引文格式: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),2026,51(6):1118-1129.DOI:10.13203/j.whugis20240331

Citation:JIANG Na'na,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,2026,51(6):1118-1129.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[1] 张守建[1] 曹月玲[2] 李星星[1] 夏凤雨[2] 孟轶男[3] 陈 雷[3]

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空间信号精度(signal in space accuracy,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,评估了北斗三号全球导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system-3,BDS-3)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$SISA_{oc}$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 d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$SISA_{ocb}$取值优化和$SISA_{oc1}$算法优化两部分。在$SISA_{ocb}$取值优化中,取历史所有卫星轨道径向误差与钟差误差均方根值之和的最大数作为$SISA_{ocb}$的最小限值。在$SISA_{oc1}$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$SISA_{oc1}$相比,确定$SISA_{oc1}$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,验证了所提算法的优势,实现了$SISA_{oc}$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;$SISA_{oc}$参数;完好性;SISA参数;漏包络

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-22

DOI:10.13203/j.whugis20240331 **文章编号**:1671-8860(2026)06-1118-12

Optimization of SISA Parameter Level Conversion Algorithm for BDS-3 System Integrity

JIANG Na'na[1] *ZHANG Shoujian*[1] *CAO Yueling*[2] *LI Xingxing*[1] *XIA Fengyu*[2] *MENG Yi'nan*[3] *CHEN Lei*[3]

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 BeiDou navigation satellite system-3 (BDS-3) signal in space accuracy (SISA) integrity parameter to the comprehensive ranging errors induced by the orbit radial and clock errors, an improved SISA parameter index conversion algorithm based on 395 d of historical data is proposed. **Methods**: The algorithm consists of two parts: $SISA_{ocb}$ (SISA parameter associated with orbit radial and clock accuracy) and $SISA_{oc1}$ (SISA parameter associated with satellite clock speed accuracy) algorithm optimization. In $SISA_{ocb}$ value optimization, the root mean square maximum of orbit radial and clock comprehensive error of all satellites in history is taken as the minimum limit of $SISA_{ocb}$. In the optimization of $SISA_{oc1}$ algorithm, the maximum of first-order coefficient extracted through clock error fitting is compared with $SISA_{oc1}$ calculated by free value formula of independent variable to deter-

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

通信作者:张守建,博士,教授。shjzhang@sgg.whu.edu.cn

mine the constant N in the $SISA_{oc1}$ parameters 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 $SISA_{oc}$ parameters for satellite radial and clock errors (excluding significant anomalies in broadcast ephemeris for satellite abroad), and reduce 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 $SISA_{oc}$ parameters can provide a valuable reference for the upgrading and construction of BDS-3 system integrity service.

Key words: BDS-3; $SISA_{oc}$ parameters; integrity; SISA parameters; leakage envelope

全球导航卫星系统(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[1-2]，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[3-4]。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全球定位系统(global positioning system，GPS)、Galileo和北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system，BDS)等GNSS系统建设者的重要工作之一[5-8]。

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系统通过播发导航电文中的完好性参数，如用户测距精度(user range accuracy，URA)或空间信号精度(signal in space accuracy，SISA)，来预测空间信号精度。不同GNSS导航系统电文的完好性参数如表1所示。美国GPS的传统导航电文(legacy navigation message，LNAV)、中国BDS-2/3 D1/D2电文以及欧洲Galileo的完好性导航电文(integrity navigation message，INAV)和自由飞行导航电文(free navigation message，FNAV)，均播发一个表征广播星历空间信号精度的单参数，如URA或SISA。而GPS系统民用导航电文(civil navigation message，CNAV)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(clock，Clk)特性分解为4个参数，分别为轨道平面误差预测精度指数、星历径向(radial，R)与钟偏精度指数、卫星钟速精度指数、卫星钟漂精度指数。GPS使用$URAI_{ED}$、$URAI_{NED0}$、$URAI_{NED1}$和$URAI_{NED2}$变量表征这4类指数[9]，而BDS-3使用$SISAI_{oe}$、$SISAI_{ocb}$、$SISAI_{oc1}$和$SISAI_{oc2}$变量表征[10]。基于以上4类精度指数，可计算卫星轨道与Clk预测精度URA或SISA(URA/SISA)。上述GPS和BDS-3的完好性参数下标ED(elevation-dependent)和oe(orbital plane error)含义相同，均表示沿轨道平面空间测距误差，而NED(non-elevation-dependent)和oc(orbit radial and clock)表示沿R空间测距误差，其下标0或ocb(orbit radial and clock bias)、1和2表示卫星轨道R误差与Clk a0、卫星钟漂a1及卫星钟漂a2引起的R空间测距误差。

表1　各卫星导航系统广播星历精度参数

Table 1　Broadcast Ephemeris Accuracy Parameters for 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
	CNAV	URA	$URAI_{ED}$	轨道平面预测精度指数
			$URAI_{NED0}$	星历R与钟偏精度指数
			$URAI_{NED1}$	卫星钟速精度指数
			$URAI_{NED2}$	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	$SISAI_{oe}$	轨道平面预测精度指数
			$SISAI_{ocb}$	星历R与钟偏精度指数
			$SISAI_{oc1}$	卫星钟速精度指数
			$SISAI_{oc2}$	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等[11]初步定义了Galileo的预处理SISA算法。赵春梅等[12]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[13]优化了SISA完好性算法所需的最差用户位置(worst user location,WUL)的计算算法。MACH等[14]提出了Galileo完好性概念的修正版,其特点是传播瞬时的SISE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[15]设计了一种SISA计算方法,计算的SISA参数能够准确反映广播星历SISA,对大部分卫星可实现对SISE 98%的包络。陈金平等[16]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$SISA_{oe}$、$SISA_{oc}$参数对SISE的包络能力分别约为99.7%、98.6%。针对BDS-3系统尚未在其接口控制文件(interface control document,ICD)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,杨戬等[17]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[17-18],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 d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。

