

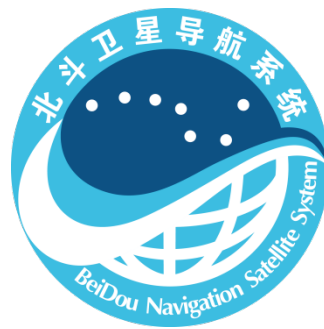
BD

中国第二代卫星导航系统重大专项标准

BD 210009-2022

北斗卫星导航系统 RNSS 服务可用性确定方法

Determination methods for availability of BeiDou satellite navigation system
RNSS



2022-08-01 发布

2022-09-01 实施

中国卫星导航系统管理办公室 批准

目 次

| | |
|--------------------------|----|
| 前言 | II |
| 1 范围 | 3 |
| 2 规范性引用文件 | 3 |
| 3 术语和定义 | 3 |
| 4 缩略语 | 4 |
| 5 RNSS 服务可用性 | 5 |
| 5.1 RNSS 服务可用性指标体系 | 5 |
| 5.2 单星可用性 | 5 |
| 5.3 星座可用性 | 5 |
| 5.4 服务可用性 | 5 |
| 6 方法分类 | 6 |
| 7 基于分析的可用性确定方法 | 6 |
| 7.1 基于分析的单星可用性确定方法 | 6 |
| 7.2 基于分析的星座可用性确定方法 | 7 |
| 7.3 基于分析的服务可用性确定方法 | 8 |
| 8 基于实测的可用性确定方法 | 10 |
| 8.1 基于实测的单星可用性确定方法 | 10 |
| 8.2 基于实测的星座可用性确定方法 | 10 |
| 8.3 基于实测的服务可用性确定方法 | 11 |

前 言

本标准由中国卫星导航系统管理办公室提出。

本标准由全国北斗卫星导航标准化技术委员会（SAC/TC 544）归口。

本标准起草单位：中国航天标准化研究所、中国卫星导航工程中心、北京卫星导航中心等。

本标准主要起草人：龚佩佩、张 锐、王 凯、程海龙、郑 恒、龙东腾、向才炳、周 倜、王小宁、王晋婧、申 林、角淑媛、冉迎春、郑紫霞。

北斗卫星导航系统 RNSS 服务可用性确定方法

1 范围

本标准规定了北斗卫星导航系统RNSS空间信号与服务可用性指标体系、基于分析的可用性确定方法和基于实测的可用性确定方法。

本标准适用于北斗卫星导航系统RNSS设计、建设、运行、维护可用性指标确定及评价。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 39267 北斗卫星导航术语

GB/T 39473 北斗卫星导航系统公开服务性能规范

GJB 451 可靠性维修性保障性术语

BD 310002 北斗卫星导航系统 RNSS 公开服务性能评估方法

3 术语和定义

GB/T 39267、GB/T 39473、GJB 451和BD 310002界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

可用性 availability

卫星导航系统可服务时间与系统期望服务时间之比。可服务时间是指在给定服务区域内满足规定服务性能的时间。

3.2

空间信号可用性 signal in space availability

卫星导航系统星座中规定轨道位置上在轨工作卫星播发健康的空间信号的时间比率。

注1：卫星播发的多个导航信号，应根据每个导航信号分别确定其可用性。

注2：健康是指空间信号的健康参数符合北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件的规定。

3.3

标称星座 nominal constellation

卫星导航系统星座中规定数量、规定轨道位置上一组导航卫星的总称。

3.4

服务可用性 service availability

规定时间、规定条件下，卫星导航系统提供的服务性能不低于规定阈值的时间比率。

3.5

短期计划中断 Short Term Scheduled (STS) Outages

导航卫星因维护活动出现的短时间服务中断。

3.6

短期非计划中断 Short Term Unscheduled (STU) Outages

导航卫星因短期硬件失效或软失效出现的服务中断。

3.7

平均中断间隔时间 mean time between outages (MTBO)

导航卫星播发的空间信号可用状态持续时间的平均值。

3.8

平均中断恢复时间 mean time to outages restore (MTTOR)

导航卫星播发的空间信号发生中断后恢复为可用状态时间的平均值。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CPT —— conditional probability tables, 条件概率表;

GEO —— geostationary earth orbit, 地球静止轨道;

HDOP —— horizontal dilution of precision, 水平精度衰减因子;

HSAT —— horizontal service availability threshold, 水平服务可用性阈值;

