引文格式:楚彬,姜卫平,李宸雨,等.2026年北斗导航卫星更新维护操作对空间信号测距误差和单点定位影响分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(10):2092-2104.DOI:10.13203/j.whugis20260386

Citation: CHU Bin, JIANG Weiping, LI Chenyu, et al. Impact of BeiDou Navigation Satellite Update and Maintenance Operations in 2026 on Signal-in-Space Ranging Error and Single Point Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(10):2092-2104.DOI:10.13203/j.whugis20260386

2026年北斗导航卫星更新维护操作对空间信号测距误差和单点定位影响分析

楚 彬[1,2] 姜卫平[3] 李宸雨[3] 刘天骏[4] 刘 洋[5] 陈 华[4]

1 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430072
2 湖南省测绘科技研究所,湖南 长沙,410007
3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079
4 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079
5 广州市城市规划勘测设计研究院,广东 广州,510060

摘 要:为提升卫星导航系统服务性能和运行稳定性,导航卫星需要开展在轨的更新维护。然而,卫星在轨升级和维护可能会影响卫星广播轨道和钟差精度,进而影响空间信号质量和用户端定位的可靠性。对2026年4月北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)部分倾斜地球同步轨道卫星和中圆地球轨道卫星更新维护操作进行研究。基于2026年3月—6月的广播星历和全球分布的15个测站观测数据,采用武汉大学国际GNSS服务实时分析中心提供的快速精密轨道和精密钟差产品作为参考,系统分析了BDS更新维护对空间信号测距误差(signal-in-space ranging error,SISRE)、伪距单点定位(single point positioning,SPP)精度和位置精度因子(position dilution of precision,PDOP)的影响。结果表明,在更新维护前,卫星轨道误差和钟差误差整体稳定,轨道径向、切向、法向3个方向误差与钟差误差均方根(root mean square,RMS)分别为0.175 m、0.261 m、0.204 m与0.828 m;在更新维护时间段内,参与维护卫星广播星历钟差和轨道径向出现明显跳变,仅轨道SISRE升至1 m以上,综合SISRE受钟差异常影响出现数十米量级突增,其中C38和C44卫星峰值分别约为58 m和64 m。维护结束后,卫星的SISRE恢复至维护前的数值,约为0.75 m。此外,全球可见卫星数量和PDOP变化统计分析表明,由于部分BDS-2卫星退役,更新维护后全球平均可见BDS卫星数由11.61颗减少至9.64颗,平均减少约1.97颗;全球平均PDOP由1.92增大至2.13,平均增加约0.21。基于全球15个测站的SPP数据评估发现,BDS-3系统更新维护期间,定位性能出现阶段性下降,定位精度RMS由1.5 m变化到2.2 m,维护完成后,SPP定位精度恢复至正常水平。进一步深入分析2026年4月BDS-3卫星更新维护对SISRE及用户定位性能的影响,研究结果可为BDS-3系统运行状态分析、性能监测及其导航定位应用提供参考。

关键词:北斗卫星导航系统;更新维护;广播星历;SISRE;伪距单点定位;PDOP

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-28

DOI:10.13203/j.whugis20260386 **文章编号**:1671-8860(2026)10-2092-13

Impact of BeiDou Navigation Satellite Update and Maintenance Operations in 2026 on Signal-in-Space Ranging Error and Single Point Positioning

CHU Bin[1,2] *JIANG Weiping*[3] *LI Chenyu*[3] *LIU Tianjun*[4] *LIU Yang*[5] *CHEN Hua*[4]

1 Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2 Hunan Insititute of Geomatics Sciences and Technology, Changsha 410007, China
3 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China
4 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
5 Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China

Abstract: **Objectives**: To improve service performance and operational stability, satellite navigation sys-

基金项目:湖南省自然科学基金(2024JJ8367);国家自然科学基金面上项目(42574030);国家自然科学基金青年项目(42404031);江苏省自然资源厅北斗导航定位重点实验室开放研究基金(KLBDS-K202501)。

第一作者:楚彬,博士生,主要从事高精度卫星导航与位置服务研究。chubin@whu.edu.cn

通信作者:姜卫平,博士,教授,中国工程院院士。wpjiang@whu.edu.cn

tems require in-orbit update and maintenance operations. However, such operations may affect the accuracy of broadcast orbits and clock offsets, thereby influencing signal-in-space quality and the reliability of user positioning. This study investigates the update and maintenance operations conducted in April 2026 for selected inclined geosynchronous orbit and medium earth orbit satellites of the BeiDou satellite navigation system (BDS). **Methods**: Based on broadcast ephemerides from March to June 2026 and observations from 15 globally distributed stations, and using rapid precise orbit and clock products provided by the international GNSS service real-time analysis center at Wuhan University as references, we systematically evaluate the effects of BDS update and maintenance operations on signal-in-space ranging error (SISRE), pseudorange single point positioning (SPP) accuracy, and position dilution of precision (PDOP). **Results**: The results show that before the update and maintenance operations, satellite orbit and clock errors remained generally stable, with root mean square (RMS) of 0.175 m, 0.261 m, and 0.204 m in the radial, along-track, and cross-track directions, respectively, and 0.828 m for clock errors. During the maintenance period, the maintained satellites exhibited pronounced jumps in broadcast clock offsets and radial orbit errors. The orbit-only SISRE increased to more than 1 m, while the combined SISRE showed sharp increases of several tens of metres due to clock anomalies, with peak values of approximately 58 m and 64 m for satellites C38 and C44, respectively. After the maintenance operations, the SISRE recovered to its pre-maintenance level, approximately 0.75 m. In addition, statistical analyses of the global number of visible satellites and PDOP indicate that, owing to the retirement of several BDS-2 satellites, the global mean number of visible BDS satellites decreased from 11.61 to 9.64 after the update and maintenance operations, with an average reduction of approximately 1.97 satellites. The global mean PDOP increased from 1.92 to 2.13, corresponding to an average increase of approximately 0.21. Evaluation of SPP results from 15 globally distributed stations further shows that BDS-3 positioning performance experienced a temporary degradation during the update and maintenance period, with the RMS positioning accuracy decreasing from 1.5 m to 2.2 m. After the maintenance operations were completed, SPP accuracy recovered to its normal level. **Conclusions**: This study provides a detailed assessment of the effects of the April 2026 BDS-3 satellite update and maintenance operations on SISRE and user positioning performance, and offers a reference for BDS-3 operational status analysis, performance monitoring, and navigation applications.

Key words: BeiDou satellite navigation system; update and maintenance; broadcast ephemeris; SISRE; single point positioning; PDOP

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统[1],可为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务,是国家重要的空间基础设施[2-3],按照“三步走”发展战略,先后建成北斗一号、北斗二号和北斗三号系统[4-5]。其中,北斗二号卫星导航系统(BDS-2)于2012年建成[6],其基本空间星座由5颗地球静止轨道(geostationary earth orbit,GEO)卫星、5颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit,IGSO)卫星和4颗中圆地球轨道(medium earth orbit,MEO)卫星组成[7],主要面向亚太地区提供定位、测速、授时、广域差分和短报文通信服务[8]。北斗三号卫星导航系统(BDS-3)于2020年建成并正式开通全球服务[9],其完整基本星座由3颗GEO卫星、3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星组成[10]。在提供基本定位、导航和授时服务的基础上[11],BDS-3还具备全球短报文通信、区域短报文通信、国际搜救、星基增强和精密单点定位等特色服务能力[12]。

为提供更优质服务,BDS在2026年4月中下旬实施了在轨维护更新,并对部分卫星的工作状态进行优化调整[13]。升级完成后,部分卫星的伪随机噪声码编号(pseudo random noise,PRN)发生了变化,并使用部分BDS-3卫星对BDS-2卫星进行了替换。表1列出了本次分析涉及的BDS-3卫星更新维护时间、卫星号变化以及被替换的PRN等,参与其中的3颗IGSO卫星更新维护发生在4月10日—17日,8颗MEO卫星的更新维护发生在4月18日—21日。

