

# 基于完好性风险估计减少 RAIM 误警率方法

杨传森<sup>1,5</sup>, 徐肖豪<sup>2</sup>, 刘瑞华<sup>3</sup>, 赵鸿盛<sup>4</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国民航大学空管学院, 天津 300300;  
3. 中国民航大学电子信息工程学院, 天津 300300; 4. 北京航空航天大学电子信息工程学院,  
北京 100191; 5. 金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169)

**摘要:** 为了提供更精确的完好性服务, 提出一种新型降低用户端自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)误警率的方法。给出了定位误差与残差向量关系的新解释, 基于最大定位误差完好性风险算法, 提出了扩展正常检测区方法并进行故障检测, 通过最大定位偏差保护限值提供故障检测的完好性保证, 满足航段漏警率要求。最后, 设计一种新的故障检测与故障识别准则, 达到在不降低漏检率的条件下, 减少误警率。算例表明该方法简单易行、有效。

**关键词:** 用户端自主完好性监测; 误警率; 漏检率; 最小可测偏差; 总体最小二乘法

**中图分类号:** P 228.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.12.16

## Method for reducing probabilities of false detection of RAIM based on estimation of integrity risk

YANG Chuan-sen<sup>1,5</sup>, XU Xiao-hao<sup>2</sup>, LIU Rui-hua<sup>3</sup>, ZHAO Hong-sheng<sup>4</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
3. College of Electronic Information Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;  
4. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;  
5. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** In order to provide the accurate integrity service, a novel method of reducing the probability of false detection based on receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) algorithm is proposed. A new explanation in relationship between the position bias and the residual is proposed. Then the method of expanding the normal detection zone based on the maximal positioning bias integrity risk algorithm is proposed for fault detection. In addition to meet the probabilities of missed detection for the corresponding flight phases, the maximal position error protection limit provides the integrity guarantee for fault detection. Moreover, without reducing the probability of missed detection, a new fault detection and fault identification criterion is designed to decrease the probability of false detection. Simulation results show that the proposed method is simple, feasible and effective.

**Keywords:** receiver autonomous integrity monitoring; probability of false detection; probability of missed detection; minimal detectable bias; total least square method

## 0 引言

用户端自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)是重要的研究方向<sup>[1]</sup>, 可以实现快速的故障检测与识别功能, 提供民用航空安全保证。RAIM 算法研究已有了成熟的结论, 但依然存在误警率与漏检率相

矛盾且两者之间难以权衡的问题, 误警率研究鲜见报道。

RAIM 算法使用 Neyman-Pearson 准则(给定误警率, 使漏检率最小)来确定故障检测阈值, 这种方法虽然可以使漏检率最小, 却不能完全消除漏检率, 如果降低阈值来减少漏警率, 就增加了误警率。无论采取何种故障检测方法, RAIM 都涉及到阈值选取, 总是会存在误警率和漏检率之

收稿日期: 2011-12-06; 修回日期: 2012-05-04。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA12Z313)资助课题

作者简介: 杨传森(1968-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为卫星导航自主完好性监测。E-mail: winycs@163.com

间难以权衡的问题。因此,绝大多数关于阈值选取方法研究,或局限于定位域,告警率阈值被用于 RAIM 可用性评价<sup>[2-3]</sup>;或局限于测量域,误警率阈值被用作故障检测的临界值;或着重于固定阈值和可变阈值之间的比较<sup>[4-5]</sup>,以及基于先验信息的阈值优化<sup>[6]</sup>,很难将其推广到多故障目标问题。在诸如涉及生命与安全(在包含垂直引导的航段上)等应用领域,对漏检率与误警率都有着严苛的要求,由于多个故障卫星出现概率的增加,这些情形都会影响甚至导致 RAIM 性能降级。目前,解决此类问题的研究罕见报道。文献[7]提出了基于最大定位误差完好性风险算法具有一定的应用前景。文献[8]研究了利用机载气压高度表来增强 RAIM 算法的可用性,降低漏检率,提高故障检测灵敏性,但只适合于单故障目标。文献[9]提出了基于最小二乘残差 RAIM 改进算法,综合考虑了卫星几何分布以及漏检率等因素,降低了漏检率,但没有考虑环境噪声较大的情况。针对存在误警率和漏检率矛盾的问题,文献[10]提出了概率极限状态算法实现故障检测及其完好性保证,降低了误警率,该方法显然不同于传统 RAIM 的定值分析算法。针对伪距偏差可能导致检测量超限而实际定位误差不超限的情形,文献[11]提出了一种减少误警的方法,这种方法减少误警的能力和伪距偏差有关。考虑观测噪声所引起的观测数据矩阵和观测量的扰动对解算精度的影响,同时考虑截断误差对解算精度的影响,文献[12]基于总体最小二乘残差在 RAIM 应用进行了深入地探讨。

