



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: SBAS GEO 卫星 URE 精度及定位增强研究
作者: 金彪, 陈姗姗, 李祝莲, 李语强, 李子潇
收稿日期: 2021-08-23
网络首发日期: 2021-09-16
引用格式: 金彪, 陈姗姗, 李祝莲, 李语强, 李子潇. SBAS GEO 卫星 URE 精度及定位增强研究. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20210915.1217.007.html>



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。

引用格式：

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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210091 (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, 2021, 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,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(SBAS) GEO 卫星用户测距误差(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。本文利用 WAAS、BDSBAS、GAGAN 和 MSAS 等增强系统的 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，WAAS GEO 卫星 URE 优于 1.6m；BDSBAS 3 颗 GEO 卫星分别存在 14.32m、12.64m 和 17.44m 的系统偏差，经系统性误差改正后，GEO 卫星 URE 优于 2.9m；GAGAN 和 MSAS GEO 卫星 URE 分别优于 13.9m 和 3.2m。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

文献标志码：A

为满足民航用户对 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(SBAS)，包括 WAAS^[1]、EGNOS^[2]、GAGAN^[3] 和 MSAS^[4] 等。我国 BDSBAS^[5,6]、俄罗斯的 SDCM、澳大利亚的 AUS-NZ^[7] 以及韩国的 KASS^[8] 系统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(DFMC) SBAS^[10] 将支持通过 IGSO 等卫星提供服务。依据标准^[11,12]，SBAS 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^[16,14,15]、用户差分距离误差(UDRE)和双频距离误差(DFRE)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。开展 SBAS GEO 卫星用户测距误差(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 IGS MGEX 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。文章第 1 部分对数学模型和选取的数据

源进行描述；第 2 部分分析了各 SBAS GEO 卫星的测距精度；第 3 部分研究了将 GEO 卫星观测值纳入 SBAS 解算对定位精度、完好性和可用性的影响；第 4 部分为结论。

1 数学模型和数据源

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：

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

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{x^{\text{sat}} - x}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|}, \frac{y^{\text{sat}} - y}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|}, \frac{z^{\text{sat}} - z}{|\mathbf{r}^{\text{sat}} - \mathbf{r}|} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Delta E_B = [\Delta x^{\text{sat,B}}, \Delta y^{\text{sat,B}}, \Delta z^{\text{sat,B}}] \quad (3)$$

其中， $\Delta \rho_s^r$ 为测距误差， ρ_s^r 为观测值， $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{s}$ 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， $\mathbf{G}$ 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， $\mathbf{r}^{\text{sat}}$ 和 $\mathbf{r}$ 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，

收稿日期：2021-08-23

项目资助：国家自然科学基金(41974041)。

第一作者：金彪，博士生，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

$(dx^{\text{sat,B}}, dy^{\text{sat,B}}, dz^{\text{sat,B}})$ 为星历改正数分量, c 为光速, dt_r 为接收机钟差, $dt^{\text{s,B}}$ 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)得到的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:

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

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

n 为该测站观测到的 GNSS 卫星数, σ_i^2 为测站综合误差方差, $\sigma_{i,\text{flt}}^2$ 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 (Message Type 28, MT28) 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, $\sigma_{i,\text{trop}}^2$ 为对流延迟改正残余误差方差。各参数的具体计算方法可参考^[9,11,21]。得到接收机钟差后, 将其代入式(1)即可得到卫星的用户测距误差。

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 号以及测距能力如下表所示:

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

SBAS	PRN	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
--------	-----	------	-----

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。

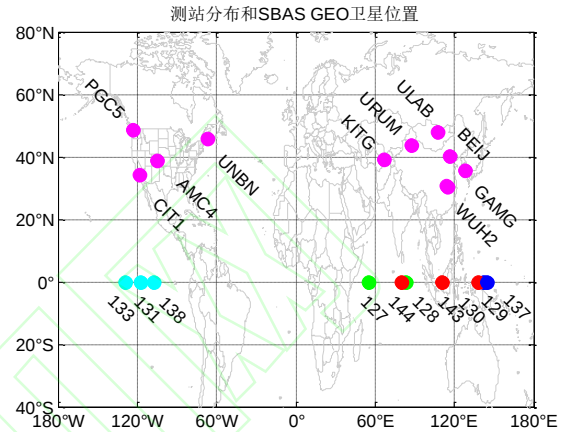


图 1 测站分布及 SBAS GEO 卫星位置
Fig.1 Stations Distribution and Position of SBAS GEO Satellites

