

BD

中国第二代卫星导航系统重大专项标准

BD 310002—2019

北斗卫星导航系统 RNSS 公开服务性能评估方法

Assessment method for RNSS open service performance of
BeiDou Navigation Satellite System



2019-11-07 发布

2019-12-01 实施

中国卫星导航系统管理办公室 批准

目 次

前言	III
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和定义、缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 缩略语	2
4 评估项目	2
5 评估方法	3
5.1 空间信号广播轨道精度	3
5.2 空间信号广播钟差精度	3
5.3 空间信号测距误差 (SISRE)	5
5.4 空间信号测距变化率误差 (SISRRE)	5
5.5 空间信号测距二阶变化率误差 (SISRRE)	6
5.6 协调世界时偏差误差	6
5.7 空间信号连续性	6
5.8 空间信号可用性	7
5.9 定位精度	7
5.10 测速精度	7
5.11 授时精度	8
5.12 PDOP 可用性	8
5.13 定位服务可用性	9
附录 A (规范性附录) 评估前提条件	10
附录 B (资料性附录) BDS 区域广播电离层模型	11
附录 C (资料性附录) BDS 全球广播电离层模型 (BDGIM)	13
附录 D (资料性附录) Saastamoinen 对流层改正模型	17
附录 E (资料性附录) BDS 卫星信号载波频率	18

前 言

为适应我国卫星导航发展对标准的需要，全国北斗卫星导航标准化技术委员会组织制定北斗专项标准，推荐有关方面参考采用。

本标准附录A是规范性附录，附录B、附录C、附录D和附录E是资料性附录。

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：中国卫星导航工程中心、战略支援部队信息工程大学、西安测绘研究所、武汉大学、中科院国家授时中心、中国航天标准化研究所、中国航天科技集团有限公司第九研究院。

本标准主要起草人：苏牡丹、焦文海、李建文、贾小林、胡志刚、朱 峰、龚佩佩、王 凯、朱永兴、耿长江、张慧君、宋晓丽。

北斗卫星导航系统 RNSS 公开服务性能评估方法

1 范围

本标准规定了北斗卫星导航系统RNSS（Radio Navigation Satellite Service）公开服务性能评估项目和评估方法。

本标准适用于北斗卫星导航系统RNSS公开服务性能的评估与分析、系统状态分析和故障诊断等。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本标准的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单（不包含勘误的内容）或修订版本都不适用于本标准，但提倡使用本标准的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本标准。

BD 110001-2015 北斗卫星导航术语

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

BD 110001-2015确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1 北斗卫星导航系统公开服务 **BDS open services**

利用北斗卫星导航系统播发的公开服务信号，来确定用户位置、速度、时间的无线电导航服务。

3.1.2 信号中断 **signal outages**

北斗系统卫星不能播发状态为“健康”的空间信号，包括信号不播发、播发非标准码，以及信号状态为“不健康”。

注：信号中断包括计划中断和非计划中断。

3.1.3 计划中断 **scheduled suspensions**

在卫星信号预计将不符合规定的性能时，提前发出通知的卫星信号中断。

3.1.4 非计划中断 **unscheduled outages**

计划中断之外的由系统故障或维修事件等造成的卫星信号中断。非计划中断应在中断发生后尽快通知用户。

3.1.5 用户等效测距误差 **User Equivalent Range Error (UERE)**

由导航卫星轨道、钟差、大气传播、用户观测等引起的卫星至用户距离观测量的误差总和。

3.1.6 空间信号测距误差 **SIS Range Error (SISRE)**

由导航卫星轨道、钟差等引起的误差在卫星至用户视线上的投影。

3.1.7 空间信号测距变化率误差 **SIS Range Rate Error (SISRRE)**

SISRRE 的一阶导数，由导航卫星轨道、钟差等引起的卫星至用户距离观测量变化率误差。

3.1.8 空间信号测距二阶变化率误差 **SIS Range Acceleration Error (SISRAE)**

SISRRE 的二阶导数，由导航卫星轨道、钟差等引起的卫星至用户距离观测量二阶变化率误差。

3.1.9 空间信号可用性 **SIS availability**

卫星导航系统播发的能够被接收机使用的空间信号的时间百分比。

3.1.10 空间信号连续性 **SIS continuity**

特定时间段内，卫星导航系统空间信号能够提供连续满足规定服务要求的时间百分比。

3.1.11 卫星钟差 **satellite clock offset**

卫星的钟面时与卫星导航系统的系统时间之间的差值。

3.1.12 卫星钟频率稳定度 **satellite clock frequency stability**

卫星钟的频率信号在某一取样时间内平均频率随机起伏的程度，常用阿伦标准偏差表示。

3.1.13 协调世界时偏差误差 **UTC Offset Error (UTC OE)**

卫星导航系统播发的协调世界时偏差的误差。

3.1.14 空间信号健康信息 **SIS health**

卫星导航电文中用于指示本卫星导航信号是否正常的状态参数。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本标准。

