

## GPS 空间信号可用性评估算法

王尔申<sup>1a,1b,2</sup>, 张晴<sup>1a</sup>, 雷虹<sup>3</sup>, 庞涛<sup>1a</sup>, 曲萍萍<sup>1a</sup>

(1. 沈阳航空航天大学, a. 电子信息工程学院; b. 辽宁省通用航空重点实验室, 沈阳 110136;  
2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 3. 电磁环境效应航空科技重点实验室, 沈阳 110035)

**摘要:** 在民航等应用领域, 卫星导航系统的可用性是决定其能否作为唯一或主要导航系统的关键性能指标。主要对 GPS 卫星导航系统的空间信号(SIS)可用性进行评估分析, 研究一种基于马尔可夫过程的卫星导航单星可用性算法模型, 并研究对卫星导航星座可用性的评估模型。结合 GPS 实测数据和 GPS 标准定位服务性能标准(GPS SPS PS)中的可用性指标, 证明提出的空间信号评估模型有效且符合 GPS SIS 可用性指标要求。研究结果对我国北斗卫星导航系统可用性的评估具有一定的参考价值。

**关键词:** GPS; 空间信号; 可用性; 北斗卫星导航系统

中图分类号: O213.2 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2017)02-0039-04

## Evaluation Algorithm of GPS Signal in Space Availability

WANG Er-shen<sup>1a,1b,2</sup>, ZHANG Qing<sup>1a</sup>, LEI Hong<sup>3</sup>, PANG Tao<sup>1a</sup>, QU Ping-ping<sup>1a</sup>

(1. Shenyang Aerospace University, a. School of Electronic and Information Engineering; b. Liaoning General Aviation Key Laboratory, Shenyang 110136, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Electromagnetic Environment Effect Top Laboratory of Aviation Industry, Shenyang 110035, China)

**Abstract:** In civil aviation and other application fields, the availability of satellite navigation system is the key performance indicator for whether it can be taken as the only or the main navigation system. This paper mainly evaluates and analyzes the availability of Space-in-Signal (SIS) of GPS satellite navigation system. A model of single satellite availability algorithm based on Markov process is presented, and the model for evaluating availability of navigation satellite constellation is studied. In addition, based on the relevant data and the availability index of the latest GPS Standard Positioning Service Performance Standards (GPS SPS PS), it is verified that the model is effective and conforms with the availability index of GPS SIS. The result has great reference value to the study of the availability of BeiDou navigation system.

**Key words:** GPS; signal-in-space; availability; BeiDou Satellite Navigation System (BDS)

### 0 引言

随着 GNSS 逐步向兼容和互操作方向发展, 卫星导航的服务性能已经成为衡量系统建设及用户需求的重要指标和依据<sup>[1]</sup>。然而, 目前卫星导航服务领域内尚未形成统一的服务性能标准体系, 美国的 GPS、欧盟的 Galileo、俄罗斯的 GLONASS 及我国的北斗都发布了各自的性能标准, 其指标名称、阐述方式, 指标所规定

的范围也都有差别。且针对 GPS 服务性能的研究, 美国发布的文件就包括适用于民用用户的 GPS 标准定位服务性能标准(GPS SPS PS), 适用于军事和特定用户的 GPS 精密定位服务性能标准(GPS PPS PS)及 GPS 广域增强系统性能标准(GPS WAAS PS)等。此外, 自 1993 年开始, 美国联邦航空局(FAA)便以 GPS SPS PS 文档给出的性能指标为依据对 GPS 及其增强系统有关性能的数据进行监测, 并将相关结果体现在其每季度的性能分析报告中<sup>[2]</sup>。

作为卫星导航系统的四大基础服务性能之一, 可用性已经成为民航等应用领域的关键性能指标, 是判断导航系统是否可靠的重要依据<sup>[3]</sup>。考虑到 GPS SPS PS 发展比较成熟, 目前已经主导了卫星导航系统的性能标准及其评估指标体系, 因此, 本文主要以 GPS SPS