为了在不降低漏检率的前提下减小误警率,须对现有 RAIM 算法进行改进和更新。本文首先给出了定位误差与残差向量关系的新解释;其次,基于最大定位误差完好性风险算法,扩展正常检测区并进行故障检测,通过最大定位误差保护限值提供故障检测的完好性保证,满足航段漏警率要求。最后,设计一种新的故障检测与故障识别准则,达到在不降低漏检率的条件下,减少误警率。算例表明,该方法是简单易行而且有效的。

## 1 基本原理

### 1.1 RAIM 模型

即使不存在故障卫星,环境噪声实际上也可能引起观测数据异常,环境噪声及其他偏差等都会影响观测数据矩阵,最终可能导致存在故障卫星的误判和漏判。当 GPS 作为唯一导航手段时,区域导航(regional navigation, RNAV)进近(在包含垂直引导的航段上)对导航性能要求更加严格,RNAV 进近引导能力由告警限值来限定导航系统误差的最大值。RAIM 算法应该考虑观测噪声和截断误差对解算精度的影响。

基于总体最小二乘残差法的量测模型定义为<sup>[12]</sup>:存在  $\Delta \mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$ ,  $\Delta \mathbf{H} \in \mathbf{R}^{m \times 4}$ ,使得  $\min \|(\Delta \mathbf{H}, \Delta \mathbf{b})\|_F$ ,  $(\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b}) \in \text{Range}(\mathbf{H} + \Delta \mathbf{H})$ ,其中  $(\Delta \mathbf{H} | \Delta \mathbf{b}) \in \mathbf{R}^{m \times 5}$ ,  $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{m \times 4}$  为数据矩阵,  $\Delta \mathbf{H}$  是  $\mathbf{H}$  的微小扰动,视为偏移矩阵;  $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$  为  $m$  维残差矢量,包含观测噪声矢量,  $\mathbf{b}$  服从正态分布  $N(\mu_b, \mathbf{R}_b)$ ,  $\Delta \mathbf{b}$  是其扰动量。  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^4$  是四维状态矢量。有

$$(\mathbf{H} + \Delta \mathbf{H})\mathbf{x} = \mathbf{b} + \Delta \mathbf{b} \quad (1)$$

将增广矩阵进行奇异值分解,如  $(\mathbf{H}, \mathbf{b}) = \mathbf{U}_z \Sigma_z \mathbf{V}_z^T$ ,其中  $\mathbf{U}_z = (\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_5)$ ,  $\mathbf{U}_1 \in \mathbf{R}^{m \times 4}$ ,  $\mathbf{U}_5 \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ ,  $\mathbf{U}_z^T \mathbf{U}_z = \mathbf{I}_m$ ;  $\Sigma_z = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_5)$ ,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_4 > \sigma_5$ ;  $\mathbf{V}_z^T \mathbf{V}_z = \mathbf{I}_5$ ,  $\mathbf{V}_{11} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ ,

$$\mathbf{V}_{15} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}, \mathbf{V}_{51} \in \mathbf{R}^{1 \times 4}, \mathbf{V}_{55} \in \mathbf{R}^1, \mathbf{V}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11} & \mathbf{V}_{15} \\ \mathbf{V}_{51} & \mathbf{V}_{55} \end{bmatrix}。总体最$$