BDS——BeiDou Navigation Satellite System，北斗卫星导航系统；

BDT——the BDS Time，北斗系统时；

ICD——Interface Control Document，接口控制文件；

PDOP——Position Dilution of Precision，位置精度因子；

RNSS——Radio Navigation Satellite Service，卫星无线电导航业务；

RMS——Root Mean Square，均方根；

SIS——Signal in Space，空间信号；

TGD——Time Correction of Group Delay，卫星设备群时延。

4 评估项目

RNSS公开服务性能评估项目包括空间信号性能和系统服务性能两个方面，见表1。

表 1 评估项目一览表

序号	评估项目	评估方法	
1	空间信号性能	空间信号广播轨道精度	5.1
		空间信号广播钟差精度	5.2
		空间信号测距误差	5.3
		空间信号测距变化率误差	5.4
		空间信号测距二阶变化率误差	5.5
		协调世界时偏差误差	5.6
		空间信号连续性	5.7
		空间信号可用性	5.8
2	系统服务性能	定位精度	5.9
		测速精度	5.10
		授时精度	5.11
		PDOP可用性	5.12
		定位服务可用性	5.13

5 评估方法

5.1 空间信号广播轨道精度

5.1.1 基本方法

以精密轨道作为基准坐标，利用广播星历按照北斗系统ICD规定方法计算得到的卫星位置为评估对象，将两者转换到同一坐标框架和同一时间系统下，并扣除天线相位中心改正数后作差，按公式（1）获得坐标差值，统计评估时段内的坐标差值得到广播轨道精度（RMS）。

$$\Delta\bar{R} = (\bar{R}_{brd} + A \cdot PCO_{brd}) - \bar{R}_{pre} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- $\Delta\bar{R}$ —— 广播轨道误差；
- \bar{R}_{brd} —— 广播星历计算的卫星位置，m；
- A —— 星体坐标系到地固系的转换矩阵；
- PCO_{brd} —— 卫星天线相位中心到卫星质心的改正数，m；
- \bar{R}_{pre} —— 精密星历计算的卫星位置，m。

5.1.2 评估要求

空间信号广播轨道精度的评估应满足以下要求：

- 精密轨道精度应高于广播轨道精度一个数量级；
- 评估时段应大于等于 1 个星座回归周期；
- 采样间隔应不大于 15min。

5.2 空间信号广播钟差精度

5.2.1 基本方法

以精密钟差作为评估基准，利用广播钟差按照北斗系统ICD规定方法计算得到的卫星钟差为评估对象，将两者时标统一到同一时间系统下，按公式（2）计算得到广播误差，统计评估时段内的广播钟差误差得到广播钟差精度（RMS）。

$$\Delta\tilde{c}_k^t = \Delta c_k^t - \frac{\sum_{k=1}^N \Delta c_k^t}{N} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\Delta\tilde{c}_k^t$ —— 卫星 k 在 t 时刻的扣除时间基准差异后广播钟差误差；

Δc_k^t —— 经TGD和天线相位中心改正后广播钟差与精密钟差的差值；

N —— 卫星个数；

k —— 卫星号；

t —— 历元时刻。

其中：

Δc_k^t 按公式（3）计算：

$$c_k^t = B_k^t - \frac{TGD_{m1} f_{m1}^2 - TGD_{m2} f_{m2}^2}{f_{m1}^2 - f_{m2}^2} - \frac{e_k^{pre} - e_k^{brd}}{c} - \bar{C}_k^t \dots\dots\dots (3)$$

式中：

B_k^t —— 根据北斗系统 ICD 定义的算法，由广播钟差参数计算得到第 k 颗卫星在 t 时刻的钟差；

\bar{C}_k^t —— 第 k 颗卫星在 t 时刻的精密钟差，s；

$\frac{TGD_{m1} f_{m1}^2 - TGD_{m2} f_{m2}^2}{f_{m1}^2 - f_{m2}^2}$ —— 利用广播TGD参数获得卫星钟差的TGD改正数，s；

TGD_{m1} —— f_{m1} 频点信号星上设备时延差，s；

TGD_{m2} —— f_{m2} 频点信号星上设备时延差，s；

f_{m1} 、 f_{m2} —— 精密钟差确定中双差无电离层组合采用的信号载波频率，MHz；

$\frac{e_k^{pre} - e_k^{brd}}{c}$ —— 广播钟差和精密钟差采用的天线相位中心改正数的差异，s；

e_k^{pre} 、 e_k^{brd} —— 分别为精密钟差和广播钟差产品所采用的 Z 方向天线相位中心改正数，m。

5.2.2 评估要求

空间信号广播钟差精度的评估应满足以下要求：

- a) 精密钟差精度应高于广播星历钟差精度一个数量级；
- b) 评估时段应大于等于1个星座回归周期；

c) 采样间隔应不大于15min。

5.3 空间信号测距误差 (SISRE)

