

引文格式:金彪,陈姗姗,李祝莲,等.SBAS GEO 卫星 URE 精度及定位增强研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(7):1166-1175.DOI:10.13203/j.whugis20210091



Citation: JIN Biao, CHEN Shanshan, LI Zhulian, et al. SBAS GEO Satellite User Range Error and Position Augmentation Research[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(7):1166-1175.DOI:10.13203/j.whugis20210091

SBAS GEO 卫星 URE 精度及定位增强研究

金彪^{1,2,3} 陈姗姗³ 李祝莲¹ 李语强¹ 李子潇³

1 中国科学院云南天文台, 云南 昆明, 650011

2 中国科学院大学, 北京, 100049

3 航天恒星科技有限公司, 北京, 100094

摘要: 分析星基增强系统(satellite based augmentation system, SBAS)地球同步轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星用户测距误差(user range error, URE), 研究GEO卫星测距对导航定位性能的影响, 可为SBAS系统设计和民航应用提供有益参考。利用广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)、北斗星基增强系统(BeiDou SBAS, BDSBAS)、GPS辅助静地增强导航系统(GPS aided GEO augmented navigation, GAGAN)和多功能卫星增强系统(multi-functional satellite augmentation system, MSAS)的SBAS信息对GPS和GEO卫星星历、时钟和观测值进行改正, 固定测站位置, 根据改正数残差方差加权计算接收机钟差, 得到GEO卫星测距误差; 将GEO卫星观测值纳入SBAS定位解算, 评估GEO卫星测距对定位结果的影响。通过实测数据分析可知, WAAS GEO卫星URE优于1.6 m; BDSBAS 3颗GEO卫星分别存在14.32 m、12.64 m和17.44 m的系统偏差, 经系统性误差改正后, GEO卫星URE优于2.9 m; GAGAN和MSAS GEO卫星URE分别优于13.9 m和3.2 m。当GPS卫星数较少时, 联合GEO卫星观测值进行SBAS解算能够有效减小定位保护级, 提升系统可用性。

关键词: 星基增强系统; GEO 卫星; 用户测距误差; 定位增强

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2022-06-29

DOI:10.13203/j.whugis20210091

文章编号:1671-8860(2024)07-1166-10

SBAS GEO Satellite User Range Error and Position Augmentation Research

JIN Biao^{1,2,3} CHEN Shanshan³ LI Zhulian¹ LI Yuqiang¹ LI Zixiao³

1 Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Space Star Technology, Beijing 100094, China

Abstract: Objectives: Satellite based augmentation system (SBAS) improves the positioning accuracy and integrity by broadcasting ephemeris corrections and associated integrity parameters through geostationary Earth orbit (GEO) satellites. SBAS GEO satellite can also be used as a ranging source together with GPS satellites to improve the system performance. User range error (URE) of the GEO satellite and their effect on positioning results are investigated. URE of SBAS GEO and GPS satellite is determined by weighting the observation residuals which are derived with fixed station coordinates. SBAS messages are applied to correct the orbit and clock errors contained in broadcast ephemeris and the ionosphere delay. Ranging data from GEO satellite is engaged in the SBAS positioning process to explore the impact on positioning accuracy, integrity and availability. Methods: SBAS messages broadcast by wide area augmentation system (WAAS), BeiDou SBAS (BDSBAS), GPS aided GEO augmented navigation (GAGAN) and multi-functional satellite augmentation system (MSAS) and real data from international GNSS service (IGS) stations are applied to perform the assessment. European geostationary navigation overlay service (EGNOS) and system for differential corrections and monitoring (SDCM) are not included because of the absence of the ranging

基金项目:国家自然科学基金(41974041)。

第一作者:金彪,博士,高级工程师,主要从事卫星导航定位完好性和卫星定轨研究。jinbiao366788@126.com

通讯作者:李语强,博士,研究员。lyq@ynao.ac.cn

capability. **Results:** WAAS GEO satellite has the best performance with ranging accuracy better than 1.6 m. The 99.9% error bound is less than 6.8 m while the broadcast user differential range error (UDRE) for the GEO satellite is 7.5 m, which meets the integrity requirement. The 3 GEO satellites of BDSBAS show ranging biases of 14.32 m, 12.64 m and 17.44 m respectively, and the accuracy is better than 2.9 m. After removing the bias, the related 99.9% error bound is 8.60 m, 7.80 m and 11.60 m which suggests an UDRE of 11–12. User range accuracy (URA) of 15 is broadcast in message type 9 for the BDSBAS GEO satellites. URE of the GAGAN GEO satellite is better than 13.9 m and MSAS is better than 3.2 m. The UDRE of GAGAN and MSAS is 14. URE of GPS satellite after augmented by SBAS is also calculated for comparison purpose. Ranging accuracy of GPS is 0.60 m, 0.53 m, 0.21 m and 0.34 m for WAAS, BDS-BAS, GAGAN and MSAS respectively. WAAS GEO satellite is selected to perform the positioning analysis whose UDRE is less than 14 so that it can be weighted properly in the solution. Engagement of GEO satellite in SBAS positioning will lead to lower position dilution of precision (PDOP) and reduce the protection level especially for the blockage circumstance. The system availability of localizer performance with vertical guidance 200 (LPV200) service is improved from 99.984% to 99.997% with collaboration of 3 GEO satellites' observation. **Conclusions:** With sufficient GPS satellites, the combination of GEO satellites will decrease the positioning accuracy because of the relative larger range error, while with less available satellites, combining the GEO satellite data effectively reduces the protection level and improves the system availability. Results suggest that SBAS GEO ranging data should be included in the SBAS solution for aviation users.

