0254-6124/2020/40(4)-572–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Mengli, XU Junyi, XIANG Caibing, YAO Lihao. Fault and detection performance definition of Beidou satellite space signal (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(4): 572-577. DOI:10.11728/cjss2020.04.572

北斗卫星空间信号故障与监测性能指标定义 *

王梦丽　徐君毅　向才炳　姚李昊

(中国人民解放军 32021 部队　北京 100094)

摘　要　卫星导航系统指标分配与论证是指导和约束各大系统方案设计及工程实现的重要依据. 完好性和连续性是系统服务性能的关键指标, 能否满足用户需求主要取决于其中的空间信号故障和监测性能指标. 以用户完好性和连续性要求为设计依据, 定义了空间信号故障次数、平均故障率、故障漏检率、虚警率等系统指标与完好性、连续性等风险概率之间的转换关系. 针对北斗系统及星座构成特点, 按照国际民航组织规定的用户完好性和连续性风险概率需求, 分析了不同空间信号故障条件对系统完好性监测性能的指标要求. 研究结果可为北斗全球系统可靠性指标论证和设计提供依据和参考.

关键词　空间信号, 完好性监测, 故障次数, 风险概率

中图分类号　P 228.41

Fault and Detection Performance Definition of Beidou Satellite Space Signal

WANG Mengli　XU Junyi　XIANG Caibing　YAO Lihao

(*32021 Troops of the PLA, Beijing* 100094)

Abstract　Performance index assignment and demonstration is an important accordance for satellite navigation system, and it is necessary to direct and restrict each system scheme design and project implementation. Integrity and continuity are key service performance indexes, and whether they are satisfied with user requirement depends on the design of SIS (Signal in Space) fault and monitoring performance. In the system index design, the fault rate of satellite signal and the integrity monitoring index of satellite signal are complementary and constrained with each other. It is necessary to realize the comprehensive design according to the index of each link of the system. Taking user integrity and continuity performances as designing accordances, the conversion and distribution relationships among SIS fault times, mean fault probability, fault misdetecting probability, fault alarming probability and hazardous probability are defined. Then calculation and analyzation are implemented aiming at Beidou system and its constellation characters. In the calculation, requirements of user integrity and continuity adopt the ICAO standard, and the level of satellite signal failure refers to the actual operation level of Beidou regional system. Beidou system monitoring performance index

* 国家自然科学基金项目资助 (41374038)

2019-04-26 收到原稿, 2019-12-23 收到修定稿

E-mail: compass2020@126.com

under different SIS fault level is analyzed. The research conclusions provide demonstration and design foundation of the reliability index for Beidou global system.

Key words Space signal, Integrity monitoring, Fault times, Risk probability

0 引言

卫星导航技术的快速发展及其广泛应用使得对系统服务性能指标的要求不断提高, 特别是系统可靠性指标. 系统可靠性以空间信号完好性的形式反馈到用户, 并直接影响导航服务的完好性和连续性 [1]. 为满足用户对卫星空间信号的完好性需求, 需采用广域增强、局域增强以及接收机自主完好性等技术手段对空间信号进行改正和监测. 因此, 空间信号的完好性取决于空间信号故障率和系统监测性能指标.

近年来, 关于 GNSS 卫星空间信号完好性的研究主要针对系统完好性概念、监测方法设计以及用户端完好性监测方法设计等. 例如, 文献 [2] 通过分析 GPS Ⅱ 空间信号完好性设计薄弱环节, 提出降低空间信号未告警误导信息的技术手段, 介绍了 GPS Ⅲ 的完好性设计概念. 文献 [3] 给出 Galileo 系统完好性设计思路, 分析了系统基本完好性参数的定义和计算方法. 文献 [4, 5] 分析了 SBAS 系统的完好性设计原理和系统组成. 文献 [6] 从完好性监测的各个层面分析了目前 GNSS 增强技术的发展现状及设计目标, 介绍了北斗增强系统的工作原理及系统组成. 文献 [7, 8] 从用户端角度提出接收机自主完好性的改进设计方法. 文献 [9] 给出了基于风险树的服务完好性和连续性确定方法. 这些研究的前提都是假设空间信号故障率和系统监测性能是确定的.