5.3.1 基本方法

利用广播轨道精度和广播钟差精度计算得到空间信号测距误差 (SISRE)。按公式 (4) 获得 SISRE 均方根误差 (RMS)。

$$SISRE = \sqrt{((\alpha\delta_R - c\delta_T))^2 + \beta(\delta_A^2 + \delta_C^2)} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- SISRE —— 空间信号测距误差(RMS), 单位 m;
- α —— 径向误差平均贡献因子;
- δ_R —— 广播轨道径向精度(RMS), 单位 m;
- δ_T —— 广播钟差精度(RMS), 单位 s;
- β —— 切向、法向误差平均贡献因子;
- δ_A —— 广播轨道切向精度(RMS), 单位 m;
- δ_C —— 广播轨道法向精度(RMS), 单位 m;

误差贡献因子如表 2 所示:

表 2 BDS SISRE 平均贡献因子 (截止高度角 5°)

高度	35786km		21528km	
	GEO/IGSO		MEO	
贡献因子	α	β	α	β
数值	0.9924	0.0867	0.9823	0.1324

5.3.2 评估要求

空间信号测距误差的评估应满足以下要求:

- a) 精密星历精度应高于广播星历精度一个数量级;
- b) 评估时段应大于等于 1 个星座回归周期;
- c) 采样间隔应不大于 15min。

5.4 空间信号测距变化率误差 (SISRRE)

空间信号用户测距率评估, 采用卫星钟的 3s 稳定度评估, 按公式 (5) 计算。

$$SISRRE \approx c \cdot \sigma_y(3s) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$$\sigma_y(3s) = \sigma_y(\tau) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{3}} \text{ —— 用Allan方差表示的卫星钟频率3秒稳定度;}$$

τ —— 平均时间, $3s \leq \tau \leq 4000s$ 。

5.5 空间信号测距二阶变化率误差 (SISRAE)

空间信号用户测距加速度评估, 采用卫星钟的 3s 稳定度评估, 按公式 (6) 计算。

$$SISRAE \approx c \cdot \sigma_y(3s) / 3 \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$$\sigma_y(3s) = \sigma_y(\tau) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{3}} \text{——用Allan方差表示的卫星钟频率3秒稳定度;}$$

τ ——平均时间, $3s \leq \tau \leq 4000s$ 。

5.6 协调世界时偏差误差

以高精度的协调世界时偏差 ($BDT - UTC$) 为参考, 以通过广播星历计算得到的协调世界时偏差 Δt_{brd} 为评估对象, 将二者做差, 对一段时间的差值进行统计得到协调世界时偏差误差 (RMS)。

任意参考时标误差按公式 (7) 计算:

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{brd} - \Delta t_{ref} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

Δt_{brd} ——按北斗系统ICD规定算法计算得到的广播协调世界时偏差;

Δt_{ref} ——高精度协调世界时偏差 ($BDT - UTC$)。

5.7 空间信号连续性

以某卫星播发“健康”信号为判据, 在评估起始时刻健康可用, 计算该卫星一年以上评估期内, 在规定的长度内不发生非计划中断而持续工作的概率。每颗卫星空间信号连续性按公式 (8) 计算。

$$Con = \frac{\sum_{t=t_{start}, inc=T}^{t_{end}-t_{op}} \left\{ \prod_{k=t, int=T}^{t+T_{op}} \text{bool}(status) \right\}}{\sum_{t=t_{start}, inc=T}^{t_{end}-t_{op}} \text{bool}(status)} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

Con —— 卫星空间信号连续性;

t_{start} —— 数据起始时间, h;

t_{end} —— 数据结束时间, h;

T —— 数据采样间隔, 一般采用 1s;

$status$ —— 卫星健康字状态, 由计划中断导致的不健康状态, 不纳入考虑范围;

$\text{bool}()$ —— 布尔函数, k 时刻卫星健康则取 “1”, 否则取 “0”;

t_{op} —— 滑动窗口的长度取 1h。

5.8 空间信号可用性

以某卫星播发“健康”信号为判据，计算该卫星一年以上评估时段内健康状态总时间与评估时段总时间的比值得到空间信号可用性。每颗卫星空间信号的可用性按公式（9）计算。

$$A = U/T \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

A ——卫星空间信号可用性；

U ——评估时段内每颗卫星的总可用时间，单位s；

T ——评估时段内每颗卫星的总时间，单位s。

5.9 定位精度

5.9.1 基本方法

以已知坐标为基准，根据北斗系统ICD规定的算法获得伪距定位结果为评估对象，将定位结果与已知坐标转换到同一坐标框架后作差，统计评估时段内的差值得到水平和垂直定位精度(95%)。差值一般有空间直角坐标系 d_{xyz} 和当地水平坐标系 d_{enu} 两种表示形式，按公式（10）、公式（11）计算。

