



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: BDS-3 系统完好性 SISA 参数等级转换算法优化  
作者: 姜娜娜, 张守建, 曹月玲, 李星星, 夏凤雨, 孟轶男, 陈雷  
DOI: 10.13203/j.whugis20240331  
收稿日期: 2024-12-22  
网络首发日期: 2025-01-16  
引用格式: 姜娜娜, 张守建, 曹月玲, 李星星, 夏凤雨, 孟轶男, 陈雷. BDS-3 系统完好性 SISA 参数等级转换算法优化[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240331>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240331

引用格式：

姜娜娜, 张守建, 曹月玲, 等. BDS-3 系统完好性 SISA 参数等级转换算法优化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240331 (JIANG Nana, ZHANG Shoujian, CAO Yueling, et al. Optimization of SISA parameter level conversion algorithm for BDS-3 system integrity[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240331)

## BDS-3 系统完好性 SISA 参数等级转换算法优化

姜娜娜<sup>1</sup>, 张守建<sup>1\*</sup>, 曹月玲<sup>2</sup>, 李星星<sup>1</sup>, 夏凤雨<sup>2</sup>, 孟轶男<sup>3</sup>, 陈雷<sup>3</sup>

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079

2 中国科学院上海天文台, 上海 200030

3 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

**摘要：**卫星导航系统的服务完好性 SISA 参数由广播星历中播发的完好性索引指数通过相应的转换算法计算得到, 用于星历空间测距误差及定位服务精度的预测。基于实测数据, 评估了 BDS-3 系统完好性 SISA 参数对空间测距误差的包络能力。结果表明完好性 SISA<sub>oc</sub> 参数对轨道径向与钟差的综合测距误差存在漏包络现象。为了解决这一问题, 基于 395 天历史数据, 提出一种改进的 SISA 参数索引转换算法。该算法包括两部分: SISA<sub>ocb</sub> 取值优化和 SISA<sub>oc1</sub> 算法优化。在 SISA<sub>ocb</sub> 取值优化中, 取历史所有卫星轨道径向误差与钟差误差 RMS 值之和的最大数作为 SISA<sub>ocb</sub> 的最小限值。在 SISA<sub>oc1</sub> 算法优化中, 通过钟差拟合提取的一次项系数最值与自变量自由取值公式计算的 SISA<sub>oc1</sub> 相比, 确定 SISA<sub>oc1</sub> 参数计算公式中的常数 N 值。通过对 8 个月的实测数据进行分析, 验证了所建算法的优势, 实现了 SISA<sub>oc</sub> 参数对卫星沿径向误差的“零次”漏包络 (不包含卫星在境外时广播星历显著异常情况), 降低了因电文参数播发值不合理带来的 BDS-3 系统完好性参数漏包络事件。

**关键词：**BDS-3; SISA<sub>oc</sub> 参数; 完好性; SISA 参数; 漏包络

## Optimization of SISA parameter level conversion algorithm for BDS-3 system integrity

JIANG Nana<sup>1</sup>, ZHANG Shoujian<sup>1\*</sup>, CAO Yueling<sup>2</sup>, LI Xingxing<sup>1</sup>, XIA Fengyu<sup>2</sup>, MENG Yinan<sup>3</sup>, CHEN Lei<sup>3</sup>

1. School of Geodesy and Geomatics, WUhan University, WUhan 430079, China;

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

**Abstract: Objectives:** To improve the leakage envelope phenomenon of BDS-3 SISA<sub>oc</sub> integrity

收稿日期: 2024-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(42374016, 12373077, 12303071, 42474023)。

第一作者: 姜娜娜, 博士, 研究方向为 GNSS 定位及完好性。2024182140078@whu.edu.cn

通讯作者: 张守建, 博士, 副教授。shjzhang@sgg.whu.edu.cn

parameter to the comprehensive ranging errors induced by the orbit radial and clock errors, an improved SISA parameter index conversion algorithm based on 395 days of historical data is proposed. **Methods:** The algorithm consists of two parts: SISA<sub>ocb</sub> (SISA parameter associated with orbit radial and clock accuracy) and SISA<sub>oc1</sub> (SISA parameter associated with satellite clock speed accuracy) algorithm optimization. In SISA<sub>ocb</sub> value optimization, the RMS maximum of orbits radial and clock comprehensive error of all satellites in history is taken as the minimum limit of SISA<sub>ocb</sub>. In the optimization of SISA<sub>oc1</sub> algorithm, the maximum of first-order coefficient extracted through clock error fitting is compared with SISA<sub>oc1</sub> calculated by free value formula of independent variable to determine the constant N in the SISA<sub>oc1</sub> parameter calculation formula. **Results:** By analyzing measured data of 8 months, the advantages of the proposed algorithm are verified. The new algorithm can achieve the “zero” leakage envelope of SISA<sub>oc</sub> parameter for satellite radial and clock errors (excluding significant anomalies in broadcast ephemeris for satellite abroad), and reduced the leakage envelope event of BDS-3 integrity parameter caused by unreasonable SISA broadcast values. **Conclusions:** The effective optimization algorithm and analysis results for BDS-3 SISA<sub>oc</sub> parameter in this paper can provide a valuable reference for the upgrading and construction of BDS-3 system integrity service.

**Keywords:** BDS-3; SISAoc parameters; integrity; SISA parameters; leakage envelope

全球卫星导航系统( Global Navigation Satellite System, GNSS )为用户提供全天候定位、导航和授时服务。精度、完好性、连续性和可用性是 GNSS 系统的四大服务性能指标,其中精度是评估导航系统性能的基础,完好性起源于民用航空的需求<sup>[1-2]</sup>,表征卫星导航系统提供服务的精度可信性。在生命安全导航领域,系统不仅需要提供当前服务所要求的精度等级,还需在发生异常(如定位失败或星历质量不可靠等)时,能够快速通知用户,以保证提高用户使用安全性<sup>[3-4]</sup>。系统服务的安全性通过导航电文向用户播发完好性参数实现。提高系统的完好性服务目前成为美国 GPS、欧洲 Galileo 和中国北斗等 GNSS 系统建设者的重要工作之一<sup>[5-8]</sup>。

监测导航卫星空间信号误差 (Signal-In-Space Error, SISE) 的精度预测指标正确性和可用性是各系统基本完好性体系建设的核心任务之一。各大 GNSS 系统播发导航电文完好性参数 URA (User Range Accuracy) 或 SISA (Signal In Space Accuracy) 来预测空间信号精度。不同 GNSS 导航电文的完好性参数如表 1 所示。美国 GPS 系统 LNAV 电文、中国 BDS-2/3 D1/D2 电文和欧洲 Galileo INAV/FNAV 电文均播发空间信号预测精度 (URA or SISA)单参数表征广播星历空间信号精度。而 GPS 系统 CNAV (Civil Navigation)电文和 BDS-3 CNAV 电文更加精细化,将空间信号预测精度根据轨道与钟差特性分解为四个参数,分别为:轨道平面误差预测精度指数(URAI<sub>ED</sub>、SISAI<sub>oc</sub>)、星历径向与钟偏精度指数(URAI<sub>NED0</sub>、SISAI<sub>ocb</sub>)、卫星钟速精度指数(URAI<sub>NED1</sub>、SISAI<sub>oc1</sub>)、卫星钟漂精度指数(URAI<sub>NED2</sub>、SISAI<sub>oc2</sub>)。基于以上四个精度指数,可计算卫星轨道径向与钟差预测精度 URA<sub>NED</sub>/SISA<sub>oc</sub>。

表 1 各卫星导航系统广播星历精度参数

Tab.1 Broadcast ephemeris accuracy parameters for GNSS satellite navigation systems				
系统	电文类型	完好性参数	含义	
GPS	LNAV	URA	用户测距精度	
		URAI <sub>ED</sub>	轨道平面预测精度指数	
	CNAV	URA	URAI <sub>NED0</sub>	星历径向与钟偏精度指数
			URAI <sub>NED1</sub>	卫星钟速精度指数
			URAI <sub>NED2</sub>	卫星钟漂精度指数
Galileo	INAV/FNAV	SISA	用户测距精度	
BDS-2/3	D1/D2	URA	用户测距精度	
BDS-3	CNAV1/ CNAV2	SISA	SISAI <sub>oc</sub>	轨道平面预测精度指数
			SISAI <sub>ocb</sub>	星历径向与钟偏精度指数
			SISAI <sub>oc1</sub>	卫星钟速精度指数
			SISAI <sub>oc2</sub>	卫星钟漂精度指数