BDS-3卫星更新维护期间,卫星PRN、星历状态发生了调整,对于用户端而言,更新维护窗

表1 BDS-3卫星系统更新维护时间汇总

Table 1 Summary of BDS-3 Satellite System Update and Maintenance Periods

原PRN	新PRN	轨道类型	开始时间(UTC)	结束时间(UTC)
C13	C09	IGSO	2026-04-18 03:00:00	2026-04-18 07:00:00
C16	C10	IGSO	2026-04-18 11:00:00	2026-04-18 15:00:00
C38	C06	IGSO	2026-04-10 12:00:00	2026-04-10 16:00:00
C39	C07	IGSO	2026-04-17 00:00:00	2026-04-17 04:00:00
C40	C08	IGSO	2026-04-17 06:00:00	2026-04-17 10:00:00
C45	C39	MEO	2026-04-18 22:00:00	2026-04-19 02:00:00
C50	C14	MEO	2026-04-19 04:00:00	2026-04-19 08:00:00
C49	C13	MEO	2026-04-19 08:00:00	2026-04-19 12:00:00
C47	C11	MEO	2026-04-19 23:00:00	2026-04-20 03:00:00
C44	C31	MEO	2026-04-20 04:00:00	2026-04-20 08:00:00
C43	C38	MEO	2026-04-20 08:00:00	2026-04-20 12:00:00
C46	C40	MEO	2026-04-20 23:00:00	2026-04-21 03:00:00
C48	C12	MEO	2026-04-21 04:00:00	2026-04-21 08:00:00

注:UTC(coodinated universal time)表示协调世界时。

口前后,广播轨道钟差连续性、空间信号测距误差(signal-in-space ranging error,SISRE)水平以及伪距单点定位(single point positioning,SPP)结果变化是判断更新维护期间服务稳定性的直接依据[14]。部分研究表明,全球卫星定位系统的升级、维护、卫星机动、钟差异常或导航电文更新,会短时间影响卫星广播轨道和钟差精度[15-17]。基于2000—2010年超过4亿条GPS导航电文,相关研究结果表明,2007年10月部分异常与GPS控制段相关,但研究对象重点在GPS系统导航电文的异常检测与成因分析,对BDS在轨升级过程中的多频信号、偏差参数和定位性能响应缺乏讨论[18]。针对BDS多频码偏差的估计与分析发现,2022年BDS-3升级维护可能导致BDS-3卫星C2I类型的伪距观测值特定信号偏差(observable-specific signal bias,OSB)发生较大变化[19]。此外,对2022年间BDS-3升级维护进行分析,研究表明维护前后高时间分辨率差分码偏差(differential code bias,DCB)和宽巷未校准相位延迟(uncalibrated phase delay,UPD)出现明显跳变,且维护前后DCB和UPD出现较大变化[20]。然而,该研究主要集中于卫星端偏差参数的变化,对星座可见性、空间几何结构、SISRE以及实际定位性能等的讨论仍不充分。目前,2026年4月BDS-3的IGSO与MEO卫星已经更新维护完成,相关学者已经对此次更新操作有了初步评估[21],其研究结果表明,BDS-3升级维护更新后,全球B1I/B3I信号的卫星平均可见数减少,B1C/B2a信号的卫星平均可见数增加,两类星座的最差位置精度因子(position dilution of precision,PDOP)均有所改善,而PDOP可用性、定位精度及单星SISRE无明显变化。但该研究更侧重升级前后总体性能对比,且研究的时间段相对较短(仅一个月),对升级期间广播星历、轨道误差、钟差误差及用户定位性能需要更详细的研究。

因此,本文针对2026年4月的BDS更新维护事件,采用武汉大学国际GNSS服务(international GNSS service,IGS)实时分析中心提供的精密轨道和精密钟差产品作为参考,首先对维护窗口前后BDS-3卫星广播轨道误差、广播钟差误差及SISRE变化进行综合评估;在此基础上,进一步分析了卫星数量与PDOP的变化;最后结合15个GNSS实验项目(multi-GNSS experiment,MGEX)测站的SPP定位结果,评估此次BDS更新维护对定位的影响。

1 SISRE计算与评估方法

1.1 卫星端时空参考改正

广播星历与精密产品比较前,需要统一时空基准和卫星参考点。由于BDS-3广播星历轨道与精密轨道产品的参考点不同,因此首先需结合卫星姿态和天线相位中心(antenna phase center,APC)偏差进行改正,使差值在同一参考点下计算:

$$r_{\mathrm{APC}} = r_{\mathrm{COM}} + \boldsymbol{R} \cdot d_{\mathrm{PCO}} \tag{1}$$

式中,r_{APC}为卫星APC位置;r_{COM}为卫星质心(center of mass,COM)位置;$\boldsymbol{R}$为卫星姿态矩阵;d_{PCO}为卫星质心至天线相位中心的偏移向量(phase center offset,PCO),可以从IGS提供的天线文件获取。

此外,由于不同星历产品采用的钟差参考频点并不完全一致,若直接比较广播钟差与精密钟差,可能会引入由硬件群延迟造成的系统性偏差。对于BDS卫星而言,广播星历中的卫星钟差通常以B3I频点为参考[22],而精密钟差多基于B1I/B3I无电离层组合估计[23]。因此,在进行钟差精度评估前,需要利用广播星历中的群延迟(transmitter group delay,TGD)参数对广播钟差进行频点统一修正,使其与精密钟差处于相同的参考基准下。其中,B1I/B3I无电离层(ionospheric-free,IF)组合对应的TGD可表示为:

$$\mathrm{TGD}_{\mathrm{IF}}^{s}=\frac{f_{\mathrm{B1}}^{2}\mathrm{TGD}_{\mathrm{B1}}^{s}-f_{\mathrm{B3}}^{2}\mathrm{TGD}_{\mathrm{B3}}^{s}}{f_{\mathrm{B1}}^{2}-f_{\mathrm{B3}}^{2}} \tag{2}$$

式中,f_{B1}和f_{B3}分别为B1I和B3I频点的载波频率,通常取f_{B1}=1 561.098 MHz,f_{B3}=1 268.520 MHz;$\mathrm{TGD}_{\mathrm{B1}}^{s}$和$\mathrm{TGD}_{\mathrm{B3}}^{s}$分别表示第$s$颗卫星在B1I和B3I频点上的群延迟参数,可以从广播星历中获取。当广播星历钟差以B3I为参考时,其转换到B1I/B3I IF组合参考下的修正量可写为:

$$\Delta t_{\mathrm{TGD}}^{s}=\mathrm{TGD}_{\mathrm{B3}}^{s}-\mathrm{TGD}_{\mathrm{IF}}^{s} \tag{3}$$

经过TGD修正后的广播钟差为:

$$\delta t_{\mathrm{brd,IF}}^{s}(t)=\delta t_{\mathrm{brd,B3}}^{s}(t)+\Delta t_{\mathrm{TGD}}^{s} \tag{4}$$

式中,$\delta t_{\mathrm{brd,B3}}^{s}(t)$为第$s$颗卫星在$t$时刻的广播钟差,其参考频点为B3I;$\delta t_{\mathrm{brd,IF}}^{s}(t)$表示统一到B1I/B3I IF组合参考频点后的广播钟差。随后,将其与精密钟差$\delta t_{\mathrm{pre,IF}}^{s}(t)$进行比较,可得到第$s$颗卫星的钟差误差:

$$\Delta t^{s}(t)=\delta t_{\mathrm{brd,IF}}^{s}(t)-\delta t_{\mathrm{pre,IF}}^{s}(t) \tag{5}$$

式中,$\Delta t^{s}(t)$表示广播钟差与精密钟差之间的差异。由于广播钟差和精密钟差可能采用不同的钟差基准,直接比较时仍可能存在星座整体的系统性偏移。为削弱该影响,本文采用重心基准法进行去基准处理。首先计算同一历元下所有参与统计卫星的钟差误差均值:

$$\Delta\bar{t}(t)=\frac{1}{N}\sum_{S=1}^{N}\Delta t^{s}(t) \tag{6}$$

式中,$\Delta\bar{t}(t)$为该历元下星座钟差误差的平均值;N为参与计算的卫星数量。然后从每颗卫星的钟差误差中扣除该均值,得到去基准后的钟差误差:

$$\Delta\tilde{t}^{s}(t)=\Delta t^{s}(t)-\Delta\bar{t}(t) \tag{7}$$

式中,$\Delta\tilde{t}^{s}(t)$为去除星座整体钟差基准偏差后的钟差误差及广播钟差相对于精密钟差的二次差。

1.2　SISRE计算方法

SISRE用于描述轨道误差和钟差误差投影到用户测距方向后的综合影响。为有效区分轨道误差与钟差误差对SISRE的影响[24-25],本文分别使用MONTENBRUCK等[22]定义的仅轨道SISRE和综合钟差误差的SISRE进行分析,其值计算如下:

$$V_{\mathrm{SISRE_{orb0nly}}}=\sqrt{w_{R}R^{2}+w_{AC}\left(A^{2}+C^{2}\right)} \tag{8}$$

$$V_{\mathrm{SISRE}}=\sqrt{\left(w_{R}R-\Delta T\right)^{2}+w_{AC}\left(A^{2}+C^{2}\right)} \tag{9}$$

