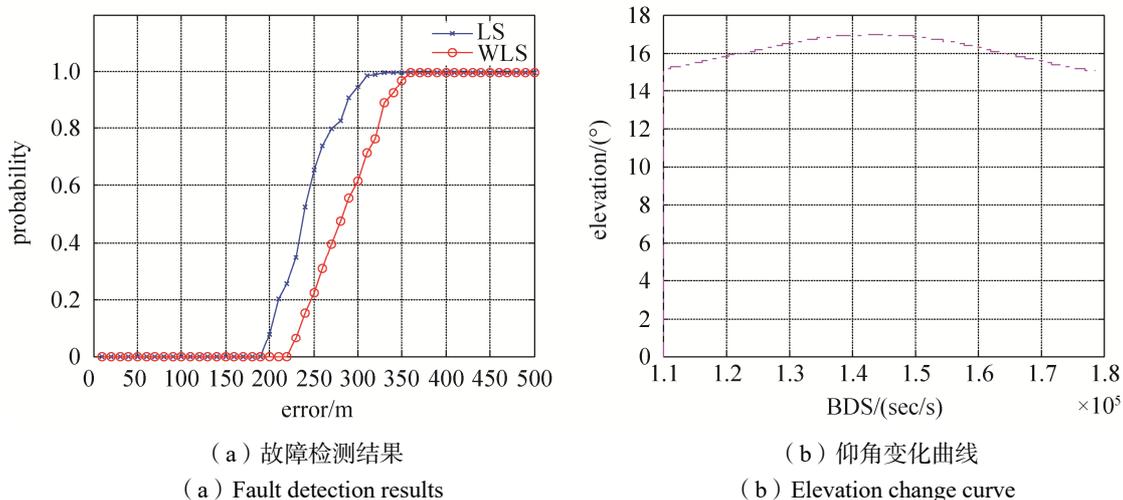


图4 5号星故障检测结果
Fig. 4 Fault detection results of PRN 5

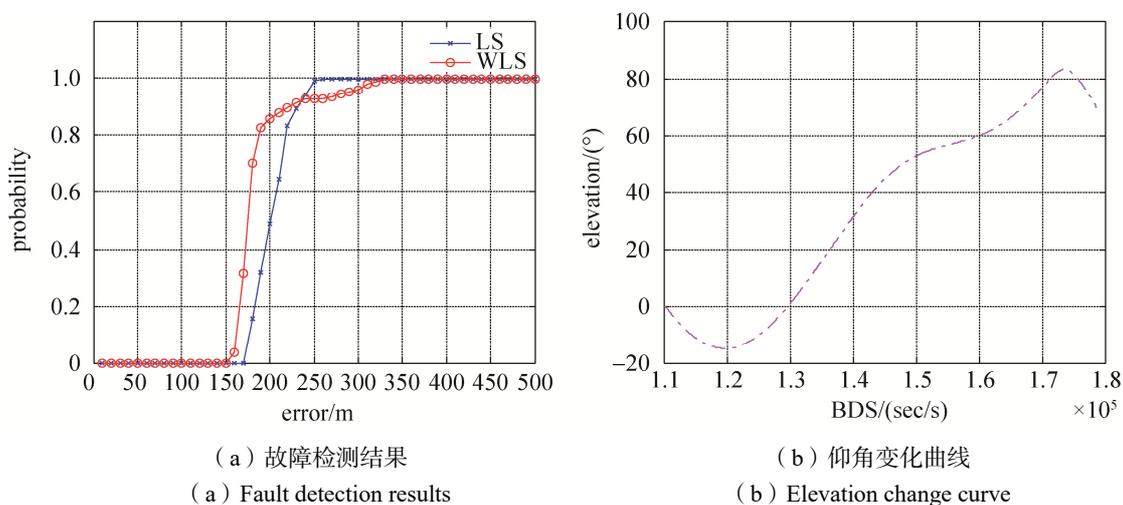


图5 9号星故障检测结果
Fig. 5 Fault detection results of PRN 9

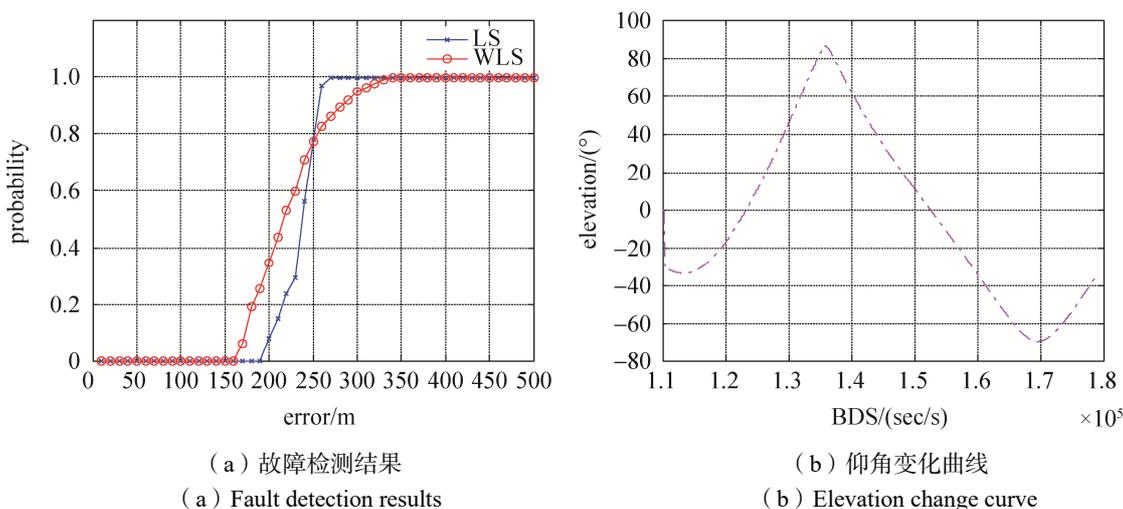


图6 21号星故障检测结果
Fig. 6 Fault detection results of PRN 21

从图 6 中可以看出, GEO 卫星相对接收机的仰角基本不变, 3 号卫星的仰角较高, 在 45°左右, 加权 RAIM 算法的检测敏感度优于传统 RAIM 算法; 5 号卫星的仰角较低, 传统 RAIM 算法的检测敏感度优于加权 RAIM 算法; IGSO 和 MEO 卫星的仰角随时间变化, 两种算法的检测结果存在交叉。

(2) 故障识别结果

两种算法均能正确识别故障星, 识别率为 100%, 不存在误检的情况。

3.3 结果分析

对试验数据进行分析可知, 目前所有北斗卫星的 URA 值均为 2.0 m。因此, 针对本文中的权阵来说, 仰角越低的卫星, 伪距观测噪声方差越大, 其权值越低。权阵使得低仰角卫星的伪距残差在所有可见卫星中的比重降低, 当作为故障卫星加入伪距偏差时, 则不易检测; 反之, 高仰角卫星的伪距残差在所有可见卫星中的比重增大, 当作为故障卫星加入伪距偏差时, 则更容易检测。

由于采集数据跨度长, 致使同一伪距偏差下, 既包含高仰角的情况, 又包含低仰角的情况。若某一伪距偏差对应高仰角的时间跨度相对于低仰角长, 则加权 RAIM 算法的检测率高于传统 RAIM 算法; 反之, 则传统 RAIM 算法高于加权 RAIM 算法的检测率。因此, 若卫星在观测时段仰角变化明显, 则两种算法的检测结果存在交叉。