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($SISAI_{oe}$、$SISAI_{ocb}$、$SISAI_{oc1}$、$SISAI_{oc2}$)表示完好性参数($SISA_{oe}$、$SISA_{ocb}$、$SISA_{oc1}$、$SISA_{oc2}$)。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[9]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[10]尚未给出各参数的等级对应关系表及其用户算法。考虑到杨戬等[17]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实验分析。

杨戬等[17]提供的索引关系表如表2所示。$SISAI_{oe}$或$SISAI_{ocb}$索引参数的取值范围均为−16~15,且两者相同的索引值对应着一致的等级数值范围。$SISA_{oe}$或$SISA_{ocb}$取索引关系表中相应等级范围内的上限值。

表2 $SISAI_{oe}$或$SISAI_{ocb}$索引关系表

Table 2 Index Relationship Table for $SISAI_{oe}$ or $SISAI_{ocb}$

$SISAI_{oe}$或$SISAI_{ocb}$索引参数	$SISA_{oe}$或$SISA_{ocb}$索引值/m	$SISAI_{oe}$或$SISAI_{ocb}$索引参数	$SISA_{oe}$或$SISA_{ocb}$索引值/m
15	>6 144.00	−1	(1.20,1.70]
14	(3 072.00,6 144.00]	−2	(0.85,1.20]
13	(1 536.00,3 072.00]	−3	(0.60,0.85]
12	(768.00,1 536.00]	−4	(0.43,0.60]
11	(384.00,768.00]	−5	(0.30,0.43]
10	(192.00,384.00]	−6	(0.21,0.30]
9	(96.00,192.00]	−7	(0.15,0.21]
8	(48.00,96.00]	−8	(0.11,0.15]
7	(24.00,48.00]	−9	(0.08,0.11]
6	(13.65,24.00]	−10	(0.06,0.08]
5	(9.65,13.65]	−11	(0.04,0.06]
4	(6.85,9.65]	−12	(0.03,0.04]
3	(4.85,6.85]	−13	(0.02,0.03]
2	(3.40,4.85]	−14	(0.01,0.02]
1	(2.40,3.40]	−15	≤0.01
0	(1.70,2.40]	−16	没有精度预测,使用有风险

$SISAI_{oc1}$和$SISAI_{oc2}$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[17]获得$SISA_{oc1}$和$SISA_{oc2}$。其中,计算$SISA_{oc1}$的公式和GPS系统相关算法[9]一致:

$$\begin{cases} SISA_{oc1}=2^{-(SISAI_{oc1}+14)}, SISAI_{oc1}\in[0,7] \\ SISA_{oc2}=2^{-(SISAI_{oc2}+28)}, SISAI_{oc2}\in[0,7] \end{cases} \tag{1}$$

式中，$SISAI_{oc1}$ 和 $SISAI_{oc2}$ 取值均为整数。

综合 $SISA_{ocb}$、$SISA_{oc1}$、$SISA_{oc2}$ 参数可计算 $SISA_{oc}$：

$$SISA_{oc}=\begin{cases}SISA_{ocb}+SISA_{oc1}\cdot(t-t_{op}),\\ \qquad t-t_{op}\leqslant 93\,600\\ SISA_{ocb}+SISA_{oc1}\cdot(t-t_{op})+\\ SISA_{oc2}\cdot(t-t_{op}-93\,600)^2,\\ \qquad t-t_{op}>93\,600\end{cases}\tag{2}$$

式中，t 为系统时间(s)；t_{op} 为电文参考时间(s)。

基于 $SISA_{oe}$ 和 $SISA_{oc}$ 参数可计算反映广播星历空间信号精度的综合 SISA 参数[15,19]：

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

式中，MEO 为中圆地球轨道(medium Earth orbit)；IGSO 为倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit)。使用上述算法计算 $SISA_{oe}$、$SISA_{oc}$、综合 SISA 参数后，评估 $SISA_{oe}$ 参数对轨道切平面误差的包络能力 P_{oe}、$SISA_{oc}$ 参数对轨道 R 与钟差综合误差的包络能力 P_{oc}、综合 SISA 参数对 WUL 方向投影误差的包络能力 P_{SISA}[19] 为：

$$\begin{cases}P_{oe}=\dfrac{M(\sqrt{\Delta T^2+\Delta N^2}<k\cdot SISA_{oe})}{M_a}\\ P_{oc}=\dfrac{M(|\Delta R-\Delta C|<k\cdot SISA_{oc})}{M_a}\\ P_{SISA}=\dfrac{M(SISE_{WUL}<k\cdot SISA)}{M_a}\end{cases}\tag{4}$$

式中，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；ΔR、ΔT、ΔN 分别为广播星历计算轨道与精密轨道 R、切向(tangential，T)和法向(normal，N)的误差；ΔC 为广播钟差与精密钟差之差的二次差；$SISE_{WUL}$ 为 WUL 方向的投影误差[20]；$M(\cdot)$ 表示满足条件的评估点个数；M_a 为全部评估点个数。

目前，GPS 系统标准定位服务性能标准文件[19]明确要求卫星广播星历的 SISE 在 WUL 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 1×10^{-5}，即 4.42 倍 URA 门限，可以 99.999% 的概率包络卫星广播星历 SISE 在 WUL 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《国际民用航空公约》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国际卫星导航服务组织数据中心(ftp://igs.gnsswhu.cn)下载的 BDS-3 RINEX 4.0 格式 CNAV1/CNAV2 广播星历和德国地学研究中心发布的精密星历，时间为 2022-09-01—2023-09-30(共 395 d)，系统评估 BDS-3 系统电文完好性 SISA 参数对广播星历 SISE 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～C30、C32～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 min，共计 113 760 个样本点。

由表 3 可知，27 颗卫星的 $SISA_{oe}$ 参数的 P_{oe} 均为 100%。对于 $SISA_{oc}$ 参数对轨道 R 与 Clk 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 R 与 Clk 综合误差。对于综合 SISA 参数对 WUL 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 WUL 方向的投影误差。