小二乘(total least square, TLS)法残差集解为

$$\mathbf{x}_{\text{TLS}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} - \sigma_5^2 \mathbf{I}_4)^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{b} \quad (2a)$$

$$\mathbf{x}_{\text{TLS}} = -\mathbf{V}_{15} / \mathbf{V}_{55} \quad (2b)$$

总体最小二乘估算解  $\hat{\mathbf{x}}_{\text{TLS}}$  服从正态分布  $N(\mu_{\hat{\mathbf{x}}}, \mathbf{R}_{\hat{\mathbf{x}}})$ , 且  $\Delta \mathbf{x}_{\text{TLS}}$  服从正态分布  $N(\mu_{\Delta \hat{\mathbf{x}}}, \mathbf{R}_{\Delta \hat{\mathbf{x}}})$ , 其中  $\mu_{\Delta \hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} - \sigma_5^2 \mathbf{I}_4)^{-1} \mathbf{H}^T \mu_b$ ,  $\mathbf{R}_{\Delta \hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{R}_b (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 。

伪距残差向量  $\mathbf{R}_{\text{TLS}}$  与其伪距残差平方和(square sum of error, SSE)  $\text{SSE}_{\text{TLS}}$  分别为

$$\mathbf{R}_{\text{TLS}} = \Delta \mathbf{b} - \Delta \mathbf{H} \mathbf{x}_{\text{TLS}} = -\sigma_5 \mathbf{U}_5 / \mathbf{V}_{55} \quad (3)$$

$$\text{SSE}_{\text{TLS}} = \mathbf{R}_{\text{TLS}}^T \mathbf{R}_{\text{TLS}} = \sigma_5^2 / \mathbf{V}_{55}^2 \quad (4)$$

### 1.2 阈值选取

故障检测算法通常采用固定误警率  $P_{fa}$  来调整检测阈值。系统在正常情况下,伪距残差向量  $\mathbf{R}_{\text{TLS}}$  中的各个分量是相互独立的正态分布随机误差(均值为 0, 方差为  $\sigma_0^2$ )。依据统计理论,无故障,则  $E(\mu) = 0$ ; 有故障,则  $E(\mu) \neq 0$ 。

$$H_0: \text{SSE}_{\text{TLS}} / \sigma_0^2 \sim \chi^2(m-4) \quad (5)$$

$$H_1: \text{SSE}_{\text{TLS}} / \sigma_0^2 \sim \chi^2(m-4, \lambda)$$

在无故障时,系统应该处于正常检测区,如果出现检测告警,则为误警,会严重影响 RAIM 性能及可靠性。因此,给定误警率  $P_{fa}$ , 应有式(6)成立,并求得阈值  $\sqrt{\text{SSE}_T}$ , 设  $Q = 1 - P(\chi^2 | r)$ 。

$$P_r(\text{SSE}_{\text{TLS}} / \sigma_0^2 < \text{SSE}_T / \sigma_0^2) = \int_0^{\text{SSE}_T / \sigma_0^2} f_{\chi^2(m-4)}(x) dx = 1 - P_{fa} \quad (6)$$

$$\text{SSE}_T = \sigma_0^2 Q^{-1}(P_{fa}, m-4) \quad (7)$$

当存在故障时,检测统计量  $\text{SSE}_{\text{TLS}}$  应大于  $\text{SSE}_T$ , 表示检测到故障,应该告警。如果  $\text{SSE}_{\text{TLS}}$  小于  $\text{SSE}_T$ , 则为漏检。漏检会严重影响 RAIM 的可靠性,危及民用航空的安全。给定漏检率  $P_{MD}$ , 应满足如下概率等式:

$$P_r(\text{SSE} / \sigma_0^2 < \text{SSE}_T / \sigma_0^2) = \int_0^{\text{SSE}_T / \sigma_0^2} f_{\chi^2(m-4, \lambda)}(x) dx = P_{MD} \quad (8)$$

