

基于完好性与连续性风险的最优垂直保护门限计算

阳 凯, 郭承军

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 成都 611731)

摘 要: 为降低飞行器精密垂直引导进近过程中的完好性风险和连续性风险, 使接收机自主完好性监测 (RAIM) 算法能提供水平方向和垂直方向上的完好性保障, 提出一种基于多假设解分离的 RAIM 算法来求解最优垂直保护门限 (VPL)。在满足全球导航卫星系统 (GNSS) 完好性和连续性的前提下, 优化 GNSS 系统对各假设故障模式的完好性风险和连续性风险分配, 得到最优 VPL。仿真结果表明, 与传统基于斜率的 RAIM 算法相比, 该算法能够提供更精确的 VPL 值, 提高了系统可用性, 并且随着卫星故障先验概率不断增大仍具有较好的鲁棒性。

关键词: 接收机自主完好性监测; 多假设解分离; 完好性风险; 连续性风险; 垂直保护门限

中文引用格式: 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): 50-54.

英文引用格式: Yang Kai, Guo Chengjun. Calculation of Optimal Vertical Protection Level Based on Integrity Risk and Continuity Risk [J]. Computer Engineering, 2016, 2017, 43(1): 50-54.

Calculation of Optimal Vertical Protection Level Based on Integrity Risk and Continuity Risk

YANG Kai, GUO Chengjun

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science
and Technology of China, Chengdu 611731, China)

[Abstract] In order to reduce the integrity risks and continuity risks in the process of precision vertical guidance of aircraft, and make the Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) algorithm provide the horizontal and vertical integrity for security, this paper proposes a Multiple Hypothesis Separation Solution (MHSS)-based RAIM algorithm to solve Vertical Protection Level (VPL). The algorithm is based on the premise that the integrity and continuity of the Global Navigation Satellite System (GNSS) can be met, and the optimal Vertical Protection Level (VPL) is obtained by optimizing the allocation of the integrity budgets and the continuity risks in each hypothesis failure mode. Simulation results show that the proposed algorithm can provide a more accurate VPL value and increase the availability of the system compared with the traditional slope-based RAIM algorithm. It also has good robustness with the increasing prior probability of satellite failure.

[Key words] Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM); Multiple Hypothesis Solution Separation (MHSS); integrity risk; continuity risk; Vertical Protection Level (VPL)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.01.009

0 概述

完好性^[1]是指当导航系统的误差超过允许限值不能胜任规定的导航工作时, 系统及时报警, 通知用户或终止此信号的功能。连续性^[1]是指在某一具体时间间隔内的导航系统可正常工作的连续可用时间的百分比。接收机自主完好性监测 (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM) 技术^[1]是运行在

用户接收机中的一种算法, 它利用接收机收到的导航卫星冗余观测信息对多个导航解进行一致性校验, 从而达到完好性监测的目的。

目前常用的 RAIM 算法主要分为: 基于离散模型和卡尔曼滤波的 RAIM 和基于连续模型的快照 RAIM。快照 RAIM 算法主要包括: 伪距比较法, 最小二乘残差法和奇偶矢量法, 这 3 种算法对于只有一个故障且观测噪声服从高斯分布的情况具有较好

的效果,并且已经被证明效果相同^[2]。斯坦福大学的研究人员于 1998 年共同提出一种多解分离算法^[3],该算法具有更好的灵活性和通用性,但对定位误差保护门限(Protection Level, PL)的计算与以上算法类似。由于奇偶矢量法计算相对简单并被普遍采用,后来航空无线电技术委员会(RTCA) SC-159 小组推荐奇偶矢量法为 RAIM 的基本算法。RAIM 已经成功地运用在水平方向的完好性保障,近些年随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的不断发展和完善,用户接收机在同一时刻可以收到更多的可见卫星以及多频导航信号^[4],这使得 GNSS 接收机能够获得更精确的位置、速度和时间(PVT)信息,GNSS 提供的导航服务性能大幅提高,在这一背景下,人们考虑将 RAIM 运用在对精度、完好性和连续性要求更高的垂直方向(LPV-200 标准^[5])的完好性保障上。由于 RAIM 算法对故障检测易受到卫星个数和几何分布的影响,因此在进行故障检测和排除前必须进行可用性判断,而可用性是通过计算当前卫星几何分布构型下的水平/垂直定位误差保护门限,再与相应航行阶段的水平/垂直告警门限(VAL)进行比较来实现^[6]。一方面,传统的 RAIM 算法在计算定位误差保护水平时为所有的卫星(故障模式)分配相同的漏检率,造成对 PL 的估值过于保守,降低了系统的可用性。另一方面,在垂直方向上对于定位精度的提高,必然要求故障检测门限减小,所以,发生故障的先验概率肯定会增加,同时更多的可见卫星也会导致 GNSS 系统整体上出现故障的概率大大增加。因此,有效的 RAIM 算法应当不仅能检测和排除故障,同时也应当满足此过程中对完好性风险和连续性风险的要求,提供更为精确的 PL 值,保证系统的可用性。本文设计一种基于多假设解分离(Multiple Hypothesis Solution Separation, MHSS)的 RAIM 算法来优化垂直保护门限(Vertical Protection Level, VPL),同时可满足完好性风险和连续性风险^[7],以提高系统可用性。

