DOI:10.14075/j.jgg.2024.09.442

文章编号:1671-5942(2025)10-1049-08

一种联合方差膨胀模型的接收机自主完好性监测算法

王 建[1] 王 乐[1,2,3] 黄观文[1,2,4] 王紫薇[1] 杨维聪[1]

1 长安大学地质工程与测绘学院,西安市雁塔路 126 号,710054
2 智能北斗陕西省高校工程研究中心,西安市雁塔路 126 号,710054
3 陕西省黄河科学研究院,西安市雁塔路 126 号,710054
4 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室,西安市雁塔路 126 号,710054

摘 要:针对传统接收机自主完好性监测(RAIM)算法存在故障识别异常及对微小故障不敏感的局限性,将稳健估计中的方差膨胀思想引入 RAIM 中,提出一种联合方差膨胀模型的 RAIM 算法,同时设计改进的故障处理流程,利用位置不确定性的用户保护水平进行完好性判定,最后进行多星座仿真实验与复杂环境实测实验。仿真实验结果表明,本文方法可以准确识别所添加的 30 m 显著故障,并且能有效应对添加的 5 m 微小故障对定位结果的影响,成功将定位误差水平恢复至未添加故障时的状态。真实场景实验结果表明,本文方法的水平与垂直方向可用性分别为 95.38%和 98.74%,相较于传统 RAIM 算法分别提升 11.63%和 5.06%;在定位精度方面,E、N、U 方向定位精度较传统 RAIM 算法分别提升 23.03%、11.68%和 26.79%。

关键词:接收机自主完好性监测;方差膨胀;故障处理;保护水平;可用性

中图分类号:P228 **文献标识码**:A

GNSS 信号固有的脆弱性使得 GNSS 观测值极易受到硬件故障和多项误差的影响[1-2],进而影响定位结果的可靠性。因此,有必要在接收机端进行完好性监测,即在保障 GNSS 定位精度的同时,通过概率风险对其所提供的信息的正确性进行度量[2]。

接收机自主完好性监测(RAIM)利用冗余观测量实现对故障的处理[3]。为提升完好性监测算法处理故障观测值的能力,王尔申等[4]根据卫星的伪距残差特性提出一种加权 RAIM 算法;陈兵等[5]从伪距残差分量之间的相关性方面提出一种基于奇异值分解的 RAIM 算法;舒宝等[6]从卫星特性斜率的角度提升故障检测性能。针对多故障处理,张倩倩等[7]基于独立分量分析提出一种卫星多故障探测和识别的算法;吴有龙等[8]提出一种基于惯性辅助的 GNSS 多粗差探测方法。为降低告警频率,赵昂等[9]提出基于验后方差重构用户保护水平的方法。针对微小故障,沙海等[10]提出历元累积的 RAIM 算法;黄国荣等[11]提出新息累积外推法以提升故障检验率。为保障 RAIM 算法的性能,Yang 等[12]提出一种基于多星座和稳健估计的 RAIM 算法,并使用真实发生故障的 GNSS 数据验证算法性能;Zhu 等[13]提出基于丹麦法的 RAIM 算法。

但上述研究未考虑最小二乘均衡误差的模型特性,在微小故障场景下存在缺陷:故障被分摊引发漏检或分配失衡引发误检。误检会恶化卫星的几何构型,漏检会导致故障被吸收而使定位解出现偏差[14]。本文将方差膨胀思想引入 RAIM 算法来改进故障处理流程,然后基于位置不确定性的用户保护水平进行完好性判定,最后使用多星座的仿真数据与复杂环境数据来验证算法的有效性。

1 基于最小二乘残差的 RAIM 算法

1.1 基本模型

在伪距单点定位模型中,观测方程可表示为:

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{L}$ 为伪距观测值与近似计算伪距差值向量;$\boldsymbol{A}$ 为 $n\times(m+3)$ 阶观测矩阵,n 为卫星个数,m 为星座个数;$\boldsymbol{x}$ 为解向量 $[\mathrm{d}x,\mathrm{d}y,\mathrm{d}z,\mathrm{d}t_1,\cdots,\mathrm{d}t_m]^{\mathrm{T}}$;

收稿日期:2024-09-20
项目来源:国家自然科学基金(42374025);陕西省重点研发计划(2021LLRH-06, 2022ZDLSF07-12, 2022KW-09)。
第一作者简介:王建,硕士生,主要研究方向为 GNSS 完好性监测,E-mail:jian@chd.edu.cn。
通讯作者:王乐,博士,高级工程师,主要研究方向为精密定位定轨与完好性分析,E-mail:rexlele@163.com。

$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为伪距噪声、未充分建模误差及潜在故障，称为量测误差。根据加权最小二乘原理，伪距残差 $\boldsymbol{v}$ 可表示为：

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{L}-\hat{\boldsymbol{L}}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{P}$ 为观测权阵；$\boldsymbol{R}$ 为平差因子。伪距残差对应的协方差矩阵 $\boldsymbol{Q}_v$ 可表示为：

$$\boldsymbol{Q}_v=\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}^{-1} \tag{3}$$