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 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 (FAA) 负责建设, 满足 LPV200 导航规范。WAAS 空间段包括 3 颗 GEO 卫星, PRN 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 (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 301 天至 360 天共 60 天的卫星测距误差统计结果箱型图。图中绿色、蓝色

和紫色分别为PRN131、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PRN133卫星，均值偏差为2.65m，标准差为4.54m，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PRN133卫星测距精度最高，均值偏差为0.62m，标准差为0.61m。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0.7m，无明显系统性偏差。具体统计结果见表2，表中同时给出了测站观测卫星的高度角，以字母E表示。

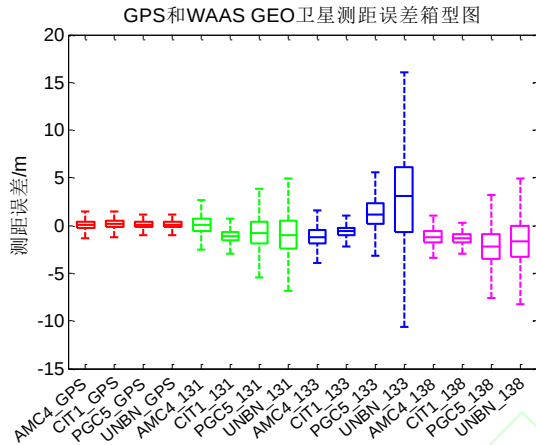


图 2 GPS和WAAS GEO卫星测距误差箱形图
Fig.2 Box Plot of GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error

表 2 GPS和WAAS GEO卫星测距误差统计值
Tab.2 Statistics of GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error

站点	GPS/m	PRN131/m	PRN133/m	PRN138/m
AMC4	0.07±0.62	0.08±1.08 E=43.25°	-1.18±1.28 E=38.32°	-1.16±1.02 E=45.00°
CIT1	0.12±0.61	-1.11±0.70 E=50.34°	-0.62±0.61 E=48.63°	-1.35±0.63 E=48.67°
PGC5	0.05±0.70	-0.75±2.07 E=33.85°	1.20±1.70 E=33.93°	-2.15±2.33 E=32.06°
UNBN	0.08±0.56	-1.00±2.27 E=18.09°	2.65±4.54 E=10.19°	-1.61±2.40 E=23.90°

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0.51m~1.25m，测距精度为0.85~1.08m，整体URE优于1.6m。对GEO卫星的测距误差包络进行统计如图4所示，PRN131、133和138卫星99.9%的测距误差分别为4.8m、6.8m和5.7m。评估时段内WAAS GEO卫星UDREI最小值为10，对应的UDRE为7.5m，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0.08m，标准差为0.60m，99.9%测距误差包络为3.2m。评估时段内GPS卫星UDREI最小值为5，均值为5.4，对应UDRE为3.0m~3.75m。

可以看出WAAS较好的平衡了系统服务的完好性和可用性。

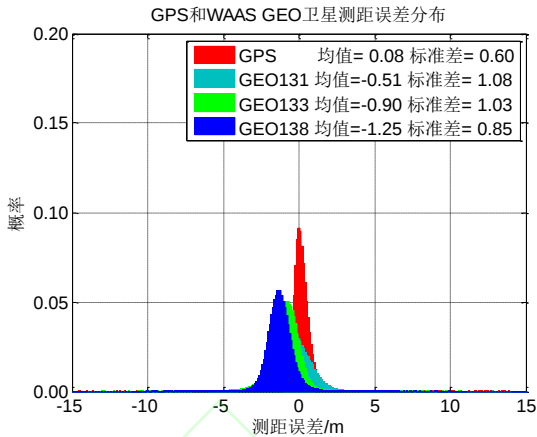


图 3 GPS和WAAS GEO卫星测距误差直方图
Fig.3 GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error Histogram