收稿日期:2016-01-26 修回日期:2016-03-26

基金项目:国家自然科学基金(61571309, 61101161);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2010CB731805);航空科学基金(2011ZC54010);辽宁省自然科学基金联合基金(2013024003)

作者简介:王尔申(1980—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 副教授, 研究方向为卫星导航。

PS文档为依据,结合FAA发布的GPS性能分析报告中的有关数据,以GPS为代表,对GPS SIS的单星可用性和星座可用性进行评估分析,从而验证评估模型的有效性及GPS SIS可用性的符合性。

## 1 GPS SIS 可用性指标分析

截止目前,美国发布了4个版本的GPS SPS PS文档,其对可用性的研究内容如表1所示<sup>[4-7]</sup>。

表1 GPS SPS PS 对可用性研究内容的对比

Table 1 Availability research content of GPS SPS PS

GPS SPS PS 文档	可用性研究内容
1993年版	服务可用性标准
1995年版	服务可用性标准
2001年版	PDOP 可用性标准、SPS 服务可用性标准
2008年版	SIS 可用性标准、PDOP 可用性标准、SPS 服务可用性标准

由表1可见,随着GPS SPS PS的不断演变,GPS可用性的评估指标也在不断完善,并且在最新版的GPS SPS PS中,可用性已经趋于分成SIS可用性及服务层可用性,但服务层可用性也是只考虑SIS的影响。

GPS SPS PS(2008年版)将SIS可用性定义为:播发可跟踪、健康SPS SIS的卫星占据GPS星座轨位的概率,包括单轨位可用性和星座可用性两部分。其中,单轨位可用性是指播发可跟踪、健康SPS SIS的卫星占据GPS星座中单轨位的时间比率,主要取决于卫星设计、地面控制段进行在轨维修和故障响应的策略。

影响SIS可用性的故障主要有4类:长期计划故障(主要是寿命末期故障)、短期计划故障(主要是运行和维护造成的故障)、长期非计划故障(主要是长期硬故障)和短期非计划故障(主要是短期硬故障和软故障)。由于4类故障都反映了卫星的故障,因此,GPS SIS的可用性实质上是对GPS卫星可用性的评估,即在信号域和伪距域内对单颗卫星的可用性进行时间累计效应统计,再由单颗卫星可用性构成星座可用性,从而综合反映星座内所有卫星SIS的可用性情况。

## 2 基于马尔可夫过程的单星可用性

目前已有文献对单星可用性进行阐述<sup>[8]</sup>,并给出了相应的模型,但这些模型仅给出基于故障率和可靠性的单星瞬时可用性函数,并没有考虑单星在轨修复特性。事实上,卫星发生的大部分故障是可以通过地面控制段修复或星载备份设备来解决的,这正是马尔可夫链的功能之一。本文提出的基于马尔可夫过程的单星可用性模型是对卫星故障情况和修复特性的综合体现,更能从整体上反映卫星的可靠性。

### 2.1 马尔可夫可用性模型

当构成系统各部件的寿命分布、故障后的修理时间分布及其他有关分布均服从指数分布时,适当定义系统的状态,则该系统能用马尔可夫过程来描述<sup>[9]</sup>。因此,当假设卫星的故障率服从指数分布时,单颗卫星的马尔可夫状态转移过程如图1所示<sup>[10-11]</sup>。

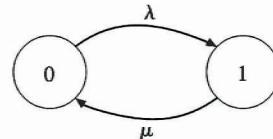


图1 单颗卫星的马尔可夫状态转移过程

Fig.1 Markov state transition process of single satellite

图1中:0表示系统状态正常;1表示系统状态故障;λ表示卫星的故障率,是平均故障中断时间(MTBF)的倒数;μ表示卫星的修复率,是平均故障修复时间(MTTR)的倒数。

基于可靠性理论,由马尔可夫过程可以得到卫星的可用性为

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (1)$$

对式(1)进行分析可知,当μ远远大于λ时,卫星的可用性最高,基本接近于100%;当λ远远大于μ时,卫星的可用性最低,几乎为0;除去上述两种情况,卫星的可用性将介于0%~100%之间,由μ和λ的实际大小关系来决定。