此时的验后单位权中误差 $\hat{\sigma}$ 可表示为：

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{v}/(n-m-3)} \tag{4}$$

1.2 基于残差的故障处理

假设在无故障情况下 $\varepsilon_i\sim N(0,1)$，则 $\hat{\sigma}^2\sim\chi^2(n-m-3)$。若当前历元观测值中存在故障，则 $\hat{\sigma}^2\sim\chi^2(n-m-3,\lambda)$，$\lambda$ 为非中心化偏移参数。故障处理算法中采用验后单位权中误差 $\hat{\sigma}$ 作为故障探测检验量，探测所需的检验阈值 σ_T 可表示为：

$$\sigma_T=\sqrt{T^2/(n-m-3)} \tag{5}$$

式中，T^2 为 $\chi^2(n-m-3)$ 分布的上侧分位数[6]。如果 $\hat{\sigma}>\sigma_T$，表明存在故障卫星，需要进行故障识别。

通过残差向量及协方差矩阵可构建如下识别检验统计量[15]：

$$T_i=\frac{|v_i|}{\sqrt{Q_{v_{ii}}}} \tag{6}$$

式中，v_i 为第 i 颗卫星的伪距残差；$Q_{v_{ii}}$ 为 v_i 对应的协方差阵元素。在无故障假设下，T_i 服从正态分布，在考虑误警率 P_{fa} 平均分配的情况下，故障识别检验阈值 T_d 可表示为：

$$2\times\int_{T_d}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2}}\mathrm{d}x=\frac{P_{\mathrm{fa}}}{n} \tag{7}$$

若 $T_i>T_d$，表明当前历元第 i 颗卫星观测值中存在故障。

2 联合方差膨胀模型的 RAIM 算法

2.1 故障处理算法改进

伪距残差的大小不仅取决于量测误差 $\boldsymbol{\varepsilon}$，还受平差因子 $\boldsymbol{R}$ 的影响。平差因子可反映量测误差通过卫星几何构型对伪距残差影响的程度。因此，式(2)可详细表示为：

$$\boldsymbol{v}_0+\boldsymbol{v}_1+\boldsymbol{v}'=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{\varepsilon}_0+\boldsymbol{\varepsilon}_1+\boldsymbol{\varepsilon}') \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{v}_0$ 为伪距噪声 $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ 对应的残差；$\boldsymbol{v}_1$ 为未充分建模误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 对应的残差；$\boldsymbol{v}'$ 为潜在故障 $\boldsymbol{\varepsilon}'$ 对应的残差，只有当第 i 颗卫星存在故障时才有 $\varepsilon_i'\neq0$。为更加简要清晰地表述故障与残差之间的关系，本文不考虑未充分建模误差的影响，即 $\boldsymbol{\varepsilon}_1=0$，$\boldsymbol{v}_1=0$。

由式(8)可知，卫星 i 的观测故障 ε_i' 将会对所有可视卫星的观测值残差噪声产生影响，具体公式如下：

$$v_j'=r_{ji}\varepsilon_i' \tag{9}$$

式中，ε_i' 为第 i 颗卫星体现在观测值上的故障；v_j' 为 ε_i' 对第 j 颗卫星造成的残差污染量；r_{ji} 表示 $\boldsymbol{R}$ 中第 j 行第 i 列的元素。可以看出，故障将污染所有残差，污染程度取决于平差因子。正是这种均衡故障的作用，使得遇到非显著故障时，易出现漏检或可探测但不可识别事件。一般情况下 $r_{ji}<r_{ii}(j\neq i)$，ε_i' 通过 r_{ii} 作用得到的 v_i' 比其他 $v_j'(j\neq i)$ 大，此时 $\max\{|v_i'|\}$，$i=1,2,\cdots,n$，对应的 T_i 通常也最大[16]。本文在剔除不可识别事件中 $\max\{T_i\}$ 的同时，引入方差膨胀模型。

方差膨胀模型将传统 RAIM 算法中接受与拒绝的二元选择扩展为完全接受、适当接受及拒绝，这不仅可提供一种应对漏检情况的有效手段，同时也能避免因盲目剔除卫星而对卫星星座构型产生不利影响。本文采用 IGG 选权迭代法构造随机模型，具体表达式为[17-18]：

$$\bar{p}_i=w_ip_i=\begin{cases}p_i, & |\hat{v}_i|\leqslant k_0\sigma\\ p_i\dfrac{k\sigma}{|\bar{v}_i|}, & k_0\sigma<|\bar{v}_i|\leqslant k_1\sigma\\ 0, & |\bar{v}_i|>k_1\sigma\end{cases} \tag{10}$$

式中，i 为第 i 颗卫星；$\bar{p}_i$ 为经方差膨胀后的权重；w_i 为方差膨胀因子；p_i 为先验权重；$\bar{v}_i$ 为标准化残差；$\bar{v}_i=v_i/\sigma_{v_i}$，$v_i$ 为伪距残差，σ_{v_i} 为 v_i 的标准差；k、k_0 和 k_1 为权函数的调和系数，结合导航误差特性和已有文献经验，本文设置 $k=k_0=1.0$，$k_1=2.5$。具体算法流程见图 1。

2.2 基于位置不确定性的用户保护水平

用户保护水平(PL)为给定完好性风险下的定位误差(PE)上限，当 PL 超出预设的告警门限(AL)时，则判定系统不可用，并向用户告警。本文通过精度因子变化法($\delta\mathrm{DOP}_{\max}$)计算先验保护水平，并基于位置不确定性计算用户后验保护水平[9,19]。将地心地固坐标系下位置参数的方差-协方差矩阵 $\boldsymbol{Q}_{XYZ}$ 转换为站心坐标系下的 $\boldsymbol{Q}_{\mathrm{ENU}}$ 矩阵：