$\text{SSE}_T$  值取决于误警率和漏检率。误警率服从右尾概率分布,漏检率服从左尾概率分布,如图 1 所示。

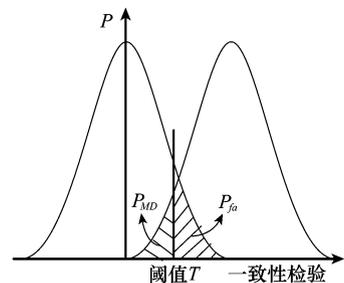


图 1 对称和非对称概率分布

定位误差和 RAIM 检测量都是伪距偏差的线性函数，定位误差和 RAIM 检测量两者之间也是线性关系<sup>[11]</sup>。在图 2 中，Slope 为误差斜率，为伪距误差和检验统计量的比值。近似径向误差保护限值 (approximated radial-error protected, ARP)，是 Slope 与阈值  $\sqrt{SSE_T}$  相交的截距 DE，用来保证故障检测和故障识别的可靠性。无故障情况下，由于卫星伪距误差较小，检测统计量会很小；而有故障情况下，检测统计量变大。漏检区和误警区的大小由阈值  $\sqrt{SSE_T}$  决定，且互相抵触（虚警区变大则漏警区变小）。

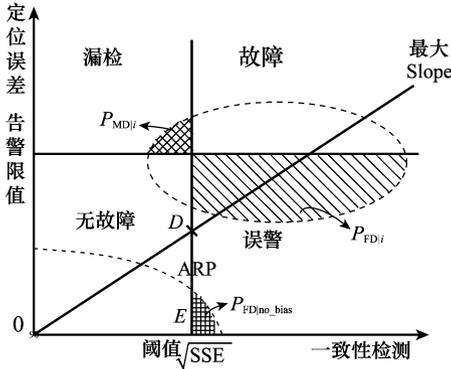


图 2 ARP 几何示意

## 2 减少 RAIM 误警率的方法

为了提高 RAIM 算法的可靠性，本文提出了一种新型降低 RAIM 误警率的方法。

### 2.1 定位误差和 RAIM 检测统计量的关系

由于定位误差向量与残差向量是正交的<sup>[13]</sup>，故可将量测空间分解为正交的两维空间，定位域子空间和残差域子空间，且两子空间相互垂直，如图 3 所示。

$$v = v_1 + v_2 \quad (9)$$

式中， $v$  是包含偏差项与噪声项的量测矢量； $v_1$  是残差域子空间分矢量； $v_2$  是定位域子空间分矢量。

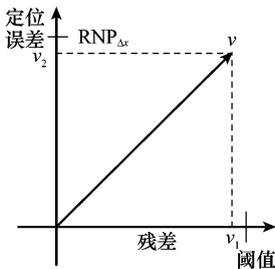


图 3 量测的两维空间分解示意

在理想条件下，每个量测都是无偏量测值，无偏量测值仅包含随机噪声误差。定位误差完好性风险比值 (position integrity risk, PIR) 定义<sup>[7]</sup>为

$$PIR = \|\Delta x_{TILS}\|^2 / SSE_{TILS} \quad (10)$$

式中， $\Delta x_{TILS}$  是定位误差； $SSE_{TILS}$  是残差的平方和。选取斜率  $Ratio = \sqrt{PIR}$  作为检测统计量。PIR 表明定位误差  $\Delta x_{TILS}$

的平方与检测统计量  $SSE_{TILS}$  之间存在一定的比例关系。PIR 比值越小，表明量测值在定位域子空间的误差分量越小。利用残差分量与定位误差分量之间相关性，故将残差域子空间的残差分量转变到定位域子空间定位误差分量，再与各个航段规定的最大允许定位误差限值  $RNP_{\Delta x}$  比较，借此判定是否存在故障。其中，需要对噪声进行抑制。确定斜率阈值  $Ratio_T$  为

$$Ratio_T = \sqrt{RNP_{\Delta x}^2 / SSE_T} \quad (11)$$

斜率阈值  $Ratio_T$  取决于最大允许定位误差保护限值  $RNP_{\Delta x}$  和故障检测阈值  $\sqrt{SSE_T}$ ，它们影响 PIR 算法的可靠性。