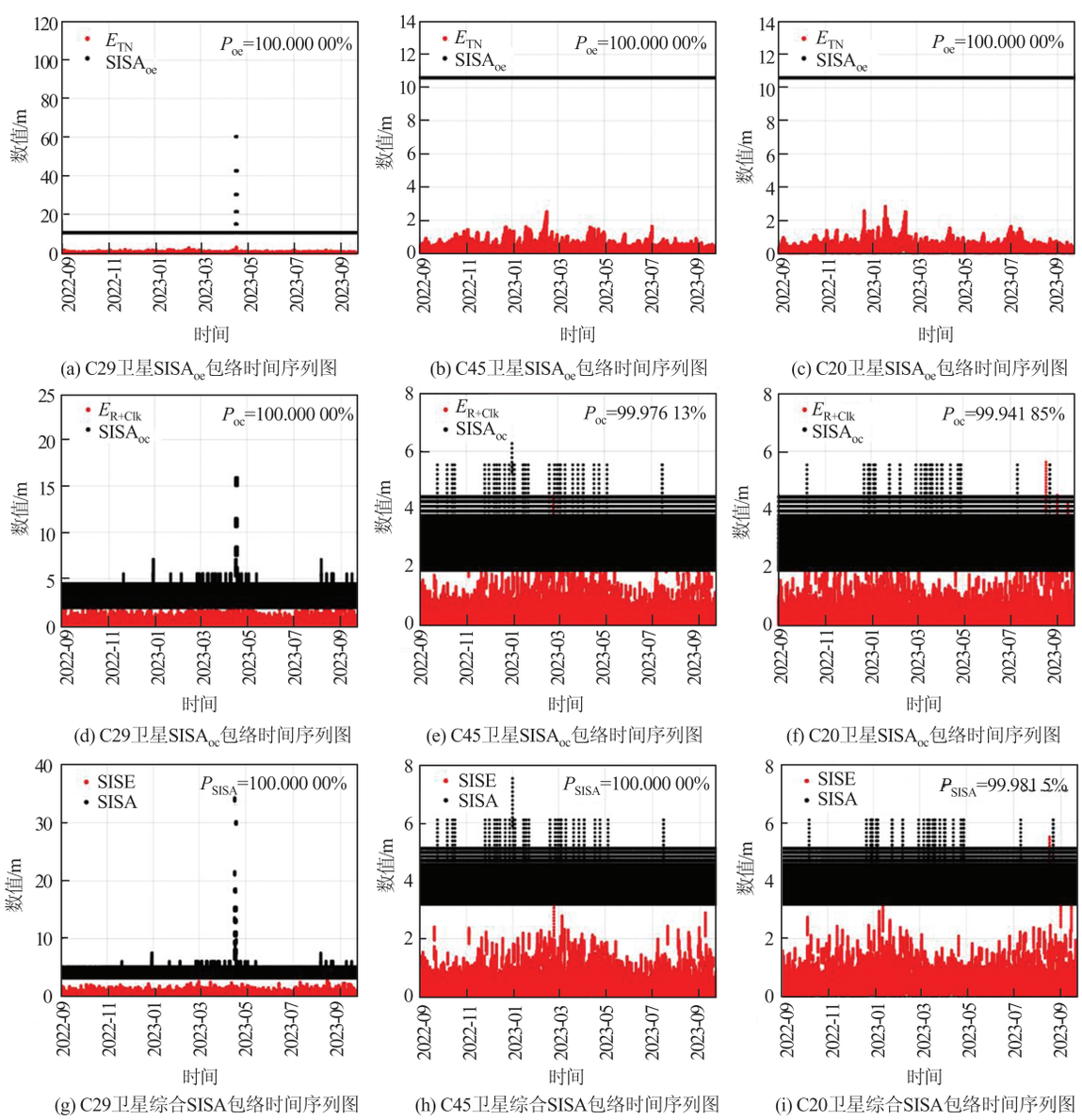
为详细分析完好性参数性能，以 C29、C45、C20 卫星为例，图 1 给出了各卫星 $SISA_{oe}$、$SISA_{oc}$ 和综合 SISA 参数的包络时间序列图。从上至下 3 排子图中，红色点依次表示广播星历轨道 T 和 N 确定的平面误差(E_{TN})、广播星历轨道 R 误差和 Clk 之和(E_{R+Clk})、广播星历在 WUL 方向投影的 SISE；黑线表示相应的告警门限(4.42 倍 $SISA_{oe}$、4.42 倍 $SISA_{oc}$ 和 4.42 倍 SISA)。C29 卫星的 P_{oe}、P_{oc} 和 P_{SISA} 均为 100%，C45 卫星仅 P_{oe} 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，综合 SISA 参数漏包络主要由于轨道 R 与 Clk 综合误差超过 $SISA_{oc}$ 参数门限导致。

为具体分析 $SISA_{oc}$ 参数漏包络的原因，图 2 和图 3 分别给出了 C45、C20 卫星具体的未能有效包络误差的时段。C45 卫星 2023-02-25 15 时至 17 时和 C20 卫星 2023-08-22 14 时至 16 时 Clk 预报误差较大，而 $SISA_{oc}$ 参数门限计算值偏小，导致 E_{R+Clk} 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 h。因此，根据式(2)中 $SISA_{oc}$ 的计算方法可得出，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 Clk 发生米级跳变时，$SISA_{oc}$ 参数对 E_{R+Clk} 的包络能力小于 99.999%，进而

表3 CNAV1电文SISA参数误差包络能力（2022-09-01—2023-09-30）/%

Table 3 Error Envelopment Capability of SISA Parameters for CNAV1 Broadcast Messages（2022-09-01—2023-09-30）/%