$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{ENU}}=\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}_{XYZ}\boldsymbol{C} \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{C}$ 为坐标转换矩阵[9]。基于位置不确定性的保护水平可表示为：

$$\mathrm{HPL}=K_h\sqrt{(q_{\mathrm{E}}^2+q_{\mathrm{N}}^2)} \tag{12}$$

$$\mathrm{VPL}=K_v\sqrt{q_{\mathrm{U}}^2} \tag{13}$$

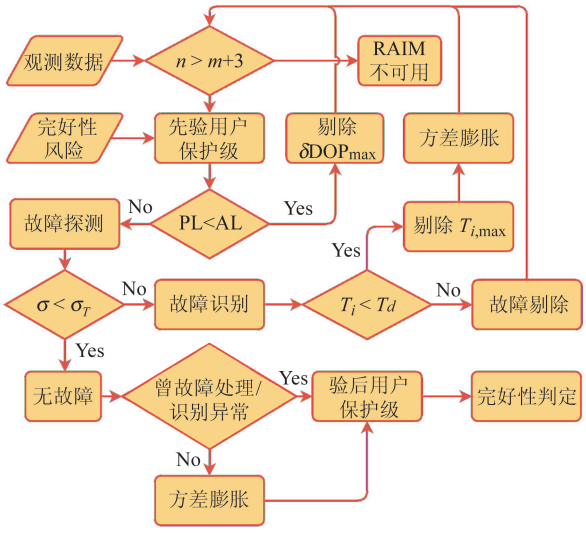


图 1　联合方差膨胀模型的接收机自主完好性监测算法流程

Fig. 1　Flow chart of receiver autonomous integrity monitoring algorithm based on variance inflation model

式中，HPL、VPL 分别为水平与垂直方向的保护水平；K_h、K_v 分别表示水平与垂直方向的漏检膨胀因子[20]，表达式为：

$$K_h = \mathrm{RayleighCDF}^{-1}(1-P_{\mathrm{md}}) \tag{14}$$

$$K_v = \Phi^{-1}\left(1-\frac{P_{\mathrm{md}}}{2}\right) \tag{15}$$

式中，$\mathrm{RayleighCDF}^{-1}(\cdot)$ 表示逆瑞利累积分布函数；$\Phi^{-1}(\cdot)$ 表示逆标准正态累积分布函数；P_{md} 为漏警率。

3　实验与分析

3.1　仿真实验

为验证本文方法的可行性，设计以下 4 种方案，其中方案 1 和方案 2 为对照方案。

方案 1：含仿真故障情况下未进行故障处理的加权最小二乘解算；

方案 2：无仿真故障情况下的加权最小二乘解算；

方案 3：传统接收机自主完好性监测算法；

方案 4：联合方差膨胀模型的接收机自主完好性监测算法。

实验采用榆林市 JX02 测站 2024 年 doy99 真实数据，并向 17：30－18：30 时段中的 C05、G10 卫星分别添加 30 m 与 5 m 的伪距偏差进行 C05 单故障、C05 和 G10 双故障仿真实验。处理策略为：GPS/BDS 双系统，卫星截止高度角为 10°；误警率 P_{fa} 取 0.05，漏警率 P_{md} 取 10^{-5}，告警门限 AL 取 40 m。JX02 测站在观测历元内 GPS/BDS 卫星数均大于 7 颗，满足双系统下接收机自主完好性故障探测与识别的基本条件。图 2 为 JX02 测站单故障下的定位误差序列。

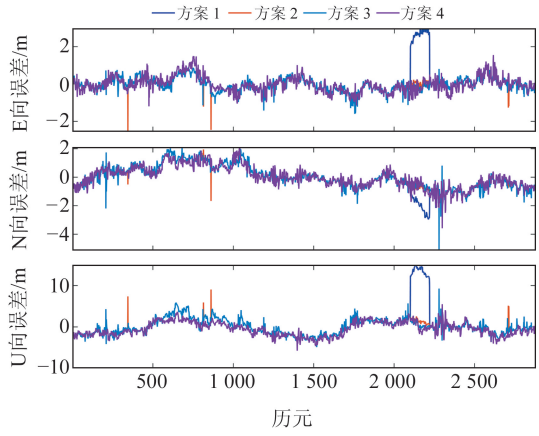


图 2　JX02 测站单故障定位误差

Fig. 2　Single-fault positioning error at JX02 station

由图 2 可知，方案 1 在故障仿真期间定位误差出现了较大的阶跃偏差，其中 E 和 U 方向尤为明显；随着卫星构型的变化，C05 故障对 N 方向的影响也逐渐变得显著。表 1 为完好性监测性能统计，结合图 2 可知，方案 3、4 均能有效处理 C05 故障卫星，并将定位误差水平恢复至无添加故障时的状态，且方案 4 能较好地解决定位误差的“跳点”问题。在定位精度当面，方案 4 较方案 3 表现更优，3D 定位中误差为 1.84 m；在保护水平方面，方案 4 的 HPL/VPL 分别为 9.32 m 和 15.64 m，相较于方案 3 略显保守。

表 1　单故障仿真实验完好性监测性能统计

Tab. 1　Statistics of integrity monitoring performance in single-fault simulation experiments

	RMSE/m			PL/m		
	E	N	U	3D	HPL	VPL
方案 1	0.64	0.89	3.26	3.44	—	—
方案 2	0.34	0.79	1.82	2.01	—	—
方案 3	0.34	0.79	1.81	2.00	8.75	14.35
方案 4	0.41	0.74	1.63	1.84	9.32	15.64