Key words: SBAS; GEO satellite; URE; position augmentation

为满足民航用户对全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)导航定位精度、完好性、连续性及可用性的需求,世界各主要国家相继建立了星基增强系统(satellite based augmentation system, SBAS),包括广域增强系统(wide area augmentation system, WAAS)^[1]、欧洲地球同步导航重叠服务(European geostationary navigation overlay service, EGNOS)^[2]、GPS辅助静地增强导航系统(GPS aided GEO augmented navigation, GAGAN)^[3]和多功能卫星增强系统(multi-functional satellite augmentation system, MSAS)^[4]等。中国的北斗星基增强系统(Bei-Dou SBAS, BDSBAS)^[5-6]、俄罗斯的差分改正与监测系统(the system for differential corrections and monitoring, SDCM)、澳大利亚-新西兰的星基增强系统(Australia-New Zealand SBAS, AU-NZ SBAS)^[7]以及韩国增强卫星系统(Korea augmentation satellite system, KASS)^[8]也在建设或测试之中。SBAS利用区域测站数据解算导航卫星星历和电离层改正数及完好性参数^[9]。用户终端利用SBAS信息进行定位解算并生成保护级以判断系统的可用性。

单频SBAS通过GEO卫星向用户播发服务信息,后续双频多星座SBAS^[10]将支持通过倾斜地球同步轨道等卫星提供服务。依据标准^[11-12],

SBAS 地球同步轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星可同时作为测距源向用户提供测距服务。当GNSS可用卫星数较少时,引入GEO卫星作为测距源能够提升定位的连续性和可用性^[13]。

当前,SBAS的研究主要集中在改正数解算^[6,14-15]、用户差分距离误差(user differential range error, UDRE)和双频距离误差参数生成^[16-17]、电离层完好性建模^[18-21]以及定位精度和可用性评估^[5,22]方面。针对SBAS GEO卫星的测距性能、测距完好性以及GEO卫星观测值对定位结果的影响研究较少。研究SBAS GEO卫星用户测距误差(user range error, URE)及其对定位结果的影响,可为SBAS系统设计和民航终端应用提供有益参考。本文利用国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)多模GNSS实验(multi-GNSS experiment, MGEX)数据和自建测站实测数据对SBAS GEO卫星的测距精度及其对定位结果的影响进行研究。

1 数学模型与数据源

1.1 数学模型

本文在进行GEO卫星测距误差分析时,固定测站坐标,同时利用SBAS播发的增强信息对卫星轨道误差、卫星钟差以及电离层延迟进行改

正,对流层延迟采用标准^[11]推荐方法改正。用户测距误差可表示为:

$$\Delta \rho_s^r = \rho_r^s - (\rho_0 - G\Delta E_B + cdt_r - cdt^{s,B} + d_{\text{ion},B} + d_{\text{trop}} + d_{\text{bias}} + \epsilon) \quad (1)$$

$$G = \left[\frac{x^{\text{sat}} - x}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|}, \frac{y^{\text{sat}} - y}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|}, \frac{z^{\text{sat}} - z}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|} \right] \quad (2)$$

$$\Delta E_B = [dx^{\text{sat},B}, dy^{\text{sat},B}, dz^{\text{sat},B}] \quad (3)$$

式中, $\Delta\rho_s^r$ 为测距误差; ρ_r^s 为观测值; r 和 s 分别表示接收机和卫星; ρ_0 为利用广播星历计算的卫星和测站间的几何距离; G 为卫星至测站的视线向量; $(x^{\text{sat}}, y^{\text{sat}}, z^{\text{sat}})$ 为卫星位置; (x, y, z) 为测站位置; r^{sat} 和 r 分别为卫星和测站的位置向量; ΔE_B 为 SBAS 播发的星历改正数; $(dx^{\text{sat}, B}, dy^{\text{sat}, B}, dz^{\text{sat}, B})$ 为星历改正数分量; c 为光速; d_t 为接收机钟差; $dt^{s, B}$ 为 SBAS 播发的相对于广播星历的卫星钟差改正数; $d_{\text{ion}, B}$ 为电离层延迟改正数; d_{trop} 为对流层延迟, 采用模型进行改正^[11]; d_{bias} 为系统性偏差, 主要由 BDS 和 GPS 系统时间差异、GEO 卫星端硬件延迟和星历误差导致, 对于 BDSBAS 系统, 文中对该项进行改正; ϵ 为多径和观测噪声。

利用式(1)得到未消除测站接收机钟差的测距残差,根据式(4)加权计算接收机钟差:

$$dt_r = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \Delta \rho_s^r / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \quad (4)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,\text{flt}}^2 + \sigma_{i,\text{UIRE}}^2 + \sigma_{i,r}^2 + \sigma_{i,\text{trop}}^2 \quad (5)$$

式中, n 为该测站观测到的 GNSS 卫星数; σ_i^2 为卫星 i 的综合误差方差; $\sigma_{i,\text{fl}}^2$ 为卫星星历改正数方差, 可利用 SBAS 播发的卫星 UDRE 参数、信息类型 28 以及相应的降效参数计算; $\sigma_{i,\text{UIRE}}^2$ 为电离层延迟改正数方差, 可利用 GIVE 参数及电离层降效参数计算; $\sigma_{i,r}^2$ 为接收机测量误差的方差; $\sigma_{i,\text{trop}}^2$ 为对流层延迟改正残余误差方差。各参数的具体计算方法可参考文献[9, 11, 21]。得到接收机钟差后, 将其代入式(1)即可得到卫星的 URE。

1.2 数据源

根据各 SBAS 播发的信息,目前 WAAS、BDSBAS、GAGAN 和 MSAS 的 GEO 卫星支持测距,其中 BDSBAS 处于测试状态。EGNOS、SDCM 和 AUS-NZ 在信息中表明其 GEO 卫星不支持测距,因此不对其 GEO 卫星的测距性能进行分析。各 SBAS 的服务状态、GEO 卫星的 PRN 号以及测距能力如表 1 所示。

利用 IGS MGEX 和自建测站数据对 SBAS GEO 卫星的测距精度及其对定位结果的影响进行分析。所选取的测站除能够提供 SBAS GEO

卫星观测数据外,还应处于SBAS服务区域内以进行电离层延迟改正。测站分布如图1所示,其中测站BEIJ为笔者自建站点,位于北京中关村环保科技园,其余为IGS站点。图1同时给出了各SBAS GEO卫星的位置。

表 1 各 SBAS 服务状态及 GEO 卫星测距功能
 Tab. 1 SBAS Status and Ranging Capability

SBAS	卫星编号	服务状态	测距能力
WAAS	131,133,138	正式服务	支持
GAGAN	127,128	正式服务	支持
MSAS	129,137	正式服务	支持
BDSBAS	130,143,144	测试状态	支持
EGNOS	123,126,136	正式服务	不支持
SDCM	125,140,141	测试状态	不支持
AUS-NZ	122	测试状态	不支持