1 MHSS 算法基本原理

基于 MHSS 的 RAIM 算法首先会根据当前观测数据做一系列故障模式假设,一般而言, H_0 表示无故障假设, H_i 表示第 i 种故障模式。对于每一种故障模式 i 分配一个先验概率 $P_{ap,i}$ 表示 H_i 发生的概率,用 $P(HMI|i)$ 表示在 H_i 假设下发生危险误导信息(Hazardous Misleading Information, HMI)的概率^[8]。

由所有的故障模式假设(假设有 N 种)引起的系统总 HMI 概率可以表示为:

$$PHMI = \sum_{i=0}^{N-1} P(HMI|i) P_{ap,i} \quad (1)$$

为满足民航飞行系统对导航系统的要求, MHSS 算法通过保证 $PHMI$ 来满足完好性的要求。对于每种故障假设要求满足:

$$P_{ap,i} \cdot P(HMI|i) \leq PHMI_i \quad (2)$$

其中, $PHMI_i$ 表示系统分配给故障假设 H_i 的危险误导信息概率。 $PHMI_i$ 的设定可以采用平均分配的方式,也可以采用算法进行最优化分配,本文采用最优化分配方式来提高可用性。

在进行故障模式假设时,假如有 n 个观测量,考虑到所有的卫星故障与否的组合应该有 2^n 种故障模式,但实际情况是:3 个及 3 个以上大量卫星同时发生故障的概率几乎可以忽略不计,一般而言,单个卫星发生故障的概率为 $P_{sat} = 10^{-5}$,则 3 颗卫星同时发生故障的概率为:

$$P_{3_sat} = C_n^3 P_{sat}^3 (1 - P_{sat})^{n-3} \quad (3)$$

对 GPS 卫星而言, n 一般在 8~12 之间,当 $n=8$ 时,该值为 5.6×10^{-14} ,与系统完好性风险概率要求值 $P_{sat} = 10^{-7}$ 相比,几乎可以忽略。

从图 1 可以看出,3 个及 3 个以上的卫星同时发生故障的故障模式先验概率较完好性风险要求的门限值几乎可以忽略不计,同时可以大幅降低 MHSS 算法中故障模式的数量和计算复杂度。若系统对完好性风险要求极为严苛且接收机硬件资源丰富,也可将各种可能的故障模式全部考虑进来,并为之分配完好性风险和连续性风险,计算方法保持不变,只是故障模式有所增加。这种方法在理论上更加完整和精确,但实用性较低。考虑到 GNSS 系统 3 个及 3 个以上卫星同时出现故障的概率较小的实际情况,本文在后续算法研究过程中将只考虑单卫星故障和双卫星故障的故障模式。

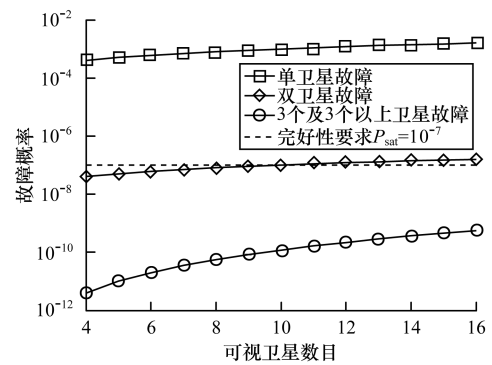


图 1 卫星故障概率与可视卫星的关系 ($P_{sat} = 10^{-7}$)