式中,R、A、C分别为径向、切向和法向轨道误差;ΔT为距离量纲下的钟差误差;ω_{R}和ω_{AC}为与卫星系统和卫星轨道类型有关的权系数,其具体数值如表2所示[22]。

表2　BDS系统MEO与IGSO卫星径向、切向与法向加权系数

Table 2　Weighting Coefficients for Radial, Along-Track, and Cross-Track Components of BDS MEO and IGSO Satellites

BDS系统卫星轨道类型	w_{R}	w_{AC}
MEO	0.98	0.5
IGSO	0.99	0.09

1.3　SPP与PDOP

SPP是利用接收机观测得到的伪距观测值,并结合广播星历计算卫星位置和卫星钟差,通过最小二乘方法估计接收机三维坐标和接收机钟差[26]。本文采用BDS B1/B3双频IF组合伪距观测模型[27]。对于同一颗BDS卫星s,利用B1和B3两个频点上的伪距观测值P_{B1}^{s}和P_{B3}^{s}构造IF组合伪距:

$$P_{\mathrm{IF}}^{s}=\frac{f_{\mathrm{B1}}^{2}P_{\mathrm{B1}}^{s}-f_{\mathrm{B3}}^{2}P_{\mathrm{B3}}^{s}}{f_{\mathrm{B1}}^{2}-f_{\mathrm{B3}}^{2}} \tag{10}$$

式中,P_{IF}^{s}为B1/B3双频IF组合伪距观测值;f_{B1}和f_{B3}分别为BDS B1和B3频点频率。

通过卫星钟差、相对论效应、地球自转改正以及对流层延迟改正后,双频IF组合伪距观测方程可表示为:

$$P_{\mathrm{IF}}^{s}=\rho^{s}+c\left(\delta t_{r}-\delta t^{s}\right)+T^{s}+\varepsilon_{\mathrm{IF}}^{s} \tag{11}$$

式中,ρ^{s}为卫星到接收机的几何距离;c为光速;δt_{r}和δt^{s}分别为接收机钟差和卫星钟差;T^{s}为对流层延迟;$\varepsilon_{\mathrm{IF}}^{s}$为组合观测噪声及其他未建模误差。

对观测方程进行线性化后,可采用加权最小二乘方法求解待估参数改正数:

$$\Delta\boldsymbol{x}=\left(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{H}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{l} \tag{12}$$

式中,$\Delta\boldsymbol{x}=\left[\Delta x,\Delta y,\Delta z,c\delta t_{r}\right]^{\mathrm{T}}$为待估参数改正数;$\boldsymbol{H}$为设计矩阵;$\boldsymbol{W}$为观测权阵;$\boldsymbol{l}$为观测值与计算值之差。通过迭代更新接收机坐标和钟差,直至参数改正数满足收敛条件,即可得到SPP定位结果。

PDOP用于评价卫星空间几何构型对三维定位精度的影响[28],通常由设计矩阵构造协因数矩阵,再由位置参数对应的对角元素计算PDOP。其中协因数矩阵为:

$$\boldsymbol{Q}=\left(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\right)^{-1} \tag{13}$$

PDOP值可表示为:

$$V_{\mathrm{PDOP}}=\sqrt{q_{xx}+q_{yy}+q_{zz}} \tag{14}$$

式中,q_{xx}、q_{yy}、q_{zz}分别为协因数矩阵中与三维位置参数对应的对角元素。

2 实验结果与分析

2.1 实验数据处理策略

本文采用IGS发布的广播星历文件对BDS卫星更新维护时段的轨道、钟差与SISRE进行分析,实验时段覆盖时间为2026年3月—5月。轨道与钟差的参考真值均采用来自武汉大学IGS实时分析中心的快速精密星历与精密钟差产品[29]。SPP采用15个全球分布的MGEX测站,测站分布覆盖北美洲、南美洲、欧洲、亚洲、大洋洲及南部非洲等区域,全球分布的测站如图1所示。