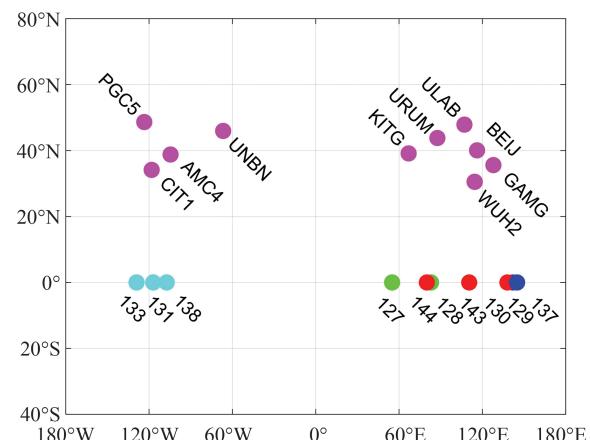


图 1 测站分布与 SBAS GEO 卫星位置
 Fig. 1 Stations Distribution and Position of SBAS GEO Satellites

2 GEO 卫星 URE 分析

SBAS 通过信息类型 9(MT9) 播发 GEO 卫星的位置、位置变化率、时钟和时钟变化率信息，通过信息类型 17(MT17) 播发 GEO 卫星的历书和健康状态，在健康状态中给出了 GEO 卫星是否支持测距，同时在信息类型 2~5(MT2~5) 中播发 GEO 卫星快变改正数和 UDRE 参数。采用 §1.1 中的方法对 GEO 卫星 URE 进行分析。

2.1 WAAS GEO 卫星测距性能

WAAS由美国联邦航空管理局负责建设,满足低至200英尺高度带有垂向引导的定位性能(localizer performance with vertical guidance 200, LPV200)导航规范。WAAS空间段包括3颗GEO卫星,卫星编号分别为131、133和138。WAAS GEO测距信号由地面生成,经时间同步、

码载波频率相位控制及误差改正后,由 GEO 卫星星载转发器向用户播发^[23-25],MSAS 和 GAGAN 也采用此方式向用户提供测距服务。WAAS 信息 MT9 中 GEO 卫星的用户测距精度(user range accuracy, URA)为 0,在 MT4 中播发 GEO 卫星的快变改正数及 UDRE 参数。图 2 为测站 AMC4、CIT1、PGC5 和 UNBN 2019 年年积日 301—360 天共 60 天的卫星测距误差统计结果箱形图。图 2 中,绿色、蓝色和紫色分别为 131、133 和 138 卫星测距误差统计值。各站测距误差均值不为 0,最大偏差值为 UNBN 测站 133 卫星,均值偏差为 2.65 m,标准差为 4.54 m,主要是由于该 GEO 卫星高度角较低,导致测距误差增大。测站 CIT1 的 133 卫星测距精度最高,均值偏差为 0.62 m,标准差为 0.61 m。作为对比,图 2 同时给出了各测站 GPS 卫星的测距精度,以红色表示。可以看出,经 WAAS 改正后,GPS 卫星测距精度优于 0.7 m,无明显系统性偏差。表 2 中给出了各测站卫星测距误差的均值和标准差,同时给出了测站观测卫星的高度角,以字母 E 表示。表 2 中,±号前面表示均值,后面表示标准差。

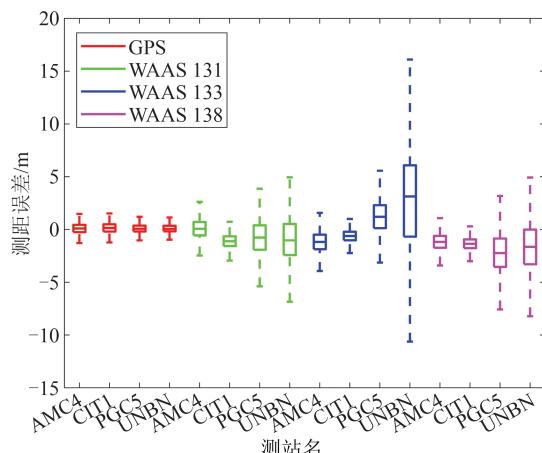


图 2 GPS 和 WAAS GEO 卫星测距误差箱形图
Fig. 2 Box Plot of GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error

绘制测距误差直方图如图 3 所示。可以看出,综合所有测站数据后,WAAS GEO 卫星测距值仍存在均值偏差,偏差绝对值为 0.51~1.25 m,测距精度为 0.85~1.08 m,整体 URE 优于 1.6 m。对 GEO 卫星的测距误差包络进行统计如图 4 所示,131、133 和 138 卫星 99.9% 的测距误差分别为 4.8 m、6.8 m 和 5.7 m。评估时段内 WAAS GEO 卫星 UDRE 指数(UDRE index, UDREI)最小值为 10,对应的 UDRE 为 7.5 m,能够实现对测距误差 99.9% 的包络,满足完好性要求。图 3 和图 4

同时给出了经 WAAS 改正后的 GPS 测距误差统计结果。GPS 测距误差均值为 0.08 m,标准差为 0.60 m,99.9% 测距误差包络为 3.2 m。评估时段内 GPS 卫星 UDREI 最小值为 5,均值为 5.4,对应 UDRE 为 3.0~3.75 m。可以看出 WAAS 较好地平衡了系统服务的完好性和可用性。

表 2 GPS 和 WAAS GEO 卫星测距误差统计

Tab. 2 Statistics of GPS and WAAS GEO Satellites

Ranging Error

站点	GPS/m	131 卫星/m	133 卫星/m	138 卫星/m
AMC4	0.07 ± 0.62 ($E=43.25^\circ$)	0.08 ± 1.08 ($E=38.32^\circ$)	-1.18 ± 1.28 ($E=45.00^\circ$)	-1.16 ± 1.02
CIT1	0.12 ± 0.61 ($E=50.34^\circ$)	-1.11 ± 0.70 ($E=48.63^\circ$)	-0.62 ± 0.61 ($E=48.67^\circ$)	-1.35 ± 0.63
PGC5	0.05 ± 0.70 ($E=33.85^\circ$)	-0.75 ± 2.07 ($E=33.93^\circ$)	1.20 ± 1.70 ($E=32.06^\circ$)	-2.15 ± 2.33
UNBN	0.08 ± 0.56 ($E=18.09^\circ$)	-1.00 ± 2.27 ($E=10.19^\circ$)	2.65 ± 4.54 ($E=23.90^\circ$)	-1.61 ± 2.40