对于每种故障模式,垂直定位误差满足^[9]:

$$P(|x_v^{(i)} - x_v| \geq L_i | i) \leq P(HMI|i) \quad (4)$$

其中, $x_v^{(i)}$ 表示在 H_i 假设下, 排除假设有故障的卫星后在垂直方向上的导航定位解; x_v 表示用户实际的垂直方向位置; L_i 表示在假设情况下垂直方向定位解与真实解的偏差区间。根据上文的假设, x_0 表示无故障情况下垂直方向上的导航定位解, 由此可引出根据实际观测量求出的垂直保护门限^[9]为:

$$VPL_{RT} = \max(|x_v^{(i)} - x_v^{(0)}| + L_i) \quad (5)$$

根据该定义, 在所有的故障假设模式下, 垂直方向导航定位解的偏差都在可接受范围内:

$$[x_v^{(i)} - L_i, x_v^{(i)} + L_i] \subset [x_v^{(i)} - VPL_{RT}, x_v^{(i)} + VPL_{RT}] \quad (6)$$

并且有:

$$P(HMI|i) \leq P(|x_v^{(i)} - x_v^{(0)}| \geq L_i|i) \leq \frac{PHMI_i}{P_{ap,i}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} PHMI &= \sum_{i=0}^{N-1} P(HMI|i) P_{ap,i} \\ &\leq \sum_{i=0}^{N-1} \frac{PHMI_i}{P_{ap,i}} P_{ap,i} = PHMI_{req} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, N 表示假设的故障模式总数。

实时 VPL 取决于实际的观测量, 但为了满足连续性的要求, 需要进行完好性的预测, 用户位置在无故障假设条件下, VPL 需要满足下述表达式^[9]:

$$P(VPL_{RT} > VPL) \leq P_{cont} \quad (9)$$

根据式(5)对 VPL_{RT} 的定义, 可以看出:

$$\begin{aligned} P(VPL_{RT} > VPL) &= P(\exists i \| x_v^{(i)} - x_v^{(0)}| + L_i \geq VPL) \\ &\leq \sum_{i=1}^{N-1} P(|x_v^{(i)} - x_v^{(0)}| + L_i \geq VPL) \end{aligned} \quad (10)$$

同样地, 连续性风险 P_{cont} 被分配到除了 H_0 以外的所有故障假设中:

$$\sum_{i=1}^{N-1} P_{cont,i} = P_{cont} \quad (11)$$

在每种故障假设下定义 M_i 并进行完好性风险分配:

$$P(|x_v^{(i)} - x_v^{(0)}| \geq M_i) \leq P_{cont,i} \quad (12)$$

预测的 VPL 可以表示为:

$$VPL = \max(VPL_i) = \max(M_i + L_i) \quad (13)$$

采用这种方式计算出的 VPL 可以同时满足完好性和连续性要求。可以看到, 与传统基于 Slope 的 RAIM 算法^[10]相比, MHSS 算法对于保护门限的计算具有更好的灵活性, 计算结果更精确, 并且提高了可用性。

2 基于 MHSS RAIM 的最优 VPL 计算方法

假设在某次观测过程中有 n 个观测量且观测矩阵为 G , 伪距误差服从高斯分布, 且方差为 σ_k 、最大偏差为 b_k , 取加权矩阵为各个观测量的方差组成对

角矩阵的逆矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_n^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (14)$$

在第 i 种故障模式 H_i 时, 观测矩阵 G_i 与原观测矩阵 G 保持相同的维数, 只是将假设有故障的卫星对应的观测值的行用全 0 来代替原来的值。

在实际计算过程中, 对应每一种故障模式 H_i 可以求出垂直方向的导航定位解为:

$$x_v^i = h^{(i)} y \quad (15)$$

$$h^{(i)} = [(G_i^T W G_i)^{-1} G_i^T W]_{3,g} \quad (16)$$

那么伪距残差在垂直方向的方差和累积误差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{v,i}^2 &= h^{(i)} W^{-1} h^{(i)T} = (G_i W G_i)_{3,3}^{-1} \\ B_{v,i} &= \sum_{k=1}^n |h_k^{(i)}| b_k \end{aligned} \quad (17)$$

