

一种改进的空间信号完好性监测算法

汪冬瑾^{1,2}, 张英^{1,2}, 刘建敬^{1,2}, 李晓东^{1,2}

(1. 宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100854; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘要: 针对 Galileo 系统空间信号完好性监测方案中两项关键技术点做出改进, 首先提出改进临界圆法, 从坐标系转换角度解决最坏用户位置方位角转换的复杂度问题; 其次引入“截尾概率包络”概念, 改善原模型对非零均值空间信号误差值高斯分布的过分包络问题; 最后在无故障、阶跃类故障、斜坡类故障 3 种模式下, 对比分析改进方案前后系统的完好性能; 结果表明, 完好性阈值对实时空间信号误差估计值的平均包络紧度由 3.89 米改善至 2.62 米, 对斜坡类故障的告警更加及时。

关键词: 空间信号完好性; 改进临界圆法; 截尾概率包络; 阈值包络紧度; 告警性能

An Improved Signal-in-space Integrity Monitoring Algorithm

Wang Dongjin^{1,2}, Zhang Ying^{1,2}, Liu Jianjing^{1,2}, Li Xiaodong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Beijing 100854, China;

2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: To improve the algorithm of two key technologies in the Galileo signal-in-space integrity monitoring system, an improved critical circle method and a censored probability envelope model were proposed for the determination of the worst user location and enveloping the Signal-in-space Error respectively. The improved critical circle method could obtain accuracy WUL directly by coordinate conversion to simplify purely geometric derivation. The censored probability envelope model solved the over-bound problem by using a new envelop concept for the SISE distribution with non-zero mean. Finally, simulations were conducted to compare the integrity performance of the improved algorithm with the original one in fault-free, step failure and slope failure modes. The results show that the integrity threshold envelope tightness improves from 3.89 meters to 2.62 meters and system alarm more timely than the original algorithm in the slope failure mode.

Keywords: signal-in-space integrity; improved critical circle method; censored probability envelope model; integrity alarm performance analysis; envelope tightness

0 引言

为了满足用户的高可靠性服务需求, 导航系统建立之初, 国际民航组织就提出精度、完好性、连续性、可用性等四方面要求。其中, 完好性是指导航系统不能用于导航时及时、有效地向用户提供告警信息的能力^[1]。空间信号完好性监测则是 GNSS 导航系统完好性监测体系重要组成之一。目前, 存在两种空间信号完好性监测方案: 1) 新一代 GPS 系统的用户距离精度完好性监测方案^[2]; 2) Galileo 系统提出的空间信号精度 (SISA, signal-in-space accuracy) / 空间信号监测精度 (SISMA, signal-in-space monitoring accuracy) 完好性监测方案^[3-4]。但两种空间信号完好性监测方案仍未投入应用, 同时我国北斗导航系统的完好性监测体系短缺。

本文在系统地分析 Galileo 系统空间信号完好性监测方案的基础上, 对关键技术点——最坏用户位置 (WUL, worst user location) 解算和空间信号误差 (SISE, signal in space error) 包络模型的不足之处提出改进方案, 并仿真分析改进方案在无故障、阶跃类故障、斜坡类故障 3 种模式下, 对系统完好性性能的改善。

1 Galileo 完好性监测方案

1.1 方案原理

Galileo 空间信号完好性监测方案的监测对象选取为空间段误差在用户伪距域的投影值, 即 SISE。完好性监测参数包括 SISA 和 SISMA/完好性标识 (IF, integrity flag)^[3]。系统工作流程如图 1 所示。

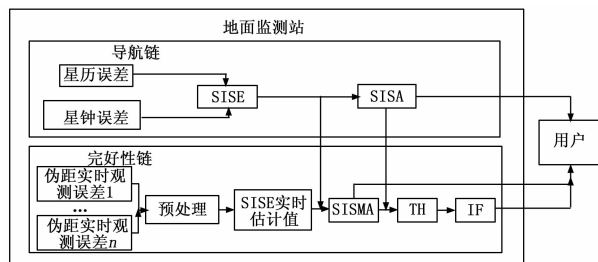


图 1 系统完好性监测流程

SISA 为更新周期内、一定置信水平下卫星可视域内最大 SISE 的统计分布, 用于衡量 SISE 广播值的精度, 更新周期为 100 分钟。SISMA 为一定置信水平下卫星可视域内最大 SISE 估计差值的统计分布, 用于监测 SISA 的预报质量, 更新周期为 30 s。IF 由 SISA、SISMA 联合生成, 更新周期为 1 s^[4]。用户根据这 3 种完好性参数计算定位保护水平, 以确定定位结果的可靠性。