卫星	P_{oe}	P_{oc}	P_{SISA}	卫星	P_{oe}	P_{oc}	P_{SISA}
C19	100.000 00	99.964 66	100.000 00	C34	100.000 00	99.952 46	99.968 31
C20	100.000 00	99.941 85	99.981 50	C35	100.000 00	99.930 88	99.963 98
C21	100.000 00	99.986 77	99.997 35	C36	100.000 00	99.955 68	99.965 43
C22	100.000 00	99.939 21	99.989 43	C37	100.000 00	99.964 65	99.989 39
C23	100.000 00	99.968 22	99.989 41	C38	100.000 00	99.978 74	100.000 00
C24	100.000 00	99.984 71	99.974 82	C39	100.000 00	99.960 11	100.000 00
C25	100.000 00	99.985 02	99.992 95	C40	100.000 00	99.989 37	100.000 00
C26	100.000 00	99.996 48	100.000 00	C41	100.000 00	99.948 88	99.978 85
C27	100.000 00	99.960 41	99.997 36	C42	100.000 00	99.963 85	99.996 47
C28	100.000 00	99.949 85	99.978 88	C43	100.000 00	99.959 45	99.989 42
C29	100.000 00	100.000 00	100.000 00	C44	100.000 00	99.969 13	99.994 71
C30	100.000 00	99.948 92	99.968 30	C45	100.000 00	99.976 13	100.000 00
C32	100.000 00	99.926 11	99.969 21	C46	100.000 00	99.936 23	99.982 29
C33	100.000 00	99.902 99	99.979 72				



(a) C29卫星$SISA_{oe}$包络时间序列图 (b) C45卫星$SISA_{oe}$包络时间序列图 (c) C20卫星$SISA_{oe}$包络时间序列图

(d) C29卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图 (e) C45卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图 (f) C20卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图

(g) C29卫星综合SISA包络时间序列图 (h) C45卫星综合SISA包络时间序列图 (i) C20卫星综合SISA包络时间序列图

图1 C29、C45、C20卫星$SISA_{oe}$、$SISA_{oc}$、综合SISA参数对误差的包络时间序列图

Fig. 1 Sequences of Envelopment of $SISA_{oe}$, $SISA_{oc}$ and Comprehensive SISA Parameters for Satellites C29, C45 and C20

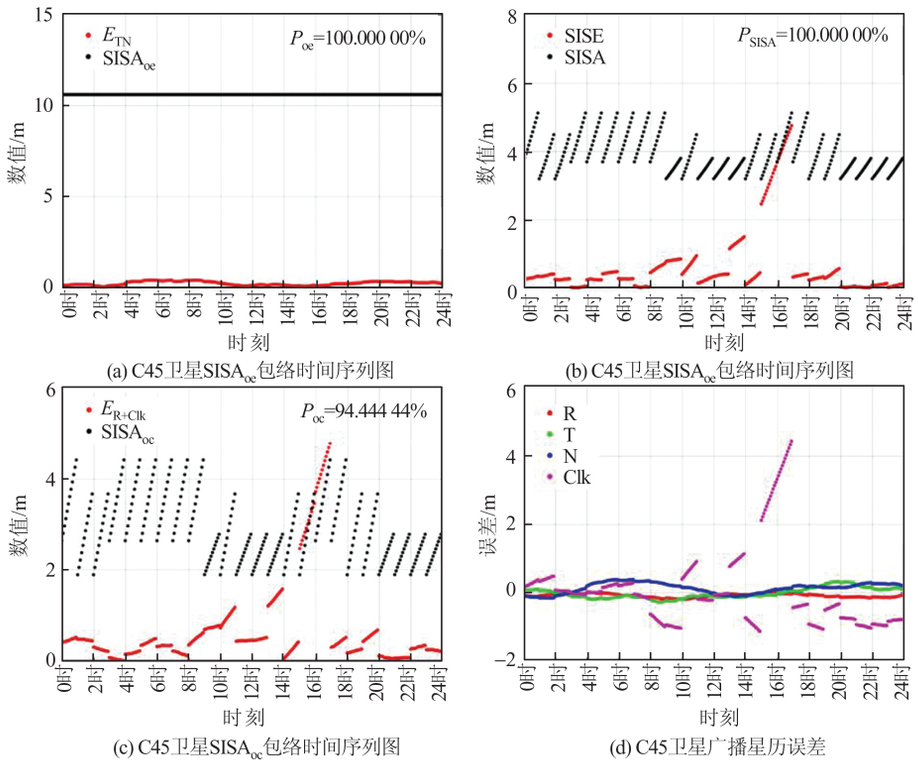


图 2　C45 卫星 2023-02-25 $SISA_{oe}$、$SISA_{oc}$、综合 SISA 参数的包络时间序列图及广播星历误差结果

Fig. 2　Sequences of Envelopment of $SISA_{oe}$, $SISA_{oc}$ and Comprehensive SISA Parameters of Broadcast Ephemeris Errors for C45 Satellite on 2023-02-25