此外,由λ,μ与MTBF,MTTR之间的关系还可以将式(1)等价为

$$A = \frac{M_{MTBF}}{M_{MTBF} + M_{MTTR}} \quad (2)$$

对于不同类型的故障,其中任意一种类型故障的发生都有可能导致卫星不可用,且不同类型的故障是并联关系,因此,在图1的基础上用不同故障类型表示的单颗卫星马尔可夫过程如图2所示。

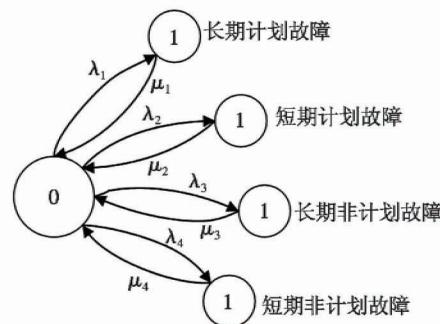


图2 不同故障类型的单星马尔可夫状态转移过程

Fig.2 Markov state transition process of single satellite based on different fault types

图2中,  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 表示卫星某类故障的故障率,  $\mu_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 表示卫星某类故障的修复率。综合考虑不同类型故障的影响, 式(1)中卫星的故障率  $\lambda$  和修复率  $\mu$  分别等价为

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 \\ \mu = \frac{\lambda}{\lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2 + \lambda_3/\mu_3 + \lambda_4/\mu_4} \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 基于实测数据的单星可用性计算

由马尔可夫状态转移模型可以看出, 利用此模型计算单颗卫星可用性的关键在于得到卫星的故障率  $\lambda$  和修复率  $\mu$ , 而  $\lambda$  和  $\mu$  又分别与 MTBF 和 MTTR 成倒数关系, 因此, 可以通过分析 FAA 提供的 GPS 状态故障报告来分别获取每颗卫星不同类型故障的 MTBF 和 MTTR, 进而求出卫星的可用性。

### 2.2.1 实测数据获取

为了保证分析结果的可靠性, 本文根据 FAA 提供的 GPS 状态故障报告对 1999~2015 年间发生的所有中断进行了统计。但是, 由于 GPS 的故障报告基本都按照卫星的 PRN 号对卫星的故障情况进行统计, 对于具体的单颗卫星而言, 考虑到大多数 PRN 号都对应过不止一颗卫星, 所以需要对 GPS 卫星的发射、退役时间以及目前运行状况等信息进行统计, 从而得到每颗卫星的故障情况。

### 2.2.2 实测数据分析

对 FAA 的 GPS 故障报告进行统计分析, 得到 1999~2015 年间共有 51 颗卫星发生过不同类型的中断, 将卫星的 MTBF 和 MTTR 整理可以得到每颗卫星的平均故障率和平均修复率, 如图 3 所示。

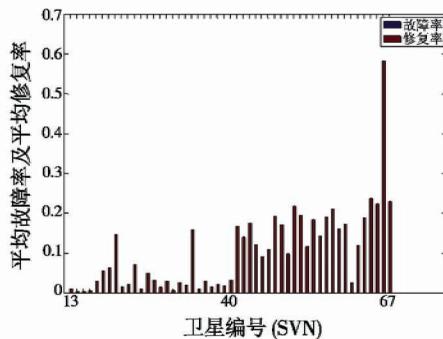


图 3 GPS 单颗卫星的平均故障率及平均修复率

Fig.3 Average failure rate and repair rate of single GPS satellite

卫星编号与卫星的发射顺序有一定关系, 编号较小的卫星发射较早, 卫星型号较低; 而编号较大的卫星则发射较晚, 卫星型号相对较高。从总体上对图 3 进行分析可知, 与低型号的卫星相比, 型号较高卫星的平均修复率普遍远远大于其平均故障率。结合对式(1)的分析可以推断, 型号较高卫星的可用性普遍接近 100%, 一定程度上说明了随着技术的不断发展, 卫星