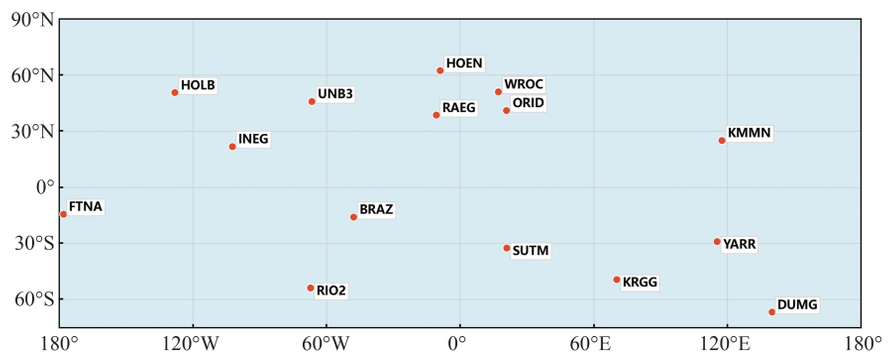


图1 全球测站分布

Fig. 1 Distribution of Global Tracking Stations

2.2 更新维护前后轨道误差、钟差误差与SISRE分析

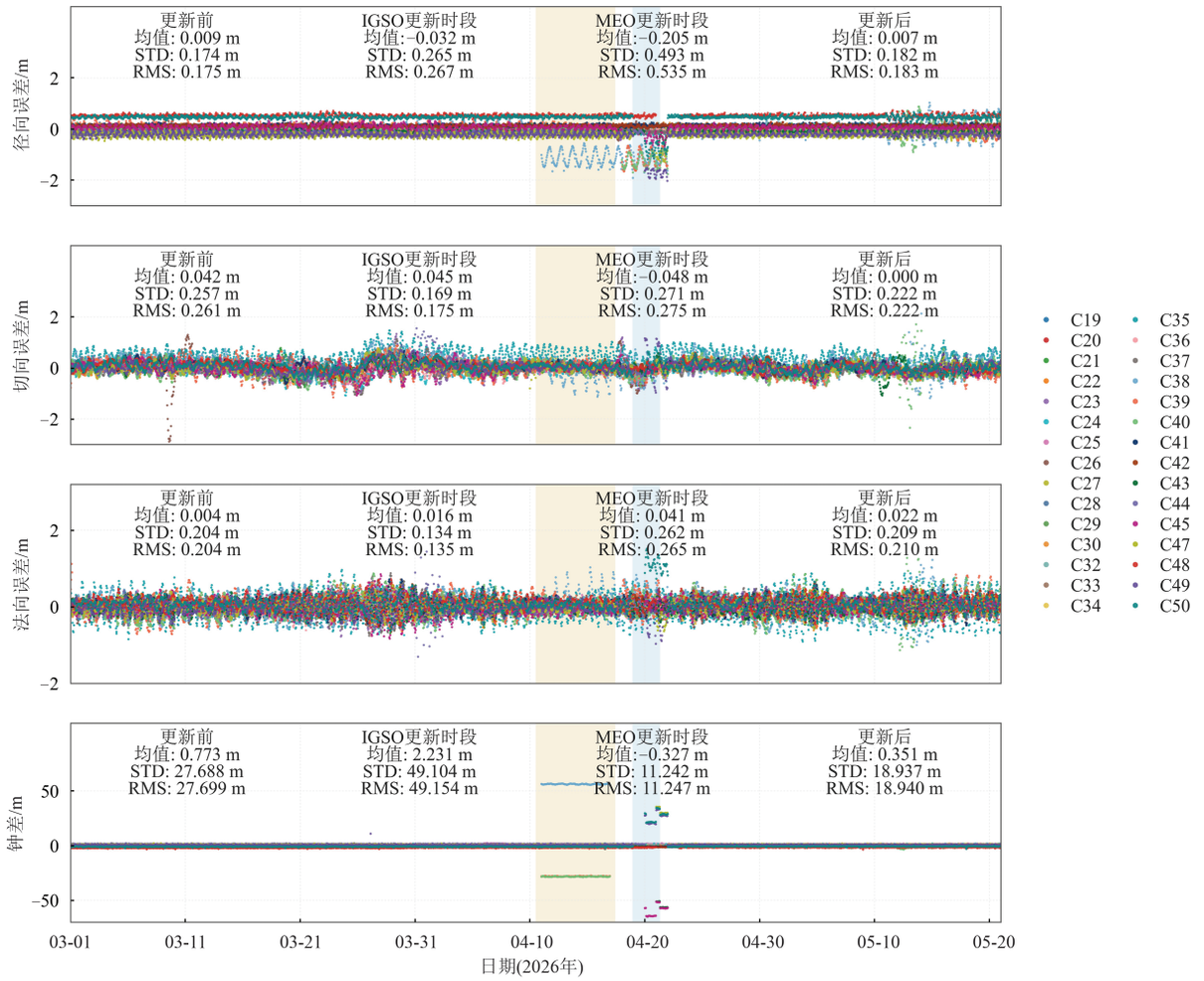
2.2.1 轨道误差与钟差误差

图2给出了BDS-3更新维护前后径向、切向、法向3个方向的轨道误差和钟差误差时序,其中黄色覆盖时段为BDS-3 IGSO卫星更新维护窗口,蓝色覆盖时段为MEO卫星更新维护窗口。对于广播星历轨道误差,在BDS-3更新维护前,多数卫星径向和切向误差主要分布在约±1 m范围内。4月中下旬,BDS-3卫星开始更新维护,从图2中可以看出更新维护时期轨道误差分布较为离散,轨道误差的均方根(root mean square,RMS)与标准差(standard deviation,STD)明显增大,以径向最为明显,RMS与STD在MEO更新时段分别达到0.535 m与0.493 m;当BDS-3卫星更新维护完成后,多数卫星径向和切向误差又回到原有水平,均值、RMS与STD与更新前相差无几。更新维护前,多数卫星径向误差较为稳定,其误差值约为0.009 m;当IGSO及MEO卫星执行更新维护操作时,C38、C40与C49卫星的径向误差发生显著跳变,均在-2~-1 m范围内波动。

除了广播星历轨道,广播钟差也受到这次更新维护的影响。在更新维护时段内,IGSO卫星C38和C40的广播钟差出现约50 m的偏差。此外,MEO卫星C44、C49、C50等卫星也出现约60 m的异常,星座整体RMS与STD分别达到11 m。当更新维护完成后,卫星钟差误差恢复至正常水平,RMS与STD下降至原有0.8 m左右。图3展示了BDS-2星座的相关误差时序。从图3可以看出,更新前BDS-2的均值、RMS和STD整体高于BDS-3,表明其误差离散性和波动性更高。这可能与BDS-2中存在的卫星诱导码偏差有关,而该问题在BDS-3中已得到一定程度的改善。此外,BDS-3采用新一代星载原子钟,其稳定性优于BDS-2卫星钟,也有助于降低钟差误差[30]。综合两张图可以看出,在4月21日8时即MEO与IGSO星座更新完成之后,时间序列中还有一段误差较大,并且在4月22日12时恢复正常。总体而言,BDS星座的更新维护对参与更新维护的卫星广播轨道误差与钟差误差都有一定影响,且对广播钟差误差的影响较为明显。

2.2.2 仅轨道SISRE结果

图4为仅考虑轨道误差影响的BDS-3 SISRE时序。2026年3月至4月上旬,BDS-3星座卫星仅轨道SISRE均值为0.193 m,RMS与STD分别为0.229 m与0.124 m。当IGSO和MEO更新维护时,参与更新维护的卫星仅轨道SISRE出现显著跳变,C49卫星仅轨道SISRE最高接近2.03 m,C38、C40等卫星在更新维护时期也高达约1.90 m、1.68 m;同时,星座整体RMS与STD明显增大,MEO更新时段达到0.5 m左右。更新维护结束



注:图中黄色覆盖时段为IGSO更新时段,蓝色覆盖时段为MEO更新时段。

图2　BDS-3卫星轨道径向、切向、法向3个方向误差与钟差误差时序结果

Fig. 2　Time Series of BDS-3 Satellite Orbit Errors in the Radial, Along-Track, and Cross-Track Directions and Clock Errors

后,星座各卫星仅轨道SISRE恢复至正常数值,均值恢复至0.189 m,RMS与STD也分别降至0.225 m与0.122 m。图5为仅考虑轨道误差影响的BDS-2 SISRE时序结果,其同时期轨道误差较BDS-3更高,同时更新维护后仅有原PRN号为C13、C16的两颗卫星并入BDS-3系统继续服役。

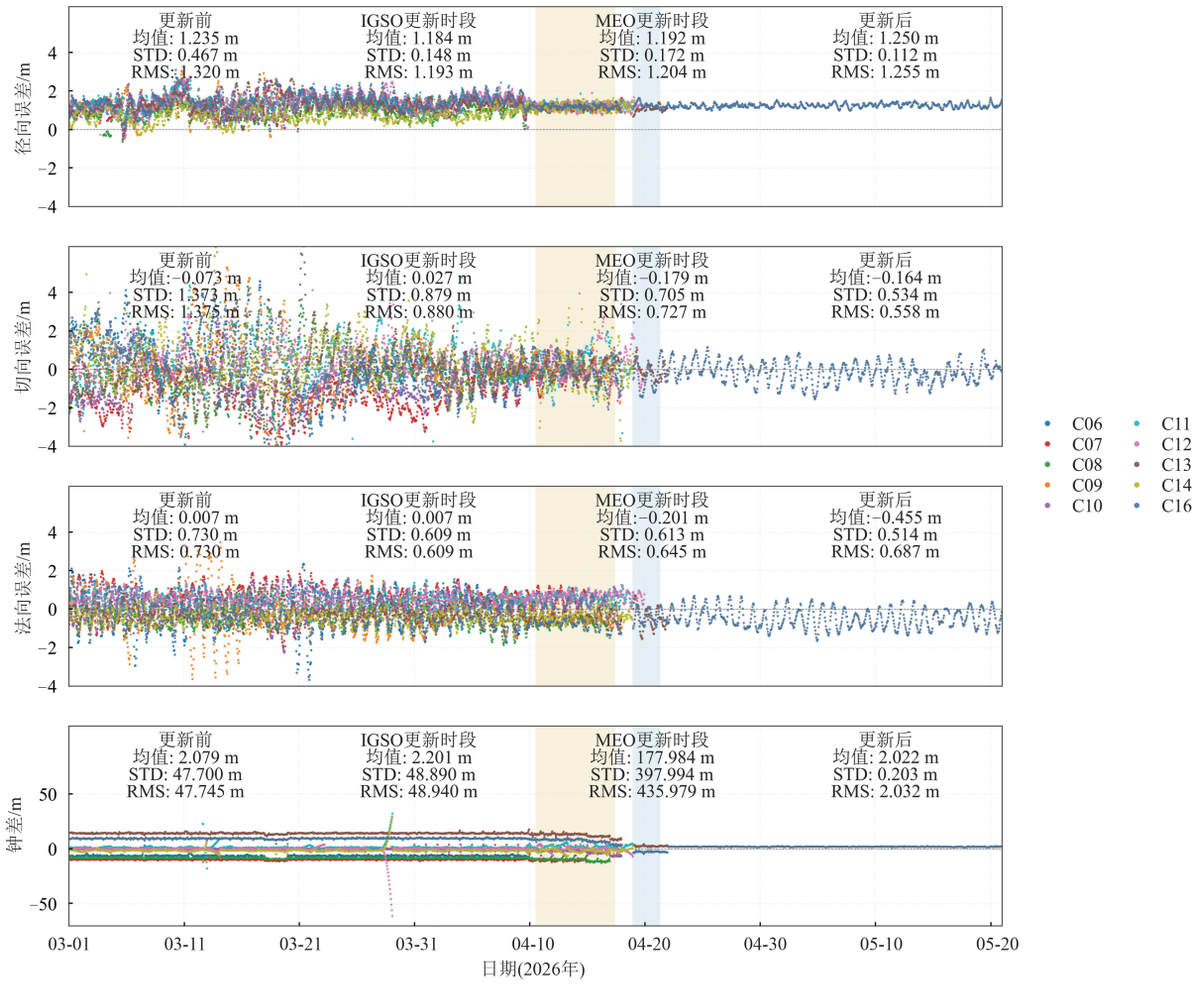
2.2.3　SISRE结果

图6为综合考虑轨道误差和钟差误差后的SISRE结果。与仅轨道SISRE相比,综合SISRE在更新维护窗口内的突增更为显著:IGSO更新维护阶段,C38卫星SISRE达到约58 m,C39、C40卫星SISRE达到约28 m;MEO更新维护阶段,C45卫星SISRE最高约64 m,C49和C50等卫星也出现约20～30 m量级的峰值。

更新维护窗口结束后,综合SISRE整体快速回落,均值回到原有0.8 m左右的水平,仅少数卫星维持米级偏高或出现间歇性波动。结合图2中的钟差误差可知,本次综合SISRE的极端值主要受更新维护窗口内的钟差异常影响。图7为BDS-2星座综合SISRE,可以明显看出IGSO卫星有较大的系统性偏差。更新维护后,并入BDS-3系统的卫星SISRE较小,有较高的可用性。总体而言,参与更新维护的各卫星的SISRE在更新维护时段均有较明显增大,且维持在较大值的时段与各轨道类型卫星的整体更新维护起始时间一致。