### 2.2 故障检测的完好性保证

根据故障数目，在量测方程中找到与故障数目相等的卫星组合，判定这些组合中引起精度下降最快的方向，当该组合出现故障时，是最难检测的。最大定位误差保护限值 (maximum position error protection limit, MPEPL) 定义<sup>[7]</sup>为

$$MPEPL = \sqrt{PIR \cdot \lambda_{min}} \quad (12)$$

式中， $\lambda_{min}$  是满足航段完好性监测漏检概率要求的最小非中心化参数，如表 1 所示。计算 MPEPL 值，并与该航段的保护限值比较，获得故障检测的完好性保证。

表 1 在视卫星数目与对应的  $\lambda_{min}$  值

卫星数	$\lambda_{min}$	卫星数	$\lambda_{min}$
5	54.76	10	69.56
6	58.52	11	71.91
7	62.57	12	73.44
8	64.80	13	75.01
9	67.12		

### 2.3 故障检测与故障识别准则设计

#### 2.3.1 故障检测与故障识别判定准则设计

(1) 当满足  $Ratio \leq Ratio_T$  时，如果  $SSE_{TILS} \leq SSE_T$ ，认为是正常状态；如果  $SSE_{TILS} > SSE_T$  且  $\sqrt{SSE_{TILS}} \cdot Ratio \leq RNP_{\Delta x}^2$ ，认为是误警状态；如果  $SSE_{TILS} > SSE_T$  且  $\sqrt{SSE_{TILS}} \cdot Ratio > RNP_{\Delta x}^2$ ，认为存在故障。

(2) 当满足  $Ratio > Ratio_T$  时，如果  $SSE_{TILS} \leq SSE_T$  且  $\sqrt{SSE_{TILS}} \cdot Ratio \leq RNP_{\Delta x}^2$ ，认为是正常状态；如果  $SSE_{TILS} \leq SSE_T$  且  $\sqrt{SSE_{TILS}} \cdot Ratio > RNP_{\Delta x}^2$ ，需要告警；如果  $SSE_{TILS} > SSE_T$ ，认为存在故障。

具有最大 MPEPL 值的卫星最有可能出现故障。为了剔除误警，将最大 MPEPL 值与航段定位误差限值比较，如果它大于限值，则认为有故障并将其隔离；否则认为是误警，无故障。

#### 2.3.2 降低误警率方法分析

图 4 是正常检测区的扩展示意图，包括告警区、误警区、

扩展区和正常检测区。按照故障检测与故障识别准则,如果 Ratio 统计值大于阈值  $Ratio_T$ , 不会出现误警。如果 Ratio 统计值远小于阈值  $Ratio_T$ , 检测统计量超出阈值而实际定位误差超出所需性能参数 (required navigation performance, RNP) 限值的情形会导致误警, 这种误警类型多数出现在扩展区。本文采用最大允许定位误差保护限值  $RNP_{\Delta x}$  的平方与  $SSE_T$  之和的开方值为半径作圆弧, 作为新扩展的正常检测区与误警区的边界。将正常检测区 OAC 区扩展到 OBC 区, 添加了扩展区而相应地减小了误警区, 即降低了误警率。OAC 的面积与 OBC 的面积分别为

$$S_{OAC} = RNP_{\Delta x} \cdot \sqrt{SSE_T} / 2 \quad (13)$$

$$S_{OBC} = \pi \cdot (RNP_{\Delta x}^2 + SSE_T) \cdot \beta / 360 \quad (14)$$

$$\beta = \arctan (RNP_{\Delta x} / \sqrt{SSE_T}) \quad (15)$$

正常检测区的扩展幅度为

$$R = S_{OBC} / S_{OAC} \quad (16)$$

误警率实际降低程度与 RNP 定位误差限值和 SSE 数值有关。SSE 与噪声的标准差、误警率、卡方分布的自由度有关。

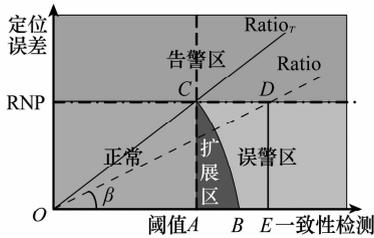


图 4 正常检测区扩展的示意

### 3 算例分析

本节从故障检测性能分析、降低误警率的影响因素和误警率分析 3 个方面进行分析与验证。

#### 3.1 故障检测性能分析

满足航段完好性监测概率要求下的卡方分布的最小非中心化参数  $\lambda_{min}$ , 得到满足漏检率和误警率的最小可检测偏差, 并且以此来分析故障检测性能。最小可检测偏差<sup>[14]</sup>计算公式为