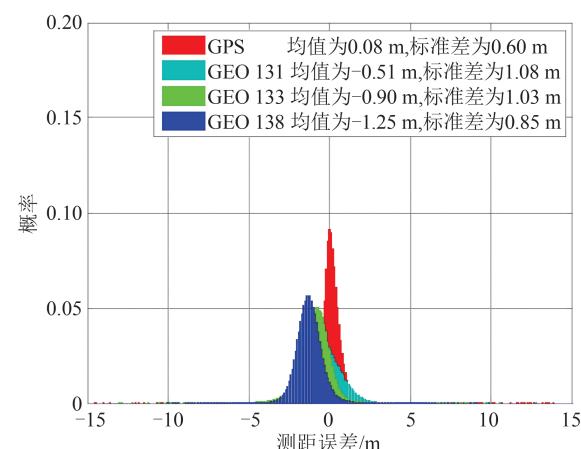


图 3 GPS 和 WAAS GEO 卫星测距误差直方图
Fig. 3 Histogram of GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error

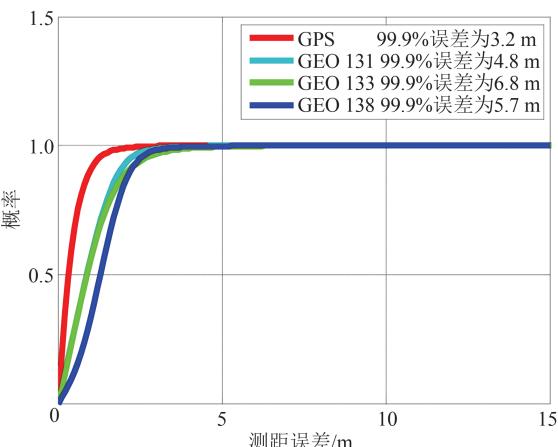


图 4 GPS 和 WAAS GEO 卫星测距误差累积概率分布
Fig. 4 Cumulative Distribution Function of GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error

2.2 BDSBAS GEO 卫星测距性能

BDSBAS 空间段由 3 颗 GEO 卫星构成, 编号分别为 130、143 和 144, 目前均已在轨播发 SBAS 信息^[26], 且每 6 s 播发 MT0 信息表明系统处于测试状态。与 WAAS 不同, BDSBAS GEO 卫星直接利用星上载荷生成测距信号。BDSBAS MT9 中 GEO 卫星 URA 为 15, 未在 MT2~5 中播发 GEO 卫星的改正数和 UDRE 参数。评估站点为 BEIJ、GAMG、ULAB、URUM 和 WUH2。

图 5 为上述测站 2021 年年积日 041—100 共 60 d 的卫星测距误差统计结果。图 5 中, 红色表示 GPS 卫星, 绿色、蓝色和紫色分别表示 PRN 130、143 和 144 卫星测距误差的统计值, 具体数值及各测站卫星高度角见表 3。BEIJ 和 GAMG 站点可同时记录 3 颗 GEO 卫星的观测数据, 其他站点当前只记录 PRN 130 卫星的观测数据。可以看出, 经 BDSBAS 改正后, GPS 卫星测距精度优于 0.66 m。BDSBAS GEO 卫星存在测距偏差。该偏差主要由三部分组成, 一是 BDS 与 GPS 系统时间的偏差^[27], 由于 BDSBAS GEO 测距信号由卫星直接生成, 系统时间差异会导致测距偏

差; 二是 GEO 卫星端 GPS L1 信号的硬件延迟^[28]; 三是 GEO 卫星星历误差^[29-30]。各测站 GEO 卫星测距精度存在差异, 其中 BEIJ 和 GAMG 测站 3 颗 GEO 卫星的测距误差超过 2.0 m, 其他测站 GEO 卫星测距精度优于 1.5 m。进一步分析发现, BEIJ 和 GAMG 站接收机型号为 SEPT POLARX5, 其余测站为 JAVAD TRE_3。

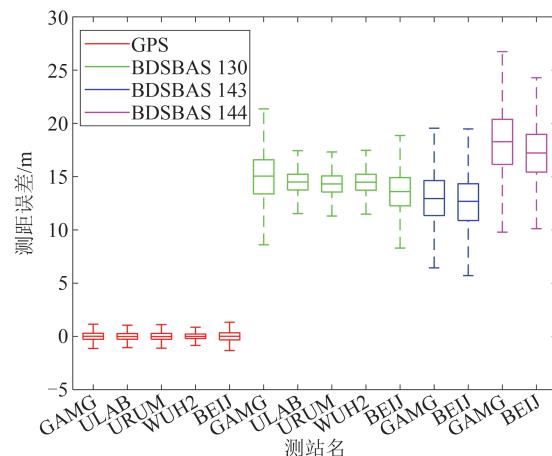


图 5 GPS 和 BDSBAS GEO 卫星测距误差箱形图
Fig. 5 Box Plot of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

表 3 GPS 和 BDSBAS GEO 卫星测距误差统计

Tab. 3 Statistics of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

站点	GPS/m	130 卫星/m (E=)	143 卫星/m (E=)	144 卫星/m (E=)
BEIJ	-0.03±0.66	13.71±2.00 (E=38.75°)	12.36±2.33 (E=43.19°)	16.95±2.55 (E=28.67°)
GAMG	0.01±0.56	14.89±2.50 (E=48.03°)	12.93±2.43 (E=44.62°)	17.93±3.25 (E=23.46°)
ULAB	0.01±0.44	14.42±1.13 (E=27.65°)		
URUM	0.00±0.44	14.19±1.13 (E=18.82°)		
WUH2	0.01±0.41	14.37±1.42 (E=45.87°)		

绘制 2021 年年积日 080—089 BEIJ 和 ULAB 测站 130 卫星测距误差, 如图 6(a) 所示, 红色和蓝色分别表示 BEIJ 和 ULAB 的测距误差。ULAB 站时段平均高度角为 27.65°, 信号功率为 43.2 dB-Hz, BEIJ 站高度角为 38.75°, 信号功率为 45.7 dB-Hz, 排除了卫星高度角和信号功率的影响。作为对比, 图 6(b) 给出了 GPS 卫星的测距误差, 可以看出两测站 GPS 测距精度相当。导致 BDSBAS GEO 卫星测距精度不一致的原因可能与接收机对 BDSBAS 信号的处理策略有关。