那么上文所提出的 L_i 即为^[11]:

$$L_i = K_{PHMI,i} \sigma_{v,i} + B_{v,i} \quad (18)$$

$$K_{PHMI,i} = Q^{-1} \left(1 - \frac{PHMI_i}{2P_{ap,i}} \right) \quad (19)$$

式(18)右边第 1 项是为了限制噪声在伪距测量中的影响, 第 2 项是为了限制测距误差对伪距测量的影响。

下面求解 M_i , 按照定义应有:

$$P(|x_v^{(i)} - x_v^{(0)}| \geq M_i) = P(|(h^{(i)} - h^{(0)})y| \geq M_i) \quad (20)$$

那么, 前文定义的 M_i 可以表示为:

$$M_i = K_{cont,i} \sigma_{ss,i} + B_{ss,i} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{ss,i}^2 &= \sigma_{v,i}^2 - \sigma_{v,0}^2 \\ B_{ss,i} &= \sum_{i=1}^n |h_k^{(i)} - h_k^{(0)}| b_{cont,k} \end{aligned} \quad (22)$$

同理, 系数 $K_{cont,i}$ 的定义^[12]为:

$$K_{cont,i} = Q^{-1} \left(1 - \frac{P_{cont,i}}{2} \right) \quad (23)$$

至此, 基于 MHSS 的 RAIM 算法中所有需要用到的变量和表达式全部叙述完成, 接下来就是要寻找一种最优的完好性风险 P_{int} 和连续性风险 P_{cont} 分配方案, 使得导航过程中垂直保护门限最小。该问题用数学表达式可以表述为:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } \max_i \left\{ M_i (P_{cont,i}) + L_i \left(\frac{PHMI_i}{P_{ap,i}} \right) \right\} \\ &\text{s. t. } \sum_{i=0}^{N-1} PHMI_i = PHMI_{req} \quad \sum_{i=1}^{N-1} P_{cont,i} = P_{cont} \end{aligned} \quad (24)$$

这是一个在约束条件下的极小极大值^[13]问题, 常用的解决办法是将其转化为一个等价的非线性规

划问题,在具体的解决过程中需要进行二维搜索以及多次迭代运算,当故障模式较多时计算量较大,不利于用户接收机解算,考虑到含有垂直引导导近的飞行阶段对完好性要求非常严格,定位解的完好性通常比精度更难保证^[14],完好性应当放在首位。折衷考虑,此处将系统的连续性风险平均分配到每一个故障模式中,从而着重优化完好性风险的分配来得到最小的垂直保护门限。这种方法虽然对连续性风险的分配较为保守,但在算法的计算复杂度和有效性之间做出了一种有效的平衡,更加符合实际运用场合的需求。该方法综合考虑完好性风险和连续性风险并进行最优化分配即对式(24)进行求解,在硬件资源允许和有严格连续性要求的场合也适用,并且它对 VPL 的计算更为精确。

下面将各个表达式和变量用新的符号来代替,以简化数学表达式:

$$r_i = K_{HMI,i} = Q^{-1} \left(1 - \frac{PHMI_i}{2P_{ap,i}} \right)$$

$$t_i = K_{cont,i} = Q^{-1} \left(1 - \frac{P_{cont}}{2N} \right)$$

$$\sigma_i = \sigma_{v,i}, \theta_i = \sigma_{ss,i}, \beta_i = B_{v,i} + B_{ss,i}$$

$$A = PHMI, a_i = P_{ap,i} \quad (25)$$

那么 VPL 求解问题可以表述为:

$$\text{Minimize } \max_i \{ r_i \sigma_i + t_i \theta_i + \beta_i \}$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=0}^{N-1} 2a_i Q(-r_i) = A \quad (26)$$

可以看到,式(26)中仅有 r_i 这一类未知数,将该问题转化为等价的非线性规划时,只需要进行一维搜索即可解决。假设极小值为 x ,则有:

$$x = r_i \sigma_i + t_i \theta_i + \beta_i \quad (27)$$

x 应当满足:

$$\sum_{i=0}^{N-1} 2a_i Q \left(\frac{t_i \theta_i + \beta_i - x}{\sigma_i} \right) = A \quad (28)$$

在式(27)中, x 表示极小的 VPL 值,由它所代表的物理意义可知其为一个正实数,可以令 x 的初值为 1,然后按照递增的方向,以步长为 1 进行搜索,当左式接近右式时缩小步长(如 0.1),进行更精确的搜索便可得到在约束条件下的极小极大的 VPL 值。