GNSS 社区在完好性参数 URA/SISA 如何反映和界定 SISE 真实变化方面做了大量的努力。Medel et al<sup>[9]</sup>初步定义了伽利略卫星的预处理 SISA 算法。赵春梅等<sup>[10]</sup>基于轨道误差和卫星钟差协方差矩阵有效求解完好性指标 SISA，分析其和空间信号误差 SISE 的变化分布情况。结果表明不同卫星应分别计算其完好性指标。郭英等<sup>[11]</sup>优化了 SISA 完好性算法所需的最坏用户位置 WUL (Worst User Location) 的计算算法。Mach et al<sup>[12]</sup>提出了伽利略完好性概念的修正版，其特点是传播瞬时的空间信号误差边界，同时修正了 SISA 边界的定义，二者的优化允许放松过界要求，也将卫星完好性风险最小化。杨赛男等<sup>[13]</sup>设计了一种 SISA 计算方法，结果表明所计算的 SISA 参数能够准确反映广播星历空间信号精度，对大部分卫星可实现对空间信号误差 98% 的包络。陈金平等<sup>[14]</sup>设计了一种基于先验信息的北斗卫星基本完好性 SISA 参数实现算法，所计算的 SISA<sub>oc</sub>、SISA<sub>oc</sub> 参数对 SISE 误差的包络能力分别约为 99.7%、98.6%。针对 BDS-3 系统尚未在其 ICD 文件中给出各 SISAI (表 1) 索引参数的等级转换关系及相应的 SISA 参数用户应用算法，杨骞等<sup>[15]</sup>设计了 BDS-3 系统 SISAI 参数的等级转换方法及用户应用算法。实验分析表明随着 BDS-3 系统组网完成，基于该算法评估的 BDS-3 系统非精密进近 NPA (Non-precision approach) 阶段完好性服务能力为 100%。

虽然 BDS 系统完好性算法设计已经有初步研究<sup>[15-16]</sup>，但是还缺乏对北斗完好性参数的服务性能进行系统性验证分析。本文首先基于 395 天的北斗广播星历和精密星历数据系统调查北斗系统基本完好性算法的正确性，对潜在的漏包问题进行详细分析，并对北斗系统基本完好性用户算法进行优化。本文结构组织如下。首先，第 2 部分介绍完好性 SISA 参数算法。第 3 部分分析 SISA 算法实验结果，并对漏包原因进行分析。第 4 部分根据漏包影响因素进行算法优化。第 5 部分对优化算法进行验证分析。最后给出本文的重要结论。

## 1 BDS-3 完好性 SISA 参数算法

受导航电文带宽限制，BDS-3 系统广播星历以等级索引值形式 (SISAI<sub>oc</sub>、SISAI<sub>ocb</sub>、SISAI<sub>oc1</sub>、SISAI<sub>oc2</sub>) 表示完好性参数 SISA<sub>oc</sub>、SISA<sub>ocb</sub>、SISA<sub>oc1</sub>、SISA<sub>oc2</sub>。用户使用完好性参数时，需调用专门的等级对应关系表或函数将索引值 SISAI 转化为具体的预测精度值。GPS 系统 ICD 文件<sup>[17]</sup>已给出相关完好性参数的等级转换算法及用户应用算法。BDS-3 系统的

SISA 参数组成与 GPS 类似，但 BDS 系统 ICD 文件<sup>[18]</sup>尚未给出各参数的等级对应关系表及其用户算法。考虑到杨戩等<sup>[15]</sup>设计的 BDS-3 系统 SISAI 参数转换算法及用户应用算法与 GPS 系统高度相似，本文将借鉴其设计的算法进行试验分析。

杨戩等<sup>[15]</sup>提供的索引关系表如表 2 所示。SISAI<sub>oe</sub> 和 SISAI<sub>ocb</sub> 索引参数的取值范围均为-16 ~ +15，不同索引值对应的 SISA<sub>oe</sub>/SISA<sub>ocb</sub> 参数范围不同 (SISA<sub>oe</sub> 与 SISA<sub>ocb</sub> 取值相同)。SISA<sub>oe</sub> 和 SISA<sub>ocb</sub> 取索引关系表中相应等级范围内的上限值。

表 2 SISA<sub>oe</sub>/SISA<sub>ocb</sub> 索引关系表

Tab.2 Index Relationship Table for SISA<sub>oe</sub>/SISA<sub>ocb</sub>

SISAI <sub>oe</sub> /SISAI <sub>ocb</sub>	SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> (m)	SISAI <sub>oe</sub> /SISAI <sub>ocb</sub>	SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> (m)
15	6144.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub>	-1	1.20 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 1.70
14	3072.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 6144.00	-2	0.85 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 1.20
13	1536.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 3072.00	-3	0.60 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.85
12	768.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 1536.00	-4	0.43 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.60
11	384.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 768.00	-5	0.30 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.43
10	192.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 384.00	-6	0.21 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.30
9	96.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 192.00	-7	0.15 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.21
8	48.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 96.00	-8	0.11 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.15
7	24.00 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 48.00	-9	0.08 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.11
6	13.65 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 24.00	-10	0.06 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.08
5	9.65 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 13.65	-11	0.04 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.06
4	6.85 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 9.65	-12	0.03 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.04
3	4.85 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 6.85	-13	0.02 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.03
2	3.40 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 4.85	-14	0.01 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.02
1	2.40 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 3.40	-15	SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 0.01
0	1.70 <SISA <sub>oe</sub> /SISA <sub>ocb</sub> ≤ 2.40	-16	没有精度预测,使用有风险

SISAI<sub>oc1</sub> 和 SISAI<sub>oc2</sub> 参数均有 8 个等级，索引值取值范围为 0~7，通过索引值的等级值转换公式(1)<sup>[15]</sup>获得 SISA<sub>oc1</sub> 和 SISA<sub>oc2</sub>。其中，计算 SISA<sub>oc1</sub> 的公式和 GPS 系统相关算法<sup>[17]</sup>一致，且常数 14 处通常以 N 值表示( $N \in [1,14]$ )，此处 BDS-3 系统计算 SISA<sub>oc1</sub> 的 N 值取为 14。

$$\begin{aligned} SISA_{oc1} &= 2^{-(SISAI_{oc1}+14)}, \quad SISAI_{oc1} \in [0,7], \text{为正整数} \\ SISA_{oc2} &= 2^{-(SISAI_{oc2}+28)}, \quad SISAI_{oc2} \in [0,7], \text{为正整数} \end{aligned} \quad (1)$$

综合 SISA<sub>ocb</sub>、SISA<sub>oc1</sub>、SISA<sub>oc2</sub> 参数可计算 SISA<sub>oc</sub>，如式(2)<sup>[15]</sup>所示：

$$\begin{cases} SISA_{oc} = SISA_{ocb} + SISA_{oc1} \cdot (t - t_{op}), & t - t_{op} \leq 93600s \\ SISA_{oc} = SISA_{ocb} + SISA_{oc1} \cdot (t - t_{op}) + SISA_{oc2} \cdot (t - t_{op} - 93600)^2, & t - t_{op} > 93600s \end{cases} \quad (2)$$

其中， $t$  为系统时间， $t_{op}$  为电文参考时间，单位都是秒。

基于 SISA<sub>oe</sub> 和 SISA<sub>oc</sub> 参数可计算反映广播星历空间信号精度的综合 SISA 参数<sup>[15][19]</sup>，如式(3)所示：

$$SISA = \begin{cases} \sqrt{(SISA_{oe} \cdot \sin 13.2^\circ)^2 + SISA_{oc}^2} & (MEO) \\ \sqrt{(SISA_{oe} \cdot \sin 8.5^\circ)^2 + SISA_{oc}^2} & (IGSO) \end{cases} \quad (3)$$

使用上述算法计算 SISA<sub>oe</sub>、SISA<sub>oc</sub>、综合 SISA 参数后，通过以下公式评估 SISA<sub>oe</sub> 参数

对轨道切平面误差的包络能力  $P_{oe}$ 、SISA<sub>oc</sub> 参数对轨道径向与钟差综合误差的包络能力  $P_{oc}$ 、综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络能力  $P_{SISA}$  [19]。

$$\begin{aligned}
 P_{oe} &= \frac{N(\sqrt{\Delta T^2 + \Delta N^2} < k \cdot SISA_{oe})}{N_{all}} \\
 P_{oc} &= \frac{N(|\Delta R - \Delta Clk| < k \cdot SISA_{oc})}{N_{all}} \\
 P_{SISA} &= \frac{N(SISE_{WUL} < k \cdot SISA)}{N_{all}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