对 BDSBAS GEO 卫星测距误差中的系统性

偏差进行改正, 即式(1)中的 d_{bias} 项。本文解算的 130、143 和 144 卫星系统性偏差分别为 14.32 m、12.64 m 和 17.44 m。经改正后, BDSBAS GEO 和 GPS 卫星的测距误差直方图如图 7 所示, 其中 GPS 卫星的测距精度优于 0.53 m, GEO 卫星的测距精度分别优于 1.92 m、2.30 m 和 2.87 m。对各卫星的测距误差包络进行统计如图 8 所示, GPS 卫星 99.9% 的测距误差为 3.30 m, 该时段内, GPS 卫星 UDREI 最大值为 11, 最小值为 2, 均值为 4.0, 对应测距误差为 2.25 m, 可见 BDSBAS 播发的 GPS 卫星 UDRE 值偏小。GEO 卫星 99.9%

的测距误差分别为 8.60 m、7.80 m 和 11.60 m, 对应 UDREI 的范围为 11~12。

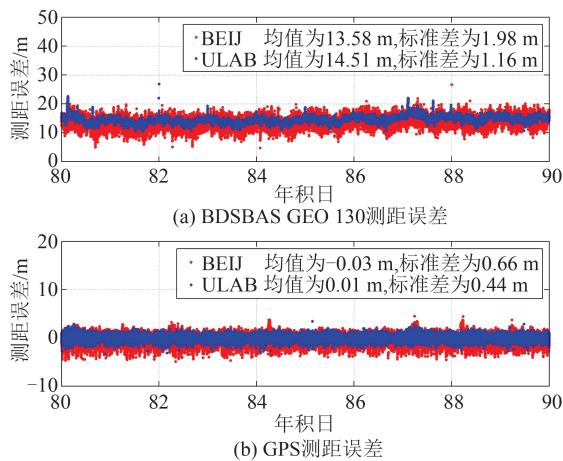


图 6 BEIJ 和 ULAB 测站 BDSBAS GEO 和 GPS 卫星测距误差

Fig. 6 BDSBAS GEO and GPS Satellites Ranging Error of BEIJ and ULAB Stations

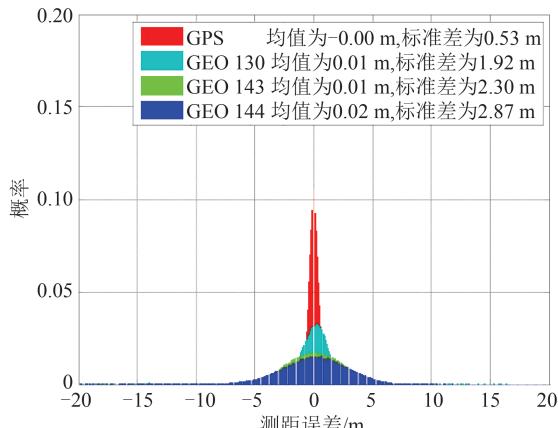


图 7 GPS 和 BDSBAS GEO 卫星测距误差直方图

Fig. 7 Histogram of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

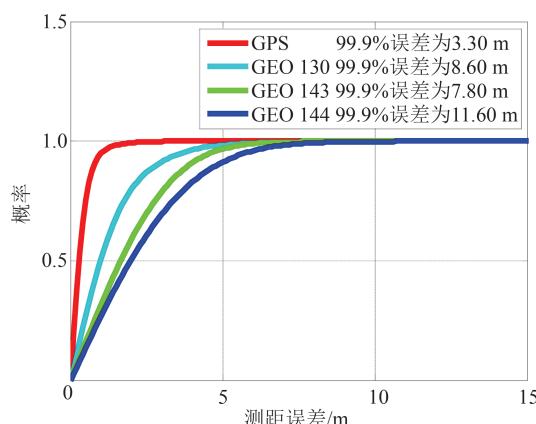


图 8 GPS 和 BDSBAS GEO 卫星测距误差累积概率分布

Fig. 8 Cumulative Distribution Function of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

2.3 其他 SBAS GEO 卫星测距性能

GAGAN 由印度太空研究组织和印度机场管理局负责建设, 提供 I 类具备垂向引导的进近 (approach with vertical guidance-I level, APV-I) 服务。GAGAN 空间段包括 2 颗 GEO 卫星, 编号分别为 127 和 128, 支持测距功能, MT9 中 URA 为 14, MT4 中含有 GEO 卫星的改正数和 UDRE 参数。GAGAN 服务区域内当前可获取数据测站为 KITG。针对该测站 2019 年年积日 301—360 GEO 和 GPS 卫星的测距误差进行分析, 结果如图 9 所示。PRN 127 和 128 卫星测距误差均值分别为 -0.92 m 和 -1.02 m , 标准差分别为 3.56 m 和 13.93 m , 128 卫星测距精度较低。经 GAGAN 改正后的 GPS 测距精度优于 0.21 m 。GPS 卫星 99.9% 的测距误差为 3.3 m , 127、128 卫星分别为 16.0 m 和 39.1 m 。评估时段内, GAGAN 播发的 GPS UDREI 均值为 5.7 , 对应的 UDRE 为 3.75 m , GEO 卫星 UDREI 为 14 , 满足 SBAS UDRE 的完好性要求。

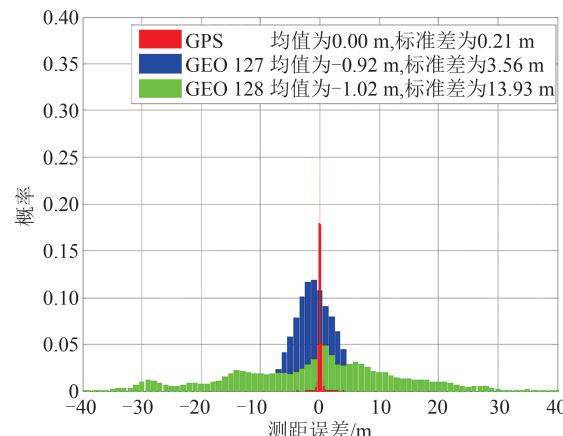


图 9 GPS 和 GAGAN GEO 卫星测距误差直方图

Fig. 9 Histogram of GPS and GAGAN GEO Satellites Ranging Error

MSAS 由日本民航局负责建设, 提供 $0.1 \text{ nautical mile}$ 的所需导航性能 (required navigation performance- $0.1 \text{ nautical mile}$, RNP 0.1) 服务。与 WAAS 和 GAGAN 不同, MSAS 通过 1 颗 GEO 卫星转发两路 SBAS 信号, 编号分别为 129 和 137, 支持测距, URA 均为 14, 同样利用 MT4 播发 GEO 卫星的改正数和 UDRE 参数。利用 GAMG 站 2019 年年积日 301—360 数据对 MSAS GEO 卫星的测距精度进行分析。由于该时段内 137 卫星数据不完整且粗差较多, 主要对 129 卫星进行评估, 结果如图 10 所示。129 卫星测距误差均值为 1.94 m , 标准差为 2.53 m , GPS