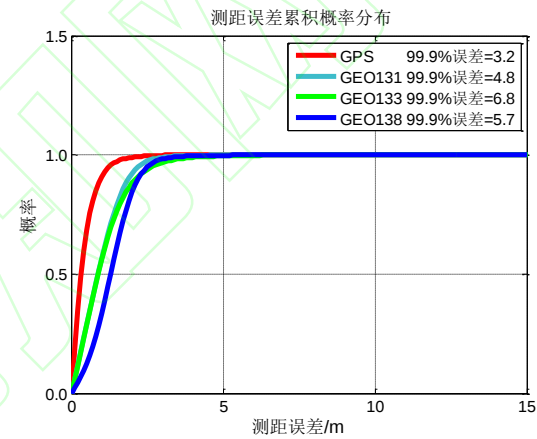


图 4 GPS和WAAS GEO卫星测距误差累积概率分布
Fig.4 Cumulative Distribution Function of GPS and WAAS GEO Satellites Ranging Error

2.2 BDSBAS GEO卫星测距性能

BDSBAS空间段由3颗GEO卫星构成，PRN分别为PRN130、143、和144，目前均已在轨播发SBAS信息^[26]，且每6秒播发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信息中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041天至100天共60天的卫星测距误差统计结果。图中红色表示GPS卫星，绿色、蓝色和紫色分别表示PRN130、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PRN130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0.66m。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2.0m,其他测站GEO卫星测距精度优于1.5m。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。

绘制2021年080至089天BEIJ和ULAB测站PRN130卫星测距误差如图6上半部分所示,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43.2dBHz, BEIJ站高度角为38.75°,信号功率为45.7dBHz,排除了卫星高度角和信号功率的影响。作为对比,图6下半部分给出了GPS卫星的测距误差,可以看出两测站GPS测距精度相当。笔者分析导致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,后续将进一步开展分析。

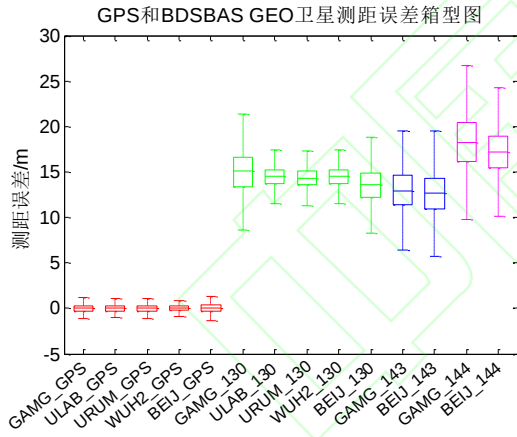


图 5 GPS和BDSBAS GEO卫星测距误差箱形图
Fig.5 Box Plot of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

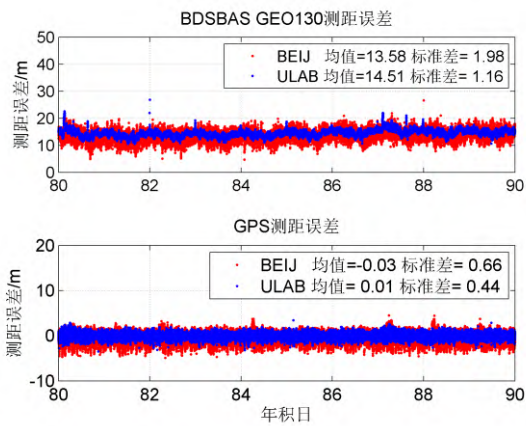


图 6 BEIJ和ULAB测站BDSBAS GEO和GPS卫星测距误差
Fig.6 BDSBAS GEO and GPS Satellites Ranging Error of Station BEIJ and ULAB

表 3 GPS和BDSBAS GEO卫星测距误差统计值
Tab.3 Statistics of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

站点	GPS/m	PRN130/m	PRN143/m	PRN144/m
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°	--	--

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PRN130、143和144卫星系统性偏差分别为14.32m、12.64m和17.44m。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0.53m,GEO卫星的测距精度分别优于1.92m、2.3m和2.87m。同样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3.3m,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2.25m。GEO卫星99.9%的测距误差分别为8.60m、7.80m和11.60m,对应UDREI的范围为11~12。