1.2 模型分析

由上述定义可知, SISA/SISMA 算法包含两个核心模块:

收稿日期:2016-01-11; 修回日期:2016-03-07。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731805)。

作者简介:汪冬瑾(1991-),女,安徽滁州人,硕士,主要从事卫星导航算法设计方向的研究。

卫星可视域内最大误差值确立和一定置信水平下的误差统计分布。

1.2.1 临界圆法

最大误差值确立即为求解具有最大误差投影值的用户位置——最差用户位置。临界圆法利用卫星、地心和轨道误差矢量构成的二维平面中, 星下点 F 与误差矢量投影点 A 的方位角与 WUL 几何关系进行解算^[5-9], 角度几何关系及解算流程如图 2 所示。

该算法模型存在两个问题: 1) 由于球模型的方位角推导公式的不准确性, A 、 F 、 WUL 可能不在一个平面上, 导致 WUL 出现误差, 需要迭代修正; 2) 球模型转换至椭球模型过程中, 需要分四种情况分别迭代计算, 方位角几何关系转换复杂度高, 迭代周期长。

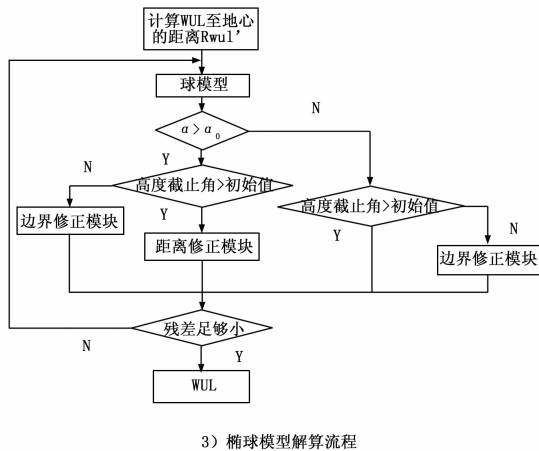
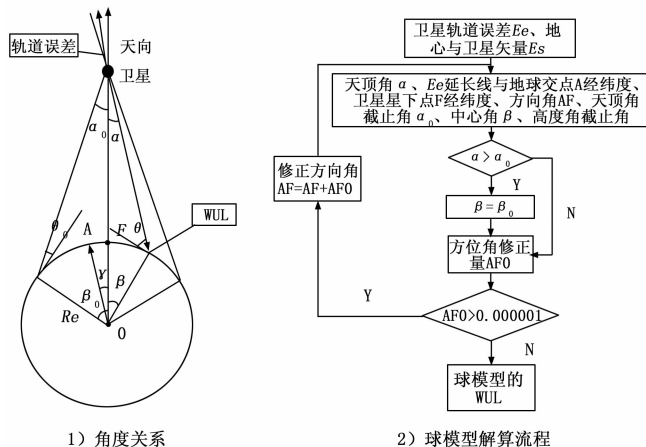


图 2 与 WUL 相关的角度

1.2.2 误差统计分布

SISE 广播值包络模型基于误差为无偏高斯分布的前提条件, $SISA$ 取值为 $SISA = k \cdot \sigma_{\Delta R_{WUL}}$ 。但实际 SISE 广播值存在 0 至 1 米的均值^[10]。以 99.9% 的界定概率为例, 原模型计算得到的 $SISA$ 值将 SISE 广播值的均值和方差同时放大 3.29 倍, 过分夸大了 SISE 的真实情况, 容易引发虚警, 影响系统可用性。

2 改进方案

2.1 改进临界圆法

WUL 的确定是完好性参数 $SISA$ 、 $SISMA$ 算法的核心模

块之一, 其准确性和算法复杂度对提高完好性参数求解的可靠性和实时性具有非常重要的意义。

文中改变原临界圆法从纯方位角几何关系推导的思路, 采用坐标系转换模块将地心地固坐标系转换至 OAF 确定的平面确定的新坐标系, 利用 A 、 F 、 WUL 的坐标关系求解, 解决了原算法中三点不在一个平面的问题, 降低算法复杂性。