$$d_{xyz} = pos_{cal} - pos_{pre} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$d_{enu} = R_{xyz2enu} \cdot d_{xyz} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

pos_{cal} —— 空间直角坐标系下的用户实际计算的定位结果，m；

pos_{pre} —— 空间直角坐标系下的用户已知坐标，m；

d_{xyz} —— 用户实际计算的定位结果与已知坐标之差（空间直角坐标系），m；

d_{enu} —— 用户实际计算的定位结果与已知坐标之差（当地水平坐标系），m；

$R_{xyz2enu}$ —— 空间直角坐标系到当地水平坐标系的转换矩阵。

5.9.2 评估要求

定位精度的评估应满足以下要求：

- a) 已知坐标精度优于0.1m；
- b) 评估时段应大于等于1个星座回归周期；
- c) 采样间隔不大于1min。

5.10 测速精度

5.10.1 基本方法

以已知速度标量为基准，根据北斗系统ICD规定的算法获得测速标量结果为评估对象，将相同时刻的速度标量作差，统计评估时段内的速度标量差值序列得到测速精度评估结果。

$$dv(t) = v_{cal}(t) - v_{ref}(t) \dots\dots\dots (12)$$

式中：

dv	——	速度标量差值，单位 m/s ；
t	——	评估历元；
v_{cal}	——	用户实际计算获得的速度标量结果，单位 m/s ；
v_{ref}	——	已知速度标量，单位 m/s 。

5.10.2 评估要求

测速精度的评估应满足以下要求：

- a) 已知速度标量精度优于0.01m/s；
- b) 评估时段应大于等于1个星座回归周期；
- c) 采样间隔不大于1min。

5.11 授时精度

5.11.1 基本方法

以高精度时间（用 T^{ref} 表示）为参考，采用用户接收机接收北斗空间信号，按照北斗系统ICD规定的算法对伪距误差进行修正，获得任意*i*时刻北斗系统时间（用 T^{rev} 表示）相对于参考时间 T^{ref} 的钟误差 Δt_i ， Δt_i 用公式（13）表示：

$$\Delta t_i = T^{ref} - T^{rev} \dots\dots\dots (13)$$

对规定时间段内的该钟差序列 Δt 进行统计（95%），获得授时精度。

5.11.2 评估要求

授时精度的评估应满足以下要求：

- a) 高精度时间参考与北斗系统时间偏差误差的准确度优于3ns；
- b) 接收机时延绝对校准精度优于2ns；
- c) 采样间隔为1s。

5.12 PDOP 可用性

5.12.1 基本方法

计算评估时段内服务区格网点的PDOP值，统计格网点PDOP值不大于规定值的数量与总数量的百分比，得到PDOP可用性，每个格网点PDOP可用性按公式（14）计算。

$$Ava_t = \frac{\sum_{t=t_{start}, inc=T}^{t_{end}} bool\{pdop_t \leq f_{Acc}\}}{1 + \frac{t_{end} - t_{start}}{T}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- t_{start}, t_{end} —— 开始时间段、结束时间段, 单位 s ;
 T —— 用户机采样间隔记为 T , 单位 s ;
 $pdop_t$ —— 某一时刻某一格网点的 PDOP 值;
 f_{Acc} —— 水平定位精度和垂直定位精度阈值, 单位 s ;
 $bool\{ \}$ —— 布尔函数, 当满足判断条件时, 取为 1, 否则取 0;
 i —— 第 i 个格网点。

5.12.2 评估要求

PDOP可用性的评估应满足以下要求:

- 卫星截止高度角一般设 5° ;
- 采样间隔不大于10min;
- PDOP阈值为6.0;
- 网格分辨率不大于 $1^\circ \times 1^\circ$;
- 评估时段应不小于1个星座回归周期。

5.13 定位服务可用性

5.13.1 基本方法

以已知坐标为基准, 根据北斗系统 ICD 规定的算法获得伪距定位结果为评估对象, 将定位结果与已知坐标转换到同一坐标框架后作差, 统计评估时段内当地水平坐标系下水平和高程差值绝对值不大于规定阈值的百分比, 每个站点的定位服务可用性按公式 (15) 计算。

$$Ava_l = \frac{\sum_{t=t_{start}, inc=T}^{t_{end}} bool\{EPEK \leq f_{Acc}\}}{1 + \frac{t_{end} - t_{start}}{T}} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

- t_{start}, t_{end} —— 始时间段、结束时间段, s ;
 T —— 用户机采样间隔记为 T , s ;
 $EPEK$ —— 某一时刻的水平定位误差或垂直定位误差, m ;
 f_{Acc} —— 水平定位精度或垂直定位精度阈值, m ;
 $bool\{ \}$ —— 布尔函数, 当满足判断条件时, 取为 1, 否则取 0。

5.13.2 评估要求

定位服务可用性的评估应满足以下要求:

- 卫星截止高度角一般设 5° ;
- 采用间隔不大于10min;
- 评估时段应不小于1个星座回归周期。

附 录 A
(规范性附录)
评估前提条件

评估基于典型的北斗系统公开服务接收机，应当满足但不限于以下基本条件：

- a) 设计与BDS-SIS-ICD-2.0-2013规定一致；
- b) 能够接收到高度角大于 5° 的所有可视卫星的公开服务信号，接收机的噪声基本服从正态分布，对信号的跟踪影响在一定范围之内（小于码元宽度的1/100）；
- c) 定位解算中保证用到最新的卫星星历、钟差信息。

附录 B

(资料性附录)

BDS 区域广播电离层模型

BDS 区域系统采用 Klobuchar 电离层模型，公开服务区为 55°S~55°N，70°E~150°E 区域。模型采用的坐标系为日固地理坐标系，该坐标系的特点是其坐标系地理经度与时间具有良好的一致性，可以更好地反映电离层的周日变化。使用的 8 参数根据中国区域监测网的实测双频观测数据解算得到，随导航电文每 2h 更新一次。

根据北斗系统接口控制文件 (Interface Control Document, ICD)，BDS 利用系统播发的 8 参数和 Klobuchar 电离层修正模型来计算电离层垂直延迟改正 $I_z(t)$ ，单位为秒，具体形式见公式 (B.1)：

$$I_z(t) = \begin{cases} 5 \times 10^{-9} + A_2 \cos \left[\frac{2\pi(t-50400)}{A_4} \right] & |t-50400| < A_4/4 \\ 5 \times 10^{-9} & |t-50400| \geq A_4/4 \end{cases} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

t —— 接收机至卫星连线与电离层交点处的地方时，s；

A_2 —— 为白天余弦曲线的幅度，用 α_n 系数计算得到，见公式 (B.2)。

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n |\phi_M|^n & A_2 \geq 0 \\ 0 & A_2 < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

A_4 —— 余弦曲线的周期，单位为秒，用 β_n 系数求得，见公式 (B.3)：

$$A_4 = \begin{cases} 172800 & A_4 \geq 172800 \\ \sum_{n=0}^3 \beta_n |\phi_M|^n & 172800 > A_4 \geq 72000 \\ 72000 & A_4 < 72000 \end{cases} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

ϕ_M —— 电离层穿刺点的地理纬度，可用用户位置按公式 (B.4) ~ 公式 (B.6) 求出：

$$\phi_M = \arcsin(\sin \phi_0 \sin \psi_0 + \cos \phi_0 \sin \psi_0 \cos A) \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\lambda_M = \lambda_0 + \arcsin(\sin \psi_0 \sin A / \cos \phi_M) \dots\dots\dots (B.5)$$

$$\psi_0 = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R_e \cos E}{R_e + H}\right) \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

- ϕ_0 —— 用户地理纬度；
- λ_0 —— 用户地理经度；
- A —— 卫星方位角；
- ψ_0 —— 用户和穿刺点的地心张角；
- E —— 卫星高度角；
- R_e —— 地球半径；
- H —— 电离层单层高度，取 $375km$ 。

通过上面一系列的计算式，可由 8 个电离层时延校正参数计算出穿刺点的垂直电离层延迟。

附录 C

(资料性附录)

BDS 全球广播电离层模型 (BDGIM)

北斗系统全球电离层时延修正模型 (BDGIM) 以改进的球谐函数为基础, 用户接收机根据 BDGIM 按公式 (C.1) 计算电离层延迟改正值:

$$T_{ion} = M_F \cdot \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \cdot \left[A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \right] \dots \dots \dots (C.1)$$

式中, T_{ion} 为卫星与接收机视线方向电离层延迟改正值, 单位为米; M_F 为投影函数, 用于垂向和斜向电离层总电子含量 (TEC) 之间的转换, 计算见公式 (C.12); f 为当前信号对应的载波频率, 单位为赫兹; α_i ($i=1\sim 9$) 为 9 个电离层延迟改正模型参数, 单位为 TECu; A_i ($i=1\sim 9$) 为根据公式 (C.6) 计算得到的数值; A_0 为根据公式 (C.9) 计算得到的电离层延迟预报值, 单位为 TECu。

用户接收机采用 BDGIM 计算卫星与接收机视线方向电离层延迟的具体步骤如下:

a) 电离层穿刺点位置的计算

以 ψ 表示用户和电离层穿刺点之间的地心张角, 单位为弧度, 其计算见公式 (C.2):

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin \left[\frac{R_e}{R_e + H_{ion}} \cdot \cos E \right] \dots \dots \dots (C.2)$$