其中， $k$  是完好性风险系数，根据 SISA 参数需满足 99.999%的包络指标要求， $k$  取值 4.42。 $\Delta R$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta N$  分别为广播星历计算轨道与精密轨道径向、切向和法向的误差， $\Delta Clk$  为广播钟差与精密钟差之差的二次差， $SISE_{WUL}$  为最差用户位置方向的投影误差[20]。公式(4)中  $N(\bullet)$  表示满足条件的评估点个数， $N_{all}$  为全部评估点个数。

目前，GPS 系统 SP SPS (Standard Positioning Service Performance Standard) 文件[19]明确要求卫星广播星历的空间信号误差在最差用户方向的投影超过 4.42 倍 URA 时，系统未给出告警信息的概率应小于  $10^{-5}$ ，即  $4.42 \times \text{URA}$  门限可以 99.999%的概率包络卫星广播星历空间信号误差在最差用户方向的投影。BDS 系统 ICD 文件虽尚无明确给出完好性指标要求，但其向国际民航组织承诺实现与 GPS 相同的完好性服务指标。以上完好性服务指标也是国际民航组织公约附件 10 中对完好性服务故障概率的要求[21]。

## 2 SISA 算法实验结果分析

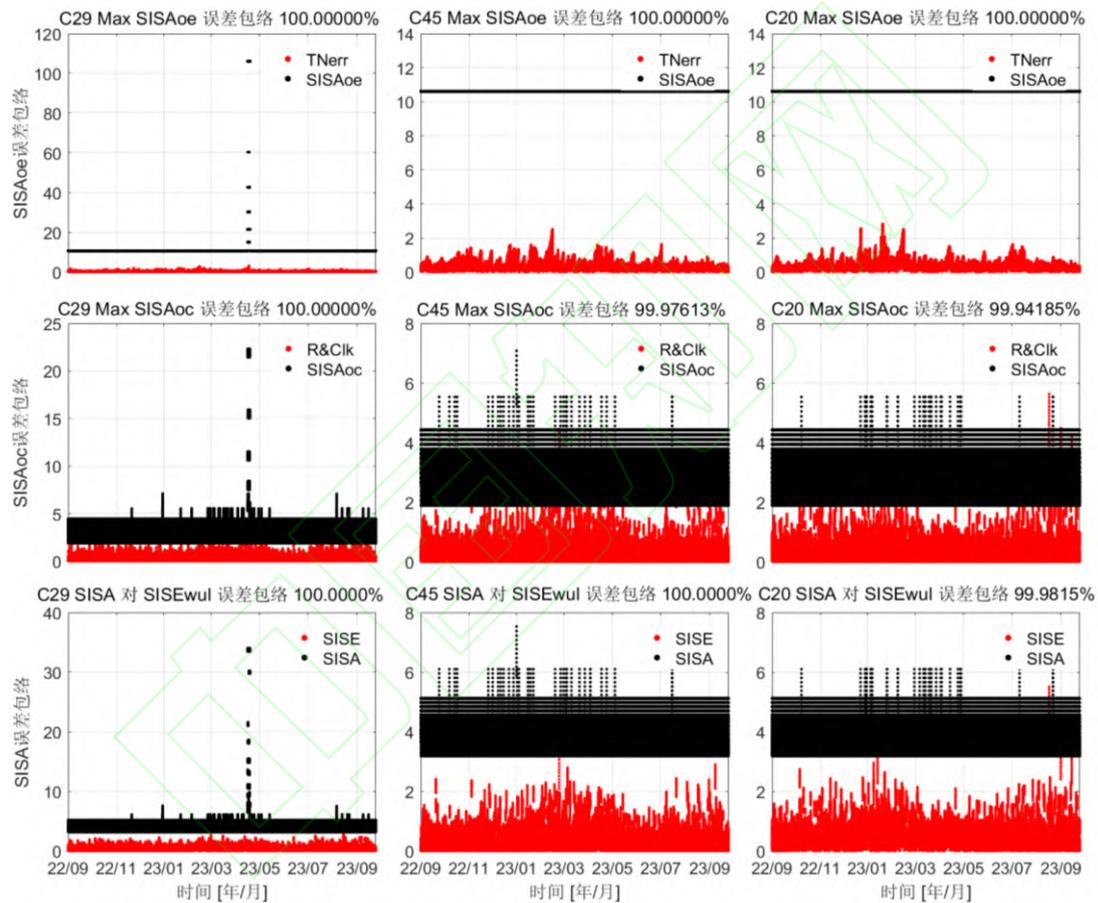
本节使用从武汉大学 IGS 数据中心 (<ftp://igs.gnsswhu.cn>) 下载的 BDS-3 RINEX 4.0 格式 CNAV1/CNAV2 广播星历和 GFZ 精密星历，时间从 2022 年 9 月 1 日至 2023 年 9 月 30 日 (共 395 天)，系统评估 BDS-3 系统电文完好性 SISA 参数对广播星历空间信号误差的包络能力。因 SISA 参数在两种电文中的播发机制相同，故本文仅评估 CNAV1 电文。表 3 统计了 BDS-3 MEO/IGSO C19 ~ C46 共 27 颗卫星的 SISA 参数对空间信号测距误差的包络情况  $P_{oe}$ 、 $P_{oc}$  和  $P_{SISA}$ 。数据统计历元间隔为 5 分钟，共计 113760 个样本点。

表 3 CNAV1 电文 SISA 参数误差包络能力 (%)

Sat	$P_{oe}$	$P_{oc}$	$P_{SISA}$	Sat	$P_{oe}$	$P_{oc}$	$P_{SISA}$
C19	100.00000	99.96466	100.00000	C34	100.00000	99.95246	99.96831
C20	100.00000	99.94185	99.98150	C35	100.00000	99.93088	99.96398
C21	100.00000	99.98677	99.99735	C36	100.00000	99.95568	99.96543
C22	100.00000	99.93921	99.98943	C37	100.00000	99.96465	99.98939
C23	100.00000	99.96822	99.98941	C38	100.00000	99.97874	100.00000
C24	100.00000	99.98471	99.97482	C39	100.00000	99.96011	100.00000
C25	100.00000	99.98502	99.99295	C40	100.00000	99.98937	100.00000
C26	100.00000	99.99648	100.00000	C41	100.00000	99.94888	99.97885
C27	100.00000	99.96041	99.99736	C42	100.00000	99.96385	99.99647
C28	100.00000	99.94985	99.97888	C43	100.00000	99.95945	99.98942
C29	100.00000	100.00000	100.00000	C44	100.00000	99.96913	99.99471
C30	100.00000	99.94892	99.96830	C45	100.00000	99.97613	100.00000
C32	100.00000	99.92611	99.96921	C46	100.00000	99.93623	99.98229
C33	100.00000	99.90299	99.97972				

由表 3 可知：27 颗卫星的  $SISA_{oc}$  参数的  $P_{oc}$  均为 100%。对于  $SISA_{oc}$  参数对轨道径向与钟差综合误差的包络能力，仅 C29 卫星的  $P_{oc}$  为 100%，其余 26 颗卫星的  $P_{oc}$  均小于 99.999%，即  $SISA_{oc}$  完好性参数包不住轨道径向与钟差综合误差。对于综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络能力，有 20 颗卫星的  $P_{SISA}$  均小于 99.999%，即综合 SISA 参数包不住用户最差位置方向的投影误差。

为详细分析完好性参数性能，以 C29、C45、C20 卫星为例，给出  $SISA_{oe}$ 、 $SISA_{oc}$ 、综合 SISA 参数对误差的包络时序情况，如图 1 所示。C29 卫星的  $P_{oe}$ 、 $P_{oc}$  和  $P_{SISA}$  均为 100%，C45 卫星仅  $P_{oc}$  小于 99.999%，C20 卫星的  $P_{oc}$  和  $P_{SISA}$  均小于 99.999%。结合表 3 和图 1 可以看到，综合 SISA 参数漏包络主要由于轨道径向与钟差综合误差超过  $SISA_{oc}$  参数门限导致。



(a) C29 卫星 SISA 参数误差包络情况 (b) C45 卫星 SISA 参数误差包络情况 (c) C20 卫星 SISA 参数误差包络情况

图 1 C29/C45/C20 卫星  $SISA_{oc}$  参数、 $SISA_{oc}$  参数、综合 SISA 参数对误差的包络情况，第一行子图为  $SISA_{oc}$  参数对轨道切平面误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA_{oc}$ ，红线为广播星历轨道切平面误差；第二行子图为  $SISA_{oc}$  参数对轨道径向及钟差综合误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA_{oc}$ ，红线为广播星历轨道径向和钟差预报误差；第三行子图为综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA$ ，红线为广播星历在用户最差位置方向投影的空间信号误差  $SISE_{WUL}$ 。