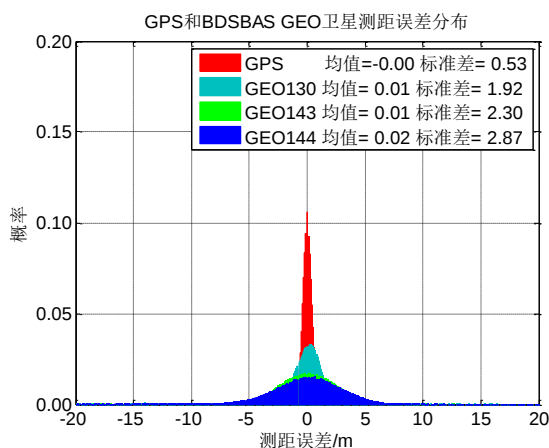


图 7 GPS和BDSBAS GEO卫星测距误差直方图
Fig.7 GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error Histogram

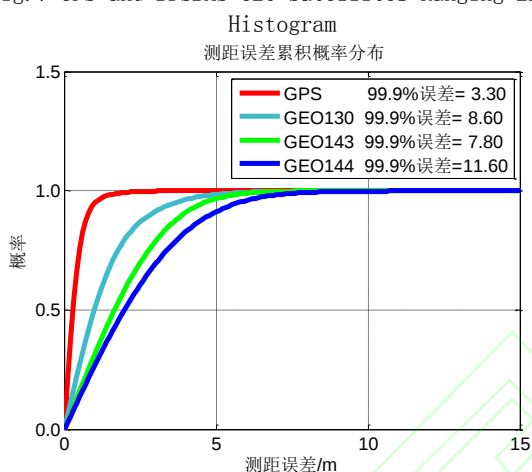


图 8 GPS和BDSBAS GEO卫星测距误差累积概率分布
Fig.8 Cumulative Distribution Function of GPS and BDSBAS GEO Satellites Ranging Error

2.3 其他SBAS GEO卫星测距性能

GAGAN由印度太空研究组织 (ISRO) 和印度机场管理局 (AAI) 负责建设, 提供APV-I服务。GAGAN空间段包括2颗GEO卫星, PRN分别为127和128, 支持测距功能, MT9信息中URA为14, MT4信息中含有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301至360天GEO和GPS卫星的测距误差进行分析, 结果如图9所示。PRN127和128卫星测距误差均值分别为-0.92m和-1.02m, 标准差为3.56m和13.93m, PRN128卫星测距精度较低。经GAGAN改正后的GPS测距精度优于0.21m。GPS卫星99.9%的测距误差为3.3m, PRN127和128卫星分别为16.0和39.1m。评估时段内, GAGAN播发的GPS UDREI均值为5.7, 对应UDRE为3.75m, GEO卫星UDREI为14, 满足SBAS UDRE的完好性要求。

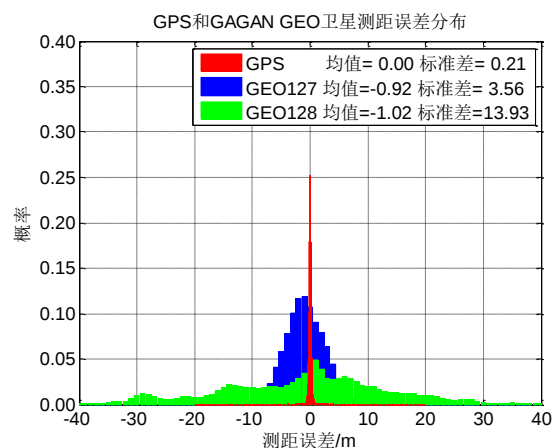


图 9 GPS和GAGAN GEO卫星测距误差直方图
Fig.9 GPS and GAGAN GEO Satellites Ranging Error Histogram