的可用性在不断提高。

将上述每颗卫星的平均故障率和平均修复率代入基于马尔可夫过程的可用性模型中, 可以得到 GPS 单颗卫星的可用性, 如图 4 所示。

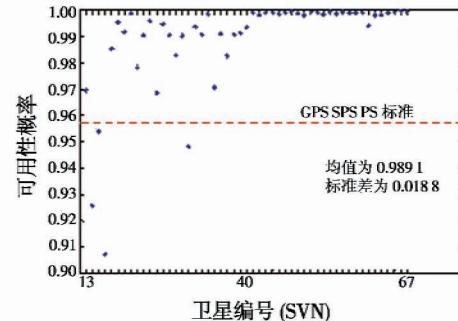


图 4 GPS 单颗卫星的可用性分布图

Fig.4 Distribution of single GPS satellite availability

图 4 中, 红色虚线处为 GPS SPS PS(2008 年版)所规定的单星可用性最低标准 0.957, 若卫星的可用性大于该值, 则卫星符合可用性标准, 否则即认为卫星不符合可用性标准。因此, 由上图可知, 除了型号较低的 BLOCK II 系列的 14, 15, 16 号卫星和 BLOCK IIA 系列的 31 号卫星的可用性明显偏小以外, 其余卫星的可用性均大于 0.957, 满足 GPS SPS PS(2008 年版)的可用性标准, 基本上验证了上述 GPS 单星可用性评估模型的正确性和有效性。从图中还可以看出, GPS 卫星的可用性均值可达到 0.9891, 且经计算, 目前仍在轨运行的所有 GPS 卫星的可用性均值达 0.9985, 远超过 0.957。

## 3 星座可用性模型

传统的星座可用性根据二项式概率分布模型来计算, 即

$$p(k) = C_N^k (1 - A)^k A^{N-k} \quad (4)$$

式中:  $p(k)$  为  $k$  颗卫星发生故障的星座可用性;  $N$  为星座中的卫星总数;  $k$  为故障卫星数;  $A$  为单星可用性。该模型根据单星稳态可用性计算星座的可用性, 虽然在一定程度上反映了星座处于不同故障状态下的可用度, 但忽略了卫星的备份策略对于星座可用性的影响。

### 3.1 星座可用性计算模型

卫星星座的可用性与多方面因素有关, 由于实际影响星座状态的因素比较复杂, 因此本文仅考虑单星可用性及备份卫星对星座可用性的影响。

首先对星座状态进行说明: 假设星座由  $N$  颗基础轨位卫星和  $M$  颗备份卫星构成, 则在无停工事件发生时, 星座的状态为  $N$ ; 一旦有 1 颗轨位卫星发生停工, 备份卫星则会及时替换停工卫星以稳定星座的状态, 此时认为星座的状态没有发生变化; 但发生停工的卫

星如果没有被替换,星座的状态就会发生变化。由此可见,备份卫星在一定程度上保持了星座的稳定状态,对星座的状态具有重要影响。

用  $S_k$  ( $k=0,1,2,3,\dots,N$ ) 表示由基础轨位卫星所构成的星座状态,其中,  $S_0$  表示没有卫星故障的状态,  $S_1$  表示有 1 颗卫星故障的状态,依次类推,则  $S_N$  表示有  $N$  颗卫星故障的状态。 $S_k$  出现的可能性是一个概率值  $P_k$ ,即  $P_k$  表示  $k$  颗卫星发生故障时星座的状态概率,其大小取决于星座中每颗卫星的可用性、卫星所有故障的组合情况以及卫星备份情况,于是有

$$\begin{cases} H_m = \sum_{n=1}^{C_N^m} \left[ \prod_{i=1}^m (1 - A_{n,i}) \prod_{j=1}^{N-m} A_{n,j} \right] & m = 0, 1, 2, \dots, N \\ R_f = \sum_{n=1}^{C_M^f} \left[ \prod_{i=1}^f B_{n,i} \prod_{j=1}^{M-f} (1 - B_{n,j}) \right] & f = 0, 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (5)$$