IGSO —— inclined geosynchronous orbit, 倾斜地球同步轨道;

MEO —— medium earth orbit, 中圆地球轨道;

MTBO —— mean time between outages, 平均中断间隔时间;

MTTOR —— mean time to outages restore, 平均中断恢复时间;

PDOP —— position dilution of precision, 位置精度衰减因子;

- RNSS ——radio navigation satellite service, 定位导航授时;
- SISRE —— signal in space ranging error, 空间信号测距误差;
- VDOP ——vertical dilution of precision, 垂直精度衰减因子;
- VSAT —— vertical service availability threshold, 垂直服务可用性阈值。

5 RNSS 服务可用性

5.1 RNSS 服务可用性指标体系

北斗卫星导航系统RNSS服务可用性包括空间信号可用性和服务可用性。

卫星播发多个导航信号, 应根据每个导航信号分别确定其可用性。

空间信号可用性又包括单星可用性和星座可用性。

服务可用性根据不同服务对象对规定阈值的不同要求, 分为PDOP可用性和定位服务可用性。

5.2 单星可用性

北斗卫星导航系统标称星座中某一单颗在轨工作卫星播发健康的空间信号的时间比率。

单星可用性的判据是地面接收设备是否可以接收到健康的空间信号。健康是指空间信号的健康参数符合北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件和公开服务性能规范的规定。

单星可用性受空间信号的短期计划中断和短期非计划中断的影响。

5.3 星座可用性

星座可用性定义为北斗卫星导航系统标称星座具有不少于规定数量的在轨工作卫星且播发健康的空间信号的时间比率。

星座可用性的判据是标称星座中应至少保证N颗卫星可用。星座构型设计的冗余性, 能保证星座在丧失一定数量的卫星后服务性能不下降, 或仍可保持一定的服务性能。

5.4 服务可用性

服务可用性定义为规定时间、规定条件下, 北斗卫星导航系统提供的RNSS服务性能满足规定阈值的时间比率。

- a) PDOP 可用性的判据是 PDOP 值, 一般要求用户 PDOP 值小于等于规定值, 即 PDOP 阈值;
- b) 定位服务可用性的判据是水平定位误差和垂直定位误差, 一般要求用户水平定位误差或垂直定位误差小于等于规定值, 即水平服务可用性阈值 (HSAT) 和垂直服务可用性阈值 (VSAT)。

HSAT和VSAT按公式 (1) 和公式 (2) 近似计算:

$$T_{HS} = \xi_{SIS} \times T_{HDOP} \dots\dots\dots (1)$$

$$T_{VS} = \xi_{SIS} \times T_{VDOP} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

T_{HS} ——水平服务可用性阈值（HSAT）；

ξ_{SIS} ——95%置信度下，空间信号测距误差（SISRE（95%））；

T_{HDOP} ——水平精度衰减因子（HDOP）的阈值；

T_{VS} ——垂直服务可用性阈值（VSAT）；

T_{VDOP} ——垂直精度衰减因子（VDOP）的阈值。

SISRE包含空间段、地面控制段对空间信号测距的影响。HDOP的阈值和VDOP的阈值由最坏情况下，星座的DOP仿真确定。HDOP和VDOP的阈值一般要求为：标称星座故障两颗卫星的最坏条件下，全球最差位置上90%以上HDOP和VDOP的最大值。

6 方法分类

本标准中可用性确定方法共包括两类，分别为基于分析和基于实测的可用性确定方法。

基于分析的可用性确定方法常用于系统设计、建设和运行阶段，对可用性指标的论证和验证评估工作，包括：随机过程模型法、二项式模型、网络模型法等。单星可用性确定一般采用随机过程模型法，根据卫星中断参数，采用马尔科夫链实现；星座可用性确定根据单星可用性确定结果，可采用二项式模型实现；服务可用性确定一般采用网络模型法，根据系统性能仿真和单星可用性确定结果，可采用贝叶斯网建模实现。

基于实测的可用性确定方法常用于系统运行阶段，对可用性指标的验证评价工作，通常采用统计的方法。

7 基于分析的可用性确定方法

7.1 基于分析的单星可用性确定方法

单星可用性利用马尔科夫链建立计算模型。假设卫星只有可用和不可用两种状态，从可用状态到不可用状态由短期计划中断和短期非计划中断引起。通过中断分析，得到北斗卫星导航系统卫星中断的MTBO和MTTOR，作为可用性确定的输入。