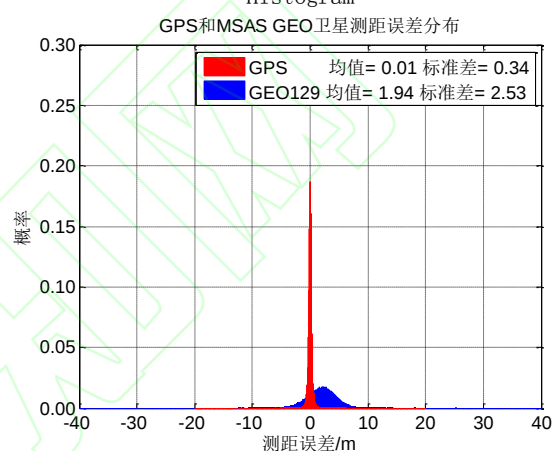


图 10 GPS和MSAS GEO卫星测距误差直方图
Fig.10 GPS and MSAS GEO Satellites Ranging Error Histogram

MSAS由日本民航局 (JCAB) 负责建设, 提供RNP0.1服务。与WAAS和GAGAN不同, MSAS通过1颗GEO卫星转发两路SBAS信号, PRN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301天至360天数据对MSAS GEO卫星的测距精度进行分析。由于该时段内PRN137卫星数据不完整且粗差较多, 主要对PRN129卫星进行评估, 结果如图10所示。PRN129卫星测距误差均值为1.94m, 标准差为2.53m, GPS测距误差均值为0.01m, 标准差为0.34m。PRN129卫星99.9%的测距误差为10.6m, GPS为3.2m。评估时段内GEO卫星UDREI为14, GPS UDREI均值为7.25, 对应的UDRE为5.25m, 同样满足SBAS UDRE的完好性要求。

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。本节将研究SBAS GEO卫星测距对定位结果的影响。

响。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 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，上图为仅使用 GPS 卫星进行 SBAS 定位，下图为联合使用 GPS 和 3 颗 GEO 卫星进行解算。图 12 为两种解算方式对应的 PDOP 值，蓝色为 GPS 定位的 PDOP 值，红色表示联合 GEO 定位的 PDOP 值。从图中可以看出在 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 50m。联合 GEO 卫星定位有效降低了 PDOP 值，提升了系统可用性。

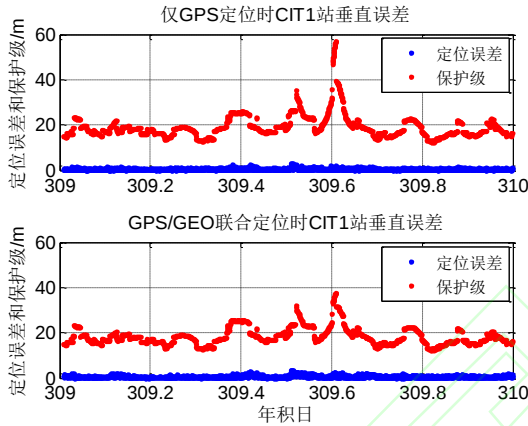


图 11 CIT1 站垂直定位误差和保护级

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

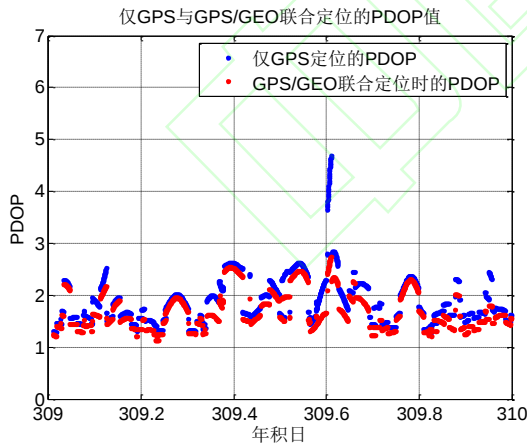


图 12 CIT1 站 GPS 定位与 GPS/GEO 联合定位 PDOP 值

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

对 4 个测站共 60 天的定位误差、定位保护级进行统计。图 13 为仅使用 GPS 时的垂直方向 Stanford 图。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 35m，导致