Fig.1 The error envelopment situation for C29/C45/C20 satellite  $SISA_{oe}$  parameters,  $SISA_{oc}$  parameters, and comprehensive SISA parameters. In the first, second and third row, the black represents alarm threshold of  $4.42 \times SISA_{oc}$ ,  $4.42 \times SISA_{oc}$  and  $4.42 \times SISA$ , respectively, and the red represents broadcast ephemeris orbital tangent plane error, and radial orbit and clock comprehensive errors, and spatial signal error  $SISE_{WUL}$  projected in user's worst position direction

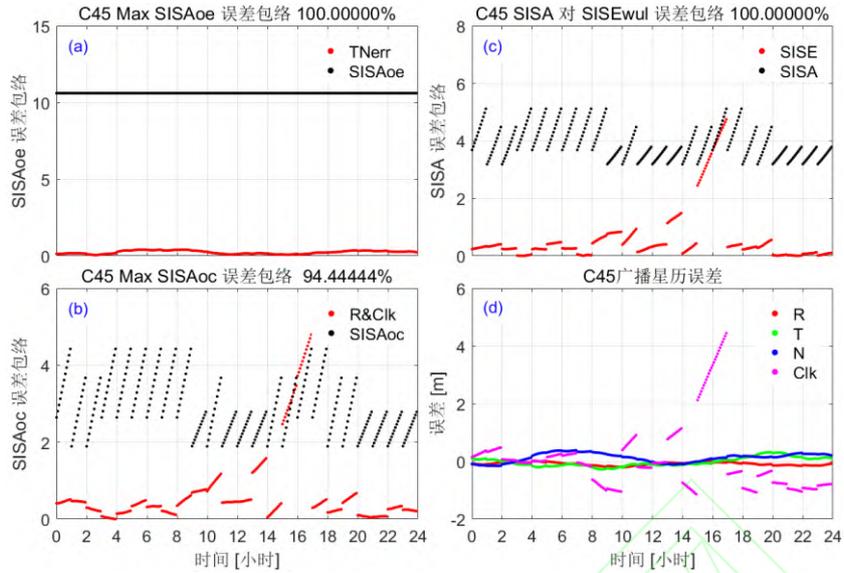


图2 C45 卫星 2023/02/25 SISAOc/SISAOc/综合 SISA 参数对误差的包络结果及广播星历误差结果。子图(a)为 SISAOe 参数对轨道切平面误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times \text{SISAOe}$ , 红线为广播星历轨道切平面误差; 子图(b)为 SISAOc 参数对轨道径向及钟差综合误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times \text{SISAOc}$ , 红线为广播星历轨道径向和钟差预报误差; 子图(c)为综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times \text{SISA}$ , 红线为广播星历在用户最差位置方向投影的空间信号误差 SISEWUL; 子图(d)为广播星历误差结果, 红线、绿线、蓝线分别为轨道径向、切向、法向误差, 粉红线为钟差误差

Fig.2 The error envelopment of SISAOc/SISAOc/Comprehensive SISA Parameter and Broadcast Ephemeris Error for C45 Satellite on February 25th, 2023. In subplots (a), (b) and (c), the black represents alarm threshold of  $4.42 \times \text{SISAOe}$ ,  $4.42 \times \text{SISAOc}$  and  $4.42 \times \text{SISA}$ , respectively, and the red represents broadcast ephemeris orbital tangent plane error, radial orbit and clock comprehensive errors, and spatial signal error SISEWUL projected in user's worst position direction. In subplot (d), the red, green and blue represent radial, tangential, and normal errors of broadcast ephemeris orbit, and the pink denotes broadcast ephemeris clock errors

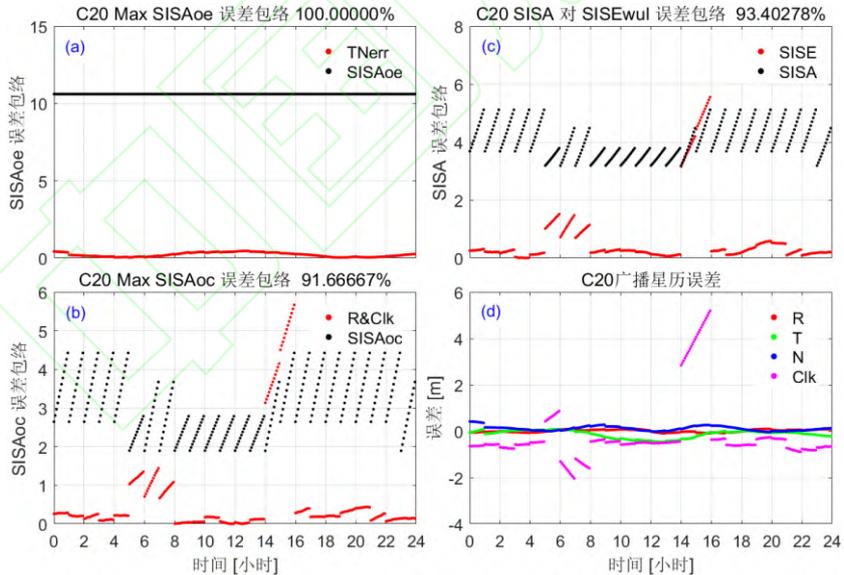


图3 C20 卫星 2023/08/22 SISAOc/SISAOc/综合 SISA 参数对误差的包络结果及广播星历误差结果, 子图(a)为 SISAOe 参数对轨道切平面误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times \text{SISAOe}$ , 红线为广播星历轨道切平面误差; 子图(b)为 SISAOc 参数对轨道径向及钟差综合误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times \text{SISAOc}$ , 红线为广播星历轨道径向和钟差预报误差; 子图(c)为综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times \text{SISA}$ , 红线为广播星历在用户最差位置方向投影的空间信号误差 SISEWUL; 子图(d)为广播星历误差结果, 红线、绿线、蓝线分别为轨道径向、切向、法向误差, 粉红线为钟差误差。

Fig.3 The error envelopment of SISAOc/SISAOc/Comprehensive SISA Parameter and Broadcast Ephemeris Error for C20 Satellite on August 22, 2023. In subplots (a), (b) and (c), the black represents alarm threshold of  $4.42 \times \text{SISAOe}$ ,  $4.42 \times \text{SISAOc}$  and  $4.42 \times \text{SISA}$ , respectively, and the red represents broadcast ephemeris orbital tangent plane error, radial orbit and clock comprehensive errors, and spatial signal error SISEWUL projected in user's worst position direction; In subplot (d), the red, green and blue represent radial, tangential, and normal errors of broadcast ephemeris orbit, and the pink denotes broadcast ephemeris clock errors

为具体分析  $SISA_{oc}$  参数漏包络的原因，图 2 和 3 给出了 C45、C20 卫星具体的未能有效包络误差的时段。C45 卫星 2023 年 2 月 25 日 15:00 至 17:00 和 C20 卫星 2023 年 8 月 22 日 14:00 至 16:00 时段钟差预报误差较大，而  $SISA_{oc}$  参数门限计算值偏小，导致轨道径向与钟差综合误差超过  $SISA_{oc}$  参数门限。一般情况下，BDS 系统广播星历的更新周期为 1 小时 ( $3600s < 93600s$ )。因此，根据公式(2)中  $SISA_{oc}$  的计算方法可得出：是卫星播发的  $SISA_{ocb}$  参数值偏小或所用  $SISA_{oc1}$  参数转换算法不合理，使得当钟差发生米级跳变时， $SISA_{oc}$  参数对轨道径向与钟差综合误差的包络能力小于 99.999%，进而使得 C20 卫星综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络能力也小于 99.999%。值得一提的是，不同于 C20 卫星，由于 C45 卫星钟差误差的跳变相对较小，其综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络能力为 100%。

试验期间，其他卫星发生 SISA 参数漏包络的情况与 C45、C20 卫星类似：在钟差误差偶发米级跳变，但  $SISA_{oc}$  参数门限存在计算值偏小，导致  $SISA_{oc}$  参数漏包轨道径向与钟差综合误差，进而可能导致综合 SISA 参数漏包络用户最差位置方向投影的误差。因此，先前研究<sup>[15]</sup>给出用户转换模型需要优化。

### 3 SISA 参数优化方案

针对由于卫星播发的  $SISA_{ocb}$  参数值偏小或系统所用  $SISA_{oc1}$  参数转换算法不合理 (主要是常数 N 值) 导致  $SISA_{oc}$  参数门限计算值偏小，最终使得  $SISA_{oc}$  参数以及潜在的综合 SISA 参数漏包络问题，本节将对计算  $SISA_{oc}$  参数的影响因子  $SISA_{ocb}$  和  $SISA_{oc1}$  参数进行优化。