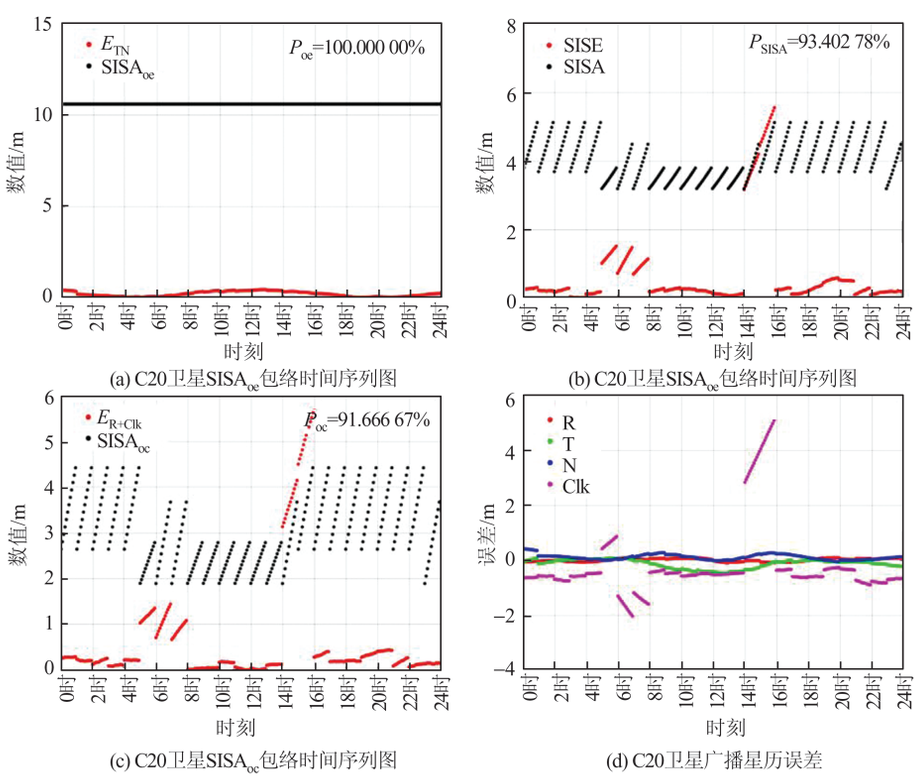


图 3　C20 卫星 2023-08-22 $SISA_{oe}$、$SISA_{oc}$、综合 SISA 参数的包络时间序列图及广播星历误差结果

Fig. 3　Sequences of Envelopment of $SISA_{oe}$, $SISA_{oc}$ and Comprehensive SISA Parameters of Broadcast Ephemeris Errors for C20 Satellite on 2023-08-22

使得 C20 卫星综合 SISA 参数对 WUL 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，C45 卫星 Clk 误差的跳变相对较小，其综合 SISA 参数对 WUL 方向投

影误差的包络能力为100%。

实验期间,其他卫星发生SISA参数漏包络的情况与C45、C20卫星类似,Clk偶发米级跳变,但$SISA_{oc}$参数门限计算值偏小,导致$SISA_{oc}$参数漏包轨道E_{R+Clk},进而可能导致综合SISA参数漏包络WUL方向投影的误差。因此,文献[17]给出的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,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Clk基准差异等改正后[22-23],先根据精密星历计算广播星历轨道误差与Clk误差,再统计各卫星处理后的轨道误差和Clk误差均方根(root mean square,RMS)值,最后选取全部卫星中轨道E_{R+Clk} RMS值之和最大数作为$SISA_{ocb}$的最小限值。

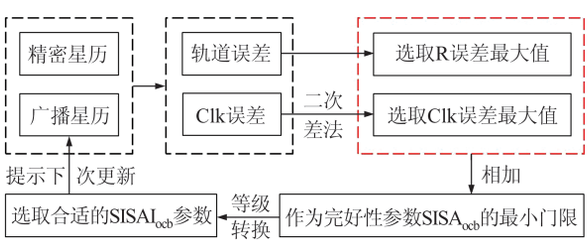


图4 完好性$SISA_{ocb}$参数的优化方案

Fig. 4 Optimization Scheme for Integrity $SISA_{ocb}$ Parameter

3.2 基于优化方案的$SISA_{ocb}$播发值

根据计算的395 d BDS-3系统广播星历误差,分别统计各卫星的轨道E_{R+Clk},如图5所示。根据本文$SISA_{ocb}$参数的优化方案,选取所有卫星中轨道E_{R+Clk} 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 m。按照表2对应关系,该最小限值介于0.85~1.20 m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1.2 m。而当前实验期间,BDS-3广播星历中播发的$SISAI_{ocb}$索引值为−4或−5的概率接近99%。

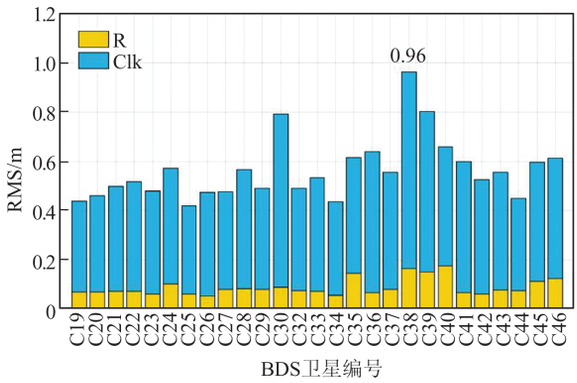


图5 BDS-3卫星广播星历BDS R和Clk误差RMS

Fig. 5 RMS of Orbit Radial and Clock Errors for BDS-3 Satellite Broadcast Ephemeris

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:

$$SISA_{oc1}=2^{-(SISAI_{oc1}+N)} \tag{5}$$

式中,$SISAI_{oc1}\in[0,7]$;$N\in[1,14]$,为正整数。

本节将通过对比式(5)计算的$SISA_{oc1}$和拟合的卫星Clk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 h,故对§3.1中处理后的Clk误差进行拟合时,按单颗卫星1 h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。

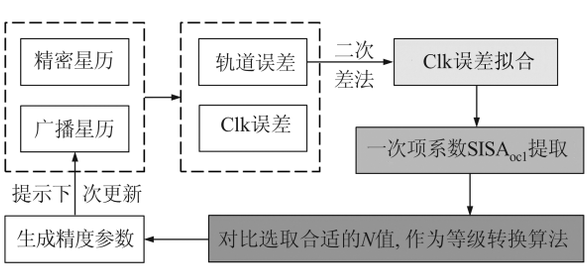


图6 完好性$SISA_{oc1}$参数的优化方案

Fig. 6 Optimization Scheme for Integrity $SISA_{oc1}$ Parameter

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值的计算公式为：

$$N=\mathrm{int}(-\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}-\log_2\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}) \quad (6)$$