式中: $H_m$  为  $m$  颗基础轨位卫星故障时,仅由基础轨位构成的星座的状态概率; $R_f$  为  $f$  颗备份卫星正常时,该  $f$  颗备份卫星的可用性概率; $C_N^m$  为  $N$  颗基础轨位卫星中有  $m$  颗卫星故障的所有组合数; $C_M^f$  为  $M$  颗备份卫星中有  $f$  颗卫星可用的所有组合数; $1 - A_{n,i}$  为第  $n$  种组合下特定  $m$  颗故障基础轨位卫星各自的单星可用性; $A_{n,j}$  为第  $n$  种组合下特定的  $N-m$  颗正常基础轨位卫星各自的单星可用性; $B_{n,i}$  为第  $n$  种组合下特定的  $f$  颗正常备份卫星各自的单星可用性; $1 - B_{n,j}$  为第  $n$  种组合下特定的  $M-f$  颗故障备份卫星各自的单星可用性。

通过实测结果得到的单颗卫星的可用性各不相同,从而导致使用上述模型计算时过程过于复杂,因此,为了简化计算过程,分别用基础轨位卫星和备份卫星的平均可用性表示各自的单星可用性,简化后的算式为

$$\begin{cases} H_m = C_N^m (1 - \bar{A})^m (\bar{A})^{N-m} & m = 0, 1, 2, \dots, N \\ R_f = C_M^f (\bar{B})^f (1 - \bar{B})^{M-f} & f = 0, 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{A}$  表示  $N$  颗基础轨位卫星的平均单星可用性; $\bar{B}$  表示  $M$  颗备份卫星的平均单星可用性。

综合考虑基础轨位卫星与备份卫星等对星座可用性的影响,认为星座可用性的计算模型为

$$\begin{cases} P_k = H_0 + H_1 \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_M) + H_2 \cdot (R_2 + R_3 + \dots + R_M) + \dots + H_M \cdot R_M & k = 0 \\ P_k = \sum_{s=k}^{k+M} H_s \cdot R_{s-k} & k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

式中, $P_k$  为  $k$  颗卫星故障时星座的状态概率。

### 3.2 结合实测数据的星座可用性分析

目前正在运行的所有 GPS 卫星中,除去没有统计到其单星可用性的卫星外,其余卫星共有 27 颗,分别位于 6 个轨道面。

由式(1)计算得到的单星可用性可以求得 24 颗基础轨位卫星的平均单星可用性  $\bar{A}$  为 0.9988,3 颗备份卫星的平均单星可用性  $\bar{B}$  为 0.9963,将其代入式(5)和式(6)可以得到  $k$  ( $k=0,1,2,3,\dots,24$ ) 颗卫星发生故障时星座的状态概率。根据 GPS SPS PS(2008 年版)关于星座可用性的评估标准,只需分析 4 颗以下卫星发生故障时星座的状态概率即可,具体如表 2 所示。

表 2 不同卫星故障情况下星座可用性

Table 2 Constellation availability under different satellite failure

$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
0.99999992	0.00000008	0.00000000	0.00000000	0.00000000

由表 2 可知,该星座 24 轨位卫星全部可用的概率为 0.99999992,至少 23 轨位卫星可用的概率为 1,符合 GPS SPS PS(2008 年版)中关于卫星导航星座可用性的评估标准,验证了该模型的正确性和 SIS 星座可用性的符合性。

## 4 结论

本文对 GPS SIS 可用性的评估方法进行了研究。从可靠性原理出发研究了一种基于马尔可夫过程的单星可用性评估模型,并研究一种同时考虑基础轨位卫星和备份卫星的星座可用性评估模型。结合 GPS 的实测数据得到单星可用性和星座可用性的评估结果,与 GPS SPS PS(2008 年版)给出的单星可用性及星座可用性标准比较,验证了 GPS SIS 的可用性符合 GPS SPS PS(2008 年版)的可用性标准,实现了对 GPS SIS 可用性性能的评估。本文所研究的 SIS 可用性评估方法对我国北斗卫星导航系统可用性的研究具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 张清华,王源,孙阳阳. 北斗卫星导航系统空间信号可用性的初步评估 [J]. 测绘地理信息, 2015, 40(6): 22-24.
- [2] Federal Aviation Administration. Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) performance analysis report [R]. Washington: FAA, 2015.
- [3] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究 [D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2012.
- [4] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service signal specification [S]. United States, 1993.
- [5] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service signal specification [S]. United States, 1995.