测距误差均值为 0.01 m, 标准差为 0.34 m。129 卫星 99.9% 的测距误差为 10.6 m, GPS 为 3.2 m。评估时段内 GEO 卫星 UDREI 为 14, GPS UDREI 均值为 7.25, 对应的 UDRE 为 5.25 m, 同样满足 SBAS UDRE 的完好性要求。

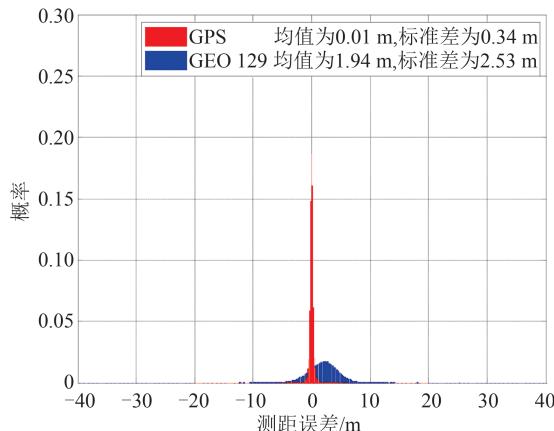


图 10 GPS 和 MSAS GEO 卫星测距误差直方图

Fig. 10 Histogram of GPS and MSAS GEO Satellites Ranging Error

3 GEO 卫星观测值对定位的影响

GEO 卫星可作为测距源参与 SBAS 定位解算。根据§2.2 分析, 目前 BDSBAS GEO 卫星未播发相应的 UDRE 信息且 URA 为 15, GAGAN 和 MSAS GEO 卫星 UDRE 值均为 14, 在 SBAS 定位过程中无法对 GEO 卫星观测数据进行合理加权, 因此采用 WAAS GEO 卫星的观测数据进行分析。

图 11 为 CIT1 测站 2019 年年积日第 309 天垂直方向定位结果, 蓝色点为定位误差, 红色点为保护级, 图 11(a) 为仅使用 GPS 卫星进行 SBAS 定位, 图 11(b) 为联合使用 GPS 和 3 颗 GEO 卫星进行解算的结果。图 12 为两种解算方式对应的位置精度因子(position dilution of precision, PDOP) 值, 蓝色为 GPS 定位的 PDOP 值, 红色表示联合 GEO 定位的 PDOP 值。从图 11 中可以看出在年积日第 309.6 天附近时, 仅用 GPS 定位时卫星数较少导致 PDOP 值变大, 垂直保护级超过 50 m; 联合 GEO 卫星定位有效降低了 PDOP 值, 提升了系统可用性。

对 4 个测站共 60 天的定位误差、保护级进行统计。图 13 为仅使用 GPS 时的垂直方向 Stanford 图。图 13 中, MI(misleading information) 表示误导信息, HMI(hazardously misleading information) 表示危险误导信息。可以看出, 定位误差

均小于保护级, 未发生完好性风险事件, 但垂直保护级部分超过 35 m, 导致 LPV200 服务不可用。评估时段内 WAAS LPV200 服务可用性为 99.984%。

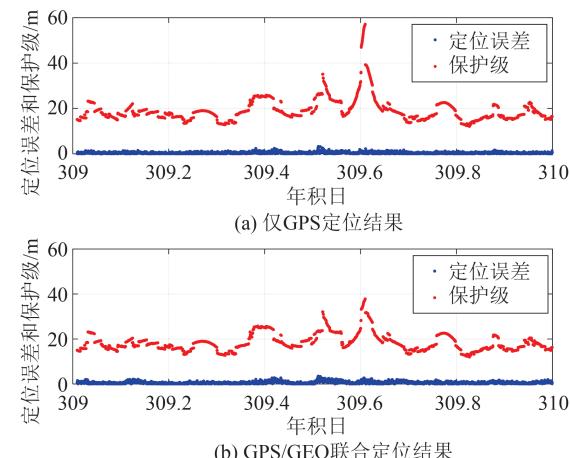


图 11 CIT1 站 GPS 定位与 GPS/GEO 联合定位的垂直定位误差和保护级

Fig. 11 Vertical Error and Protection Level of CIT1 Derived with and Without GEO Satellites

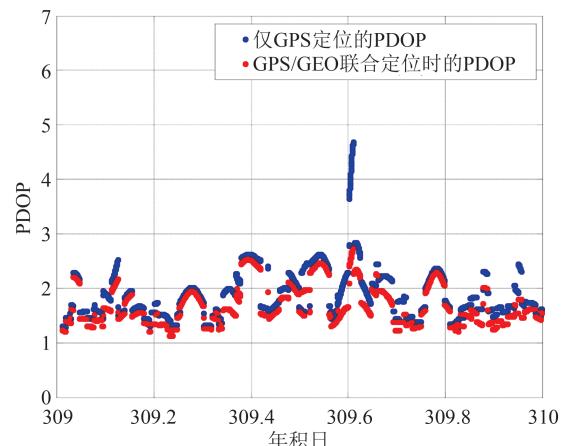


图 12 CIT1 站 GPS 定位与 GPS/GEO 联合定位 PDOP 值

Fig. 12 PDOP of CIT1 Derived with and Without GEO Satellites

图 14 为联合使用 3 颗 GEO 和 GPS 卫星定位的垂直方向 Stanford 图。GEO 卫星参与定位能够明显减小定位保护级, LPV200 可用性由 99.984% 提升至 99.997%。WAAS GEO 卫星参与 SBAS 定位解算能够有效提升系统可用性。

为分析 GEO 卫星数量对定位精度和可用性的影响, 分别联合 3 颗、1 颗 GEO 卫星以及仅使用 GPS 进行 SBAS 定位。图 15 为使用不同数量 GEO 卫星观测值对定位精度的影响, 红色、绿色、蓝色分别为使用 3 颗、1 颗和不使用 GEO 卫星时的定位精度, 纵坐标为定位误差, 横坐标为测站