式中，$\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}\in[0,7]$，取值为整数。

3.4　基于优化方案确定 $\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}$ 等级转换算法

根据计算的 395 d BDS-3 系统广播星历误差，对经过二次差法处理后的 Clk 误差进行拟合，提取各卫星 Clk 拟合的一次项系数，因一次项系数量级过小，故展示其在 3 600 s 内的量级，如图 7 所示。BDS-3 卫星 Clk 拟合结果中，Clk 一次项系数最大值在 3 600 s 内的量级最大值为 2.771 m，最小值为 0.761 m。

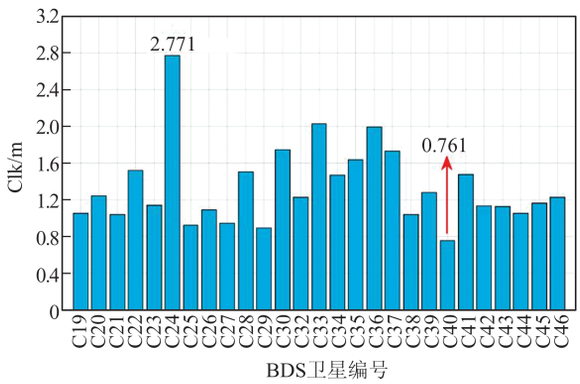


图 7　BDS-3 卫星 Clk 拟合的一次项系数最值在 3 600 s 内的量级

Fig. 7　The Magnitude of the Maximum First-Order Coefficient for BDS-3 Satellite Clock Fitting Within 3 600 s

为了选取适合的 N，需计算式(5)中依赖 N 和 $\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}$ 变化的 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 值。因式(5)计算的 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 值量级过小，故展示其在 3 600 s 内的量级，如表 4 所示。对比图 7，顾及 N 值选取原则以及 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 参数取值足以反映实际 Clk 变化趋势，可知符合要求的 N 值为 6～10。考虑到富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 $N=14$），$\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 参数在 3 600 s 内的最大量级为 0.219 7 m，远小于 Clk 实际变化量的最小值 0.761 m，不足以反映实际 Clk 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 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 参数生成算法并不可取。

表 4　式(5)生成的 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 参数在 3 600 s 内的变化量级统计

Table 4　Variation Statistics of $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ Parameter Calculated by Formula (5) Within 3 600 s

N	量级							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1 800.000	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 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 采用 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}$ 与 $\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}$ 的等级转换：

$$\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc1}}=2^{-(\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}+10)} \quad (7)$$

式中，$\mathrm{SISAI}_{\mathrm{oc1}}\in[0,7]$，且为整数。

4　SISA 参数优化算法的验证与分析

利用 2023-10-01—2024-05-31（8 个月）的广播星历和精密星历数据，评估 BDS-3 MEO/IGSO C19～C30、C32～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_{oc} 和 P_{SISA}，如表 5 所示。本文未优化 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oe}}$ 参数，故不展示其误差包络情况。

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 $\mathrm{SISA}_{\mathrm{oc}}$ 参数对轨道 $E_{\mathrm{R+Clk}}$ 的包络能力小于 99.999%，有 4 颗卫星综合 SISA 参数对 WUL 方向投影误差的包络能力小

表5 CNAV1电文SISA参数误差包络能力(2023-10-01—2024-05-31)/%

Table 5 Error Envelopment Capability of SISA Parameters for CNAV1 Broadcast Messages(2023-10-01—2024-05-31)/%

卫星	SISA算法		本文算法	
	P_{oc}	P_{SISA}	P_{oc}	P_{SISA}
C19	99.997 13	99.998 56	100.000 00	100.000 00
C20	99.935 33	99.936 77	99.994 25	99.997 13
C21	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C22	99.995 70	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C23	99.997 11	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C24	99.998 56	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C25	99.944 00	99.979 90	100.000 00	100.000 00
C26	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C27	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C28	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C29	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C30	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C32	99.995 70	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C33	99.988 47	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C34	99.997 13	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C35	99.993 46	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C36	99.995 66	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C37	99.978 30	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C38	99.971 15	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C39	99.761 22	99.892 91	99.991 32	99.992 76
C40	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C41	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C42	99.998 56	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C43	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C44	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C45	99.998 56	100.000 00	100.000 00	100.000 00
C46	99.965 52	100.000 00	100.000 00	100.000 00

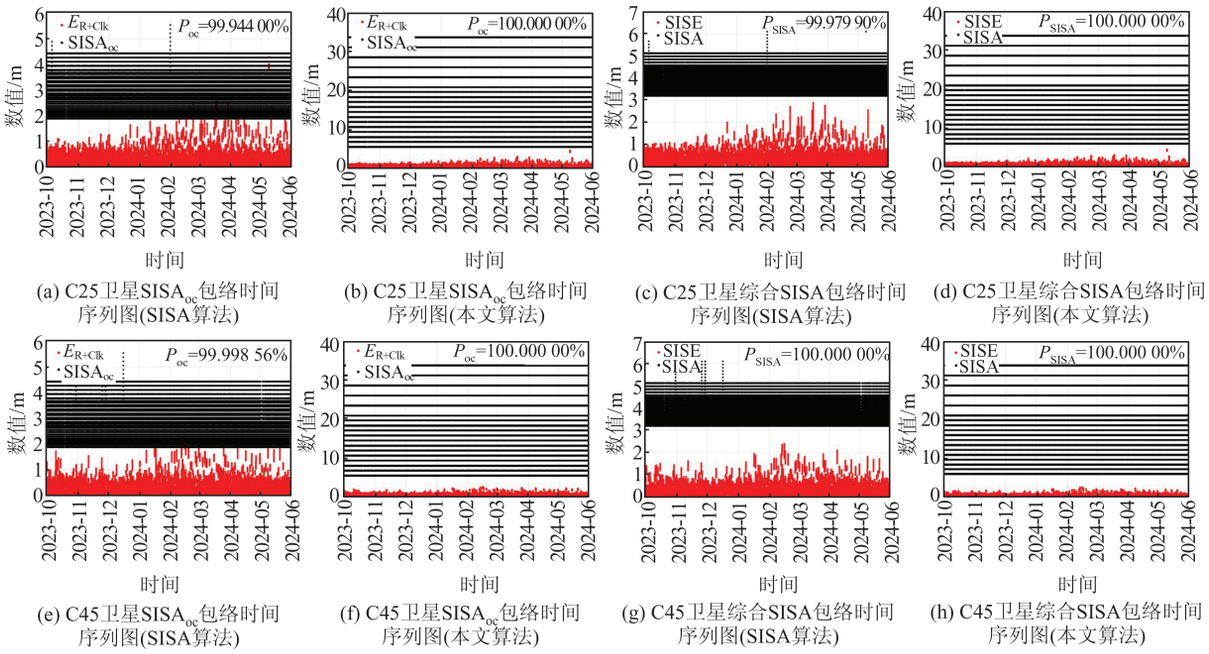
于99.999%(其中,C20、C39卫星部分时段处于境外,导致综合SISA参数漏包络,C39卫星处于境内时,综合SISA参数也存在漏包络)。而使用本文算法评估SISA参数误差包络能力时,$SISA_{oc}$参数和综合SISA参数均只有2颗卫星的误差包络能力小于99.999%(C20和C39卫星部分时段处于境外,导致综合SISA参数漏包络)。本文算法显著提高了SISA参数对误差的包络能力。