#### 3.1 $SISA_{ocb}$ 参数的优化方案

对北斗完好性  $SISA_{ocb}$  参数的优化设计流程如图 4 所示。在顾及广播星历与精密星历的轨道钟差基准差异等改正后<sup>[22-23]</sup>，根据精密星历计算广播星历轨道误差与钟差误差，再统计各卫星处理后的轨道误差和钟差误差 RMS 值，最后选取全部卫星中轨道径向与钟差综合误差 RMS 值之和最大数作为  $SISA_{ocb}$  的最小限值。

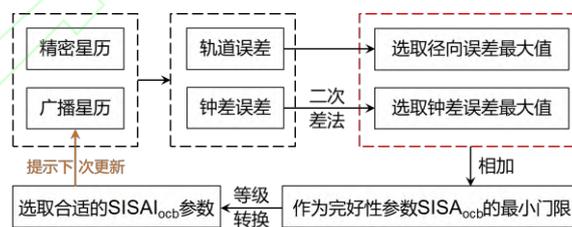


图 4 完好性  $SISA_{ocb}$  参数的优化方案

Fig.4 Optimization scheme for integrity  $SISA_{ocb}$  parameters

#### 3.2 基于优化方案的 $SISA_{ocb}$ 播发值

根据计算的 395 天 BDS-3 系统广播星历误差，分别统计各卫星的轨道径向和钟差综合误差，结果如图 5 所示。

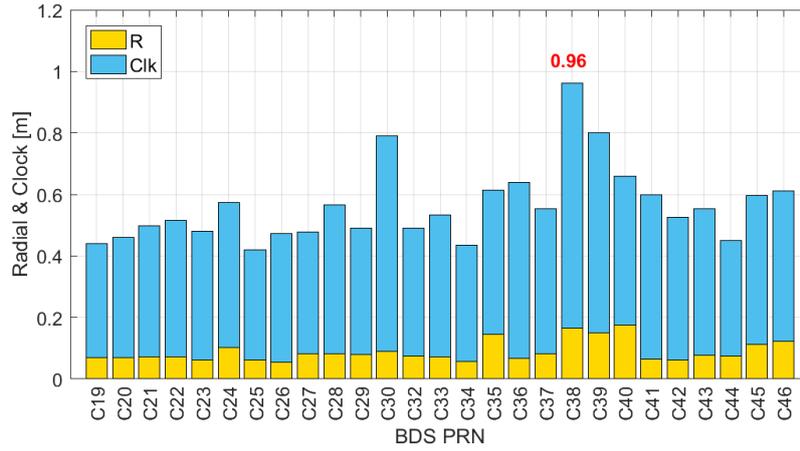


图 5 BDS-3 卫星广播星历轨道误差和钟差误差 RMS 统计图

Fig.5 RMS statistics of orbit radial and clock errors for BDS-3 satellite broadcast ephemeris

根据本文  $SISA_{ocb}$  参数的优化方案，选取所有卫星中轨道径向与钟差综合误差 RMS 值之和最大数作为  $SISA_{ocb}$  的最小限值。由图 5 统计结果可知， $SISA_{ocb}$  最小限值为 0.96 米。按照表 2 对应关系，该最小限值介于 0.85m 与 1.20m 之间，对应的  $SISAI_{ocb}$  索引值为-2。本文依据完好性 SISA 参数取索引表上限值原则，用户通过等级转换的  $SISA_{ocb}$  参数值应为 1.2m。而当前试验期间，BDS-3 广播星历中播发的  $SISAI_{ocb}$  索引值为-4/-5 的概率接近 99%。根据本文选取原则，BDS-3 卫星持续更新的广播星历中播发的  $SISAI_{ocb}$  最小等级应为-2。

### 3.3 $SISA_{oc1}$ 参数等级转换算法的优化方案

在第 2 节公式(2)中， $SISA_{oc1}$  是函数的一次项系数，本质表示卫星钟速精度。另外， $SISA_{oc1}$  与  $SISAI_{oc1}$  存在一定的函数关系，如公式(5)所示。本节将通过对比式(5)计算的  $SISA_{oc1}$  和拟合的卫星钟误差一次项系数来优化其转换算法。上文提到 BDS 系统广播星历的更新周期一般为 1 小时，故对 3.1 节中处理后的钟差误差进行拟合时，按单颗卫星 1 小时进行一次拟合，然后提取各卫星钟差拟合的一次项系数。考虑到公式(5)的计算形式以及广播星历的播发值  $SISAI_{oc1}$  应为变量，对比所有卫星一次项系数中的最大值与公式(5)计算的  $SISA_{oc1}$  值，选取适合的常数值 N。优化方案的技术流程如图 6 所示。

N 值选取满足条件：当  $SISAI_{oc1} \in [0, 7]$  时，式(5)计算的  $SISA_{oc1}$  的最大值应大于所有卫星一次项系数最大值中的最大值，最小值应小于所有卫星一次项系数最大值中的最小值，同时还应保证最值之外  $SISAI_{oc1}$  参数有富余且取值尽量小，为未来系统升级保留空间。N 值的计算如式(6)所示。

$$SISA_{oc1} = 2^{-(SISAI_{oc1} + N)}, \quad SISAI_{oc1} \in [0, 7], N \in [1, 14], \text{均为正整数} \quad (5)$$

$$N = \text{int}(-SISAI_{oc1} - \log_2 SISA_{oc1}), \quad SISAI_{oc1} \in [0, 7] \quad (6)$$

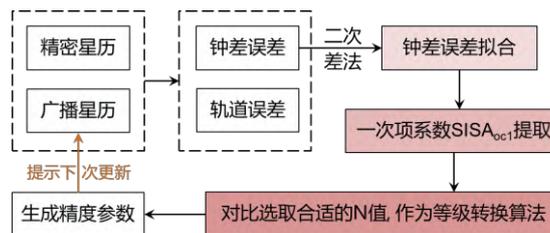


图 6 完好性  $SISA_{oc1}$  参数的优化方案

Fig.6 Optimization scheme for integrity  $SISA_{oc1}$  parameters

### 3.4 基于优化方案确定 $SISA_{oc1}$ 等级转换算法

根据计算的 395 天 BDS-3 系统广播星历误差，对经过二次差法处理后的钟差误差进行拟合，提取各卫星钟差拟合的一次项系数，因一次项系数数量级过小，故展示其在 3600s 内的量级，如图 7 所示。可知：BDS-3 卫星钟差拟合结果中，钟差一次项系数最大值在 3600s 内的量级最大值为 2.771 m，最小值为 0.761 m。

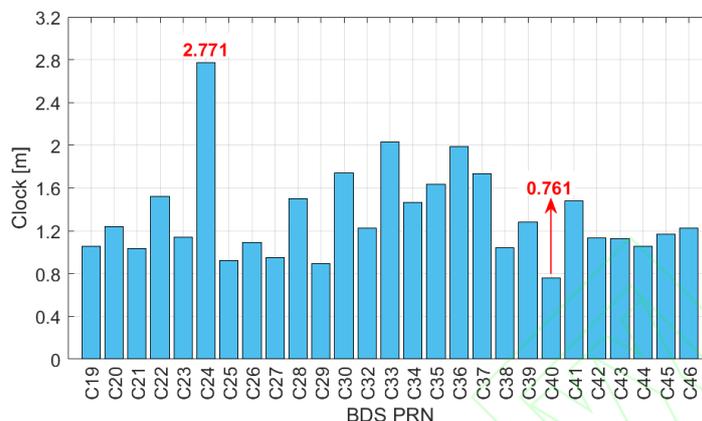


图 7 BDS-3 卫星钟差拟合的一次项系数最大值在 3600s 内的量级

Fig.7 The magnitude of the maximum first-order coefficient for BDS-3 satellite clock fitting within 3600s

为了选取适合的  $N$ ，需计算式(5)中依赖  $N$  和  $SISA_{oc1}$  变化的  $SISA_{oc1}$  值。因式(5)计算的  $SISA_{oc1}$  值量级过小，故展示其在 3600s 内的量级，如表 4。对比图 7，顾及  $N$  值选取原则以及  $SISA_{oc1}$  参数取值足以反映实际钟差变化趋势，可知符合要求的  $N$  值为 6~10。考虑到冗余及取值尽量小的条件，确定  $N=10$ 。其他系统均可采用相同的方法确定适合各自的  $N$  值。值得一提的是，目前设计 BDS 采用与 GPS 系统一致的  $N$  值(即  $N=14$ )， $SISA_{oc1}$  参数在 3600s 内的最大量级为 0.2197m，远小于钟差实际变化量的最小值 0.761m，不足以反映实际钟差变化趋势。因此，BDS 系统当前设计的与 GPS 系统卫星钟速精度计算方法高度相似的  $SISA_{oc1}$  参数生成算法并不可取。