根据两类中断的平均中断间隔时间（MTBO）和平均中断恢复时间（MTTOR），综合得到单星的中断概率和恢复率，按公式（3）和公式（4）计算：

$$\lambda_m = \lambda_s + \lambda_U \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_m = \frac{\lambda_s + \lambda_U}{\frac{\lambda_s}{\mu_s} + \frac{\lambda_U}{\mu_U}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

λ_m ——空间段中卫星m由可用状态变为不可用状态的中断概率；

λ_s ——卫星短期计划中断的概率；

λ_U ——卫星短期非计划中断的概率；

μ_m ——空间段中卫星m由不可用状态恢复为可用状态的恢复率；

μ_s ——卫星短期计划中断的恢复率；

μ_U ——卫星短期非计划中断的恢复率；

根据单轨位的中断概率和恢复率可以得到单轨位可用性，按公式（5）计算：

$$A_m = \frac{\mu_m}{\lambda_m + \mu_m} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

A_m ——星座中轨道位置上卫星m的可用性，即单星可用性。

7.2 基于分析的星座可用性确定方法

假设同类卫星的单星可用性相同，利用二项式模型得到星座可用性，按公式（6）计算：

$$A_{N_M, N_I, N_G}^{N_M, N_I, N_G} = \sum_{i=0}^{N_M} \sum_{j=0}^{N_I} \sum_{k=0}^{N_G} (Q_i^M \cdot Q_j^I \cdot Q_k^G) = \sum_{i=0}^{N_M} Q_i^M \cdot \sum_{j=0}^{N_I} Q_j^I \cdot \sum_{k=0}^{N_G} Q_k^G$$

$$Q_i^M = C_{N_M}^i (A_M)^{(N_M-i)} (1 - A_M)^i \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_j^I = C_{N_I}^j (A_I)^{(N_I-j)} (1 - A_I)^j$$

$$Q_k^G = C_{N_G}^k (A_G)^{(N_G-k)} (1 - A_G)^k$$

式中：

$A_{N_M, N_I, N_G}^{N_M^-, N_I^-, N_G^-}$ ——包括 N_M 颗MEO卫星和 N_I 颗IGSO卫星的标称星座中最多允许故障 N_M^- 颗MEO卫

星和 N_I^- 颗IGSO卫星的星座可用性；

N_M^- ——标称星座中最多允许MEO卫星故障的个数；

N_I^- ——标称星座中最多允许IGSO卫星故障的个数；

N_G^- ——标称星座中最多允许GEO卫星故障的个数；

N_G ——标称星座中GEO卫星的个数；

N_I ——标称星座中IGSO卫星的个数；

N_M ——标称星座中MEO卫星的个数；

A_M ——空间段中MEO卫星的单星可用性；

A_I ——空间段中IGSO卫星的单星可用性；

A_G ——空间段中GEO卫星的单星可用性。

7.3 基于分析的服务可用性确定方法

服务可用性计算是先通过马尔科夫链建模计算、得到单星可用性（详见6.1），再利用贝叶斯网建模计算得到服务可用性，如图1所示。贝叶斯网络模型中网络节点包括星座中所有的N颗卫星 X_m ($m=1,2,\dots,N$)，以及所有卫星的子节点 X_{N+1} “服务可用性”，该节点中的条件概率表（CPT）反映了各卫星节点与服务可用性节点的逻辑关系，图中右下所示为各卫星节点的状态均为“可用”和“不可用”两种状态，是基于马尔科夫链建模计算得到。