斯坦福图在完好性监测领域常被用来表示系统的完好性性能，根据 PE、PL 与 AL 三者之间的大小关系，可将斯坦福图划分为正常运行、不可用、误导信息（MI）、危险误导信息（HMI）4 类。图 3 为 JX02 测站单故障下的完好性斯坦福图，可以看出，方案 3、4 均能达到 100%的可用性。

图 4 为 JX02 测站双故障下的定位误差序列。由于卫星之间的相互耦合，方案 1 的定位偏差并不是随着故障的增加而增加，而是一种更加复杂的影响。结合 2 种算法在 C05 单故障实验中的表现，传统的方案 3 在双故障实验中并未消除 G10 卫星 5 m 的微小故障，而方案 4 则可以很好地解决微小故障对定位结果的影响。

图 5 为 JX02 测站双故障完好性斯坦福图，

表 2 为相应的完好性监测性能统计表。由图 5 可知,尽管方案 3、4 在双故障下均表现为 100%的可用性,但方案 3 监测结果总体呈现“短宽”形态,与表 2 中较大的定位误差共同说明传统 RAIM 算法在处理微小故障时存在不足。方案 4 相对于无故障的方案 2 精度略有提升,主要得益于引入的方差膨胀模型通过重加权对可疑观测数据进行降权,进而解决了异常历元中的跳点问题。此外,双故障下方案 4 的 HPL、VPL 分别为 8.94 m、15.06 m,相较于方案 3 分别高5.21%、6.42%,造成方案 4 保护水平保守的原因主要为可疑数据的降权使用。

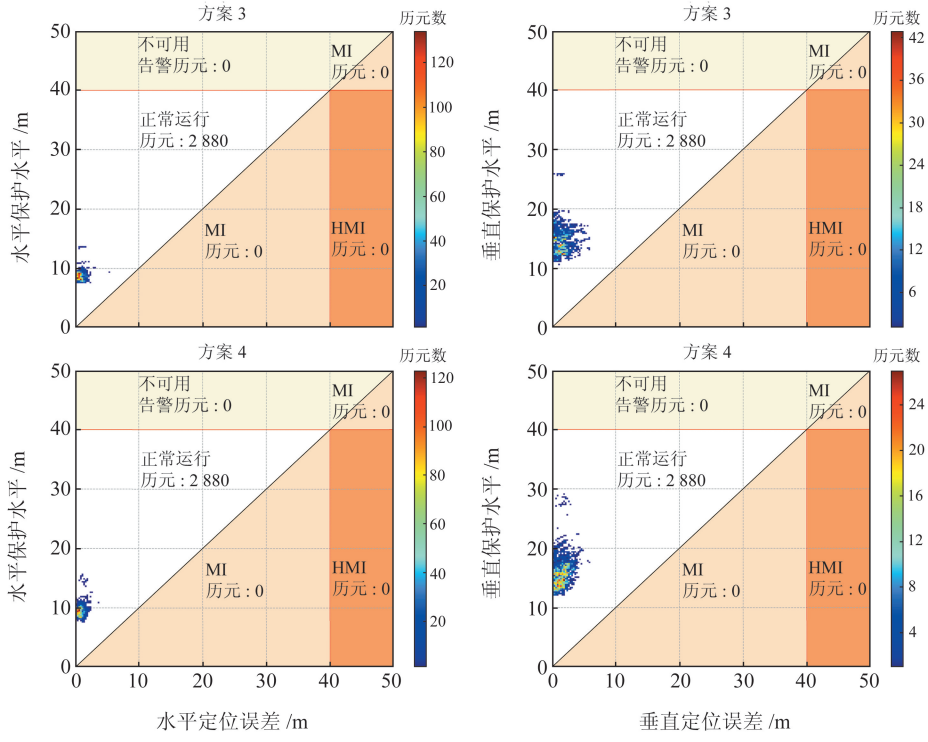


图 3 JX02 测站单故障完好性监测斯坦福图

Fig. 3 Stanford diagram of single-fault integrity monitoring at JX02 station

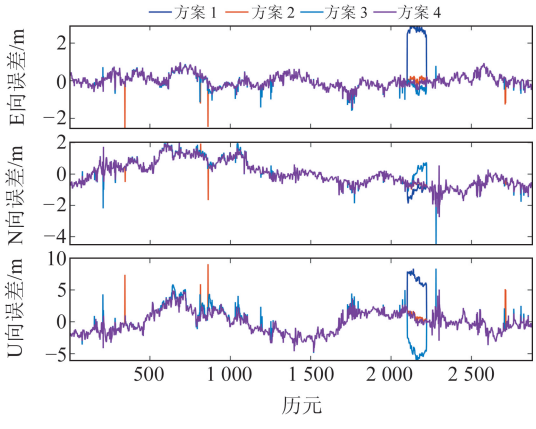


图 4 JX02 测站双故障定位误差

Fig. 4 Dual-fault positioning error at JX02 station

表 2 双故障仿真实验完好性监测性能统计

Tab. 2 Statistics of integrity monitoring performance in dual-fault simulation experiments

	RMSE/m			PL/m		
	E	N	U	3D	HPL	VPL
方案 1	0.65	0.81	2.29	2.52	—	—
方案 2	0.34	0.79	1.82	2.01	—	—
方案 3	0.34	0.79	2.04	2.21	8.50	14.15
方案 4	0.32	0.77	1.68	1.88	8.94	15.06