本文从系统指标设计出发, 以完好性和连续性风险概率要求为设计依据, 定义了空间信号故障次数和平均故障率、漏检率和虚警率等系统指标与完好性、连续性风险概率之间的转换分配关系. 针对北斗系统及星座构成特点, 按照国际民航组织规定的用户完好性和连续性风险概率需求, 分析不同空间信号故障条件下对空间信号完好性监测性能的指标要求.

1 空间信号故障及对服务性能的影响

卫星空间信号故障主要体现在两方面: 导航电文异常和伪距异常. 导航电文异常的故障因素包括监测站数据异常, 卫星轨道计算异常, 卫星钟计算异常, 星历参数拟合计算异常, 星钟参数拟合计算异常, 电离层模型参数计算异常, 导航电文上注错误, 星上转发错误, 电文传输误码等. 伪距异常的故障因素包括卫星钟异常, 卫星轨道偏差异常, 卫星发射功率异常, 伪码载波相位不一致, 伪码信号畸变, 电离层异常, 对流层异常, 多路径影响异常等. 这些故障因素具有不同物理特性, 且各种故障因素可能单独或同时发生. 但无论是导航电文异常还是伪距异常, 空间信号故障最终将导致空间信号精度 SISA 异常.

卫星空间信号故障带来两类中断: 计划中断和非计划中断. 其中, 计划中断是为了对系统进行维护活动而导致空间信号不可用. 该类中断可以通过运控段提前上注信息告知用户, 不影响系统的完好性和连续性, 只影响系统的可用性. 非计划中断是在未提前告知用户的前提下发生的空间信号不可用现象. 该类中断影响系统的完好性、连续性和可用性. 作为精确可信的卫星导航系统, 需对空间信号的完好性进行全面实时监测, 对故障进行及时告警, 确保不完好的空间信号不参与用户导航定位. 从系统完好性监测设计角度, 卫星空间信号故障率和系统完好性监测性能应满足特定用户的完好性和连续性风险概率要求.

以 GPS 系统为例, 最初 GPSⅡ 通过在导航电文中播发用户距离精度 URA 和信号健康标志等参数, 实现了 $10^{-4}\,\mathrm{h}^{-1}$ 的单星空间信号故障率. 现代化 GPSⅡ 通过改进 URA 参数设计以及增加卫星自主完好性监测技术等, 实现了 $10^{-5}\,\mathrm{h}^{-1}$ 的单星空间信号故障率, 而 10 颗卫星可见时的空间信号故障率为 $10^{-4}\,\mathrm{h}^{-1}$. 为了满足 $10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$ 的用户完好性风险概率需求, 系统完好性监测性能应满足漏检率小于 $10^{-3}\,\mathrm{h}^{-1}$. 通过对 GPS 完好性故障模型和影响因素的深入分析, 发现影响空间信号完好性的两个主要因素是卫星钟故障和上注数据错误. GPSⅢ 拟通过改进卫星钟性能以及增加星间链路等技术手段 [10,11], 加强对卫星钟故障和上注数据错误的判断与排除, 使单星空间信号故障率达到 $1\times10^{-8}\,\mathrm{h}^{-1}$,

而 10 颗卫星可见时空间信号故障率为 $1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$, 不需要增强系统的完好性监测即可满足 $1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$ 的用户完好性风险概率需求 [2].

卫星空间信号故障率既可以定义为系统原始故障引入的故障水平, 也可以定义为经过各层次监测手段后实现的故障水平. 不同的定义取决于系统故障指标的分解步骤. 空间信号完好性监测的对象包括系统原始故障、基本导航信号及差分导航信号. 空间信号故障率与系统完好性监测性能是两个互补的指标, 二者没有明确界限, 对这两个指标的合理定义是系统最优设计的前提. 北斗系统是基本导航与星基增强一体化设计的卫星导航系统, 通常认为其空间信号故障率为基本导航信号的指标要求, 空间信号完好性监测性能为星基增强信号的指标要求.