2.3　更新维护前后BDS-2/BDS-3的卫星数量与PDOP变化分析

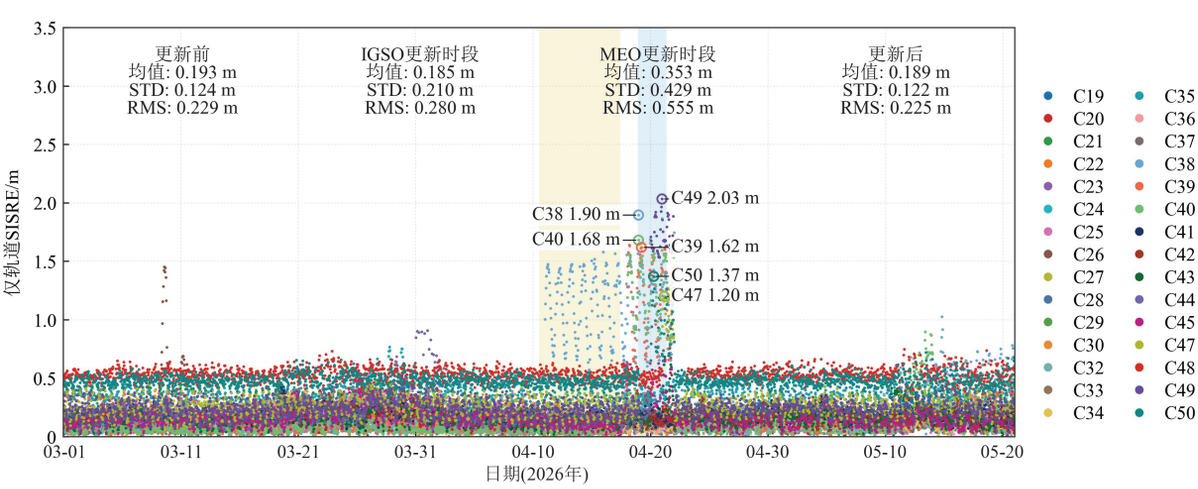
2026年4月BDS系统进行在轨升级维护后,部分BDS-2卫星退役,同时对多颗BDS-3卫星进行了PRN重分配。本节基于更新维护前后两个时段的广播星历,对全球范围内BDS-2/BDS-3的可见卫星数量和PDOP变化进行分析。由于



注：图中黄色覆盖时段为IGSO更新时段，蓝色覆盖时段为MEO更新时段。

图3 BDS-2卫星轨道在径向、切向、法向3个方向误差与钟差误差时序结果

Fig. 3 Time Series of BDS-2 Satellite Orbit Errors in the Radial, Along-Track, and Cross-Track Directions and Clock Errors

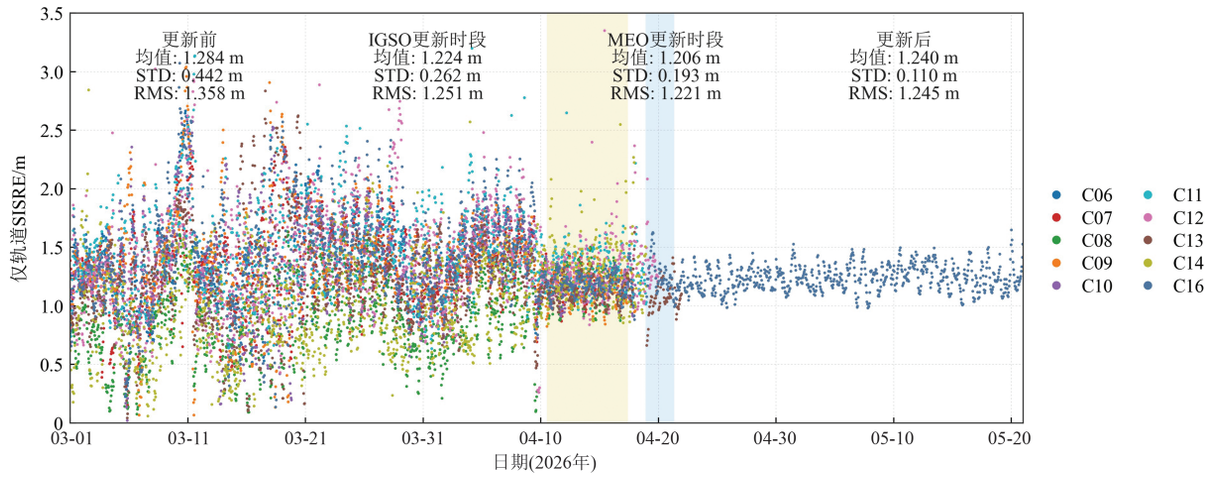


注：图中黄色覆盖时段为IGSO更新时段，蓝色覆盖时段为MEO更新时段。

图4 BDS-3仅轨道SISRE时序结果

Fig. 4 Time Series of Orbit-Only SISRE for BDS-3 Satellites

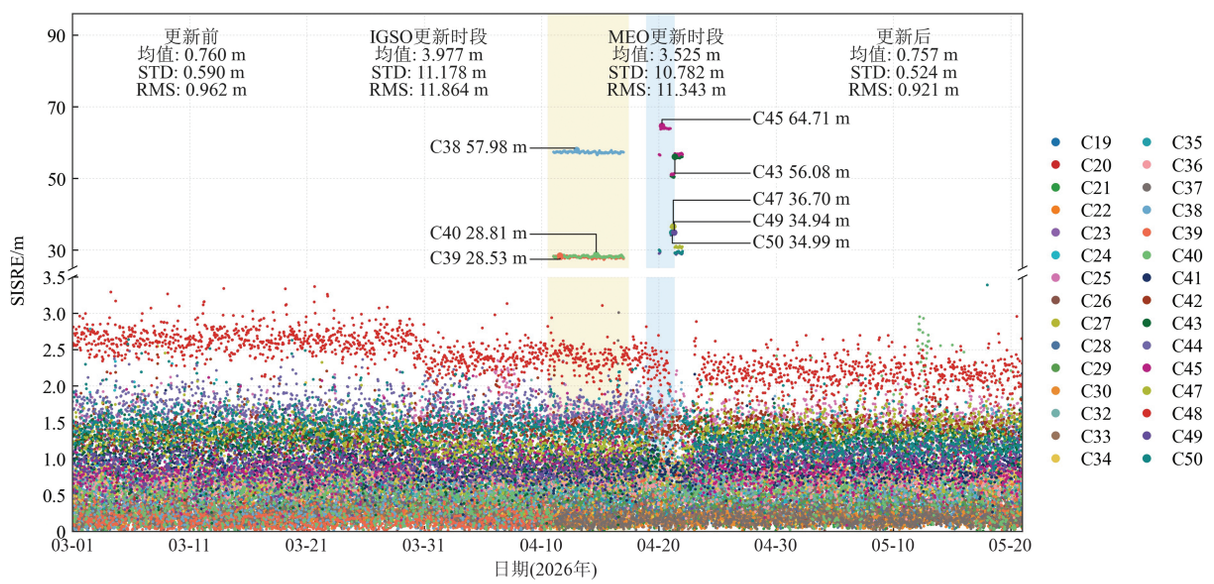
GEO卫星较少参与用户定位计算，故本文仅对IGSO与MEO卫星进行统计分析。BDS卫星的轨道重复周期最小公倍数为7 d，因此本文更新维护前选取2026-04-03 00:00:00 UTC起连续7天