3.2 遮蔽环境下的实测实验

为研究本文算法在复杂遮蔽环境下的真实性能,选择位于泸定县的 C3 测站(图 6(a))进行实测实验,实验策略与仿真实验相同。C3 测站位于多山峡谷的边坡之上,地势陡峭,周围植被茂盛,加之峡谷底部的大渡河加剧了信号的遮挡和反射,从而增加了定位误差和不确定性。图 6(b)为 C3 测站的可见卫星数,可以看出,可见卫星数在复杂环境下波动频繁,尤其在第 364 和 398 个历元时降到 5 颗,此外满足双系统下故障探测基本条件的历元数为 2 768 个。

在故障处理流程中,理想情况是经过处理后当前历元无论是在故障探测还是在故障识别中均处于无故障状态。但传统 RAIM 算法无法处理故障识别异常的情况,在无法识别出故障卫星时直接判定为不可用,体现在故障探测检验量上则表现为高于故障探测阈值。图 7 为 2 种算法经过故障处理后的故障探测检验量,可以看出,经过故障处理后,2 种算法的故障探测检验量的总体趋势一致,但方案 3 的故障探测检验量明显高于方案 4,且在 47 个

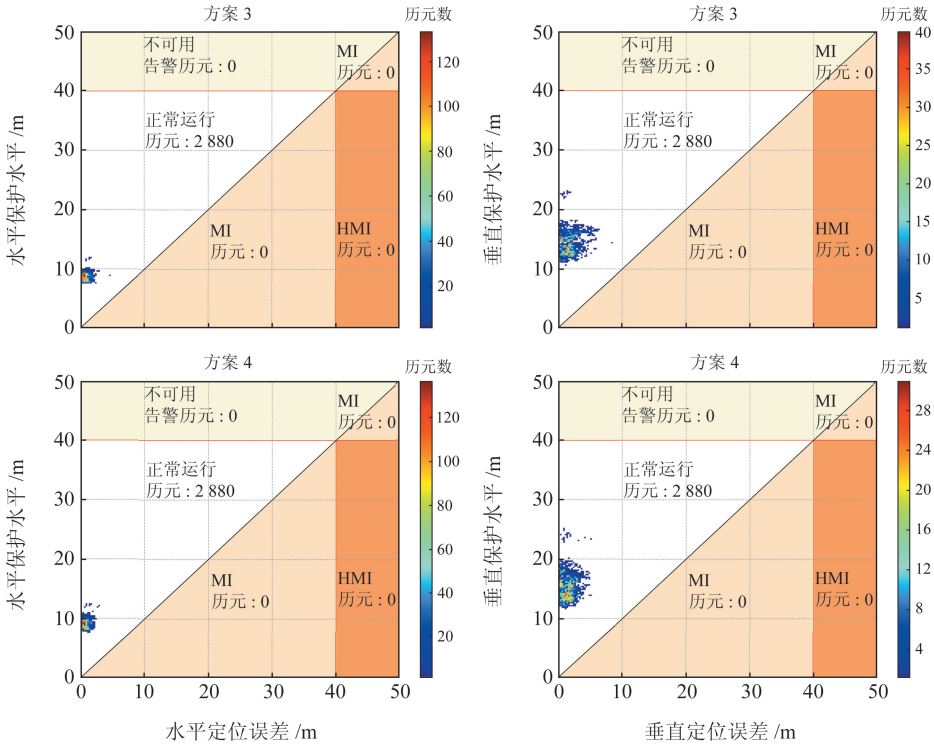
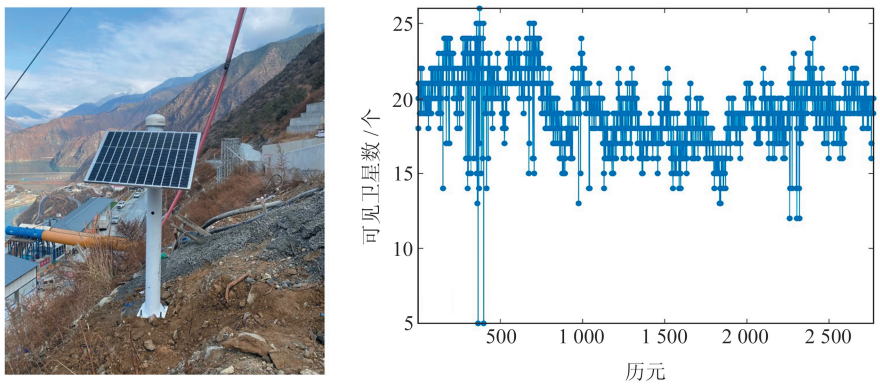


图 5　JX02 测站双故障完好性监测斯坦福图

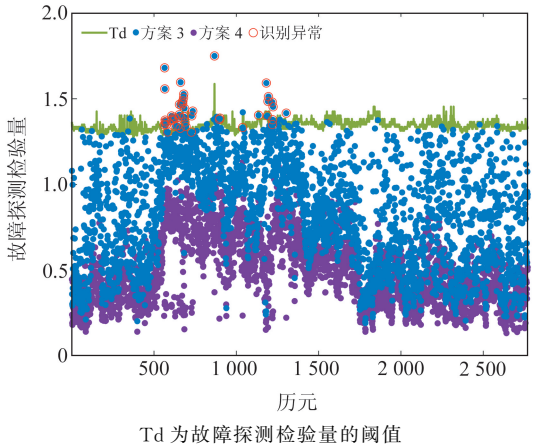
Fig. 5　Stanford diagram of dual-fault integrity monitoring at JX02 station