2 空间信号故障与监测性能指标分解

在研究卫星的空间信号故障概率时, 应遵从三条基本假定 [12]: (1) 所有卫星及信号运行条件相同且相互独立; (2) 卫星星座处于稳定状态; (3) 卫星空间信号故障概率密度函数均服从泊松分布, 即 $f(t)=\mathrm{e}^{-\lambda t}$. 其中, $\lambda=1/t_{\mathrm{mbf}}$. 这里 t_{mbf} 为平均故障时间, 即卫星总运行时间与期间总故障次数之比. 卫星寿命分布可表示为

$$F(t)=\int_0^t \lambda\mathrm{e}^{-\lambda x}\mathrm{d}x=[-\mathrm{e}^{-\lambda x}]_0^t=1-\mathrm{e}^{-\lambda t}.$$

对应的可靠性函数可表示为

$$R(t)=1-F(t)=\mathrm{e}^{-\lambda x}.$$

假设卫星 t_0 时刻正常运行, 则 t_0 至 t_0+T (T 为运行时间) 期间, 单颗卫星空间信号发生故障的概率为

$$P_{\mathrm{F,SIS}}=\frac{F(t_0+k)-F(t_0)}{R(t_0)}=1-\mathrm{e}^{-\lambda T}. \quad (1)$$

卫星空间信号故障与完好性、连续性风险概率的分解关系如图 1 所示. 空间信号完好性监测性能以漏警率和虚警率表征. 漏警率是空间信号故障时系统没有检测出的概率, 误警率是空间信号完好而系统检测为故障的概率. 故障发生时正确检出和无故障时虚假告警会造成空间信号退出服务, 致使观测几何较差的用户服务中断, 即为连续性风险; 故障发生时未正确检出以及空间信号无故障时, 多个空间信号随机误差综合引入定位异常且不能正确检出, 即为完好性风险.

假设任意一个空间信号有故障 (H1 假设), 该故障漏检将引起完好性风险, 而正确检出则将引起连续性风险 (按照最差观测条件下用户连续性要求, 假设一颗卫星空间信号故障即导致服务中断). 假设任意一个空间信号无故障 (H0 假设), 则可能因多个空间信号随机误差综合引起完好性风险, 且如果误检有故障则引起连续性风险. 因此, 用户导航定位与空间信号有如下关系:

$$\begin{cases}\mathrm{H1}:\sum_{i=1}^{n}P_{\mathrm{MD}}P_{\mathrm{F,SIS}}\leqslant P_{\mathrm{IR|H1}}.\\ \mathrm{H0}:\sum_{j=1}^{m}P_{\mathrm{ffmd}}(1-P_{\mathrm{F,SIS}})\leqslant P_{\mathrm{IR|H0}}.\end{cases}$$

$$\begin{cases}\mathrm{H1}:\sum_{i=1}^{n}(1-P_{\mathrm{MD}})P_{\mathrm{F,SIS}}\leqslant P_{\mathrm{CR|H1}}.\\ \mathrm{H0}:\sum_{j=1}^{m}P_{\mathrm{FA}}(1-P_{\mathrm{F,SIS}})\leqslant P_{\mathrm{CR|H0}}.\end{cases}$$