注:图中黄色覆盖时段为IGSO更新时段,蓝色覆盖时段为MEO更新时段。

图 5　BDS-2仅轨道SISRE时序结果

Fig. 5　Time Series of Orbit-Only SISRE for BDS-2 Satellites



注:图中黄色覆盖时段为IGSO更新时段,蓝色覆盖时段为MEO更新时段。

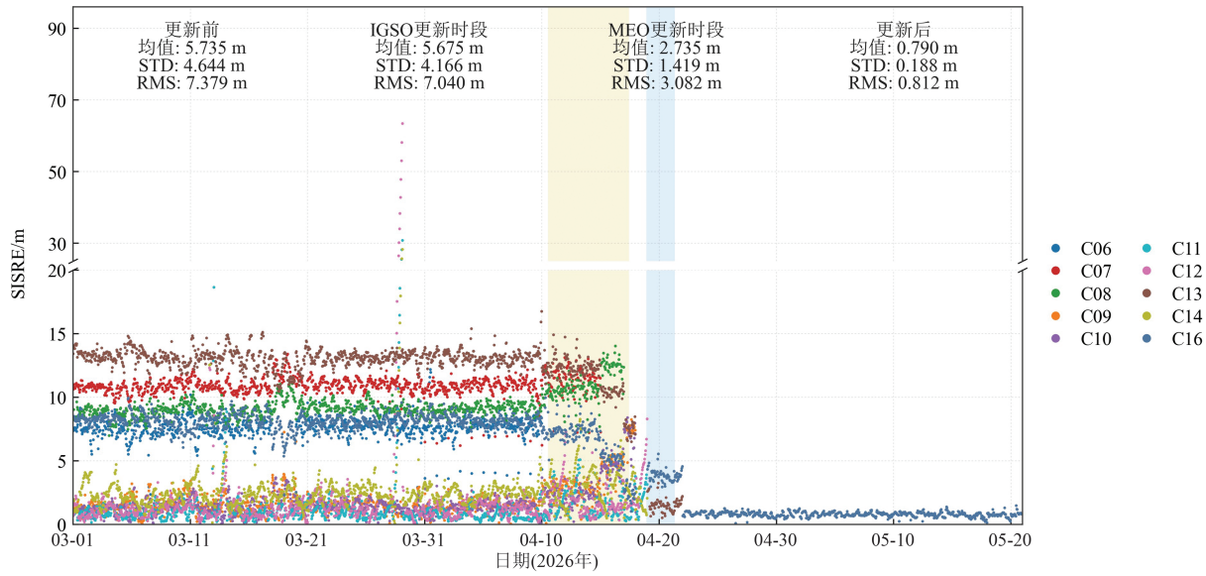
图 6　BDS-3综合SISRE时序结果

Fig. 6　Time Series of Combined SISRE for BDS-3 Satellites

的广播星历进行统计,更新维护后选取2026-05-01 00:00:00 UTC起连续7天的广播星历进行统计。全球计算格网采用2.5°纬度×5°经度,测站高程设为25 m,卫星截止高度角设为10°。在每个格网点和每个历元,根据广播星历计算卫星位置,并统计高度角大于10°的BDS卫星数量。

图8给出了更新维护前后的全球BDS-2/BDS-3可见卫星数量统计。可以看出,更新维护前,BDS-2/BDS-3在亚太区域的平均可见卫星数较多,中国及周边、东南亚、澳大利亚等区域多为16颗以上,局部区域可达到20颗以上;欧洲、非洲和美洲区域的可见卫星数量相对较少。更新维护后,全球可见卫星数量整体减少,亚太区域仍保持相对较高的可见卫星数,但较之前数量有所减少约5颗卫星。统计结果显示,更新维护前全球平均可见卫星数约为11.61颗,更新维护后约为9.64颗,平均减少约1.97颗。

为进一步统计更新维护对BDS-2/BDS-3的几何构型变化影响,本文采用式(13)和式(14)计算PDOP,图9给出了更新维护前后的全球BDS-2/BDS-3的PDOP分布。可以看出,更新维护前,全球大部分区域PDOP处于较低水平,亚太区域PDOP整体较小,几何分布较好;美洲部分区域、南大西洋及高纬区域PDOP相对较大。更新维护后,PDOP整体升高,统计结果显示,更新



注:图中黄色覆盖时段为IGSO更新时段,蓝色覆盖时段为MEO更新时段。

图7 BDS-2综合SISRE时序结果

Fig. 7 Time Series of Combined SISRE for BDS-2 Satellites

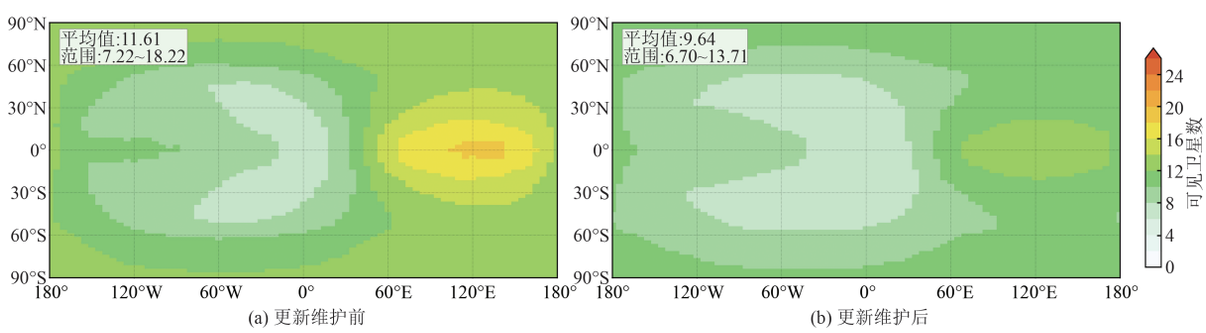


图8 更新维护前后BDS-2/BDS-3卫星数量7日均值

Fig. 8 Seven-Day Mean Number of BDS-2/BDS-3 Satellites Before and After the Update and Maintenance Operations

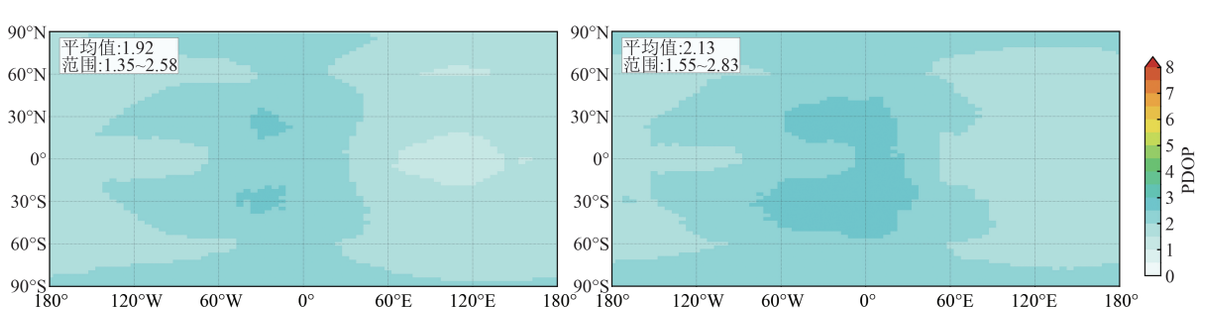


图9 更新维护前后BDS-2/BDS-3 PDOP 7日均值

Fig. 9 Seven-Day Mean PDOP of BDS-2/BDS-3 Before and After the Update and Maintenance Operations

维护前,全球平均PDOP约为1.92,更新维护后约为2.13,平均增加约0.21。

2.4 更新维护前后BDS-2/BDS-3 SPP变化分析

图10为2026-04-20 ORID站与WROC站单日三维SPP误差时序图。可以看出,C43和C44卫星更新维护时段北向与东向定位时序图出现较大偏差,高程方向误差也有较大波动。整体来看,更新维护期间各方向误差RMS相较于更新完成后均有增加,水平方向增加约0.2 m,高程方向增加约0.8 m。