$$b_{min} = \sqrt{m \cdot \lambda_{min} / (m - 4)} \quad (18)$$

由于误警率和漏检率都是规定值, 因此  $\lambda_{min}$  仅与自由度  $(m - 4)$  有关, 最小可检测偏差取决于卡方分布的自由度  $(m - 4)$ 。自由度的增加提升 RAIM 算法的灵敏度, 同时提高检测阈值  $\sqrt{SSE_T}$ , 这两个方面结合可以降低误警率水平。

图 5 揭示了卡方分布不同自由度下得到的最小可检测偏差  $b_{min}$  的理论曲线。随着自由度的增加, 最小可检测偏差呈递减趋势, 即故障检测性能随自由度增加而不断提高。

当自由度超过 12 之后, 最小可检测偏差变化不明显, 故障检测性能改善趋势依然增长, 但是趋势的增幅变小。这个现象说明可视卫星的几何分布不断获得改善, 促使最小可检测偏差不断减小。

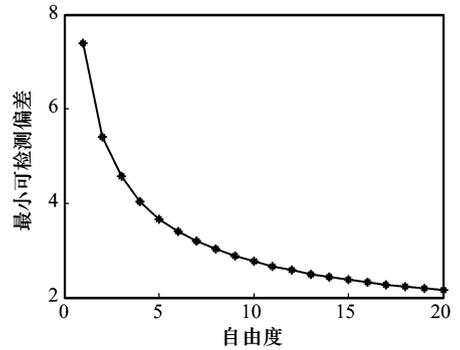


图 5 卡方分布自由度最小可检测偏差  $b_{min}$

#### 3.2 降低误警率的影响因素

本小节从卡方分布的自由度、预定误警率、观测噪声和  $RNP_{\Delta x}$  定位误差限值 4 个方面进行算例验证。初始条件为: 伪距残差向量的先验方差设为 10 m, 采用 7 星定位, 预定误警率和漏检率分别为 0.000 01/h 和 0.001/h,  $RNP_{\Delta x}$  定位误差限值取 556 m。图 6 是卡方分布自由度与扩展幅度, 将自由度设为变量。随着自由度的增加, 扩展幅度呈递减趋势, 但最低扩展幅度也有 10.6 倍, 降低了误警率。图 7 是预定误警率与扩展幅度, 将预定误警率设为变量, 扩展幅度呈递减趋势, 但最低扩展幅度也有 3 300 倍。图 8 是观测噪声与扩展幅度, 将观测噪声设为变量。随着观测噪声的增加, 扩展幅度呈衰减趋势, 扩展幅度也在 3~16 倍。分析上述现象, 这是因为自由度、观测噪声或预定误警率增加,  $SSE_T$  就会不断增加。图 9 是  $RNP_{\Delta x}$  定位误差限值与扩展幅度, 将定位误差限值设为变量。随着定位误差限值的增加, 扩展幅度呈递增趋势, 扩展区不断增大, 降低了误警率。

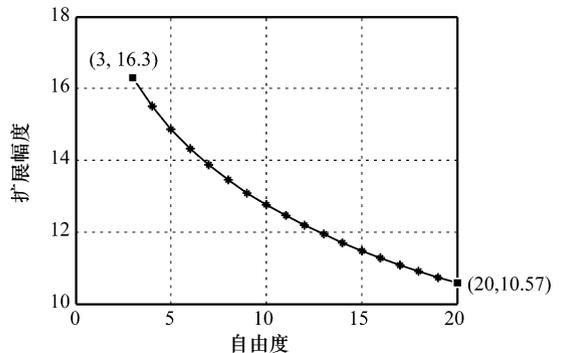


图 6 卡方分布自由度与扩展幅度

综上所述, 可以获得以下结论:

首先, 扩展幅度受到自由度、观测噪声、RNP 定位误差

限值和预定误警率 4 个方面影响。

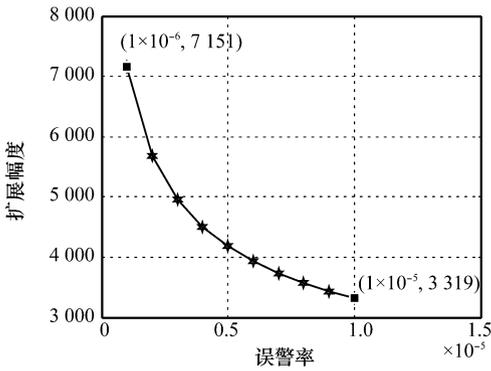


图 7 预定误警率与扩展幅度

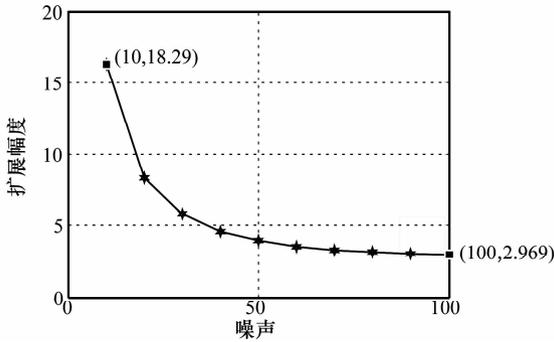


图 8 观测噪声与扩展幅度

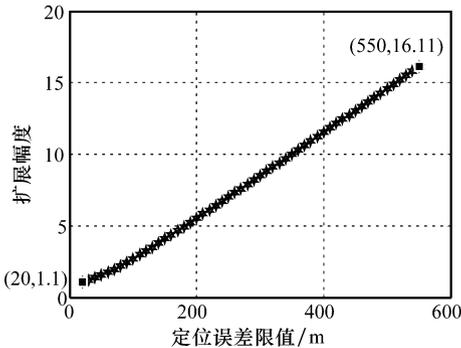


图 9 RNP 定位误差限值与扩展幅度

其次,从图 6~图 8 来看,扩展幅度均呈现递减趋势,其中预定误警率变化对扩展幅度的影响显著。而图 9 扩展幅度呈现递增趋势。通过扩展正常检测区能够减小误警区,说明该方法减小误警率是可行且有效的。

降低噪声,提高预设的误警率都有利于提高故障检测率,减小误警率。在非精密航段上,仅需要考虑卫星本身故障的影响因素。这源于最大允许误差值比系统定位精度高达几个数量级,观测噪声和截断误差导致的定位误差引起告警可以忽略。在包含垂直引导的航段上,由于垂直方向上的定位误差 RNP 限值非常低,容易导致误警。需要重点考虑噪声与预设误警率的影响。

### 3.3 误警率分析

针对 GPS 对航路、终端、非精密进近(non-precision approach, NPA)、有垂直方向引导的进近(approach with vertical guidance, APVI)航段,噪声分别采用零均值,方差为 30 m 与 10 m,其他条件设置同第 3.2 节,进行百万次蒙特卡罗仿真,统计 RAIM 误警率如表 2 所示。

表 2 航段误警率

	航路	终端	NPA	APVI
限值/m	3700	1852	556	水平 40 垂直 50
Ratio <sub>T</sub> (30)	24.2	12.1	3.64	0.262
Ratio <sub>T</sub> (10)	72.7	36.4	10.9	0.786
故障检测率	0.999	0.999	0.999	0.999
故障漏检率(小于)	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
扩展幅度(30)	37.1	18.2	5.10	1.045
扩展幅度(10)	113.2	56.2	16.3	1.37
误警率(30)	3.04 × 10 <sup>-7</sup>	6.4 × 10 <sup>-7</sup>	2.68 × 10 <sup>-6</sup>	1.05 × 10 <sup>-5</sup>
误警率(10)	6.1 × 10 <sup>-8</sup>	1.6 × 10 <sup>-7</sup>	8.9 × 10 <sup>-7</sup>	3.4 × 10 <sup>-6</sup>