式中, E 表示卫星高度角, 单位为弧度; H_{ion} 表示电离层薄层高度; R_e 表示地球平均半径。

穿刺点地理纬度 φ_g 和地理经度 λ_g 的计算见公式 (C.3):

$$\begin{cases} \varphi_g = \arcsin(\sin \varphi_u \cdot \cos \psi + \cos \varphi_u \cdot \sin \psi \cdot \cos A) \\ \lambda_g = \lambda_u + \arctan \left(\frac{\sin \psi \cdot \sin A \cdot \cos \varphi_u}{\cos \psi - \sin \varphi_u \cdot \sin \varphi_g} \right) \end{cases} \dots \dots \dots (C.3)$$

式中, φ_u 表示用户地理纬度, λ_u 表示用户地理经度, A 表示卫星方位角, 单位均为弧度。地固坐标系下, 穿刺点地磁纬度 φ_m 和地磁经度 λ_m 的计算见公式 (C.4):

$$\begin{cases} \varphi_m = \arcsin(\sin \varphi_M \cdot \cos \varphi_g + \cos \varphi_M \cdot \cos \varphi_g \cdot \cos(\lambda_g - \lambda_M)) \\ \lambda_m = \arctan \left(\frac{\cos \varphi_g \cdot \sin(\lambda_g - \lambda_M) \cdot \cos \varphi_M}{\sin \varphi_M \cdot \sin \varphi_m - \sin \varphi_g} \right) \end{cases} \dots \dots \dots (C.4)$$

式中, φ_M 为地磁北极的地理纬度, λ_M 为地磁北极的地理经度, 单位均为弧度。

日固坐标系下, 穿刺点地磁纬度 φ' 和地磁经度 λ' 的计算见公式 (C.5):

$$\begin{cases} \varphi' = \varphi_m \\ \lambda' = \lambda_m - \arctan\left(\frac{\sin(S_{lon} - \lambda_M)}{\sin \varphi_M - \cos(S_{lon} - \lambda_M)}\right) \end{cases} \dots\dots\dots (C.5)$$

式中, S_{lon} 为平太阳地理经度, 单位为弧度; S_{lon} 的计算公式为 $S_{lon} = \pi \cdot (1 - 2 \cdot (t - \text{int}(t)))$; t 表示计算时刻, 以约化儒略日 (MJD) 表示; $\text{int}()$ 表示向下取整。

b) $A_i (i=1 \sim 9)$ 的计算

A_i 的具体计算见公式 (C.6):

$$A_i = \begin{cases} P_{|n_i|, |m_i|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_i \cdot \lambda') & m_i \geq 0 \\ P_{|n_i|, |m_i|}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_i \cdot \lambda') & m_i < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (C.6)$$

式中, n_i 和 m_i 对应的取值见表 C.1

表 C.1 n_i 和 m_i 对应取值

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_i/m_i	0/0	1/0	1/1	1/-1	2/0	2/1	2/-1	2/2	2/-2

φ' 与 λ' 为日固系下电离层穿刺点的地磁纬度和地磁经度, 根据式(C.6)计算得到; $\tilde{P}_{n,m}$ 表示 n 度 m 阶的归化勒让德函数, $\tilde{P}_{n,m} = N_{n,m} \cdot P_{n,m}$ ($\tilde{P}_{n,m}$ 计算时, n 、 m 均取绝对值); $N_{n,m}$ 为正则化函数, 其计算见公式 (C.7):

$$\begin{cases} N_{n,m} = \sqrt{\frac{(n-m)! (2n+1) \cdot (2-\delta_{0,m})}{(n+m)!}} \\ \delta_{0,m} = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m>0 \end{cases} \end{cases} \dots\dots\dots (C.7)$$

$\tilde{P}_{n,m}$ 为正则化函数, 其计算见公式 (C.8):

$$\begin{cases} P_{n,n}(\sin \varphi') = (2n-1)!! (1 - (\sin \varphi')^2)^{n/2}, & n=m \\ P_{n,m}(\sin \varphi') = \sin \varphi' \cdot (2m+1) \cdot P_{m,m}(\sin \varphi'), & n=m+1 \\ P_{n,m}(\sin \varphi') = \frac{(2n-1) \cdot \sin \varphi' \cdot P_{n-1,m}(\sin \varphi') - (n+m-1) P_{n-1,m}(\sin \varphi')}{n-m}, & other \end{cases} \dots\dots\dots (C.8)$$

其中, $(2n-1)!! = (2n-1) \cdot (2n-3) \cdot \dots \cdot 1$, 且 $P_{0,0}(\sin \varphi') = 1$ 。

c) 电离层延迟预报值 A_0 的计算

A_0 的具体计算见公式 (C.9):

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 = \sum_{j=1}^{17} \beta_j \cdot B_j, \\ B_j = \begin{cases} \tilde{P}_{|n_j||m_j|}(\sin \varphi') \cdot \cos(m_j \cdot \lambda') & m_j \geq 0 \\ \tilde{P}_{|n_j||m_j|}(\sin \varphi') \cdot \sin(-m_j \cdot \lambda') & m_j < 0 \end{cases} \end{array} \right. \dots\dots\dots (C.9)$$