(a) 测站观测环境　　(b) 可见卫星数

图 6　C3 测站观测环境和可见卫星数

Fig. 6　Observation environment and number of visible satellites at C3 station



Td 为故障探测检验量的阈值

图 7　C3 测站经过故障处理后的故障探测检验量

Fig. 7　Fault detection test statistics after fault handling at C3 station

观测历元中存在故障卫星识别异常的现象。

图 8 为 C3 测站定位误差序列,可以看出,未进行故障处理的方案 2 存在大量“跳点”,方案 3、4 的定位误差较小且相对接近,表明这 2 种算法在处理数据异常方面具有良好的性能。方案 2 的误差波动最大,尤其在 E、U 方向,多次出现大幅的误差波动;方案 3、4 的误差波动较小,误差曲线较为平滑。从误差范围和波动性来看,方案 4 在 3 个方向上的表现明显优于方案 3,尤其在 U 方向上更为显著,表明方案 4 在故障处理时更加稳健。

表 3 为 3 种方案 E、N、U 及 3D 方向的内外符合精度。可以看出,方案 3、4 均能有效剔除观测数据中的故障,从而提升定位精度,2 种方案 C3 测站

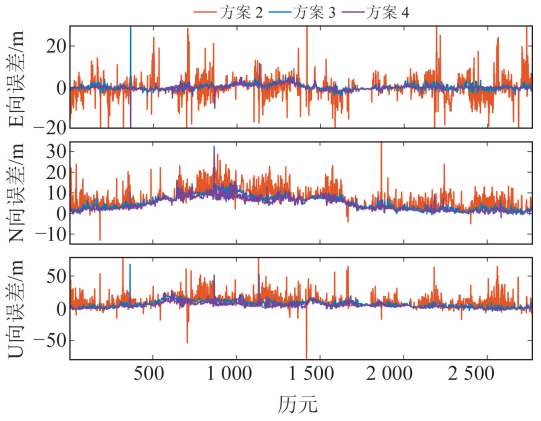


图 8 C3 测站定位误差序列

Fig. 8 Positioning error time series at C3 station

3D 方向的标准差与均方根误差分别为 6.55 m、10.45 m 与 5.60 m、8.23 m，相较于方案 2 分别提升43.68%、37.54%与51.85%、50.81%。此外，方案 4 在 E、N、U 方向的均方根误差相较于方案 2 分别提升 74.34%、34.11%、55.91%，相较于方案 3 分别提升 23.03%、11.68%、26.79%。

表 3 C3 测站定位误差统计

Tab. 3 Statistics of positioning errors at C3 station

	STD/m				RMSE/m			
	E	N	U	3D	E	N	U	3D
方案 2	4.56	4.61	9.66	11.63	4.56	8.15	13.88	16.73
方案 3	1.51	3.42	5.38	6.55	1.52	6.08	8.36	10.45
方案 4	1.17	3.20	4.45	5.60	1.17	5.37	6.12	8.23

图 9 为 C3 测站 PL、PE 经验累积概率分布。从图 9(a)可以看出，方案 3、4 均在较低保护水平下达到高累积概率；方案 4 给出的用户保护水平略显保守，这与仿真实验中的结论一致。由图 9(b)和 9(c)可知，在相同的累积概率下，方案 4 具有更小的定位误差，在垂直方向上更为明显。

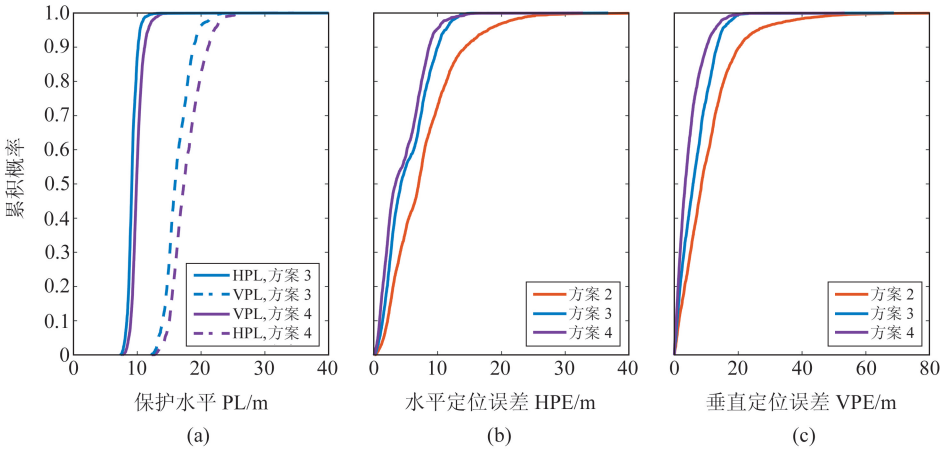


图 9 C3 测站 PL、PE 经验累积概率分布

Fig. 9 Empirical cumulative probability distribution of PL and PE at C3 station

略显保守的保护水平并非方案 4 可用性提升的主要原因，这在图 10 中有很好的体现。在遮蔽环境下，方案 3 监测结果的“短宽”形态更加明显，方案 4 中 10.01 m 与 17.71 m 的保护水平与方案 3 的保护水平也基本处于同一区间。表 4 为包括可见卫星数不足和故障识别异常在内的共计 2 770个历元的统计信息。可以看出，方案 4 的水平与垂直方向可用性分别为 95.38%、98.74%，相较于方案 3 分别提升 11.63%、5.06%，大幅降低了误导事件发生的概率，解决了方案 3 中因识别异常造成系统不可用的问题；但在垂直方向上存在将识别异常的历元处理后变成危险误导事件的现象，这可能是由于该历元中存在故障的观测数据占据主导地位，从而导致故障处理失真。