2.1.1 算法模型

(1) 球模型中 WUL 解算:

建立新坐标系, 解算球模型中 WUL 位置, 新坐标系及其角度关系如图 3 所示。新坐标系的原点仍为地心 O , X 轴指向 OA 矢量, Z 轴指向 OAF 平面的法向量 $\vec{OD}$, Y 轴由右手坐标系法则确定。需要经历三次旋转: 1) ECEF 坐标系绕 Z 轴旋转 $long_A$ 度, 使 OX 轴和 OX_{new} 轴位于同一平面; 2) 将变换后的 ECEF 坐标系绕 Y 轴旋转 lat_A 度, 使 OX 轴和 OX_{new} 轴重合; 3) 将变换后的 ECEF 坐标系绕 X 轴旋转 $\omega = \arccos(Z_2, \vec{OD})$ 度使 OZ 轴和 $\vec{OD}$ 重合; 上述旋转的变换矩阵为 C 。

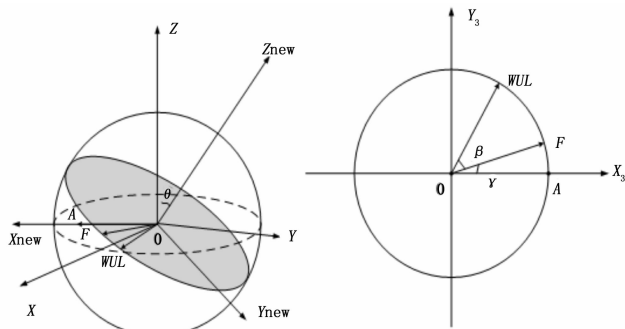


图 3 新坐标系及角度关系示意图

则球模型中, ECEF 坐标系下的最坏用户位置可由下式求得:

$$\vec{OWUL}_{new} = Re \cdot [\cos(\beta + \gamma) \quad \sin(\beta + \gamma) \quad 0] \quad (1)$$

$$\vec{OWUL}_{ECEF} = C^{-1} \cdot \vec{OWUL}_{new} = [x_{WUL} \quad y_{WUL} \quad z_{WUL}]^T \quad (2)$$

$$lat_{WUL} = \arcsin\left(\frac{z_{WUL}}{r_{WUL}}\right) \quad (3)$$

$$long_{WUL} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_{WUL}}{x_{WUL}}\right), & x_{WUL} \neq 0 \\ 90^\circ, & x_{WUL} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, x_{WUL} 、 y_{WUL} 、 z_{WUL} 为 ECEF 坐标系下, 最坏用户位置。 r_{WUL} 为 ECEF 坐标系下最坏用户位置至球心的距离。

(2) 椭球模型中 WUL 解算

WUL 值在球模型至椭球模型的转换关系如图 4 所示。

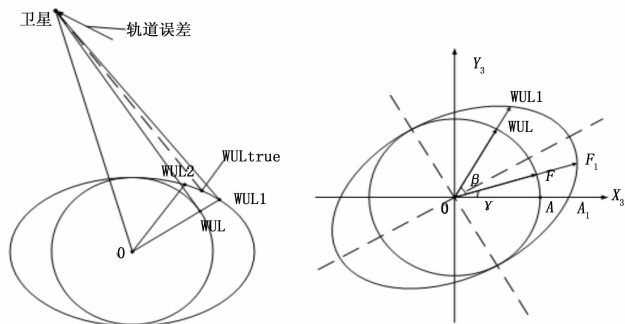


图 4 球体与椭球体的 WUL 示意图

图中点 O 为地心, WUL 为上述球模型解算得到的最坏用户位置, 与卫星的连线交椭球面于点 $WUL2$, 连接地心延长线则交椭球面于 $WUL1$ 点。椭球面上某点 E 的高度截止角, 即 E 点至卫星的方向矢量与过该点的椭球切平面的法线矢量 N_E 的夹角 φ_E , 可表示为:

$$\varphi_E = \arccos(\vec{e}_{E, sat} \cdot \vec{N}_E) \quad (5)$$

显然 $\varphi_{WUL2} > \varphi_{WUL} > \varphi_{WUL1}$ 。椭球模型中的 WUL 在 $WUL1$ 和 $WUL2$ 之间, 称为 WUL_{true} 。按照一定的步长修正中心角 β , 向 $WUL2$ 点方向逼近, 返回球模型, 直到满足 $\varphi_{WUL1} \geq \varphi_{WUL}$, 即可求得 WUL_{true} 。