表 4 公式(5)生成的  $SISA_{oc1}$  参数在 3600s 内的变化量统计

Tab.4 Variation Statistics of  $SISA_{oc1}$  parameter calculated by formula (5) within 3600s

$N$	$SISA_{oc1}$							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1800.000	900.000	450.000	225.000	112.500	56.250	28.125	14.063
2	900.000	450.000	225.000	112.500	56.250	28.125	14.063	7.031
3	450.000	225.000	112.500	56.250	28.125	14.063	7.031	3.516
4	225.000	112.500	56.250	28.125	14.063	7.031	3.516	1.758
5	112.500	56.250	28.125	14.063	7.031	3.516	1.758	0.879
6	56.250	28.125	14.063	7.031	3.516	1.758	0.879	0.439
7	28.125	14.063	7.031	3.516	1.758	0.879	0.439	0.220
8	14.063	7.031	3.516	1.758	0.879	0.439	0.220	0.110
9	7.031	3.516	1.758	0.879	0.439	0.220	0.110	0.055
10	3.516	1.758	0.879	0.439	0.220	0.110	0.055	0.027
11	1.758	0.879	0.439	0.220	0.110	0.055	0.027	0.014
12	0.879	0.439	0.220	0.110	0.055	0.027	0.014	0.007
13	0.439	0.220	0.110	0.055	0.027	0.014	0.007	0.003
14	0.220	0.110	0.055	0.027	0.014	0.007	0.003	0.002

因此，推荐 BDS-3 系统基本完好性电文精度参数  $SISA_{oc1}$  采用公式 (7)，即  $SISA_{oc1}$  与  $SISAI_{oc1}$  的等级转换算法为：

$$SISA_{oc1} = 2^{-(SISAI_{oc1}+10)}, \quad SISAI_{oc1} \in [0, 7], \text{ 为正整数} \quad (7)$$

#### 4 SISA 参数优化算法的验证与分析

本节将系统评估优化 SISA 算法的性能表现。利用 2023 年 10 月 1 日至 2024 年 5 月 31 日（共 8 个月）的广播星历和精密星历数据，评估 BDS-3 MEO/IGSO C19~C46 共 27 颗卫星的 SISA 参数对空间测距误差的包络情况  $P_{oc}$  和  $P_{SISA}$ ，如表 5 所示。本文未优化  $SISA_{oc}$  参数，故不展示其误差包络情况。

表 5 CNAV1 电文 SISA 参数误差包络能力 (%)

卫星	SISA 算法		优化后 SISA 算法	
	$P_{oc}$	$P_{SISA}$	$P_{oc}$	$P_{SISA}$
C19	99.99713	99.99856	100.00000	100.00000
C20	99.93533	99.93677	99.99425	99.99713
C21	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C22	99.99570	100.00000	100.00000	100.00000
C23	99.99711	100.00000	100.00000	100.00000
C24	99.99856	100.00000	100.00000	100.00000
C25	99.94400	99.97990	100.00000	100.00000
C26	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C27	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C28	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C29	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C30	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C32	99.99570	100.00000	100.00000	100.00000
C33	99.98847	100.00000	100.00000	100.00000
C34	99.99713	100.00000	100.00000	100.00000
C35	99.99346	100.00000	100.00000	100.00000
C36	99.99566	100.00000	100.00000	100.00000
C37	99.97830	100.00000	100.00000	100.00000
C38	99.97115	100.00000	100.00000	100.00000
C39	99.76122	99.89291	99.99132	99.99276
C40	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C41	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C42	99.99856	100.00000	100.00000	100.00000
C43	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C44	100.00000	100.00000	100.00000	100.00000
C45	99.99856	100.00000	100.00000	100.00000
C46	99.96552	100.00000	100.00000	100.00000

由表 5 可知：使用原 SISA 算法评估 SISA 参数误差包络能力时，有 17 颗卫星  $SISA_{oc}$  参数对轨道径向与钟差综合误差的包络能力小于 99.999%，有 4 颗卫星综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络能力小于 99.999% (其中，C20、C39 卫星部分时段处于境外，导致综合 SISA 参数漏包络；C39 卫星处于境内时，综合 SISA 参数也存在漏包络)。而使用

本文优化 SISA 算法评估 SISA 参数误差包络能力时,  $SISA_{oc}$  参数和综合 SISA 参数均只有 2 颗卫星的误差包络能力小于 99.999% (这两颗卫星为 C20 和 C39 卫星, 部分时段处于境外, 导致综合 SISA 参数漏包络)。本文优化算法显著提高了 SISA 参数对误差的包络能力。

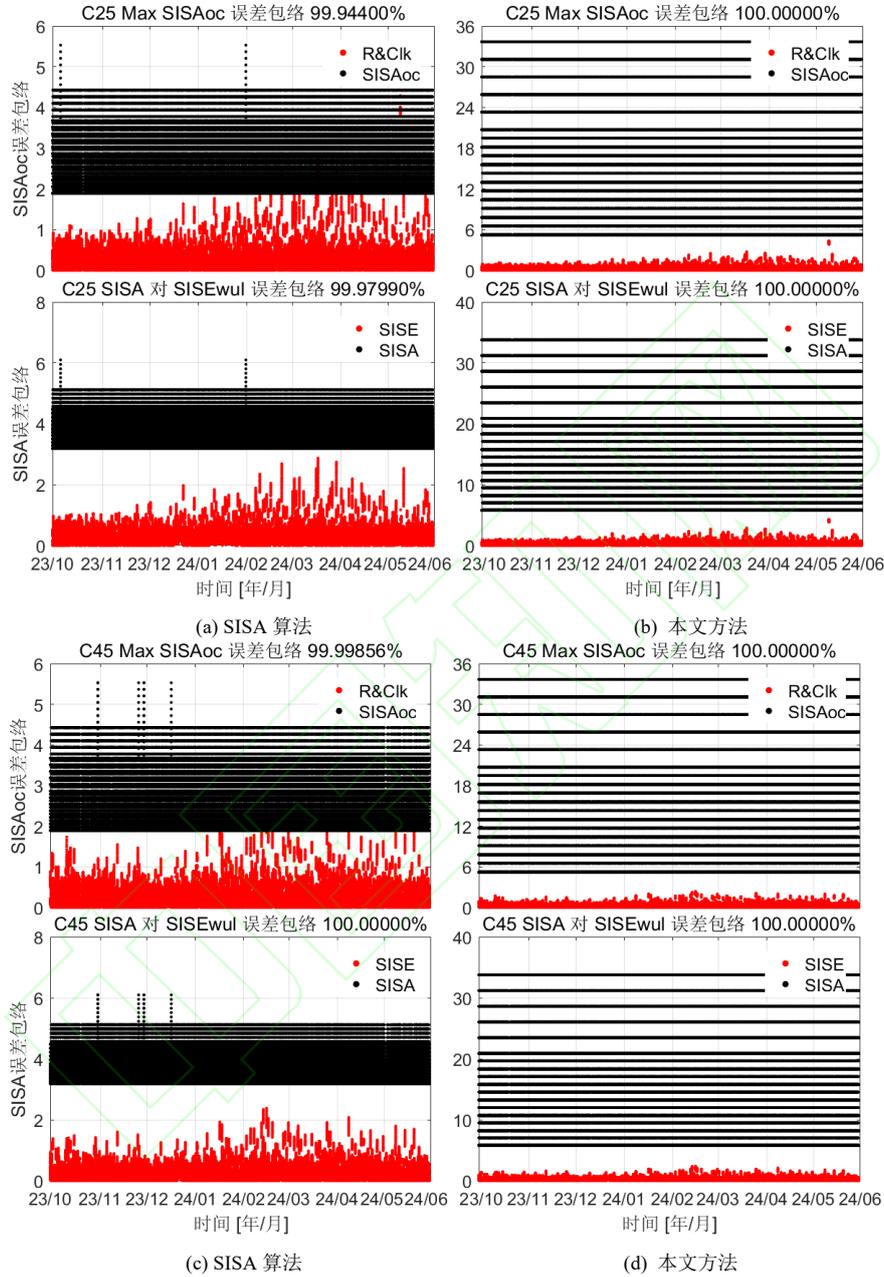


图 8 基于未优化 SISA 算法 (左) 与优化 SISA 算法 (右) 评估的 C25/C45 卫星  $SISA_{oc}$  参数、综合 SISA 参数对误差的包络情况, 各子图第一行为  $SISA_{oc}$  参数对轨道径向及钟差综合误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times SISA_{oc}$ , 红线为广播星历轨道径向和钟差预报误差; 各子图第二行为综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络结果, 黑线为告警门限  $4.42 \times SISA$ , 红线为广播星历在用户最差位置方向投影的空间信号误差  $SISE_{wul}$ 。