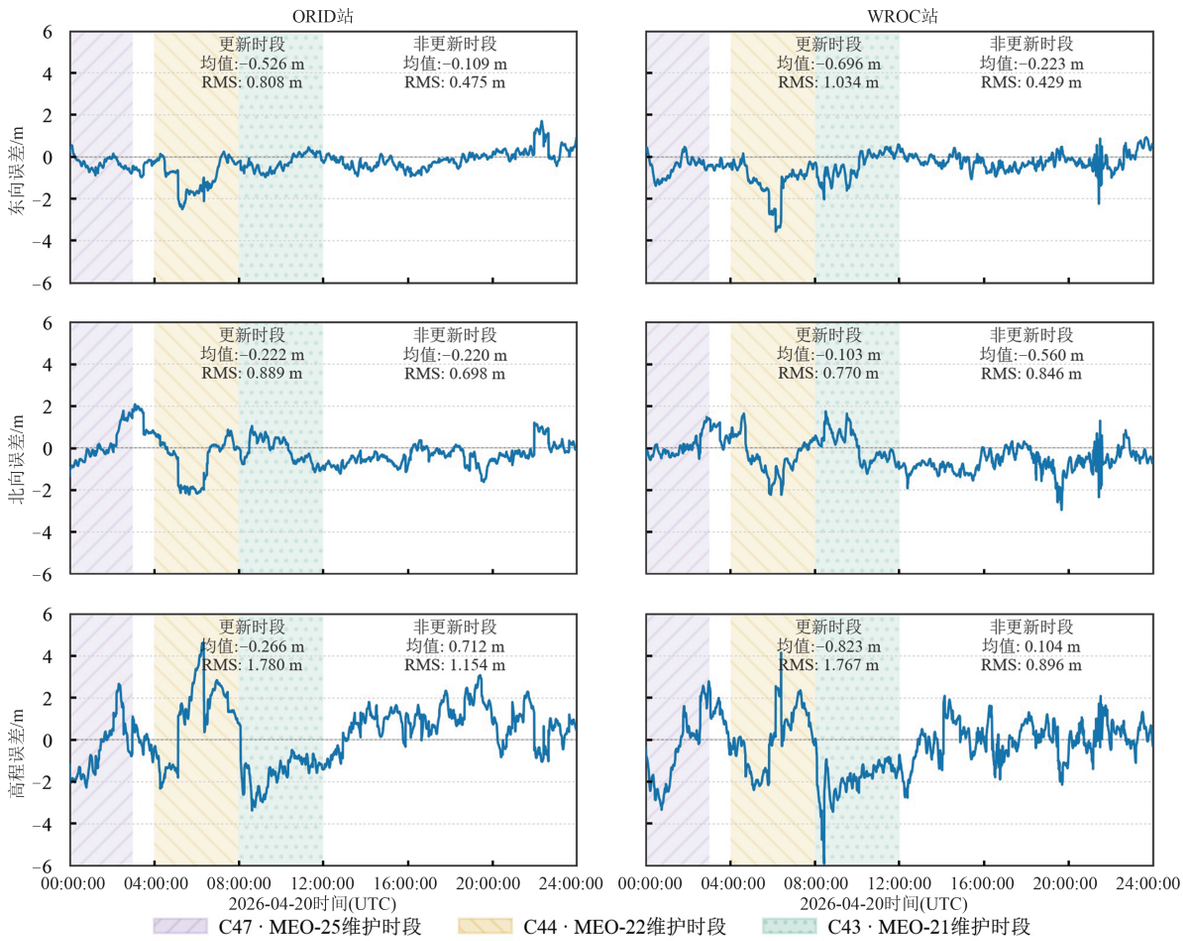


图 10　2026-04-20 ORID 站和 WROC 站 SPP 三维定位误差时间序列

Fig. 10　Time Series of Three-Dimensional SPP Positioning Errors at ORID and WROC Stations on April 20, 2026

图 11 为当日两测站 BDS 卫星数及 PDOP 时序,可以看出,更新时段内两测站的平均可用卫星数减少约 0.5 颗,PDOP 平均增加约 0.15。由于更新时间段内测站无法接收更新卫星的观测值,导致该时段 ORID 和 WROC 测站的可见卫星数量减少,从而导致定位时序图出现了较大的偏差。

图 12 给出了剔除极值后全部站点 SPP 三维定位误差日均值在更新前、更新时段和更新后的变化。由于 BDS-2 卫星的轨道误差、钟差误差较大,SISRE 较差,故实验过程中对其进行了降权处理,将其权重降低至 1/4。更新前,三维定位误差日均值主要分布在 1.5 m 左右,均值为 1.522 m,STD 为 0.051 m,RMS 为 1.523 m。进入更新时段后,部分 BDS-2 卫星退役,更新维护的 BDS-3 卫星无观测值,从而导致定位误差升高,均值增至 2.245 m,STD 增至 0.360 m,RMS 增至 2.272 m。更新结束后,三维定位误差日均值迅速下降,均值为 1.628 m,STD 为 0.034 m,RMS 为 1.629 m,稳定性相较更新前差别不大,但均值上升了约 0.1 m,这可能与 BDS-2 卫星退役导致卫星数降低有关。结果表明,全部站点 SPP 三维定位误差在更新维护时段均值较高且离散度增大,而更新结束后,误差略高于原有水平,误差变化较稳定。

3　结　语

针对 2026 年 4 月 BDS 卫星实施的升级与维护操作,本文基于 2026 年 3 月—5 月的广播星历数据及全球 15 个 MGEX 测站的观测值,系统对比分析了维护前后广播轨道误差、钟差误差及 SISRE 的变化特征,并综合评估了此次升级与维护操作对 BDS 可用卫星数量、PDOP 值及 SPP 精度的影响。主要结论如下:

1)更新维护前,BDS-3 卫星广播轨道误差、钟差误差及 SISRE 保持稳定,轨道径向、切向、法向 3 个方向误差与钟差误差 RMS 分别为 0.175 m、0.261 m、0.204 m 与 0.828 m。更新维护期间,卫

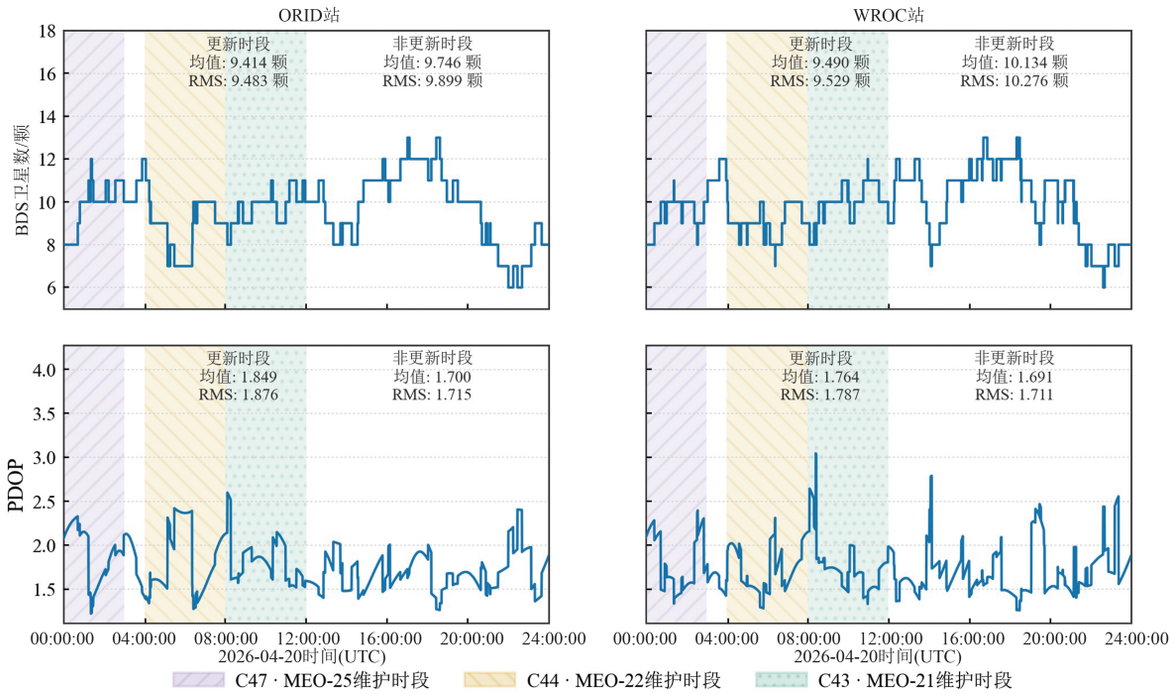


图11 2026-04-20 ORID站和WROC站北斗卫星数及PDOP时间序列

Fig. 11 Time Series of the Number of Visible BDS Satellites and PDOP at ORID and WROC Stations on April 20, 2026

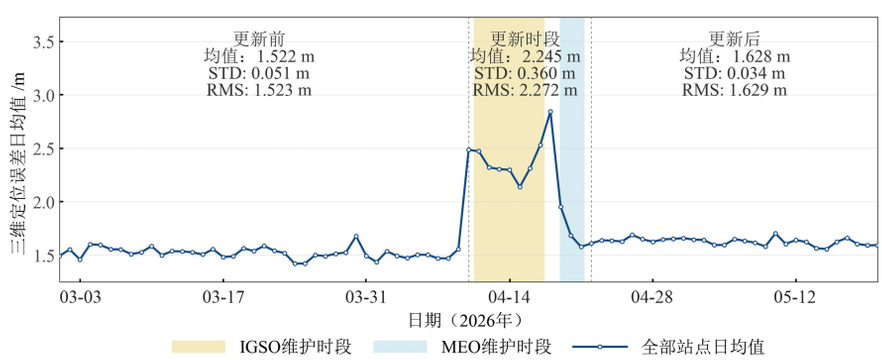


图12 更新维护前、更新时段及更新后全部站点SPP三维定位误差日均时序

Fig. 12 Daily Mean Time Series of Three-Dimensional SPP Positioning Errors at All Stations Before, During, and After the Update and Maintenance Operations

星轨道径向误差和钟差误差明显增大,其中广播钟差误差可增大至约50 m。受此影响,轨道和钟差的综合SISRE出现数米量级的增大,尤其是C38和C44卫星,其SISRE可增加至分别约为58 m和64 m。更新维护结束后,SISRE逐渐恢复至原有水平。

2)由于部分BDS-2卫星退役,更新维护前后BDS-3/BDS-2全球可见卫星数量及PDOP的对比结果表明,全球平均可见卫星数由11.61颗减少至9.64颗,平均减少约1.97颗;全球平均PDOP由1.92增至2.13,平均增加约0.21。

3)基于15个全球分布的MGEX测站90天的SPP定位精度统计结果进一步表明,更新维护期间三维定位误差波动显著增大,其中高程方向误差较为明显,如WROC测站高程方向误差可增大至6 m。此外,更新维护时段内的三维定位误差的15个测站定位误差日均值、STD和RMS分别为2.245 m、0.360 m、2.272 m;更新维护完成后,三项指标分别下降至1.628 m、0.034 m和1.629 m,SPP定位结果趋于稳定。

参 考 文 献

[1] 国务院新闻办公室. 中国北斗卫星导航系统[EB/OL]. (2016-06-16)[2026-07-21]. http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2016n/202207/t20220704_

130481.html.