(下转第 46 页)



图8 机场区域的最终检出

Fig. 8 Final detection of airport area

#### 4 实验结果及分析

本文利用 C++ 进行编程实现,实验环境为 Windows 7,64 位系统,Visual Studio 2010 + OpenCV2.4.6。对 5 幅遥感图像中的机场跑道进行检测,结果如图 9 所示。实验结果表明,机场跑道检测算法能在遥感图像中准确有效地检测出机场跑道。

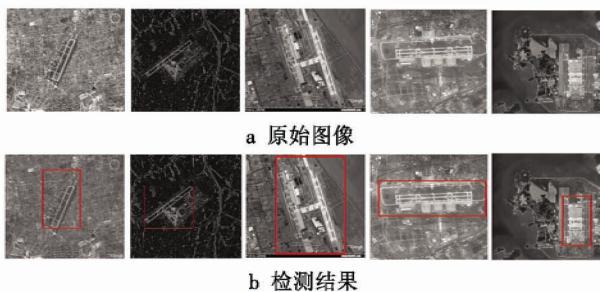


图9 遥感图像中的机场跑道检测结果

Fig. 9 Airport runway detection result in remote sensing image

#### 5 结束语

本文主要利用了机场跑道的高灰度特征和整体性从遥感图像中检测机场跑道。然而算法只利用了机场跑道的少数几个特征,若周围存在类似的目标,很可能检测出错误的目标,对此将在后续工作中展开深入研究。

(上接第 42 页)

- [6] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard [S]. United States, 2001.
- [7] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard [S]. United States, 2008.
- [8] OCHENG W Y, SHERIDAN K F, SAUER K, et al. An assessment of the RAIM performance of a combined Galileo/

#### 参 考 文 献

- [1] MENA J B, MALPICA J A. An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery [J]. Pattern Recognition Letter, 2005, 26(9):1201-1220.
- [2] POPESCU D, DOBRESCU R, MEREZANU D. Road analysis based on texture similarity evaluation [C]//Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, 2008:47-51.
- [3] 闫国华,许俊峰,艾淑芳,等.基于局部多特征的机场跑道检测算法[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1714-1720.
- [4] QU Y, LI C, ZHENG N. Airport detection base on support vector machine from a single image [C]//The 5th International Conference on Information, Communications and Signal Processing, IEEE, 2005:546-549.
- [5] 李金宗,穆立胜,李冬冬,等.大尺度高分辨率遥感图像机场目标的快速识别[J].光电子·激光,2010,21(7):1083-1088.
- [6] 陈旭光,林卉.遥感图像中机场目标的识别方法[J].计算机工程与应用,2012,48(25):194-197.
- [7] 徐正光,鲍东来,张利欣.基于递归的二值图像连通域像素标记算法[J].计算机工程,2006,32(24):186-188.
- [8] LIU D, HE L, CARIN L. Airport detection in large aerial optical imagery [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. doi: 10.1109/ICASSP.2004.1327222.
- [9] KOU Z, SHI Z, LIU L. Airport detection based on line segment detector [C]//International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS), IEEE, 2012:72-77.
- [10] 张学峰,李丽娟,刘珂.基于直线提取的机场跑道识别方法[J].激光与红外,2008,38(12):1277-1280.

GPS navigation system using the Marginally Detectable Errors (MDE) algorithm [J]. GPS Solutions, 2002, 5(3):42-51.

- [9] 曹晋华,程侃.可靠性数学引论 [M].北京:高等教育出版社,2006:182-222.
- [10] 郑桓,李海生,杨卓鹏.卫星导航系统星座可用性分析 [J].航天控制,2011,29(3):87-94.
- [11] 龚佩佩,郑桓,苏牡丹.空间信号性能理论计算与测试评估方法研究 [C]//中国卫星导航学术年会,2015:1-6.