式中: P_{MD} 为 H1 假设下的漏检概率; P_{ffmd} 为 H0 假设下的漏检概率; P_{FA} 为假设检验的误警概率; i 为

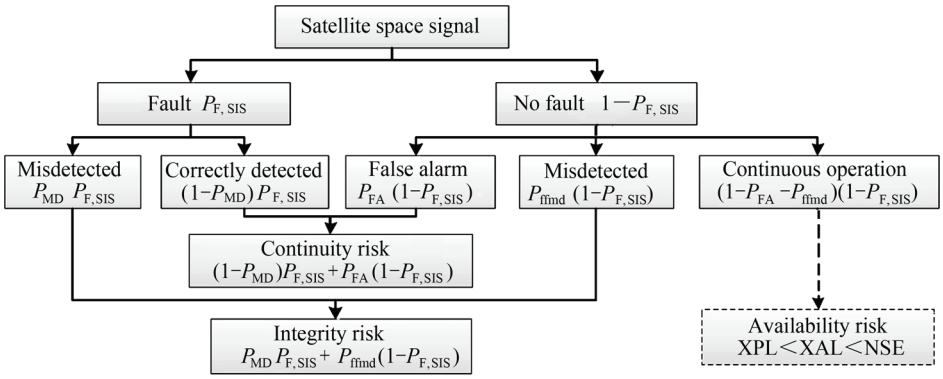


图 1 卫星空间信号故障与风险概率的分解关系

Fig. 1 Decomposition relationship between satellite space signal fault and risk probability

卫星编号, n 为参与定位的卫星数; j 为独立样本编号, m 为用户导航时间段内相应的独立采样数. 其中, 导航时间段内独立采样数 m 根据参与计算的导航信息更新频度计算. 例如: 如果参与计算的导航信息最快每 1 h 更新一次, 则每 1 h 导航时间段内 m 取值为 1; 如果参与计算的导航信息最快每 3 s 更新一次, 则每 15 s, 150 s 以及每 1 h 导航时间段内 m 取值分别为 5, 50 和 1200.

用户完好性风险概率需求值 $P_{\mathrm{IR}} = P_{\mathrm{IR|H1}} + P_{\mathrm{IR|H0}}$, 用户连续性风险概率需求值 $P_{\mathrm{CR}} = P_{\mathrm{CR|H1}} + P_{\mathrm{CR|H0}}$, 即有故障假设下的故障漏检率以及无故障假设下的漏检率和虚警率计算如下:

$$P_{\mathrm{MD}} = P_{\mathrm{IR|H1}}/(nP_{\mathrm{F,SIS}}), \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{ffmd}} = P_{\mathrm{IR|H0}}/[m(1-P_{\mathrm{F,SIS}})], \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{FA}} = P_{\mathrm{CR|H0}}/[m(1-P_{\mathrm{F,SIS}})]. \tag{4}$$

2 空间信号故障率与监测性能

根据上述空间信号故障率和监测性能指标计算方法, 以北斗系统星座构成为例, 按照国际民航组织规定的用户完好性和连续性风险概率需求, 分析不同空间信号故障条件下对空间信号完好性监测性能的指标要求.

2.1 民航用户需求

民航用户从确保生命安全的角度, 对 GNSS 精度、完好性、连续性、可用性等提出了全面性能要求. 国际民航组织 (ICAO) 按洋区航路、本土航路、终端区、非精密进近 (NPA)、垂直引导进近 (APV)、精密进近等不同飞行阶段, 制定了相应的 GNSS 导航性能要求 [13] (见表 1), 其中 T_{p} 为特定飞行阶段的导航时间.

2.2 空间信号故障率

北斗全球系统星座配置包括 24 颗 MEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星以及 3 颗 GEO 卫星. 北斗系统星座同时可见卫星数平均为 14, 即参与定位的卫星数 $n = 14$. 假设每颗卫星的空间信号平均每年发生 1/30~10 次故障, 参照 GPS Ⅲ 的空间信号故障概率要求, 给出每年单星故障次数为 1/10 000 和 1/1000 对应的空间信号平均故障率.

根据式 (1) 可以计算单颗卫星在不同导航时段内的空间信号平均故障概率以及可见卫星中有一颗卫星空间信号发生故障的概率. 其中, 导航时间 T_{P} 取值分别为 1 h, 150 s, 15 s. 计算结果见表 2.