[2] 刘健，曹冲．全球卫星导航系统发展现状与趋势[J]．导航定位学报，2020，8(1)：1-8.
LIU Jian，CAO Chong．Development Status and Trend of Global Navigation Satellite System[J]．*Journal of Navigation and Positioning*，2020，8(1)：1-8.

[3] 刘艳亮，张海平，徐彦田，等．全球卫星导航系统的现状与进展[J]．导航定位学报，2019，7(1)：18-21.
LIU Yanliang，ZHANG Haiping，XU Yantian，et al．Development Status and Trend of Global Navigation Satellite System[J]．*Journal of Navigation and Positioning*，2019，7(1)：18-21.

[4] 杨元喜．北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]．测绘学报，2010，39(1)：1-6.
YANG Yuanxi．Progress，Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System[J]．*Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*，2010，39(1)：1-6.

[5] 谭述森．北斗卫星导航系统的发展与思考[J]．宇航学报，2008，29(2)：391-396.
TAN Shusen．Development and Thought of Compass Navigation Satellite System[J]．*Journal of Astronautics*，2008，29(2)：391-396.

[6] 杨君琳，杨长风，毛国辉．中国卫星导航建设现代化管理研究[J]．中国工程科学，2023，25(2)：31-40.
YANG Junlin，YANG Changfeng，MAO Guohui．Modernized Governance for the Construction of China's Satellite Navigation System[J]．*Strategic Study of CAE*，2023，25(2)：31-40.

[7] 朱永兴，冯来平，贾小林，等．北斗区域导航系统的PPP精度分析[J]．测绘学报，2015，44(4)：377-383.
ZHU Yongxing，FENG Laiping，JIA Xiaolin，et al．The PPP Precision Analysis Based on BDS Regional Navigation System[J]．*Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*，2015，44(4)：377-383.

[8] 宁津生，姚宜斌，张小红．全球导航卫星系统发展综述[J]．导航定位学报，2013，1(1)：3-8.
NING Jinsheng，YAO Yibin，ZHANG Xiaohong．Review of the Development of Global Satellite Navigation System[J]．*Journal of Navigation and Positioning*，2013，1(1)：3-8.

[9] 曹新运，沈飞，李建成，等．BDS-3/GNSS非组合精密单点定位[J]．武汉大学学报(信息科学版)，2023，48(1)：92-100.
CAO Xinyun，SHEN Fei，LI Jiancheng，et al．BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning[J]．*Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2023，48(1)：92-100.

[10] YANG Y X，GAO W G，GUO S R，et al．Introduction to BeiDou-3 navigation Satellite System[J]．*NAVIGATION*，2019；66(1)：7-18.

[11] LIU W P，JIAO B，Hao J M，et al．Signal-in-space Range Error and Positioning Accuracy of BDS-3[J]．*Scientific Reports*，2022，12：8181.

[12] YANG Y X，DING Q，GAO W G，et al．Principle and Performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3[J]．*Satellite Navigation*，2022，3(1)：5.

[13] 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心．北斗系统升级期间星座状态变化[EB/OL]．2026-03-21．https://www.csno-tarc.cn/notice/noticeDetail id=989.
Test and Assessment Research Center，China Satellite Navigation Office．Constellation State Changes During the BeiDou System Upgrade Period[EB/OL]．(2026-03-21)[2026-09-10]．https://www.csno-tarc.cn/notice/noticeDetail id=989.

[14] CHENG C，ZHAO Y，LI L，et al．A Real-Time Detection Method for BDS Signal in Space Anomalies[J]．*Sensors*，2019；19(6)：1437.

[15] DONG Z，ZHANG S．SISRE of BDS-3 MEO：Evolution as Well as Comparison between D1 and B-CNAV (B-CNAV1，B-CNAV2) Navigation Messages[J]．*Remote Sensing*，2024，16(3)：484.

[16] JIAO G，SONG S，LIU Y，et al．Analysis and Assessment of BDS-2 and BDS-3 Broadcast Ephemeris：Accuracy，the Datum of Broadcast Clocks and Its Impact on Single Point Positioning[J]．*Remote Sensing*，2020，12(13)：2081.

[17] WALTER T，LIU Z，BLANCH J，et al．Investigation into September 2020 GPS SVN 74 Performance Anomaly[C]//The 2021 International Technical Meeting of the Institute of Navigation，Online，2021.

[18] HENG L，GAO G X，WALTER T，et al．GPS Signal-in-Space Anomalies in the Last Decade：Data Mining of 400 000 000 GPS Navigation Messages[C]//The 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)，Portland，OR，USA，2010.

[19] 李文溢，张启元，聂桂根．北斗/GNSS多频率码偏差估计与分析[J]．大地测量与地球动力学，2024，44(8)：797-803.
LI Wenyi，ZHANG Qiyuan，NIE Guigen．Estimation and Analysis of Beidou/GNSS Multi-Frequency Code Biases[J]．*Journal of Geodesy and Geodynamics*，2024，44(8)：797-803.

[20] LIU T J, Liu CHEN H, JIANG W P, et al. Impact of BeiDou-3 Upgrades and Maintenance on Code/Phase Biases Estimation and PPP Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2026, 30(9).

[21] 宋晓丽,焦文海,耿长江,等.BDS 2026年4月升级影响及性能分析[J/OL].导航定位学报,2026-07-22. https://link.cnki.net/urlid/10.1096.P.20260706.0812.002.
SONG Xiaoli, JIAO Wenhai, GENG Changjiang, et al. Impact Analysis and Preliminary Performance Evaluation of BDS In-Orbit Upgrade in April 2026 [J/OL]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2026-07-22. https://link.cnki.net/urlid/10.1096.P.20260706.0812.002.

[22] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Multi-GNSS Signal-in-Space Range Error Assessment-Methodology and Results [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12): 3020-3038.

[23] GAO M, CAO Z H, MENG Z H, et al. Algorithms Research and Precision Comparison of Different Frequency Combinations of BDS-3\GPS\Galileo for Precise Point Positioning in Asia-Pacific Region[J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 5935.

[24] 郝鑫宇,何倩倩,颜博,等.2020—2025年北斗三号广播星历及电离层模型性能研究[J].空间科学学报,2026,46(1):61-75.
HAO Xinyu, HE Qianqian, YAN Bo, et al. Research on the Performance of BeiDou-3 Broadcast Ephemeris and Ionospheric Model from 2020 to 2025 [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(1): 61-75.

[25] 毛亚,王潜心,胡超,等.BDS-3卫星钟差特性分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(1):53-61.
MAO Ya, WANG Qianxin, HU Chao, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 53-61.

[26] OSZCZAK B. New Algorithm for GNSS Positioning Using System of Linear Equations[C]//The 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN, USA, 2013.

[27] 张且且,田晓杰,方乐,等.BDS-3全频点自适应伪距单点定位算法[J].导航定位与授时,2025(4):75-83.
ZHANG Qieqie, TIAN Xiaojie, FANG Le, et al. BDS-3 Full-Frequency Adaptive Pseudo-Range Single Point Positioning Algorithm[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2025(4): 75-83.

[28] 刘会杰,张乃通.全球导航卫星系统的星座可见性研究[J].系统工程与电子技术,2000,22(5):23-25.
LIU Huijie, ZHANG Naitong. Research on Constellation Visibility for Global Navigation Satellite System[J]. System Engineering and Electronics, 2000, 22(5):23-25.

[29] GUO J, WANG C, CHEN G, et al. BDS-3 Precise Orbit and Clock Solution at Wuhan University: Status and Improvement[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97: 19.

[30] XIE X, GENG T, ZHAO Q L, et al. Performance of BDS-3: Measurement Quality Analysis, Precise Orbit and Clock Determination[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1233.