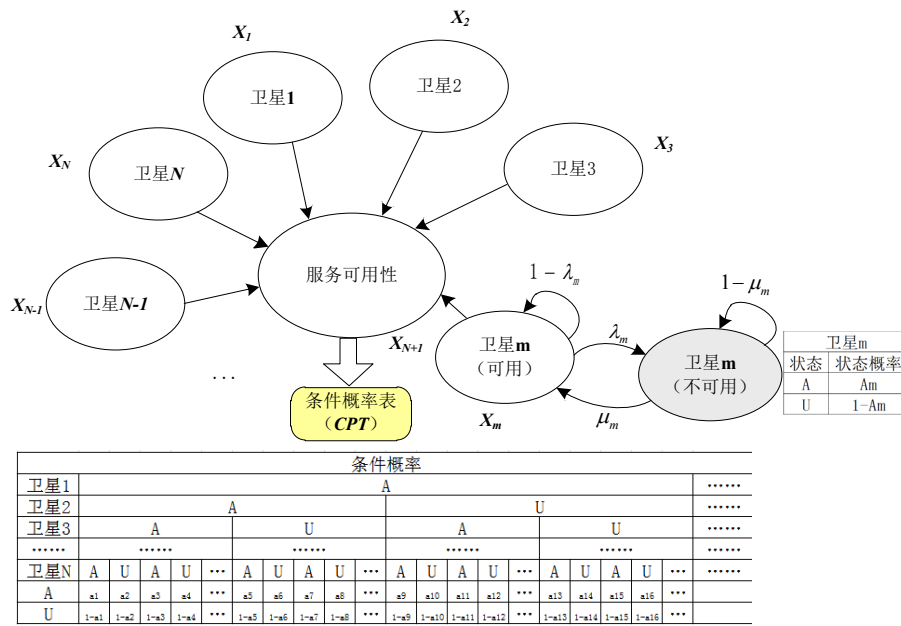


图 1 基于贝叶斯网的服务可用性计算示意图

服务可用性分析的主要步骤如下：

- a) 根据每颗卫星的中断数据，利用马尔科夫链模型计算出星座中各颗卫星的可用性 A_m 和不可用性 $(1-A_m)$ 即为第 m 个卫星节点 X_m 的边缘概率 $P(X_m)$ ($m=1,2,\dots,N$)。
- b) 根据各颗卫星节点与服务可用性节点的逻辑关系确定贝叶斯网中的条件概率表。条件概率表中输入的是服务性能仿真结果，即不同故障卫星组合下的星座值，即模型中“服务可用性”节点 X_{N+1} 的条件概率 $P(X_{N+1} | parent(X_{N+1}))$ 。其中， $parent(X_{N+1})$ 是“服务可用性”节点 X_{N+1} 的父节点集。
- c) 利用贝叶斯网通过全概率公式计算得到服务可用性，按公式 (7) 计算：

$$P(X_{N+1}) = \prod_{m=1}^N P(X_m) \cdot P(X_{N+1} | parent(X_{N+1})) \dots\dots\dots (7)$$

公式 (7) 中， $\prod_{m=1}^N P(X_m)$ 代表星座处于某种状态下的概率，用 P_k 表示； $P(X_{N+1} | parent(X_{N+1}))$

代表星座处于某种状态下的星座值，用 α_k 表示。服务可用性也可表示为：

$$A = \sum P_k \cdot \alpha_k \dots\dots\dots (8)$$

星座值是指，在一个星座回归周期内系统服务区全域划分时空点，对时空点的星座性能(例如 PDOP、HDOP 和 VDOP 等) 进行仿真，并对仿真结果进行统计得到的所有点的平均可用性。PDOP 可用性和定位服务可用性分别按照 5.4 中规定的判据条件计算星座值。

需要注意的是，模型中卫星节点过多可能造成计算爆炸的问题。当卫星数超过 30 个以上时，卫星

节点可根据不同轨道类型进行分类处理。GEO 和 IGSO 卫星按照单星作为节点；MEO 卫星按照星座作为节点，MEO 星座节点的按照故障卫星个数作为状态，其边缘概率可用性根据单星可用性和二项式模型计算。

8 基于实测的可用性确定方法

8.1 基于实测的单星可用性确定方法

单一测站只能跟踪观测到卫星的有限弧段，基于实测的单星可用性验证评价需要布设全球分布的多个测站，保证跟踪到所有卫星的所有弧段，且每个卫星每个弧段的观测至少两重以上覆盖。

- a) 对于任意时间 t (采样间隔 ≤ 10 分钟)，卫星空间信号是否可用的健康标识为： H_flag ，如果信号可被跟踪， $H_flag = 0$ 表示信号可用，否则 $H_flag = 1$ 表示信号不可用。
- b) 单星可用性按公式 (9) 计算：

$$A_{per-slot} = \frac{\sum_1^{N_t} (1 - H_flag(t))}{N_t} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$A_{per-slot}$ ——单星可用性；

N_t ——统计时间内所有的采样总数；

$H_flag(t)$ ——卫星时刻 t 健康标识的数值。

- c) 全星座单轨位平均可用性按公式 (10) 计算：

$$A_{Ave-slot} = \sum_{n=1}^{N_{sv}} A_{per-slot}(SV_n) \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$A_{Ave-slot}$ ——全星座单星平均可用性；