式中, n_j 及 m_j 的具体取值参见表 C.2, $\tilde{P}_{|n_j||m_j|}(\sin \varphi')$ 的计算参照公式(C.7)和公式(C.8); β_j ($j=1 \sim 17$)由公式(C.10)计算得到。

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_j = a_{0,j} + \sum_{k=1}^{12} (a_{k,j} \cdot \cos(\omega_k \cdot t_p) + b_{k,j} \cdot \sin(\omega_k \cdot t_p)), \\ \omega_k = \frac{2\pi}{T_k} \end{array} \right. \dots\dots\dots (C.10)$$

其中, $a_{k,j}$ 与 $b_{k,j}$, 为表 C.2 中 BDGIM 模型的非发播系数, 单位为 TECu; T_k 为表 C.2 中各非发播系数对应的周期; t_p 对应当天约化儒略日的奇数整点时刻 (01:00:00, 03:00:00, 05:00:00, ..., 23:00:00), 用户计算时选取距离当前计算时刻最近的 t_p 使用。

d) 穿刺点处垂直方向电离层延迟的计算

穿刺点处垂直方向电离层延迟 VTEC (单位为 TECu) 的计算见公式 (C.11):

$$VTEC = A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \dots\dots\dots (C.11)$$

e) 穿刺点电离层投影函数 M_F 的计算 电离层穿刺点处的投影函数 M_F 的计算见公式 (C.12):

$$M_F = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Re}{Re + H_{ion}} \cdot \cos(E) \right)^2}} \dots\dots\dots (C.12)$$

式中, Re 、 H_{ion} 及 E 参数含义同上。

f) 计算信号传播路径上的电离层延迟改正值

结合穿刺点处的垂向电离层延迟及投影函数, 按式(7-8)即可计算得到信号传播路径上电离层延迟改正值。

上述计算中, 相关参数取值建议如下:

电离层薄层高度: $H_{ion} = 400km$

地球平均半径: $Re=6378 km$

地磁北极的地理经度: $\lambda_M = \frac{-72.58^\circ}{180^\circ} \cdot \pi \text{ rad}$

地磁北极的地理纬度: $\varphi_M = \frac{80.27^\circ}{180^\circ} \cdot \pi \text{ rad}$

表 C.2: BDSGIM 模型非发播系数预报周期表 (单位: TECu)

参数 编号 k	编号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	周期 T/ 天
	n_i/m_i	3/0	3/1	3/-1	3/2	3/-2	3/3	3/-3	4/0	4/1	4/-1	4/2	4/-2	5/0	5/1	5/-1	5/2	5/-2	
0	$a_{k,i}$	-0.61	-1.31	-2.00	-0.03	0.15	-0.48	-0.40	2.28	-0.16	-0.21	-0.10	-0.13	0.21	0.68	1.06	0	-0.12	∞
1	$a_{k,i}$	-0.51	-0.43	0.34	-0.01	0.17	0.02	-0.06	0.30	0.44	-0.28	-0.31	-0.17	0.04	0.39	-0.12	0.12	0	1
	$b_{k,i}$	0.23	-0.20	-0.31	0.16	-0.03	0.02	0.04	0.18	0.34	0.45	0.19	-0.25	-0.12	0.18	0.40	-0.09	0.21	
2	$a_{k,i}$	-0.06	-0.05	0.06	0.17	0.15	0	0.11	-0.05	-0.16	0.02	0.11	0.04	0.12	0.07	0.02	-0.14	-0.14	0.5
	$b_{k,i}$	0.02	-0.08	-0.06	-0.11	0.15	-0.14	0.01	0.01	0.04	-0.14	-0.05	0.08	0.08	-0.01	0.01	0.11	-0.12	
3	$a_{k,i}$	0.01	-0.03	0.01	-0.01	0.05	-0.03	0.05	-0.03	-0.01	0	-0.08	-0.04	0	-0.02	-0.03	0	-0.03	0.33
	$b_{k,i}$	0	-0.02	-0.03	-0.05	-0.01	-0.07	-0.03	-0.01	0.02	-0.01	0.03	-0.10	0.01	0.05	-0.01	0.04	0.00	
4	$a_{k,i}$	-0.01	0	0.01	0	0.01	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14.6
	$b_{k,i}$	0	-0.02	0.01	0	-0.01	0.01	0	-0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	$a_{k,i}$	0	0	0.03	0.01	0.02	0.01	0	-0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27.0
	$b_{k,i}$	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	$a_{k,i}$	-0.19	-0.02	0.12	-0.10	0.06	0	-0.02	-0.08	-0.02	-0.07	0.01	0.03	0.15	0.06	-0.05	-0.03	-0.10	121.6
	$b_{k,i}$	-0.09	0.07	0.03	0.06	0.09	0.01	0.02	0	-0.04	-0.02	-0.01	0.01	-0.10	0	-0.01	0.02	0.05	
7	$a_{k,i}$	-0.18	0.06	-0.55	-0.02	0.09	-0.08	0	0.86	-0.18	-0.05	-0.07	0.04	0.14	-0.03	0.37	-0.11	-0.12	182.51
	$b_{k,i}$	0.15	-0.31	0.13	0.05	-0.09	-0.03	0.06	-0.36	0.08	0.05	0.06	-0.02	-0.05	0.06	-0.20	0.04	0.07	
8	$a_{k,i}$	1.09	-0.14	-0.21	0.52	0.27	0	0.11	0.17	0.23	0.35	-0.05	0.02	-0.60	0.02	0.01	0.27	0.32	365.25
	$b_{k,i}$	0.50	-0.08	-0.38	0.36	0.14	0.04	0	0.25	0.17	0.27	-0.03	-0.03	-0.32	-0.10	0.20	0.10	0.30	
9	$a_{k,i}$	-0.34	-0.09	-1.22	0.05	0.15	-0.29	-0.17	1.58	-0.06	-0.15	0.00	0.13	0.28	-0.08	0.62	-0.01	-0.04	4028.71
	$b_{k,i}$	0	-0.11	-0.22	0.01	0.02	-0.03	-0.01	0.49	-0.03	-0.02	0.01	0.02	0.04	-0.04	0.16	-0.02	-0.01	
10	$a_{k,i}$	-0.13	0.07	-0.37	0.05	0.06	-0.11	-0.07	0.46	0.00	-0.04	0.01	0.07	0.09	-0.05	0.15	-0.01	0.01	2014.35
	$b_{k,i}$	0.05	0.03	0.07	0.02	-0.01	0.03	0.02	-0.04	-0.01	-0.01	0.02	0.03	0.02	-0.04	-0.04	-0.01	0	
11	$a_{k,i}$	-0.06	0.13	-0.07	0.03	0.02	-0.05	-0.05	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1342.90
	$b_{k,i}$	0.03	-0.02	0.04	-0.01	-0.03	0.02	0.01	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	$a_{k,i}$	-0.03	0.08	-0.01	0.04	0.01	-0.02	-0.02	-0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1007.18
	$b_{k,i}$	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.01	0	0.01	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