3 仿真结果与分析

由于计算的是垂直方向上的定位误差保护门限,本文采用对导航性能要求较严格的 LPV-200 标准参数^[15]来设置仿真过程中的各参数,如表 1 所示, θ 是卫星相对于接收机的高度角。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	取值
垂直告警门限值/m	35
用户测距精度偏差 σ_{URA}/m	0.5
多径偏差 $\sigma_{multipath}/m$	$0.13 + 0.53e^{-\theta/10}$
噪声偏差 σ_{noise}/m	$0.15 + 0.43e^{-\theta/6.9}$
对流层偏差 σ_{tropo}/m	$\frac{0.12 \times 1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(\theta)}}$
测距偏差最大值(完好性) b_{int}/m	0.75
测距偏差最大值(连续性) b_{cont}/m	0.1
完好性风险 P_{int}	10^{-7}
连续性风险 P_{cont}	2×10^{-6}
卫星故障先验概率 P_{sat}	10^{-5}

仿真过程中的数据采用中国北京房山 IGS 观测站 2015 年 10 月 1 日的标准 RINEX 格式数据文件^[16],并选择从 00:00—23:00 共 24 个历元,分别计算对应的最优 VPL 值,并与采用传统基于 Slope 的 RAIM 算法所确定的 VPL 值作比较,结果如图 2 所示。可以看出,采用本文所述方法在 24 h 的观测过程中只有第 16 h 的 VPL 值超出了 VAL,算法的可用性为 96%,而采用传统基于斜率的 VPL 在 24 h 中就有 9 个 VPL 值超过 VAL,算法的可用性仅为 62.5%。同时可以看出,传统算法计算出的 VPL 值几乎是优化后的 MHSS RAIM 算法求得的 VPL 值的 2 倍,优化后算法 VPL 值精度更高,大大提高了系统可用性,更适合于精密垂直引导导近。

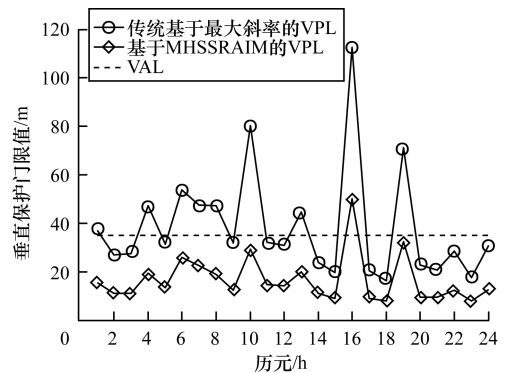


图 2 2 种算法对应的垂直保护门限比较

考虑到多可视卫星的现状以及飞行系统对导航性能要求不断提高的背景,卫星发生故障的先验概率必然会增加,这势必会对 VPL 的计算产生影响。为了评估算法在卫星故障先验概率增加条件下的鲁棒性,本文继续对这一影响过程进行仿真分析。选择一个历元的数据观察卫星故障先验概率对 VPL 的影响。此次仿真数据源选择北京房山 IGS 观测站 2015 年 10 月 1 日 12:00 这一历元的标准 RINEX 观测

数据,在 LPV-200 标准下,卫星发生故障的先验概率初始值设定为 10^{-5} ,仿真中按等比数列的方式不断增大这一值直到 10^{-2} ,一共取 8 个概率值,观察对应的 VPL 变化情况,如图 3 所示。

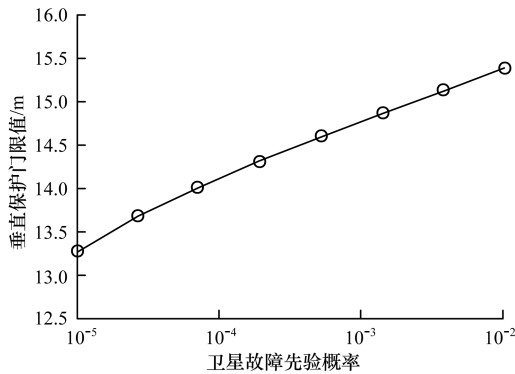


图 3 卫星故障先验概率与垂直保护门限的关系

从图 3 中可以看出,随着卫星故障先验概率不断增大,VPL 也随之变大,但增加的速度比较平缓,当卫星故障先验概率从 10^{-5} 增大到 10^{-2} 时,VPL 才增加了不到 3 m,即使在卫星故障先验概率较大的情况下依然具有较高的可用性。然后,对 24 h 内每个整点的历元数据进行仿真分析,如图 4 所示。