为详细说明本文算法的优势,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和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。SISA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,本文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2023-10-28 C20卫星$SISA_{oc}$、综合SISA参数的包络时间序列图。0时至4时期间该卫星处于境外,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,分别从99.935%、99.936%提升至99.994%、99.997%。

5 结 语

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

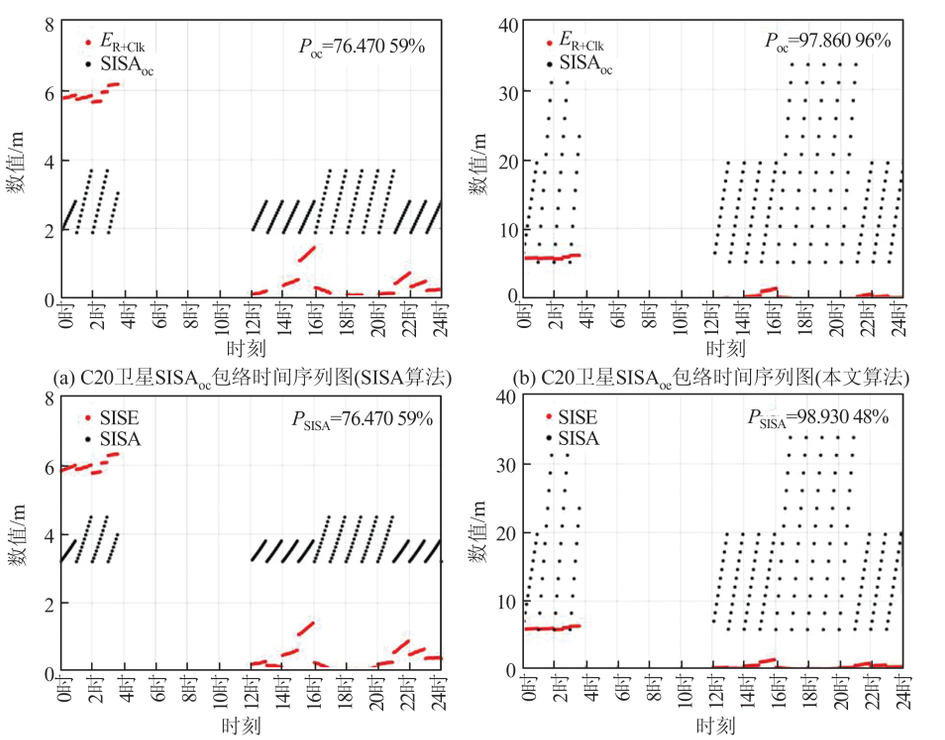


(a) C25卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(SISA算法)　(b) C25卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(本文算法)　(c) C25卫星综合SISA包络时间序列图(SISA算法)　(d) C25卫星综合SISA包络时间序列图(本文算法)

(e) C45卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(SISA算法)　(f) C45卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(本文算法)　(g) C45卫星综合SISA包络时间序列图(SISA算法)　(h) C45卫星综合SISA包络时间序列图(本文算法)

图 8　SISA 算法与本文算法评估的 C25、C45 卫星 $SISA_{oc}$、综合 SISA 参数对误差的包络时间序列图

Fig. 8　Sequences of Envelopment of $SISA_{oc}$ and Comprehensive SISA Parameters for C25 and C45 Satellites, Based on SISA Algorithm and the Proposed Algorithm



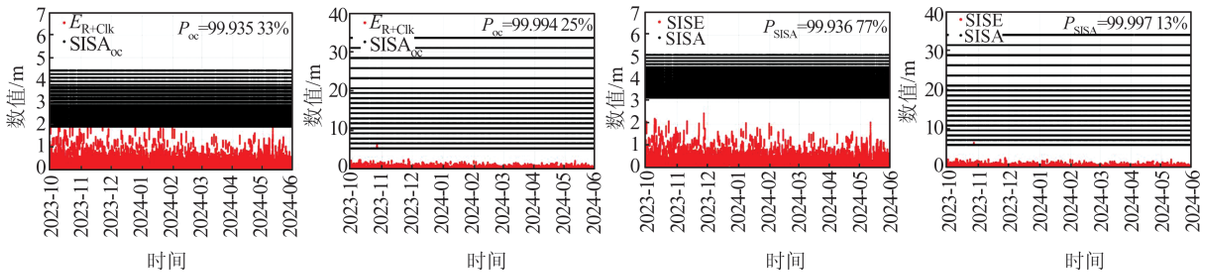
(a) C20卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(SISA算法)　(b) C20卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(本文算法)