附录 D

(资料性附录)

Saastamoinen 对流层改正模型

对流层延迟常用天顶方向的干、湿延迟分量及相应的映射函数用公式 (D.1):

$$\Delta d_{trop} = \Delta d_{z,dry} m_{dry}(E) + \Delta d_{z,wet} m_{wet}(E) \dots\dots\dots (D.1)$$

式中, $\Delta d_{z,dry}$ 、 $\Delta d_{z,wet}$ 为天顶方向的干、湿延迟分量, $m_{dry}(E)$ 、 $m_{wet}(E)$ 是与高度角 E 有关的映射函数。

Saastamoinen 模型的天顶方向的干湿延迟分量见公式 (D.2):

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_{z,dry} &= \frac{0.002277P}{f(B,h)} \\ \Delta d_{z,wet} &= \frac{e_s}{f(B,h)} \left(\frac{0.2789}{T_k} + 0.05 \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.2)$$

其中, $f(B, h)$ 为纬度 B 和高程 h 的函数, 见公式 (D.3):

$$f(B, h) = 1 - 0.00266 \cos 2B - 0.00028h \dots\dots\dots (D.3)$$

投影函数可以选择 Chao 模型, Chao 模型的映射函数形式见公式 (D.4):

$$m(E) = \frac{1}{\sin E + \frac{A_1}{\operatorname{tg} E + B_1}} \dots\dots\dots (D.4)$$

对于干分量延迟, 映射函数中的常数 $A_1=0.001433$, $B_1=0.0445$; 对于湿分量延迟, $A_1=0.00035$, $B_1=0.017$ 。

附 录 E
(资料性附录)
BDS 卫星信号载波频率

BDS 卫星信号的载波频率如表 E.1 所示。

表 E.1 BDS 卫星信号载波频率

系统	名称	频率 MHz
BDS2	B1I	1561.098
	B2I	1207.140
	B3I	1268.520
BDS3	B1I	1561.098
	B1C	1575.420
	B2a	1176.450
	B3I	1268.520

参 考 文 献

- [1]北斗卫星导航系统公开服务性能规范（1.0 版），中国卫星导航系统管理办公室，2013.12-27
- [2]北斗卫星导航系统公开服务性能规范（2.0 版），中国卫星导航系统管理办公室，2018.12-27
- [3]北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号（2.1 版），中国卫星导航系统管理办公室，2016.11-07
- [4]北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1C（1.0 版），中国卫星导航系统管理办公室，2017.12-27
- [5]北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B2a（1.0 版），中国卫星导航系统管理办公室，2017.12-27
- [6]北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B3I（1.0 版），中国卫星导航系统管理办公室，2018.02-09
-