LPV200 服务不可用。评估时段内 WAAS LPV200 服务可用性为 99.984%。

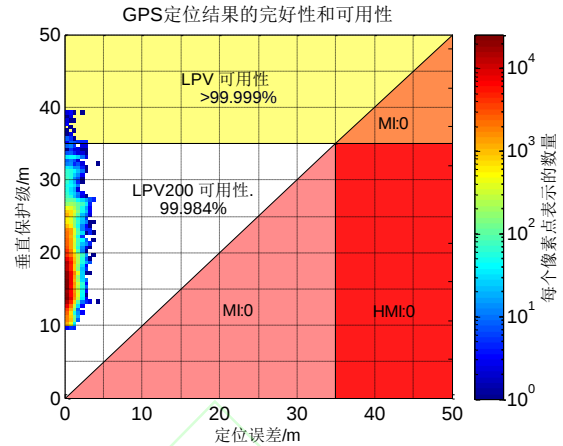


图 13 GPS SBAS 定位垂直方向 Stanford 图

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

图 14 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。

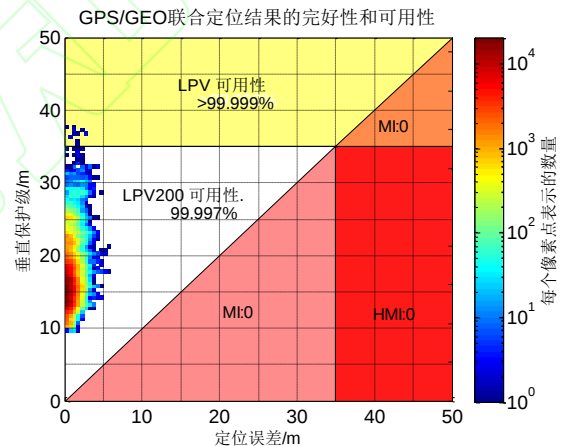


图 14 GPS/GEO 联合 SBAS 定位垂直方向 Stanford 图

Fig.14 Vertical Stanford Diagram of SBAS Positioning Result with GPS and GEO Satellites

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，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 0.9m，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 DOP 值改

善有限，导致GEO卫星参与定位时精度有所降低。

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，横坐标为测站名。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。