Fig.8 The error envelopment situation for C25/C45 satellite  $SISA_{oc}$  parameters and comprehensive SISA parameters based on unoptimized SISA algorithm (left) and optimized SISA algorithm (right). In the first and second row, the black represents alarm threshold of  $4.42 \times SISA_{oc}$  and  $4.42 \times SISA$ , respectively, and the red represents radial orbit and clock comprehensive errors and spatil signal error  $SISE_{wul}$  projected in user's worst position direction

为详细说明所建算法的优势, 选取基于原算法  $SISA_{oc}$  参数和综合 SISA 参数均存在漏包

络、仅  $SISA_{oc}$  参数存在漏包络两种情况，以 C25、C45 卫星为例，其  $SISA_{oc}$ 、综合 SISA 参数对空间信号测距误差的包络情况如图 8 所示。子图(a)、(b)为分别为 C25、C45 卫星  $SISA_{oc}$  参数、综合 SISA 参数对相应误差的包络结果，左侧未优化算法评估的完好性 SISA 参数的包络能力小于 99.999%，不满足 BDS 系统承诺的完好性指标要求；右侧所示的基于本文优化算法的评估结果均为 100%。

另外，BDS 系统没有全球监测站，当卫星位于境外时，相比境内时广播星历异常概率增大，系统完好性参数精度潜在降低，综合导致 SISA 参数漏包络的情况发生。以 C20 卫星为例，图 9 给出了 2023 年 10 月 28 日的包络时序。期间 00:00 至 04:00 该卫星处于境外，广播星历显著异常， $SISA_{oc}$  参数和综合 SISA 参数包不住误差，导致  $SISA_{oc}$  参数和综合 SISA 参数的漏包（图 10）。即使使用优化算法，8 个月的包络评估结果依旧小于 99.999%。但相比于未优化算法，本文优化算法评估的  $SISA_{oc}$  参数和综合 SISA 参数对误差包络能力有所提升，从 99.935%、99.936%提升至 99.994%、99.997%。

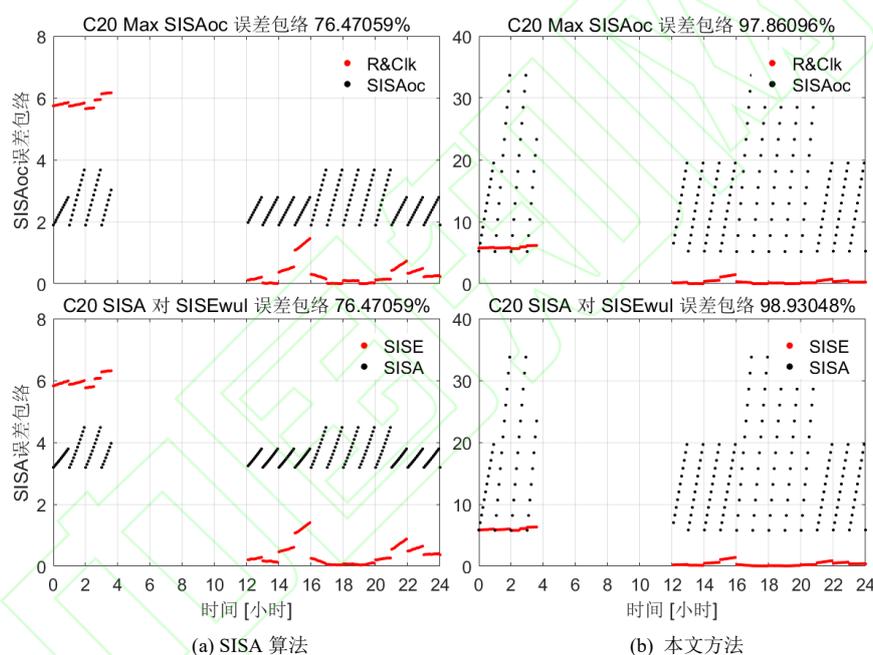


图 9 基于未优化 SISA 算法 (左) 与优化 SISA 算法 (右) 评估的 C20 卫星 2023/10/28  $SISA_{oc}$  参数、综合 SISA 参数对误差的包络情况，第一行子图为  $SISA_{oc}$  参数对轨道径向及钟差综合误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA_{oc}$ ，红线为广播星历轨道径向和钟差预报误差；第二行子图为综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA$ ，红线为广播星历在用户最差位置方向投影的空间信号误差  $SISE_{wul}$

Fig.9 The error envelopment situation for C20 satellite  $SISA_{oc}$  parameters and comprehensive SISA parameters on October 28, 2023 based on unoptimized SISA algorithm (left) and optimized SISA algorithm (right). In the first and second row, the black represents alarm threshold of  $4.42 \times SISA_{oc}$  and  $4.42 \times SISA$ , respectively, and the red represents radial orbit and clock comprehensive errors and spatial signal error  $SISE_{wul}$  projected in user's worst position direction

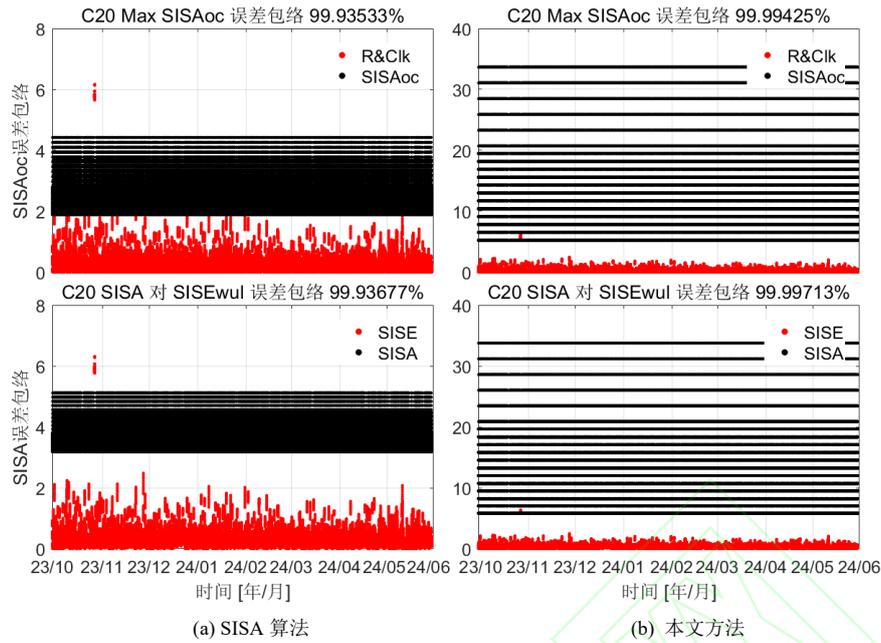


图 10 基于未优化 SISA 算法(左)与优化 SISA 算法(右)评估的 C20 卫星 SISA<sub>oc</sub> 参数、综合 SISA 参数对误差的包络情况，第一行子图为 SISA<sub>oc</sub> 参数对轨道径向及钟差综合误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA_{oc}$ ，红线为广播星历轨道径向和钟差预报误差；第二行子图为综合 SISA 参数对用户最差位置方向投影误差的包络结果，黑线为告警门限  $4.42 \times SISA$ ，红线为广播星历在用户最差位置方向投影的空间信号误差 SISE<sub>wul</sub>。

Fig.10 The error envelopment situation for C20 satellite SISA<sub>oc</sub> parameters and comprehensive SISA parameters based on unoptimized SISA algorithm (left) and optimized SISA algorithm (right). In the first and second row, the black represents alarm threshold of  $4.42 \times SISA_{oc}$  and  $4.42 \times SISA$ , respectively, and the red represents radial orbit and clock comprehensive errors and spatil signal error SISE<sub>wul</sub> projected in user's worst position direction

## 5 结论

目前，BDS-3 系统对用户公开的 ICD 文件中尚未给出 SISA 参数的用户算法，影响系统完好性服务的推广应用。基于现有研究的 BDS-3 SISAI 等级转换方法及 SISA 参数用户算法，评估 SISA 参数对误差的包络能力时，存在 SISA<sub>oc</sub> 参数“包不住”的情况，潜在的导致综合 SISA 参数“包不住”。本文对 SISA<sub>oc</sub> 参数的影响因子 SISA<sub>ocb</sub>、SISA<sub>oc1</sub> 进行了优化，设计了新的 SISAI 等级转换算法。利用 8 个月的广播星历与精密星历数据，对优化算法计算的 SISA 参数的完好性性能进行了验证分析。实验结果显示，基于本文优化算法得到的广播星历精度参数 SISA<sub>oc</sub>，实现了 SISA<sub>oc</sub> 参数对卫星轨道径向和钟差综合误差的“零次”漏包络（不包含卫星在境外时广播星历显著异常情况），提升了 BDS-3 系统完好性 SISA 参数的误差包络能力。本文优化算法和试验结果可为 BDS-3 系统完好性服务能力评估提供参考。随着未来更多历史信息可以获取，应充分利用系统开通初期以来的长期数据对本文算法验证优化。