通过表 2 分析,可以看出,随着航段要求提高,Ratio<sub>T</sub>减小,扩展幅度趋势减小,降低误警率水平。需要注意的是,在 APVI 阶段,√SSE<sub>T</sub>值为 50.9 m,由于定位误差限值相对较小(水平为 40 m,垂直为 50 m),如果噪声方差相对比较大时,降低误警率水平不明显;而噪声方差较小时,降低误警率水平相对较明显。由此说明,该方法在高精度要求的飞行阶段,还需要研究降噪方法,进一步提高定位精度。

## 4 结论

基于总体最小二乘残差的 PIR 算法,本文设计新的故障检测与故障识别准则,提出了扩展正常检测区的方法,在满足航段漏检率要求下,降低误警率。研究结果表明,该方法具有可行性高,漏警率稳定且误警率低,故障检测灵敏等优点。

### 参考文献:

[1] Wang J L, Ober P B. On the availability of fault detection and exclusion in GNSS receiver autonomous integrity monitoring[J]. *The Journal of Navigation*, 2009, 62(3): 251 - 261.

[2] Ober P B. Integrity prediction and monitoring of navigation systems[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2003.

[3] Ochieng W Y, Sauer K, Walsh D, et al. GPS integrity and potential impact on aviation safety[J]. *The Journal of Navigation*, 2003, 56(1): 51 - 65.

[4] Sturza M A, Brown K B. Comparison of fixed and variable threshold RAIM algorithms[C]// *Proc. of the ION Satellite*

- Division 3rd International Technical Meeting*, 1990:437 - 443.
- [5] Brown R G. A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods[J]. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 1992,39(3): 101 - 116.
- [6] Ene A, Blanch J, Walter T. Galileo-GPS RAIM for vertical guidance[C]//*Proc. of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2006: 432 - 440.
- [7] 杨传森,徐肖豪,刘瑞华,等. GPS RAIM 定位误差保护限值算法分析[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(3): 76 - 81. (Yang C S, Xu X H, Liu R H, et al. Analysis of algorithms for GPS RAIM position integrity risk[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2011, 35(3): 76 - 81.)
- [8] 刘准,陈哲. GPS 自主式完整性检测技术研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(8): 673 - 676. (Liu Z, Chen Z. Study on GPS receiver autonomous integrity monitoring[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(8): 673 - 676.)
- [9] 陈小平,滕云龙. 接收机自主完好性监测算法研究[J]. *电子科技大学学报*, 2008, 37(2): 218 - 220. (Chen X P, Teng Y L. Study of receiver autonomous integrity monitoring algorithm[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 37(2): 218 - 220.)
- [10] Yang C S, Xu X H, Liu R H, et al. New algorithm for receiver autonomous integrity monitoring[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 27(2): 155 - 161.
- [11] 刘文祥,孙广富,王梦丽,等. 基于定位误差估计减少 RAIM 误警的方法[J]. *全球定位系统*, 2007, 32(5): 5 - 8. (Liu W X, Sun G F, Wang M G, et al. A method for reducing the false alarms of RAIM based on the estimation of position error[J]. *GNSS World of China*, 2007, 32(5): 5 - 8.)
- [12] Yang C S, Xu X H, Liu R H, et al. An improved RAIM algorithm based on the total least squares[C]//*Proc. of the International Conference on Computational Intelligence and Security*, 2008: 319 - 324.
- [13] Ober P B. Autonomous integrity monitoring performance[C]//*Proc. of the 1st European Symposium on Global Navigation Satellite Systems*, 1997: 139 - 152.
- [14] 杨婷,黄智刚,李锐. 基于 RAIM 的多卫星导航系统完好性风险技术研究[J]. *遥测遥控*, 2009, 30(6): 15 - 20. (Yang T, Huang Z G, Li R. Research on multisatellite system's integrity risk based on RAIM[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2009, 30(6): 15 - 20.)