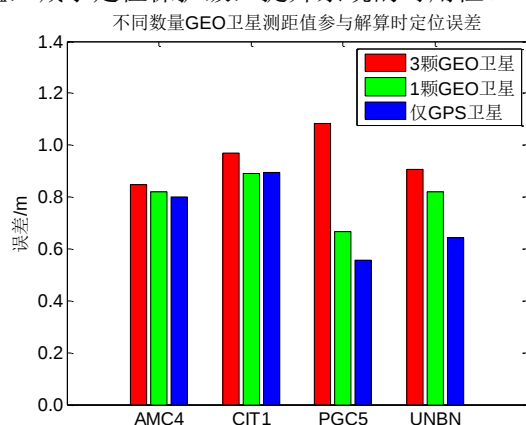


图 15 不同数量GEO卫星对SBAS定位精度的影响

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

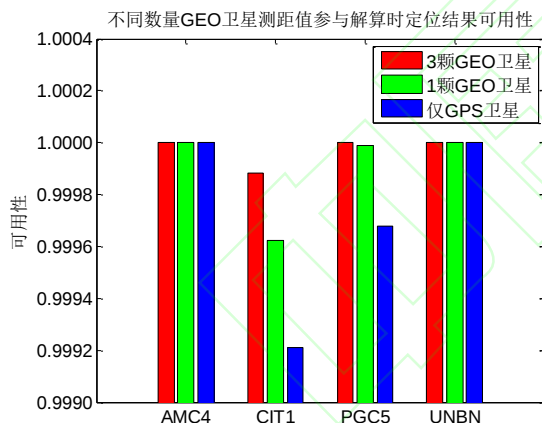


图 16 不同数量GEO卫星对SBAS定位可用性的影响

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

4 结语

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1.6m，需要注意的是，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2.9m，但分别存在14.32m、12.64m和17.44m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13.9m和3.2m。经各SBAS系统改正后的GPS卫星测距误差均优于1.0m，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, Kahlouche 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]. Proceedings of China Satellite Navigation Conference. Singapore, Springer, 2019, 563:228-237.
- [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[S/OL]. [2019-02].
- [11] RTCA SC-159. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment[S/OL]. [2013-06-25]. 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]. 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]. Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, OR, 24-27 September, 2002, 756-765.
- [15] Blanch, J., Walter, T., Enge, P. A Clock and Ephemeris Algorithm for Dual Frequency SBAS[C]. Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR, 19-23 September, 2011, 2513-2519.
- [16] Blanch, J., Walter, T., Enge, P. Evaluation of a covariance-based clock and ephemeris error bounding algorithm for SBAS[C]. Proceedings of 27th International Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2014), Tampa, FL, 8-12 September, 2014, 3270-3276.
- [17] Shao, B., Ding, Q., Wu X.B. Estimation method of SBAS dual frequency range error integrity parameter[J]. Satellite Navigation, 1(9).
- [18] Walter, T., Hansen, A., Blanch, J., Enge, P., Mannucci, T., Pi, X., Sparks, L., Iijima, B., El - Arini, B., Lejeune, R., 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), RS0D21, 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), RS0D22, 1-10.
- [21] Jin B, Chen S S, Li D J, Takka E, 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. Eric., Enge, P. Near Term Improvements to WAAS Availability[C]. Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS 2013), San Diego, CA, 16-20 January, 2013, 71-77.
- [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]. Proceedings of the Institute of Navigation 12th International Technical Meeting. Alexandria, VA, 1999, 1429-1436.
- [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]. Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, Oregon, 2003, 2712-2719.
- [26] Cai H L, Meng Y N, Geng C J, et al. BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4):427-435. (蔡洪亮,孟轶男,耿长江,等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报,2021,50(4): 427-435).
- [27] Lu J, Su C G, Hu M, 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 L, Chang G B, Gao J X, 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 J H, Tang C P, Song Y Z, 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 Y, Sun B Q, Yang X H, 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).

SBAS GEO Satellite User Range Error and Position Augmentation Research

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

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China

3. Space Star Technology, Beijing 100094, China

Abstract: 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 Global Positioning System (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. SBAS messages broadcast by Wide Area Augmentation System (WAAS), BeiDou Satellite Based Augmentation Systems (BDSBAS), GPS Aided Geo Augmented Navigation (GAGAN) and MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) Satellite based 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 capability. It was found that WAAS GEO satellite has the best performance with ranging accuracy better than 1.6m. The 99.9% error bound is less than 6.8m while the broadcast User Differential Range Error (UDRE) for the GEO satellite is 7.5m, which meets the integrity requirement. The 3 GEO satellites of BDSBAS show ranging biases of 14.32m, 12.64m and 17.44m respectively, and the accuracy is better than 2.9m. After removing the bias, the related 99.9% error bound is 8.60m, 7.80m and 11.60m which suggests an UDRE of 11~12. An URA of 15 is broadcast in message type 9 for the BDSBAS GEO satellites. URE of the GAGAN GEO satellite is better than 13.9m and for MSAS it is better than 3.2m. 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 0.60m, 0.53m, 0.21m and 0.34m for WAAS, BDSBAS, 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) approach is improved from 99.984% to 99.997% with collaboration of 3 GEO satellites' observation. With sufficient GPS satellites, the combination of GEO satellites will decrease the positioning accuracy because of the relative larger range error. Results suggest that SBAS GEO ranging data should be included in the SBAS solution for aviation users.

Keywords: satellite based augmentation system (SBAS); GEO satellite; user range error (URE); position augmentation

First Author: JIN Biao, PhD candidate, specializes in the integrity of satellite navigation and satellite orbit determination.
E-mail:jnbiao366788@126.com
Corresponding author: LI Yuqiang, PhD, professor. E-mail: lyq@ynao.ac.cn
Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (41974041).



网络首发:

标题: SBAS GEO卫星URE精度及定位增强研究

作者: 金彪, 陈姗姗, 李祝莲, 李语强, 李子潇

DOI: 10.13203/j.whugis20210091

引用格式:

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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210091 (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,2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210091)

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:

低轨卫星对导航卫星星座轨道测定的增强作用

杨宇飞, 杨元喜, 徐君毅, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(1): 46-52

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180215>

基于三频 SNR 数据探测北斗 GEO 卫星多径效应

高晓, 杨志强, 康军梅, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(2): 213-218

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20150313>