从表 2 的计算结果可见: 空间信号故障率与空间信号平均故障时间近似成正比, 即 $P_{\mathrm{F,SIS}} \approx T/t_{\mathrm{mbf}}$; 不同导航时段内的空间信号故障率与导航时段近似成正比; 对应 GPS Ⅱ $1\times10^{-5}\,\mathrm{h}^{-1}$ 的单星空间信号故障概率, 要求北斗卫星每年单星故障次数为 0.1, 即全星座 30 颗卫星中, 每年最多有 3 星次故障. 对应 GPS Ⅲ $1\times10^{-8}\,\mathrm{h}^{-1}$ 的单星空间信号故障概率, 要求北斗卫星单星故障次数为每年万分之一次.

2.3 空间信号故障监测性能

给定卫星空间信号故障概率, 分析系统对空间信号故障的监测性能需求, 包括漏检率和虚警率. 假设计算条件如下.

(1) 导航时段内独立采样数: 北斗系统基本导航信息每 1 h 更新一次, 因此 1 h 导航时段内 m 取值均为 1, 即每 15 s, 150 s 及 1 h 导航时段内 m 取值均为 1.

表 1 ICAO 定义的 GNSS 导航性能要求

Table 1 GNSS navigation performance requirements defined by ICAO

飞行阶段	精度 (95%)		完好性告警限值		告警	完好性	连续性
	水平	垂直	水平	垂直	时间	风险概率	风险概率
洋区航路	3.7 km	N/A	7.4 km	N/A	5 min	$1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$	10^{-4}~$10^{-8}\,\mathrm{h}^{-1}$
本土航路	3.7 km	N/A	3.7 km	N/A	5 min	$1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$	10^{-4}~$10^{-8}\,\mathrm{h}^{-1}$
终端区	0.74 km	N/A	1.85 km	N/A	15 s	$1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$	10^{-4}~$10^{-8}\,\mathrm{h}^{-1}$
NPA	220 m	N/A	556 m	N/A	10 s	$1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$	10^{-4}~$10^{-8}\,\mathrm{h}^{-1}$
APV Ⅰ	16 m	20 m	40 m	50 m	10 s	$2\times10^{-7}/T_{\mathrm{P}}$	8×10^{-6}/15 s
APV Ⅱ	16 m	8 m	40 m	20 m	6 s	$2\times10^{-7}/T_{\mathrm{P}}$	8×10^{-6}/15 s
CAT Ⅰ	16 m	4~6 m	40 m	10~15 m	6 s	$2\times10^{-7}/T_{\mathrm{P}}$	8×10^{-6}/15 s

表 2 单星空间信号平均故障率 $P_{\mathrm{F,SIS}}$ 计算结果

Table 2 Mean fault rate calculation results of one satellite space signal

每年单星故障次数	$T_{\mathrm{p}}=1\,\mathrm{h}$	$T_{\mathrm{p}}=150\,\mathrm{s}$	$T_{\mathrm{p}}=15\,\mathrm{s}$
0.0001	1.1×10^{-8}	4.8×10^{-10}	4.8×10^{-11}
0.001	1.1×10^{-7}	4.8×10^{-9}	4.8×10^{-10}
1/30	3.8×10^{-6}	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-8}
0.01	1.1×10^{-5}	4.8×10^{-7}	4.8×10^{-8}
0.2	2.3×10^{-5}	9.5×10^{-7}	9.5×10^{-8}
0.3	3.4×10^{-5}	1.4×10^{-6}	1.4×10^{-7}
0.4	4.6×10^{-5}	1.9×10^{-6}	1.9×10^{-7}
0.5	5.7×10^{-5}	2.4×10^{-6}	2.4×10^{-7}
0.6	6.8×10^{-5}	2.9×10^{-6}	2.9×10^{-7}
0.7	8.0×10^{-5}	3.3×10^{-6}	3.3×10^{-7}
0.8	9.1×10^{-5}	3.8×10^{-6}	3.8×10^{-7}
0.9	1.0×10^{-4}	4.3×10^{-6}	4.3×10^{-7}
1	1.1×10^{-4}	4.8×10^{-6}	4.8×10^{-7}
2	2.3×10^{-4}	9.5×10^{-6}	9.5×10^{-7}
3	3.4×10^{-4}	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-6}
4	4.6×10^{-4}	1.9×10^{-5}	1.9×10^{-6}
5	5.7×10^{-4}	2.4×10^{-5}	2.4×10^{-6}
6	6.9×10^{-4}	2.9×10^{-5}	2.9×10^{-6}
7	8.0×10^{-4}	3.3×10^{-5}	3.3×10^{-6}
8	9.1×10^{-4}	3.8×10^{-5}	3.8×10^{-6}
9	1.0×10^{-3}	4.3×10^{-5}	4.3×10^{-6}
10	1.1×10^{-3}	4.8×10^{-5}	4.8×10^{-6}