2.1.2 仿真验证

从图 2 中 WUL 相关角度的严格几何意义出发, WUL 真值应同时满足下式:

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \arccos(\vec{e}_{WUL, sat} \cdot \vec{e}_{o, sat}) - \alpha = 0 \\ \Delta\beta = \arccos(\vec{e}_{o, WUL} \cdot \vec{e}_{o, sat}) - \beta = 0 \\ \Delta\theta = \arccos(\vec{e}_{WUL, sat} \cdot \vec{e}_{o, WUL}) - (90^\circ - \gamma) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

以 GPS 系统的 PRN6 号卫星 2014 年 3 月 23 日的星历为例, 历元间隔 30 秒, 临界圆法和改进临界圆法 WUL 真值误差和解算时间的均值仿真结果如下表 1 所示。

表 1 WUL 结果及解算时间统计

均值	临界圆法	改进临界圆法
$\Delta\alpha/(\circ)$	3.73E-10	4.43E-6
$\Delta\beta/(\circ)$	2.01E-11	7.62E-6
$\Delta\theta/(\circ)$	4.19E-6	6.23E-6
解算时间/ms	0.014	0.006

由上表可知, 改进临界圆法解算的 WUL 准确性更高, 真值误差量级由 10^{-6} 提升至 10^{-10} ; 解算时间比原临界圆法低一个量级。从仿真结果还可以得出一条结论, 地心至卫星的方向矢量与卫星轨道误差矢量的夹角绝大多数情况下大于最小截止角 θ_0 相应的天顶角 α_0 , 即 WUL 绝大多数情况下在危险圆上。

2.2 截尾概率包络模型

包络模型的有效性直接决定完好性参数 $SISA$ 对 $SISE$ 广播值的衡量精度。若过小包络, 则完好性风险增大, 影响系统的可靠性; 若过分包络, 容易引发虚警, 降低系统可用性。文中引入“截尾概率包络”概念解决由 $SISE$ 非零均值特性, 引入的过分包络问题。

2.2.1 算法模型

“截尾概率包络”的概念: 高斯分布 $N(0, SISA^2)$ 在 1σ 门限外的高斯截尾概率大于完好性风险指标对应的界定概率下, 门限外, $SISE$ 非零均值高斯分布的高斯截尾概率。其中, 高斯截尾概率是指高斯分布位于门限外的累积概率, 以标准差为 σ 的零均值高斯分布为例, 可表示为:

$$\Delta p = 1 - (F(x_2) - F(x_1)) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (6)$$

其中, $[x_1, x_2]$ 为门限; $F(x_2) - F(x_1)$ 为取值范围内的累积分布概率。

假定 $SISE$ 投影值的均值为 μ , 均方差为 σ , 界定概率为 p_{x_1, x_2} , 则:

$$p = F(x_2) - F(x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (7)$$

其中, $x_1 = -k \cdot \sigma + \mu, x_2 = k \cdot \sigma + \mu, k$ 为概率 p_{x_1, x_2} 对应的分位数。

首先假定 $\mu > 0$, 由高斯分布特性可知, 当 $x_3 = -(k \cdot \sigma + \mu) < x_2, x_4 = -k \cdot (\sigma + \mu), x_5 = k \cdot (\sigma + \mu)$ 时, 则 $p_{x_4, x_5} < p_{x_1, x_3} < p_{x_1, x_2}, \Delta p_{x_1, x_2} < \Delta p_{x_1, x_3} < \Delta p_{x_4, x_5}$ 。因此, 标准差为 $SISA = \mu + k \cdot \sigma$ 的零均值高斯分布能在一定程度上改善标准差为 $SISA = k \cdot (\sigma + \mu)$ 的高斯分布造成的过包络问题。由高斯分布的对称性, 当 $\mu < 0$ 时, 可得出相同的结论。