表 4 C3 测站完好性监测性能统计

Tab. 4 Statistics of integrity monitoring performance at C3 station

	可用性/%		不可用历元数		MI 历元数		HMI 历元数		平均 PL/m	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
方案 3	83.75	93.68	49	49	401	126	0	0	9.22	16.27
方案 4	95.38	98.74	2	2	126	31	0	2	10.01	17.71

4 结 语

针对传统 RAIM 算法面对非显著故障时无法探测或识别具体故障，从而导致定位结果产生偏差和不可用的问题，提出一种联合方差膨胀模型的接收机自主完好性监测算法。通过仿真故障数据与复杂环境实测数据进行实验，结果表明，新算法通过方差膨胀模型对量测值进行分类，能克服因故障识别异常造成的不可用问题；对故障处理流程进行改进能够较好地解决无法探测的微小

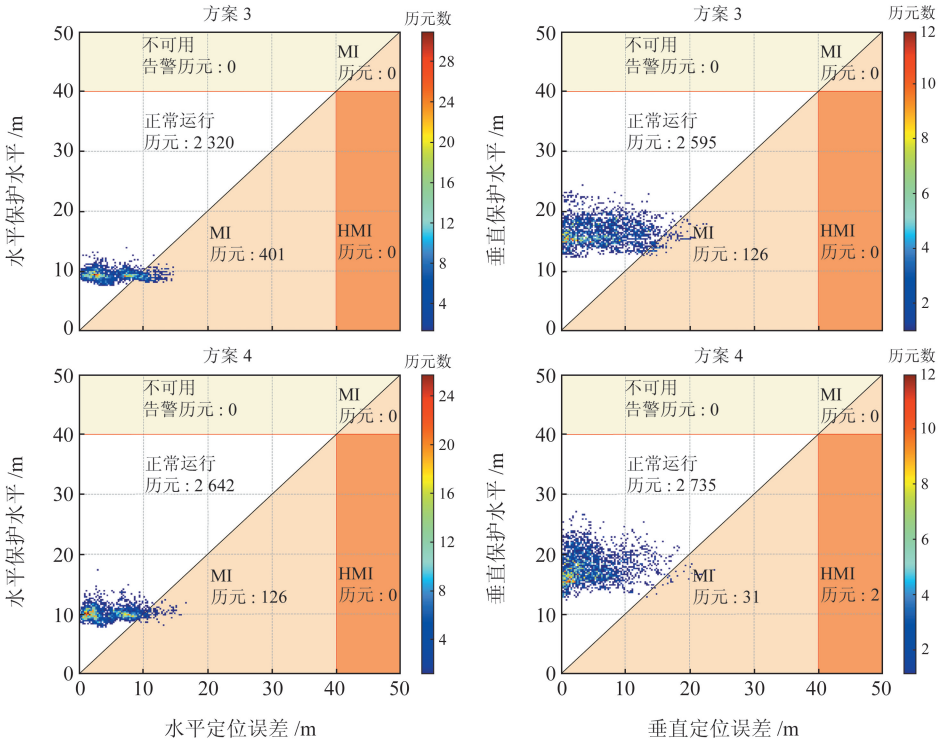


图 10　C3 测站完好性监测斯坦福图

Fig. 10　Stanford diagram of integrity monitoring at C3 station

故障对定位精度的影响;结合基于位置不确定性的用户保护水平能够有效提升用户的可用性并降低误导事件发生的概率。本文方法较传统 RAIM 算法更为有效,可为接收机自主完好性监测提供一种新思路。

参考文献

[1] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510(Yang Yuanxi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(5): 505-510)

[2] 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 Assisted Performance Enhancement Technique[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013)

[3] Angrisano A, Gaglione S, Crocetto N, et al. PANG-NAV: A Tool for Processing GNSS Measurements in SPP, Including RAIM Functionality[J]. GPS Solutions, 2019, 24(1)

[4] 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, et al. Research on RAIM Algorithm Based on Weighted Least-Square Method[J]. Electronics Optics and Control, 2017, 24(11): 7-10)

[5] 陈兵, 杨志坤, 贾睿, 等. 基于奇异值分解的接收机自主完好性监测算法[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3): 89-95(Chen Bing, Yang Zhikun, Jia Rui, et al. Receiver Autonomous Integrity Monitoring Algorithm Based on Singular Value Decomposition[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(3): 89-95)

[6] 舒宝, 李一, 王利, 等. 基于卫星特征斜率加权的 RAIM 性能分析[C]. 第十三届中国卫星导航年会, 北京, 2022(Shu Bao, Li Yi, Wang Li, et al. RAIM Performance Analysis Based on the Satellite Characteristic Slope Weighted[C]. The 13th China Satellite Navigation Conference, Beijing, 2022)

[7] 张倩倩, 归庆明, 宫铁松. 卫星多故障探测和识别的独立分量分析法[J]. 测绘学报, 2017, 46(6): 698-705(Zhang Qianqian, Gui Qingming, Gong Yisong. Multiple Satellite Faults Detection and Identification Based on the Independent Component Analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(6): 698-705)