(2) H0 和 H1 假设下风险概率分配: 空间信号无故障产生的风险占风险概率的 1%, 空间信号故障产生的风险占风险概率的 99%.

(3) 参与定位的卫星数: 根据北斗全球系统星座配置情况, 其包括 24 颗 MEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星以及 3 颗 GEO 卫星, 北斗系统星座同时可见卫星数平均为 14, 即参与定位的卫星数 $n=14$.

由表 1 可见, 对应洋区航路、本土航路、终端区和 NPA 四个飞行阶段, 完好性和连续性风险概率分别为 $1\times10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$ 和 $1\times10^{-4}\,\mathrm{h}^{-1}$; 对应 APV I, APV Ⅱ 和 CAT I, 完好性和连续性风险概率分别为 $2\times10^{-7}/T_{\mathrm{p}}$ (T_{p} 为 150 s) 和 $8\times10^{-6}/15\,\mathrm{s}$. 根据式 (2)~(4), 表 3 给出了不同风险概率条件和空间信号故障概率对应的监测性能需求计算结果.

从表 3 可见: 特定风险概率条件下, 空间信号故障概率与故障漏检率近似成正比, 即由于无故障条件下 $P_{\mathrm{IR|H0}}$ 和 $P_{\mathrm{CR|H0}}$ 值很小, $P_{\mathrm{IR}}\approx(nP_{\mathrm{F,SIS}})P_{\mathrm{MD}}$; 无故障假设下的漏检概率和虚警概率主要取决于用户风险概率需求, 基本不受卫星空间信号故障概率的影响, 即 $P_{\mathrm{ffmd}}\approx P_{\mathrm{IR|H0}}/m$, $P_{\mathrm{FA}}\approx P_{\mathrm{CR|H0}}/m$; 无故障条件下的漏检概率 P_{ffmd} 可进一步用于约束系统用户等效测距误差的实现水平.

3 结论与应用

卫星导航系统指标分配与论证是指导和约束卫星系统方案设计与工程实现的重要依据. 完好性和连续性是系统服务性能的关键指标, 其能否满足用户需求主要取决于空间信号故障和监测性能指标设计. 本文从系统完好性和连续性需求出发, 定义了空间信号故障次数、平均故障率、故障漏检率和虚警率等系统指标与完好性和连续性风险概率之间的转换关系. 针对北斗系统星座构成特点, 按照国际民航组织规定的用户完好性和连续性风险概率需求, 分析了不同空间信号故障条件下对空间信号完好性监测性能的指标要求. 研究结论可为北斗全球系统可靠性指标论证和设计提供依据.

在系统指标设计中, 空间信号故障率与空间信号完好性监测指标是互相补充和互相约束的, 需要根据系统各个环节的指标实现能力综合设计. 参照北斗区域系统运行期间的空间信号故障水平, 假设北斗全球系统星座空间信号故障率设计指标为每年 3 次, 则单星平均信号故障率为 $1.1\times10^{-5}\,\mathrm{h}^{-1}$. 相应地, 为满足民航用户各航段的风险概率需求, 在不考虑接收端自主完好性监测手段的前提下, 要求空间信号的故障漏检率为 6.2×10^{-4}, 虚警率为 1.0×10^{-6}. 空间信号故障率指标由原始数据监测接收、导航参数计算、电文上行注入、星上数据接收和处理、卫星钟、下行信号调制和发射以及系统基本完好性监测等环节共同设计实现; 空间信号完好性监测指标主要由地面运控段设计实现. 针对系统各个环节的指标分配和定义将另文分析.