2.2.2 仿真验证

以 GPS 系统的 PRN8 号卫星 2014 年 3 月 23 日 0 时起为时 4 h 的实际星历数据为例, 历元间隔 30 秒, 置信概率取为 99.9% 时, 则最大 $SISE$ 投影值与算法改进前后 $SISA$ 值的仿真结果如图 5 所示。由图可得出如下结论: 1) $SISA$ 值能够大致体现当前历元, 卫星可视域内最大 $SISE$ 伪距域投影值的变化趋势; 2) 原 $SISA$ 值过分包络 $SISE$, 基于非零均值 $SISE$ 的算法模型对包络差值改进效果最大达 3.02 米。

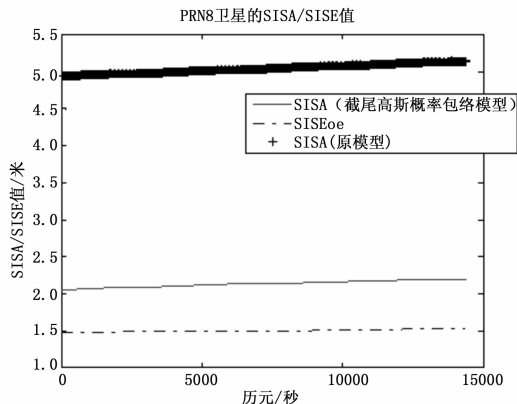


图 5 两种算法模型的 $SISA$ 值比较

3 系统性能分析

3.1 仿真数据配置

仿真环境: ①卫星类型及数目: 24 颗 MEO 卫星; ②地面监测网络: Galileo 系统拟布设于全球的 30 个监测站; ③监测站高度截止角: 15° ; ④仿真时长 6 000 秒, 仿真时间间隔 1 秒; ⑤完好性参数 $SISA$ 、 $SISMA$ 的置信概率: 99.9%。

3.2 系统性能仿真结果

选取系统的完好性告警能力作为性能衡量指标, 即完好性阈值 (TH, integrity threshold) 对实时空间信号误差的包络能力。首先分析系统无故障模式, 限于篇幅, 仅以 2 颗卫星为例, 其他未显示卫星也有同样规律。卫星的可视监测站数目与算法改进前后的实时 $SISE$ 和完好性阈值 TH 的仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 无故障模式下, TH 精度随卫星可视监测站数目的减少而下降; 算法改进前后都能够对实时 $SISE$ 完全包络; 为衡量包络紧度, 统计 TH 与实时 $SISE$ 在仿真时长内的差值平均值。结果表明, 算法改进前后, 平均包络紧度由 3.89 米改善至 2.62 米。

为有效检验系统的故障告警性能, 引入两类常见故障——阶跃类故障 (星钟跳变)、斜坡类故障 (星钟漂移)。两种故障

(下转第 71 页)

计与实现 [J]. 电信科学, 2013, 29 (11): 131-135.

[2] 王 锐, 王 洁, 冯 刚, 等. 复杂装备故障预测与健康管理体系结构研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1740-1743.

[3] 刘 晶, 季海鹏, 朱清香, 等. 含有隐性故障的复杂设备故障预警方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1030-1032.

[4] Bonissone P, Iyer N. Knowledge and time: a framework for soft computing applications in PHM [J]. Uncertainty and intelligent information systems, World Scientific, 2007.

(上接第 64 页)