(c) C20卫星综合SISA包络时间序列图(SISA算法)　(d) C20卫星综合综合SISA包络时间序列图(本文算法)

图 9　SISA 算法与本文算法评估 C20 卫星 2023-10-28 $SISA_{oc}$和综合 SISA 参数对误差的包络时间序列图

Fig. 9　Sequences of Envelopment of $SISA_{oc}$ and Comprehensive SISA Parameters for C20 Satellite, Based on SISA Algorithm and the Proposed Algorithm

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 $SISA_{oc}$参数包不住的情况,潜在的导致综合 SISA 参数包不住。本文对 $SISA_{oc}$参数的影响因子 $SISA_{ocb}$、$SISA_{oc1}$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,基于本文算法得到的广播星



(a) C20卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(SISA算法)　(b) C20卫星$SISA_{oc}$包络时间序列图(本文算法)　(c) C20卫星综合SISA包络时间序列图(SISA算法)　(d) C20卫星综合SISA包络时间序列图(本文算法)

图10　SISA算法与本文算法评估C20卫星$SISA_{oc}$和综合SISA参数对误差的包络时间序列图

Fig. 10　Sequences of Envelopment of $SISA_{oc}$ and Comprehensive SISA Parameters for C20 Satellite, Based on SISA Algorithm and the Proposed Algorithm

历精度参数$SISA_{oc}$,实现了$SISA_{oc}$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。本文算法和实验结果可为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进行验证优化。

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[24],但相关技术研究有待进一步完善。

参 考 文 献

[1] 牛飞. GNSS完好性增强理论与方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2008.
NIU Fei. Research on the Theory and Method of GNSS Integrity Enhancement[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2008.

[2] 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(1): 72-80.
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(1): 72-80.

[3] 李宗义, 汪亮, 王宁波, 等. CAS实时轨道和钟差产品的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), 2025, 50(9): 1825-1837.
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*, 2025, 50(9): 1825-1837.

[4] 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(1): 111-117.
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(1): 111-117.

[5] KOVACH K, DOBYNE J, CREWS M, et al. GPS III Integrity Concept[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Savannah, USA, 2008.

[6] HERRAIZ M E, GARCIA A M, MERINO M M R, et al. A New System Level Integrity Concept for Galileo: The Signal in Space Accuracy[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, USA 2001.

[7] OEHLER V, LUONGO F, BOYERO J P, et al. The Galileo Integrity Concept [C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Long Beach, USA, 2004.

[8] CHEN J. Analysis of the GNSS Augmentation Technology Architecture[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2011.

[9] Global Positioning Systems Directorate. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces [EB/OL]. (2022-08-22) [2025-05-28]. https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/IS-GPS-200N.pdf.

[10] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件[EB/OL].(2017-12-26) [2025-05-28]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796148/part/6776234.pdf.
BeiDou Satellite Navigation System Space Signal Interface Control Document [EB/OL]. (2017-12-26) [2025-05-28]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796148/part/6776234.pdf.

[11] MEDEL C H, VIRGILI L P, GARCIA A M, et al. SISA Computation Algorithms and Their Appli-

cability for Galileo Integrity[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2002.

[12] 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，2007，24(5)：340-342.
ZHAO Chunmei, ZHANG Huayi, WANG Hua. Calculation and Analysis on Integrity Index SISA of Satellite Navigation System[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2007, 24(5): 340-342.

[13] 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，2007，24(5)：353-356.
GUO Ying, ZHAO Chunmei, DANG Yamin, et al. Integrity Monitoring of SISA and Accuracy Algorithm of WUL[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2007, 24(5): 353-356.

[14] MACH J, DEUSTER I, WOLF R, et al, Making GNSS Integrity Simple and Efficient: A New Concept Based on Signal-in-Space Error Bounds[C]//International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Fort Worth, USA, 2006.

[15] 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(2)：250-258.
YANG Sainan, CHEN Junping, CAO Yueling, et al. Calculation and Analysis of Signal-in-Space Accuracy[J]. *Progress in Astronomy*, 2015, 33(2): 250-258.

[16] 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(S1)：1-8.
CHEN Jinping, CAO Yueling, GUO Rui, et al. The Calculation Method and Performance Evaluation on SISA of New Generation BDS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(S1): 1-8.

[17] 杨戬，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(1)：130-141.
YANG Jian, CAO Yueling. The User's Algorithm and Performance Evaluation on SISA of BDS-3[J]. *Progress in Astronomy*, 2022, 40(1): 130-141.

[18] 田秋凝. 北斗三号系统完好性监测关键技术研究与应用[D]. 北京：中国科学院大学，2022.
TIAN Qiuning. Research and Application of Key Technologies for Integrity Monitoring of BeiDou-3 System[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.

[19] GPS Standard Positioning Service Performance Standard[EB/OL]. (2021-01-22)[2025-05-28]. https://www.gps.gov/technical/ps/.

[20] HENG L, GAO G X, WALTER T, et al. Statistical Characterization of GPS Signal-in-Space Errors[C]//International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, USA, 2011.

[21] 国际民用航空公约[EB/OL]. (1944-12-07)[2025-06-01]. https://www.icao.int/.
Convention on International Civil Navigation[EB/OL]. (1944-12-07)[2025-06-01]. https://www.icao.int/.

[22] JIANG N N, CAO Y L, XIA F Y, 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] 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(6)：806-813.
ZHANG Rou, HU Zhigang, TAO Jun, et al. BDS Signal-in-Space User Range Error Evaluation Considering Different Antenna Phase Center Offset Models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(6): 806-813.

[24] 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(1)：1-9.
CHEN Lei, PEI Ling, GAO Weiguang, et al. Satellite Autonomous Integrity Monitoring Techniques for BDS-3[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2024, 11(1): 1-9.