名。可以看出,仅使用 GPS 卫星定位时精度最高,三维精度优于 0.9 m,联合 1 颗 GEO 卫星的定位精度优于同时使用 3 颗 GEO 卫星的结果,即 GEO 卫星数量的增加会降低定位精度。根据 §2.1 分析,主要是因为 GEO 卫星的测距精度相对于 GPS 较低,当 GPS 数量较多时,增加 GEO 卫星对精度因子值改善有限,导致 GEO 卫星参与定位时精度有所降低。

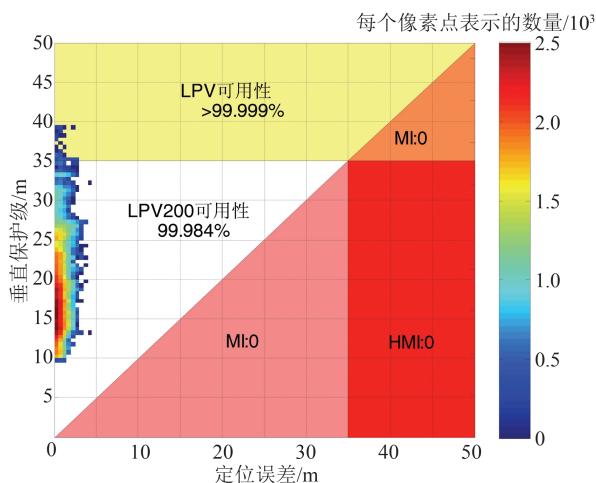


图 13 GPS SBAS 定位垂直方向 Stanford 图

Fig. 13 Vertical Stanford Diagram of SBAS Positioning Result with only GPS Satellites

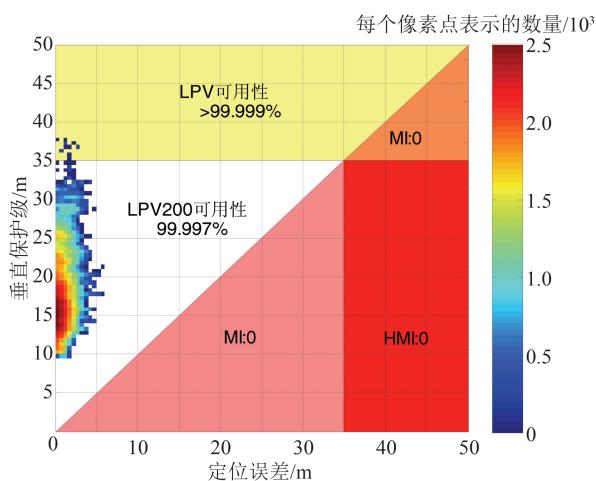


图 14 GPS/GEO 联合 SBAS 定位垂直方向 Stanford 图
Fig. 14 Vertical Stanford Diagram of SBAS Positioning Result with GPS and GEO Satellites

图 16 为 3 种解算方式下 LPV200 服务的可用性,与图 15 类似,红色、绿色、蓝色分别为使用 3 颗、1 颗和不使用 GEO 卫星时的可用性。相对于仅使用 GPS 卫星进行定位,GEO 卫星的加入能够有效提升系统可用性,且联合 3 颗 GEO 卫星时可用性最高。其原因是在仅使用 GPS 定位时,部分时段 GPS 可用卫星数较少导致定位保护级超过保护门限,而 GEO 卫星的加入能够有效改善

PDOP 值,减小定位保护级,提升系统的可用性。

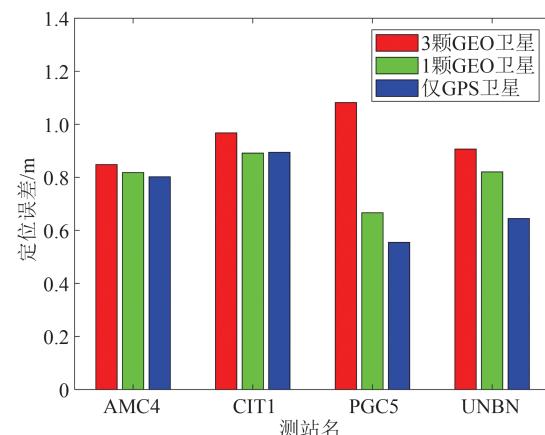


图 15 不同数量 GEO 卫星对 SBAS 定位精度的影响

Fig. 15 SBAS Positioning Accuracy with Different Numbers of GEO Satellites

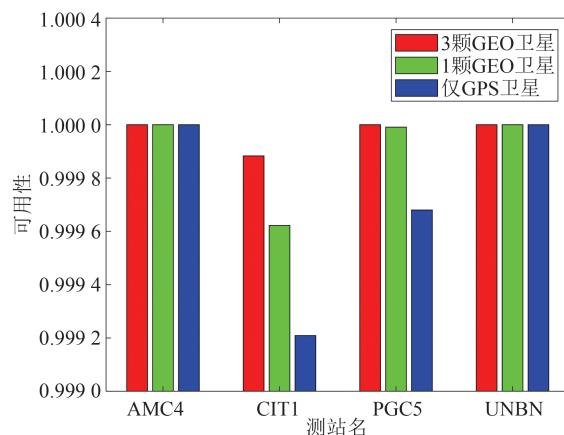


图 16 不同数量 GEO 卫星对 SBAS 定位可用性的影响

Fig. 16 SBAS Positioning Availability with Different Numbers of GEO Satellites

4 结语

本文利用实测数据对现有 SBAS GEO 卫星的测距性能进行研究。WAAS GEO 卫星 URE 精度优于 1.6 m,需注意的是,不同测站 WAAS GEO 卫星存在一定的均值偏差。BDSBAS 3 颗 GEO 卫星均支持测距功能,测距精度优于 2.9 m,但分别存在 14.32 m、12.64 m 和 17.44 m 的均值偏差,该偏差主要由 BDS 与 GPS 间的时间同步差异、卫星端硬件延迟以及 GEO 星历误差导致。GAGAN 和 MSAS GEO 卫星的整体测距精度分别优于 13.9 m 和 3.2 m。经各 SBAS 系统改正后的 GPS 卫星测距误差均优于 1.0 m,无明显系统性偏差。