另外，卫星在境外发生广播星历异常时，理论上可以通过卫星星间链路测量实现自身的完好性监测。BDS-3 卫星均具备卫星自主完好性监测功能<sup>[24]</sup>，但相关技术研究有待进一步完善探索。

## 参考文献

- [1]. Niu Fei. Research on the theory and method of GNSS integrity enhancement[D]. Zhengzhou:PLA Information Engineering University, 2008. (牛飞. GNSS 完好性增强理论与方法研究[D]. 郑州：解放军信息工程大学, 2008.)
- [2]. Zhao Ang, Yang Yuanxi, Xu Yangyin, et al. Integrity Analysis of GNSS Single System and Multi-system Combination [J]. Geomatics

- and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(01):72-80. (赵昂,杨元喜,许扬胤,等.GNSS 单系统及多系统组合完好性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(01):72-80. DOI:10.13203/j.whugis20180425.)
- [3]. Li Zongyi, Wang Liang, Wang Ningbo, et al. Performance Assessment and Integrity Support Information Estimation of CAS Real-time Orbits and Clocks Products[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230307. (李宗义,汪亮,王宁波,等.CAS 实时轨道、钟差产品性能评估及完好性支持信息估计[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI:10.13203/j.whugis20230307.)
- [4]. Jin Biao, Wei Wei, Chen Shanshan, et al. Analysis of SBAS Ephemeris Correction and UDRE Generation Algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(01):111-117. (金彪,魏巍,陈姗姗,等.SBAS 星历改正数及 UDRE 参数生成算法分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(01):111-117.DOI:10.13203/j.whugis20190033.)
- [5]. Kovach K, Dobyne J, Crews M, Miles C. GPS III Integrity Concept[C]. ION,2008:2250-2257.
- [6]. HERRAIZ-MONSECO E, GARCIA A M, MERINO M M R, et al. A New System Level Integrity Concept for Galileo: the Signal in Space Accuracy[C]. ION. 2001:1304-1316.
- [7]. Oehler V, Luongo F, Boyero J P, et al. The Galileo Integrity Concept[C]. ION, 2004:604-615.
- [8]. CHEN Jinping. Analysis of the GNSS Augmentation Technology Architecture[C]. ION, 2011: 247-266.
- [9]. Medel, Carlos Hernandez, Virgili, Laura Perea, Garcia, Alvaro Mozo, Piedelobo, Juan Ramon Martin, Merino, Miguel M. Romay, "SISA Computation Algorithms and their applicability for Galileo Integrity," Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, OR, September 2002, pp. 2173-2184.
- [10]. Zhao ChunMei, Zhang HuaYi, Wang Hua. Calculation and analysis of SISA, an index of completeness of satellite navigation system[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2007(05):340-342+345.(赵春梅,张化疑,王华.卫星导航系统完备性指标 SISA 的计算和分析[J].测绘科学技术学报,2007(05):340-342+345.)
- [11]. Guo Ying, Zhao ChunMei, Dang YaMin, et al. SISA completeness monitoring and WUL reliability algorithm[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2007(05):353-356. (郭英,赵春梅,党亚民,等.SISA 完备性监测与 WUL 可靠性算法[J].测绘科学技术学报,2007(05):353-356.)
- [12]. Mach, J., Deuster, I., Wolf, R., Werner, W., "Making GNSS Integrity Simple and Efficient - A New Concept Based on Signal-in-Space Error Bounds," Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006), Fort Worth, TX, September 2006, pp. 2666-2677.
- [13]. Yang SaiNan, Chen JinPing, Cao YueLing, et al. Algorithm design and experimental analysis of spatial signal accuracy[J]. Progress in Astronomy, 2015, 33(02):250-258. (杨赛男,陈俊平,曹月玲,等.空间信号精度的算法设计与实验分析[J].天文学进展,2015,33(02):250-258.)
- [14]. Chen JinPing, Cao YueLing, Guo Rui, et al. Calculation method and performance verification of SISA of BeiDou test satellite spatial signal accuracy parameter[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(S0):1-8. (陈金平,曹月玲,郭睿,等.北斗试验卫星空间信号精度参数 SISA 计算方法及性能验证[J].测绘学报, 2018, 47(S0): 1-8. DOI:10.11947/j.AGCS.2018.20180316.)
- [15]. Yang Jian, Cao YueLing. Algorithm and performance evaluation of SISA parameter user utilization for BeiDou-3 system[J]. Progress in Astronomy, 2022, 40(01):130-141. (杨戡,曹月玲.北斗三号系统 SISA 参数用户使用算法及性能评估[J].天文学进展,2022,40(01):130-141.)
- [16]. Tian QiuNing. Research and application of key technology for monitoring the integrity of BeiDou-3 system[D]. Shanghai:Shanghai Astronomical Observatory,Chinese Academy of Sciences, 2022. (田秋凝.北斗三号系统完好性监测关键技术研究与应用 [D].中国科学院上海天文台, 2022.)
- [17]. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>
- [18]. China Satellite Navigation System Administration Office. BeiDou Satellite Navigation System Space Signal Interface Control Document Public Service Signal B1C (Version 1.0) (BDS-SIS-ICD-B1C-1.0). (中国卫星导航系统管理办公室.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) (BDS-SIS-ICD-B1C-1.0).)
- [19]. GPS Standard Positioning Service (SPS). Performance Standard. <https://www.gps.gov/technical/ps/>.
- [20]. Liang H, Gao G X, Walter T, et al. Statistical Characterization of GPS Signal-In-Space Errors[J]. Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2011, 8034(6):312-319.
- [21]. International Civil Aviation Organization. ICAO Convention Annex 10, Volume 1, Abridged GNSS Standards and Recommended Practices for Wireless Aids to Navigation and Guidance Material. Beijing: China Academy of Aerospace Standardization and Product Assurance, 2012. (国际民航组织.国际民航组织公约附件 10 卷 1 无线助航设备节选 GNSS 标准和建议措施及指导材料.北京:中国航天标准化与产品保证研究院, 2012.)
- [22]. Jiang N,Cao Y,Xia F, et al.Broadcast ephemeris SISRE assessment and systematic error characteristic analysis for BDS and GPS satellite systems[J].Advances in Space Research,2024,73(10):5284-5298.
- [23]. Zhang Rou, Hu ZhiGang, Tao Jun, et al. An accuracy assessment method of BeiDou space signal taking into account different antenna phase center correction models[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(06):806-813. (张柔,胡志刚,陶钧,等.顾及不同天线相位中心改正模型的北斗空间信号精度评估方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(06):806-813.DOI:10.13203/j.whugis20180388.)
- [24]. Chen Lei, Pei Ling, Gao WeiGuang, et al. Autonomous integrity monitoring technology for BeiDou-3 system satellites[J]. Navigation, Positioning and Timing, 2024, 11(01):1-9. (陈雷,裴凌,高为广,等.北斗三号系统卫星自主完好性监测技术[J].导航定位与授时,2024,11(01):1-9. DOI: 10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.01.001.)

#### 网络首发:

标题: BDS-3 系统完好性 SISA 参数等级转换算法优化

作者: 姜娜娜, 张守建, 曹月玲, 李星星, 夏风雨, 孟轶男, 陈雷

收稿日期: 2024-12-22

DOI:10.13203/j.whugis20240331

#### 引用格式:

姜娜娜, 张守建, 曹月玲, 等. BDS-3 系统完好性 SISA 参数等级转换算法优化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240331 (JIANG Nana, ZHANG Shoujian, CAO Yueling, et al. Optimization of SISA parameter level conversion algorithm for BDS-3 system integrity[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, DOI:10.13203/J.whugis20240331)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

#### 您感兴趣的其他相关论文:

不同分析中心 BDS-3 姿态四元数产品比较及其在 PPP 中的应用

田福娟, 聂琳娟, 周晓慧

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1891-1899.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230366>

基于 BDS-3 的陆地探测一号星间基线高精度解算方法

张宇, 赵齐乐, 蒋科材, 郭向, 李敏

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1763-1769.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20240198>

高精度电离层产品增强 PPP-B2b 定位性能分析

宋伟伟, 宋啟晟, 何倩倩, 龚晓鹏, 辜声峰

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1517-1526.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230030>