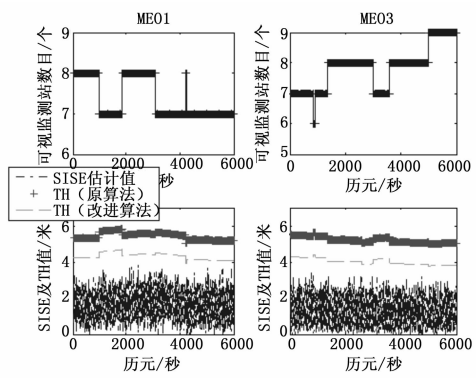


图 6 无故障模式下系统告警性能对比

模式下, 算法改进前后的实时 SISE 与完好性阈值 TH 的仿真结果如图 7、图 8 所示。其中, 两类故障的仿真时长均为 1 201 秒至 3 000 秒。

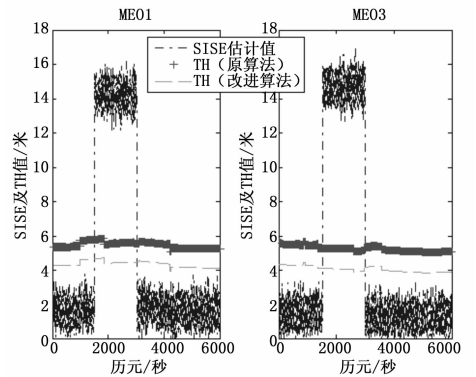


图 7 阶跃类故障模式下系统告警性能对比

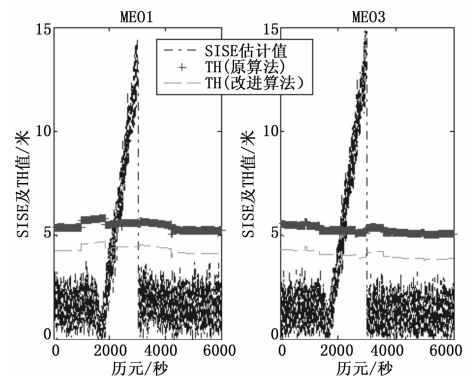


图 8 斜坡类故障模式下系统告警性能对比

由上图 7 和图 8 可看出, 实时 SISE 估计值随故障误差累

[5] 李 楠. 故障预测与健康管理 (PHM) 在 ERP 系统中的应用研究 [D]. 合肥: 中国科学院大学 (工程管理与信息技术学院), 2013.

[6] 单 珊, 冯玉光, 奚文俊. PHM 中预测性能评价方法的发展与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 3909-3912.

[7] 黄大荣, 黄丽芬. 灰色系统理论在故障预测中的应用现状及其发展趋势 [J]. 火炮发射与控制学报, 2009 (3): 88-92.

[8] 何厚伯, 赵建民, 许长安, 等. 基于马尔可夫过程的健康状态评估模型 [J]. 计算机与数字工程, 2011, 39 (7): 63-66.

积而增大, 仅当故障误差达到某一门限值, 实时 SISE 估计值超过阈值, 完好性标志 IF 置“1”, 系统告警。由于阶跃类故障的实时 SISE 值变化为瞬时值, 远短于 1 s, 两种算法均能及时告警。而对于斜坡类故障, 实时 SISE 值不断增大, 当 SISE 值超过 TH 值则系统告警。因此改进后算法能够更加及时告警。

4 结束语

文中系统地分析空间信号完好性监测系统的监测机理和算法模型, 针对其中两个关键技术点的不足之处, 提出优化方案: 改进临界圆法估计最坏用户位置 WUL; 基于非零均值 SISE 的 SISA 算法优化原算法过分包络问题。最后仿真分析无故障、阶跃类故障、斜坡类故障三种模式下, 算法改进前后系统的完好性告警性能。结果表明, 改进后的算法在保证 TH 对实时 SISE 的包络能力条件下, 将包络紧度由 3.89 米改善至 2.62 米; 且告警更加及时。

参考文献:

[1] Grover Brown R. Global Positioning System Theory and Application [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, 143-164.

[2] GPS Interface Specification IS-GPS-200F [EB/OL]. <http://www.navcen.uscg.gov>.

[3] Veit Oehler. The Galileo Integrity Concept [A]. Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004) [C]. 2004; 604-615.

[4] Helmut Blomenhofer, Walter Ehret. Performance Analysis of GNSS Global and Regional Integrity Concepts [A]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2003) [C]. 2003; 991-1001.

[5] Shaojun Feng, Washington. An Efficient Worst User Location Algorithm for the Generation of the Galileo Integrity Flag [J]. Journal of Navigation, 2006, 59 (03): 381-394.

[6] 谷守周, 秘金钟. Galileo 完备性系统中 WUL 算法研究 [J]. 测绘科学, 2011, 36 (2): 17-19.

[7] 秘金钟. GNSS 完备性监测方法、技术与应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2010.

[8] 张雪辉, 贝 超, 王 芳. 最差用户位置算法研究与仿真分析 [J]. 航天控制, 2010, 28 (2): 29-35.

[9] Fan M J, Zhou J H. Algorithm of Analysis for the Improved Integrity Index SISMA of GALILEO System [A]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings [C]. 2012; 57-65.

[10] Heng L, Gao G X, Walter T, et al. Statistical Characterization of GPS Signal-in-Space Errors [A]. Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation [C]. 2011; 312-319.