[8] 吴有龙, 陈帅, 徐楠, 等. 城市环境下惯性辅助的 GNSS 多粗差探测方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(12): 1269-1274(Wu Youlong, Chen Shuai, Xu Nan, et al. Inertial-Aided GNSS Multiple Gross Errors Detection Method in Urban Environment[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(12): 1269-1274)

[9] 赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. 一种使用抗差估计的保护水平重构方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2021, 46(1): 96-102(Zhao Ang, Yang Yuanxi, Xu Yangyin, et al. A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(1): 96-102)

[10] 沙海, 黄新明, 刘文祥, 等. 基于非相干积累的微小伪距偏差 RAIM 方法研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 708-712(Sha Hai, Huang Xinming, Liu Wenxiang, et al. Research on the RAIM Method Based on Non-Coherent Accumulation for Tiny Pseudo-Range Bias[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(6): 708-712)

[11] 黄国荣，彭兴钊，郭创，等. 基于GPS/SINS紧耦合系统的新息外推法[J]. 计算机应用，2011，31(8)：2289-2292(Huang Guorong，Peng Xingzhao，Guo Chuang，et al. Innovation Extrapolation Method for GPS/SINS Tightly Coupled System[J]. Journal of Computer Applications，2011，31(8)：2289-2292)

[12] Yang Y X，Xu J Y. GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring(RAIM) Algorithm Based on Robust Estimation [J]. Geodesy and Geodynamics，2016，7(2)：117-123

[13] Zhu N，Betaille D，Marais J，et al. GNSS Integrity Monitoring Schemes for Terrestrial Applications in Harsh Signal Environments[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine，2020，12(3)：81-91

[14] Wang L Y，Li Z Q，Yu F B. Jackknife Method for the Location of Gross Errors in Weighted Total Least Squares[J]. Communications in Statistics-Simulation and Computation，2022，51(4)：1946-1966

[15] Zhu N，Marais J，Bétaille D，et al. GNSS Position Integrity in Urban Environments：A Review of Literature[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2018，19(9)：2762-2778

[16] Kuusniemi H. User-Level Reliability and Quality Monitoring in Satellite-Based Personal Navigation[D]. Tampere：Tampere University of Technology，2005

[17] 周江文. 经典误差理论与抗差估计[J]. 测绘学报，1989，18(2)：115-120(Zhou Jiangwen. Classical Theory of Errors and Robust Estimation[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica，1989，18(2)：115-120)

[18] 王乐洋，陈汉清. 地壳形变分析的抗差最小二乘配置迭代解法[J]. 地球物理学报，2017，60(8)：3062-3071(Wang Leyang，Chen Hanqing. Analysis of Crustal Deformation Based on Iterative Solutions of Robust Least Squares Collocation[J]. Chinese Journal of Geophysics，2017，60(8)：3062-3071)

[19] Feng S J，Jokinen A，Milner C，et al. New Methods for Dual Constellation Single Receiver Positioning and Integrity Monitoring[J]. Geo-Spatial Information Science，2013，16(3)：201-209

[20] Zabalegui P，De Miguel G，Pérez A，et al. A Review of the Evolution of the Integrity Methods Applied in GNSS[J]. IEEE Access，2020，8：45813-45824

A Receiver Autonomous Integrity Monitoring Algorithm Based on Variance Inflation Model

WANG Jian[1] *WANG Le*[1,2,3] *HUANG Guanwen*[1,2,4] *WANG Ziwei*[1] *YANG Weicong*[1]

1 School of Geological Engineering and Geomatics，Chang'an University，126 Yanta Road，Xi'an 710054，China

2 Engineering Research Center of Intelligent BDS，Universities of Shaanxi Province，126 Yanta Road，Xi'an 710054，China

3 Academy of Yellow River Sciences of Shaanxi Province，126 Yanta Road，Xi'an 710054，China

4 Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention，MNR，126 Yanta Road，Xi'an 710054，China

Abstract：To address the limitations of traditional RAIM algorithms，including abnormal fault detection and insensitivity to small faults，we introduce the concept of variance inflation from robust estimation into receiver autonomous integrity monitoring(RAIM). A RAIM algorithm combing variance inflation model is proposed，with an improved fault handling process. Integrity determination is performed using the user's protection level based on positioning uncertainty，and multi-constellation simulations and real-world tests in complex environments are conducted. The simulation results show that the proposed method can accurately detect a significant fault of 30 meters and effectively mitigate the impact of a small 5-meter fault on positioning results，successfully restoring the positioning error level to the state before the fault is introduced. The real-world test results show that the proposed method achieves horizontal and vertical availability rates of 95.38% and 98.74%，respectively，which are 11.63% and 5.06% higher than traditional RAIM algorithms. In terms of positioning accuracy，compared to traditional RAIM algorithms，the proposed method improves precision in E，N，U directions by 23.03%，11.68%，and 26.79%，respectively.

Key words：receiver autonomous integrity monitoring(RAIM)；variance inflation；fault handling；protection level；availability

Foundation support：National Natural Science Foundation of China，No. 42374025；Key Research and Development Program of Shaanxi Province，No. 2021LLRH-06，2022ZDLSF07-12，2022KW-09.

About the first author：WANG Jian，postgraduate，majors in GNSS integrity monitoring，E-mail：jian@chd.edu.cn.

Corresponding author：WANG Le，PhD，senior engineer，majors in precise positioning and orbit determination and integrity analysis，E-mail：rexlele@163.com.