N_{sv} ——星座中在轨工作卫星的总数；

$A_{per-slot}(SV_n)$ ——星座中的第 n 颗卫星的单星可用性。

8.2 基于实测的星座可用性确定方法

星座可用性的验证评价测站布设和采样要求与单轨位可用性的验证要求一致，并可以采用相同数据源。

- a) 对于任意时间 t (采样间隔 ≤ 10 分钟)，卫星空间信号是否可用的健康标识为： H_flag ，

如果信号可被跟踪, $H_flag = 0$ 表示信号可用, 否则 $H_flag = 1$ 表示信号不可用。

b) 在任意时刻 t , 星座中的健康卫星数量为(N_{SV-H}), 按公式 (11) 计算:

$$N_{SV-H}(t) = \sum_{n=1}^{N_{SV}} (1 - H_flag(SV_n, t)) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$N_{SV-H}(t)$ ——时刻 t , 全星座中的健康卫星数量;

N_{SV} ——星座中在轨工作卫星的总数;

$H_flag(SV_n, t)$ ——星座中的第 n 颗卫星健康标识的数值。

c) 在任意时刻 t , 星座中不少于规定数量卫星可用的函数为 F_{MIN}^- , 按公式 (12) 计算:

$$F_{MIN}^-(t) = \begin{cases} 1, & N_{SV-H}(t) \geq N_{SV-MIN} \\ 0, & N_{SV-H}(t) < N_{SV-MIN} \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$F_{MIN}^-(t)$ ——时刻 t , 全星座中健康卫星数量是否足够函数, 足够时取值为1, 不够时取值为0;

N_{SV-MIN} ——标称星座中规定的最少的在轨工作卫星数量。

d) 星座可用性的计算, 按公式 (13) 计算:

$$A_{SV-H} = \frac{\sum_{t=1}^{N_t} F_{MIN}^-(t)}{N_t} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

A_{SV-H} ——星座可用性;

N_t ——统计时间内所有的采样总数。

8.3 基于实测的服务可用性确定方法

服务可用性的验证评价需要布设全球均匀分布的多个测站, 测站宜覆盖高中低经、纬度组合分布。连续采样时间要求至少数倍于星座回归周期 (或至少一个月), 采样间隔 ≤ 10 分钟。

a) 对于任意时间 t (采样间隔 ≤ 10 分钟), 任意观测位置 (测站) 上, 判断观测值是否可用的函数为 $A_{Inst}(t)$, 按公式 (14) 计算:

$$A_{Inst}(t) = \begin{cases} 1, & d_{OBS}(t) \leq T_{AL} \\ 0, & d_{OBS}(t) > T_{AL} \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$A_{Inst}(t)$ ——时刻t，测站的观测数据是否可用函数，可用时（观测值满足判据条件）取值为1，不可用时（观测值不满足判据条件）取值为0；

$d_{OBS}(t)$ ——时刻t，测站的观测值，指可用判据的观测值，不同判据的可用性采用不同的观测值；

T_{AL} ——可用性阈值，不同判据的可用性采用不同的观测值；

1) 当计算PDOP可用性时，公式（13）中 $d_{OBS}(t)$ 为时刻t测站的PDOP， T_{AL} 取值为PDOP阈值；

2) 当计算定位服务可用性时，公式（13）中 $d_{OBS}(t)$ 为时刻t测站的水平定位误差（95%）或垂直定位误差（95%）， T_{AL} 取值为HSAT或VSAT。

b) 任意观测位置上，服务可用性可表示为统计时间段内观测值（PDOP 值、水平定位精度和垂直定位精度）满足可用性判据的百分比，可采用符合判据条件的采样数与采样总数的比值表示，统计计算采用公式（15）：

$$A_{N_Site_i}(\phi, \lambda) = \frac{\sum_{t=1}^{N_{Site}^i} A_{Inst}(t)}{N_{Site}^i} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$A_{Site}^i(\phi, \lambda)$ ——经纬度为 (ϕ, λ) 的测站i的服务可用性；

N_{Site}^i ——统计时间内测站i所有的采样总数。

c) 全球平均服务可用性通过统计所有测点的平均值得到，按公式（16）计算：

$$A_{Global} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Tot}} (N_{Site}^i \cdot A_{Site}^i(\phi, \lambda))}{\sum_{i=1}^{N_{Tot}} N_{Site}^i} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

A_{Global} ——全球平均服务可用性；

N_{Tot} ——测站总数。