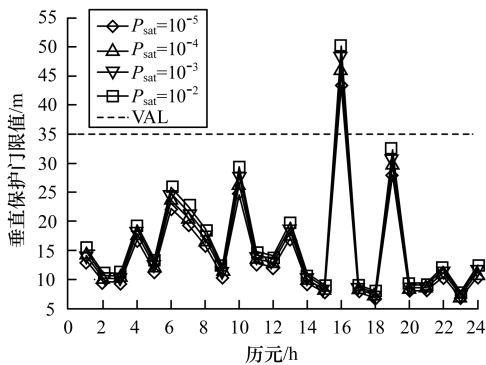


图 4 不同卫星故障先验概率下的垂直保护门限

可以看出,在每个历元处 VPL 值都是随着先验概率增大而增大,但增长比较平稳,24 个历元只有一个历元 VPL 值超过了 VAL,可用性保持为 96%。因此,算法具有较好的鲁棒性,能够满足飞行器精密垂直引导进近阶段对完好性和连续性的要求。

4 结束语

本文基于多假设解分离 (MHSS),同时考虑完好性风险和连续性风险,提出一种最优垂直保护门限计算方法。经过仿真分析得出,该方法相比传统基于斜率的 RAIM 算法,能够考虑到各种故障模式,并能动态分配连续性风险和完好性风险,最终确定满足 LPV-200 标准的最小 VPL 值,大幅提高了系统可用性。同时,在不同卫星故障先验概率下对该算法的性能进行仿真分析,发现该算法在卫星故障先

验概率不断增大的条件下依然具有较好的鲁棒性。下一步将研究如何在故障检测和排除过程中有效降低完好性风险和连续性风险。

参考文献

- [1] 陈金平,周建华. 卫星导航系统性能要求的概念分析[J]. 无线电工程,2005,35(1):30-32.
- [2] Grover B R. A Baseline GPS RAIM Scheme and a Note on the Equivalence of Three RAIM Methods [J]. Navigation, 1992,39(3):301-316.
- [3] Pervan B S, Pullen S P, Christie J R. A Multiple Hypothesis Approach to Satellite Navigation Integrity [J]. Navigation, 1998,45(1):61-71.
- [4] 徐肖豪,杨传森,刘瑞华. GNSS 用户端自主完好性检测研究综述[J]. 航空学报,2013,34(3):451-463.
- [5] Phase II of the GNSS Evolutionary Architecture Study [EB/OL]. (2010-11-21). http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/library/documents/media/GEASPhaseII_Final.pdf.
- [6] 朱金芳,倪玉德,王凯,等. ARAIM 可用性预测系统的设计与实现[J]. 计算机工程,2013,39(8):121-125.
- [7] Joerger M, Stevanovic S, Chan Fangcheng, et al. Integrity Risk and Continuity Risk for Fault Detection and Exclusion Using Solution Separation ARAIM [C]// Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, USA: [s. n.], 2013:2702-2722.
- [8] Blanch J, Walter T, Enge P. Understanding PHMI for Safety of Life Applications [D]. Palo Alto, USA: Stanford University, 2007.
- [9] Blanch J, Walter T, Enge P, et al. A Proposal for Multi-constellation Advanced RAIM for Vertical Guidance [C]// Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, USA: [s. n.], 2011:2665-2680.
- [10] 卢德兼. 多星座全球导航卫星系统完整性分析 [J]. 计算机工程,2010,36(11):238-240.
- [11] Angus J. RAIM with Multiple Faults [J]. Navigation, 2006,53(4):249-257.
- [12] Belabbas B, Gass F. RAIM Algorithms Analysis for a Combined GPS/Galileo Constellation [C]// Proceedings of ION GNSS'05. Nashville, USA: [s. n.], 2005:1781-1788.
- [13] 傅英定,成孝予,唐应辉. 最优化理论与方法 [M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [14] Joerger M, Chan F C, Langel S, et al. RAIM Detector and Estimator Design to Minimize the Integrity Risk [C]// Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, USA: [s. n.], 2012:2785-2807.
- [15] Blanch J, Walter T, Enge P, et al. Advanced RAIM User Algorithm Description: Integrity Support Message Processing, Fault Detection, Exclusion, and Protection Level Calculation [C]// Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, USA: [s. n.], 2012:2828-2849.
- [16] RINEX: The Receiver Independent Exchange Format [EB/OL]. (2015-07-14). <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>.