为验证仰角对检测结果的影响, 只统计 21 号卫星仰角在 30°以上的试验数据, 结果如图 7 所示。

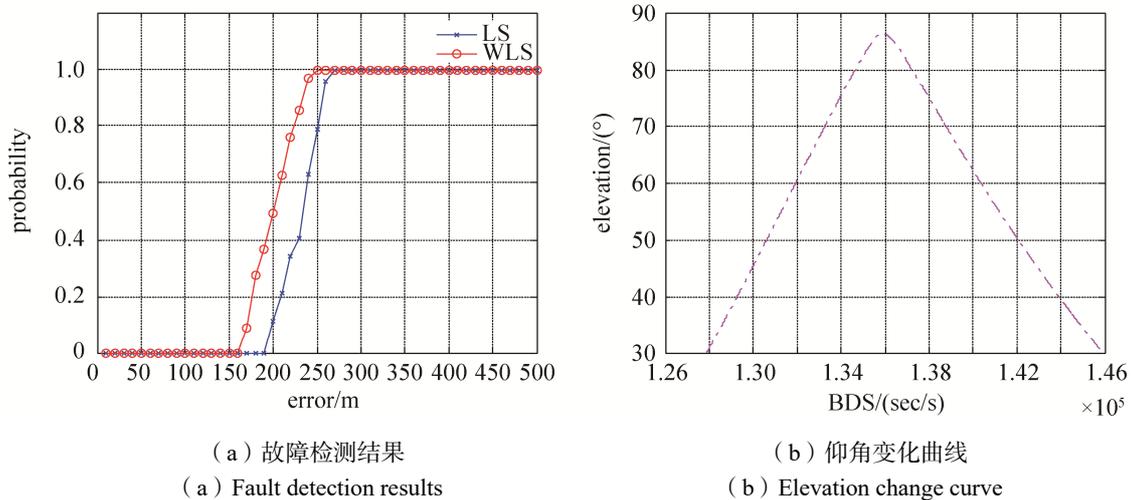


图 7 21 号星 30°以上的故障检测结果
Fig. 7 Fault detection results of PRN 21 with the elevation more than 30 degrees

由图 7 可知, 去除低仰角数据后, 加权 RAIM 算法的检测结果优于传统 RAIM 算法。

4 结束语

本文利用 BDS 试验数据, 对基于加权最小二乘定位算法的加权 RAIM 算法进行了性能研究。试验结果表明, 相比传统 RAIM 算法, 加权 RAIM 算法的性能与故障卫星的权值相关。本文中权值与仰角相关, 当故障卫星仰角较高时, 权值较大, 加权 RAIM 算法的性能优于传统算法; 反之, 当故障卫星仰角较低时, 权值较小, 加权 RAIM 算法的性能低于传统算法。实际应用中, 故障多发生在低仰角卫星, 此时加权 RAIM 算法不能及时检测告警, 这是该算法的一个缺点。然而, 需要特别指出的是, 对于低仰角卫星, 当两种 RAIM 算法都失效不能检测出故障时, 加权最小二乘算法的定位精度要优于传统算法, 这是采用加权最小二乘算法的优点。

参考文献

[1] KAPLAN E, HEGARTY C. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007: 257-268.

- [2] 葛君霞. 多模 GNSS 接收机 RAIM 技术研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2014: 3-5.
- [3] ICAO Annex10. Volume I Radio Navigation Aids[S]. Canada: ICAO, 2018: APP B-77.
- [4] RTCA DO-229D. Minimal operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment[S]. U.S.A: RTCA, Inc., 2006: 43.
- [5] KONG Longtao, WANG Wenli, ZHANG Shuhui. A simple and effective RAIM technique for multiple outliers[C]// European Group of Institutes of Navigation. Proceedings of the European Navigation Conference 2017(ENC 2017).Lausanne, Switzerland: European Group of Institutes of Navigation, 2017: 208-212.
- [6] 邓志鑫, 李隽, 刘孟江. 卫星导航 RAIM 多星故障检测与识别方法研究[J]. 导航定位学报, 2016, 4(1): 75-79.
DENG Zhixin, LI Jun, LIU Mengjiang. Research on multi satellite failure detection and recognition method of satellite navigation RAIM[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(1): 75-79.
- [7] 朱衍波, 张森艳, 张军. 加权 RAIM 可用性预测方法研究[J]. 遥测遥控, 2009, 30(1): 1-6.
ZHU Yanbo, ZHANG Miaoyan, ZHANG Jun. Research on weighted algorithm to predict RAIM availability[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(1): 1-6.
- [8] 王尔申, 杨福霞, 贾超颖, 等. 基于加权最小二乘法的 RAIM 算法研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(11): 7-10.
WANG Ershen, YANG Fuxia, JIA Chaoying. Research on RAIM algorithm based on weighted least-square method [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(11): 7-10.
- [9] 孙隽, 韦萍萍. GPS+BD 双模接收机自主完好性监测算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(7): 238-241.
SUN Jun, WEI Pingping. Research on RAIM algorithm of GPS+BD double model receiver [J]. Computer technology and development, 2013, 23(7): 238-241.
- [10] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 98-100.
- [11] MENG Fanchen, WANG Shan, ZHU Bocheng. GNSS reliability and positioning accuracy enhancement based on fast satellite selection algorithm and RAIM in multiconstellation [J]. IEEE A&E Systems Magazine. 2015: 14-27.

[作者简介]

孔龙涛 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航和组合导航。

王文丽 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星导航。

(本文编辑: 傅 杰)