利用 WAAS 观测数据分析了 GEO 卫星作为测距源时对 SBAS 定位结果的影响:当 GPS 卫星

数较少时,GEO卫星的加入能够有效改善PDOP值,降低定位保护级,提升系统可用性;当GPS卫星数量较多时,由于GEO卫星测距精度较GPS低,GEO卫星参与解算会导致定位精度降低。对于航空用户,建议将WAAS GEO卫星纳入SBAS定位解算以提升系统的可用性。

参考文献

- [1] Walter T, Shallberg K, Altshuler E, et al. WAAS at L5[J]. *Navigation*, 2018, 65:581-600.
- [2] Tabti L, Kahloche S, Benadda B, et al. Improvement of Single-Frequency GPS Positioning Performance Based on EGNOS Corrections in Algeria[J]. *Journal of Navigation*, 2020, 73(4):846-860.
- [3] Dammalage T, Silva D D, Satirapod C. Performance Analysis of GPS Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) over SRI Lanka[J]. *Engineering Journal*, 2017, 21:305-314.
- [4] Saito S. MSAS System Development [C]//ICAO GBAS SBAS Implementation Workshop, Seoul, 2019.
- [5] Chen S S, Jin B, Li D J, et al. Study on the Prediction Method of Single and Dual Frequency Service Area for BDSBAS [C]//China Satellite Navigation Conference, Singapore, USA, 2019.
- [6] Zhao L Q, Hu X G, Tang C P, et al. Generation of DFMC SBAS Corrections for BDS-3 Satellites and Improved Positioning Performances [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(3):702-714.
- [7] Wu J Z, Wang K, Ahmed E. Preliminary Performance Analysis of a Prototype DFMC SBAS Service over Australia and Asia-Pacific [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(6):1329-1341.
- [8] Lee E. System Development-KASS [C]// ICAO GBAS SBAS Implementation Workshop, Seoul, 2019.
- [9] 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. (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.)
- [10] EUROCAE WG-62. Minimum Operational Performance Standard for Galileo / Global Positioning System / Satellite Based Augmentation System Airborne Equipment: ED-259 [S]. Saint-Denis, France: EUROCAE, 2019.
- [11] RTCA SC-159. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment: RTCA DO-229E [S/OL]. [2021-01-01]. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?item_s_key=00233409.
- [12] ICAO, International Standards and Recommended Practices Annex 10 Vol. I. Radio Navigation Aids: ISBN 978-92-9258-504-4 [S]. Quebec, Canada: ICAO, 2018.
- [13] Fortin M A, Guay J C, Landry R J. Single Frequency WAAS Augmentation Observations (L1 vs. L5) on a Ground Based GPS L1 C/A Solution[J]. *Positioning*, 2014, 5:70-83.
- [14] Wu J T, Peck S. An Analysis of Satellite Integrity Monitoring Improvement for WAAS [C]// The 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, OR, 2002.
- [15] Blanch J, Walter T, Enge P. A Clock and Ephemeris Algorithm for Dual Frequency SBAS [C]// The 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, 2011.
- [16] Blanch J, Walter T, Enge P. Evaluation of a Covariance-Based Clock and Ephemeris Error Bounding Algorithm for SBAS [C]//The 27th International Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Tampa, FL, 2014.
- [17] Shao B, Ding Q, Wu X B. Estimation Method of SBAS Dual Frequency Range Error Integrity Parameter[J]. *Satellite Navigation*, 2020(1): 9.
- [18] Walter T, Hansen A, Blanch J, et al. Robust Detection of Ionospheric Irregularities[J]. *Navigation*, 2001, 48 (2): 89-100.
- [19] Sparks L, Blanch J, Pandya N. Estimating Ionospheric Delay Using Kriging: 1. Methodology [J]. *Radio Science*, 2011, 46(6): 1-13.
- [20] Sparks L, Blanch J, Pandya N. Estimating Ionospheric Delay Using Kriging: 2 Impact on Satellite Based Augmentation System Availability[J]. *Radio Science*, 2011, 46(6): 1-10.
- [21] Jin B, Chen S S, Li D J, et al. Ionospheric Correlation Analysis and Spatial Threat Model for SBAS in China Region [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(12): 2873-2887.
- [22] Blanch J, Walter T, Phelts R, et al. Near Term Improvements to WAAS Availability [C]//The 2013 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA , 2013.
- [23] Grewal M S, Brown W, Evans S, et al. Ionospheric Delay Validation Using Dual Frequency Signal from GPS at GEO Uplink Subsystem (GUS) Locations

- [C]//The Institute of Navigation 12th International Technical Meeting, Alexandria, VA, 1999.
- [24] Grewal M S, Brown W, Lucy R. Test Results of Geostationary Satellite (GEO) Uplink Sub-System (GUS) Using GEO Navigation Payloads, Monographs of the Global Positioning System [J]. *Navigation*, 1999, 4:339–348.
- [25] Grewal M S, Hsu P, Plummer T W. A New Algorithm for WAAS GEO Uplink Subsystem (GUS) Clock Steering [C]//The 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, Oregon, 2003.
- [26] Cai Hongliang, Meng Yinan, Geng Tao, et al. Initial Results of Precise Orbit Determination Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations for BDS-3 Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1493–1500. (蔡洪亮, 孟轶男, 耿涛, 等. 北斗三号卫星星地星间联合精密定轨初步结果[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(10): 1493–1500.)
- [27] Lu Jun, Su Chengeng, Hu Min, et al. Analysis of the Beidou Navigation Satellite System: Interoperability and Performance [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51(1): 019504. (卢鋆, 宿晨庚, 胡敏, 等. 北斗三号系统互操作实现与性能分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 019504.)
- [28] Xu Lei, Chang Guobin, Gao Jingxiang, et al. Estimation of BDS DCB Based on Closure Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 520–529. (徐磊, 常国宾, 高井祥, 等. 附加闭合差约束的 BDS 频间偏差估计模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 520–529.)
- [29] Yang Jianhua, Tang Chengpan, Song Yezhi, et al. Analysis of Signal-in-Space Ranging Error of GNSS Navigation Message [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2021, 51(1): 019508. (杨建华, 唐成盼, 宋叶志, 等. GNSS 导航电文空间信号测距误差分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 019508.)
- [30] Kong Yao, Sun Baoqi, Yang Xuhai, et al. Precision Analysis of BeiDou Broadcast Ephemeris by Using SLR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(6): 831–837. (孔垚, 孙保琪, 杨旭海, 等. 利用 SLR 数据进行北斗卫星广播星历精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(6): 831–837.)