参考文献

[1] Department of Defense. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 4th Edition [R]. Washington: Department of Defense, 2008

[2] KARL KOVACH, JOHN DOBYNE, MARK CREWS, *et al.* GPS Ⅲ integrity concept [C]//Proceeding of ION GNSS 2008. Savannah: ION, 2008: 2250-2257

表 3　空间信号不同故障条件下监测性能计算结果

Table 3　Monitoring performance calculation results of space signal under different fault conditions

每年单星故障次数	$P_{IR}=1\times10^{-7}\,h^{-1}$, $P_{CR}=1\times10^{-4}\,h^{-1}$			$P_{IR}=2\times10^{-7}/T_p$, $P_{CR}=8\times10^{-6}/15\,s$		
	P_{MD}	P_{ffmd}	P_{FA}	P_{MD}	P_{ffmd}	P_{FA}
0.0001	6.2×10^{-1}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	29.7	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.001	6.2×10^{-2}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	2.97	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
1/30	1.9×10^{-3}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	8.9×10^{-2}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.01	6.2×10^{-4}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-2}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.02	3.1×10^{-4}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	1.5×10^{-2}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.03	2.1×10^{-4}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-2}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.04	1.5×10^{-4}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	7.4×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.05	1.2×10^{-4}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	5.9×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.06	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.07	8.8×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	4.2×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.08	7.7×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.7×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
0.09	6.9×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.3×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
1	6.2×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
2	3.1×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	1.5×10^{-3}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
3	2.1×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	9.9×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
4	1.5×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	7.4×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
5	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	5.9×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
6	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
7	8.9×10^{-6}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	4.2×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
8	7.7×10^{-6}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.7×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
9	6.9×10^{-6}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.3×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}
10	6.2×10^{-6}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-4}	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-8}

[3] OEHLER V, LUONGO F, BOYERO J P, *et al*. The Galileo integrity concept [C]// Proceeding of ION GNSS 2004. Long Beach: ION, 2004: 604-615

[4] GREWAL M, HABEREDER H. Overview of the SBAS integrity design [C]//The European Navigation Conference 2003. Graz: European Group of Institutes of Navigation, 2003: 22-25

[5] TOSSAINT M. The Stanford-ESA integrity diagram: focusing on SBAS integrity [C]//Proceeding of ION GNSS 2006. Fort Worth: ION, 2006: 26-29

[6] CHEN Jinping. Analysis of the GNSS augmentation technology architecture [C]//Proceeding of ION GNSS 2011. Portland: ION, 2011: 247-266

[7] GRATTON L, JOERGER M, PERVAN B. Carrier phase relative RAIM algorithms and protection level derivation [J]. *J. Inst. Nav.*, 2010, **63**(2): 215-216

[8] LEE Y C. A position domain relative RAIM method [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Elec. Syst.*, 2011, **47**(1): 85-97

[9] ANON. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, International Standards and Recommended Practices (SARPs), Volume I-Radio Navigation Aids [R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2006

[10] WOLF R. Onboard autonomous integrity monitoring using intersatellite links [C]//Proceeding of ION GPS 2000. Salt Lake City: ION, 2000: 247-266

[11] HENG L, GAO G X, WALTER T, *et al*. GPS Signal-in-space integrity performance evolution in the last decade [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Elec. Syst.*, 2012, **48**(4): 2932-2946

[12] PHLONG W, ELROD B. Availability characteristics of GPS and augmentation alternatives [J]. *J. Inst. Nav.*, 1994, **40**(4): 409-428

[13] RTCA DO-229D. Minimum Operational Performance Standards for GPS/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment [R]. Washington: International Civil Aviation Organization, 2006