

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.04.07

北斗全球系统 GEO 卫星 SBAS 信号 质量评估

蒲俊宇¹, 李晓杰¹, 郭 睿¹, 唐成盼², 王梦兰¹

(1. 32021 部队, 北京 100094; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 北斗全球卫星导航系统在完成基本导航服务的基础上, 还将为中国及其周边地区提供星基增强的服务模式。北斗全球系统在 GEO 卫星下行频点 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 分别播发 RTCA DO-229D 协议和 DFMC-SBAS 协议的星基增强信息。根据 SBAS 接口协议文件, 北斗全球系统 GEO 卫星可在 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 两个频点与 GPS 卫星实现无系统偏差的联合增强定位, 这将一定程度上改善 BDSBAS 系统 GPS 用户的区域 PDOP 值。从数据完整率、载噪比和多路径误差三个角度对北斗全球系统 GEO-1 卫星在频点 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 上的信号质量进行评估, 并分别与 GPS 卫星在 L1CA 和 L5 频点上完成对比分析, 结果表明: GEO-1 卫星在中国区域的 SBAS 信号质量优于 GPS 卫星。

关键词: 北斗全球系统; GEO 卫星; 星基增强; 数据完整率; 载噪比; 多路径误差

中图分类号: P135 **文献标识码:** A

1 引 言

星基增强系统 (satellite-based augmentation system, SBAS) 是一种为高端导航用户, 特别是民航用户提供的生命安全服务, 其完好性、实时性、可靠性和精度指标的要求均比基本导航更高^[1-3]。中国将于 2020 年全面完成北斗三号组网建设, 届时也将为中国及其周边地区提供星基增强服务^[4]。中国的星基增强服务将遵循兼容互操作的原则, 依据美国航空无线电委员会 (radio technical commission for aeronautics, RTCA) 制定的 RTCA DO-229D 标准^[5], 以及国际互操作工作组 (interoperability working group, IWG) 制定的 L5 频点双频多星座 (dual frequency multi-constellation, DFMC) SBAS 接口协议草案编排地球同步轨道 (geosynchronous earth orbit, GEO) 卫星 SBAS 频点的电文信息格式^[6,7]。根据接口协

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-04-13

资助项目: 国家自然科学基金 (41874043, 41704037)

通讯作者: 蒲俊宇, pyf1992@126.com

议, GEO 卫星除了播发差分改正数和完好性信息以外, 还将播发本星的轨道和钟差信息。此外, 值得注意的是, 为实现兼容互操作, 北斗三号 GEO 卫星在频点 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 的信号体制设计与美国全球定位系统 (global positioning system, GPS) 频点 L1CA 和 L5 完全一致。因此, 北斗三号 GEO 卫星可联合 GPS 系统中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星实现增强定位, 且不会因跨导航系统而引入系统误差, 这将在一定程度上改善 GPS 星基增强用户的位置精度因子 (position dilution of precision, PDOP)。

需要说明的是, 实现北斗三号 GEO 卫星和 GPS 卫星的联合增强定位需要从多角度进行对比评估, 包括空间基准、时间基准、轨道产品、钟差产品、硬件延迟等, 而信号质量是影响定位精度的基本和首要因素, 本文将从数据完整率、载噪比和伪距多路径误差的角度, 在中国华北、东北、东南、西南以及西北地区设立 5 个全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 多模接收机测站, 以 2019 年 10 月 27 日至 2019 年 10 月 29 日的北斗和 GPS 观测数据为样本评估北斗三号 GEO-1 卫星, 即 C59 卫星在频点 BDSBAS-B1C 和 BDSBAS-B2a 上的信号质量, 并与 GPS 卫星在频点 L1CA 和 L5 上的信号质量进行对比。

2 数据完整率

数据完整率是衡量信号质量的指标之一, 其主要用于反映观测数据的连续性和完备性^[8,9]。数据完整率是否达标直接决定导航服务能否正常运转和调度, 尤其对于星基增强这种高实时性的导航业务来说, 数据完整率显得尤为重要。数据完整率主要受到卫星和接收机状态以及测站周边环境的影响, 可表示为:

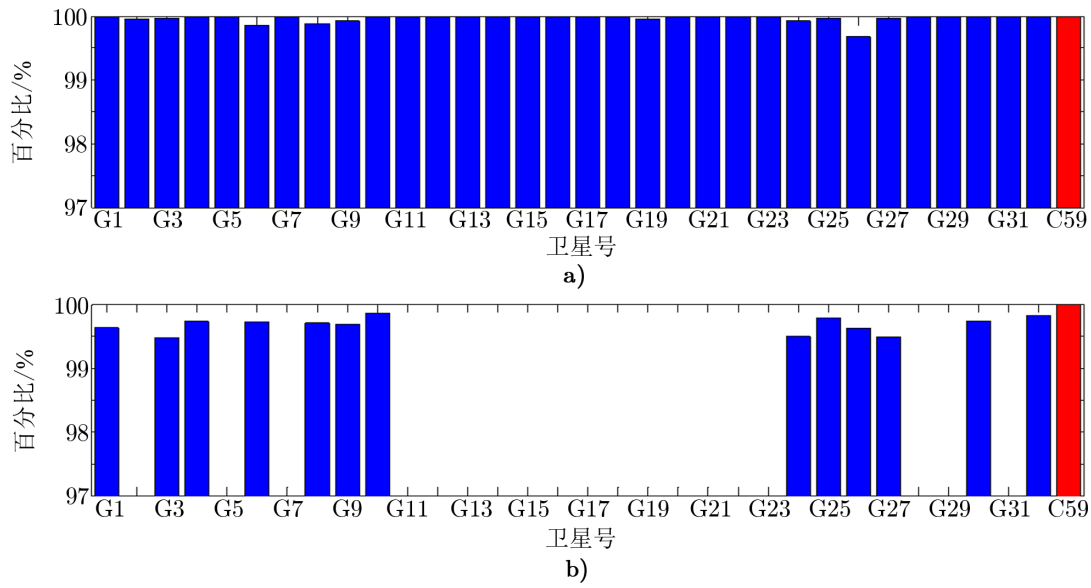
$$R = n_{\text{sat}_i} / N_{\text{sat}_i} \quad (1)$$

其中, N_{sat_i} 为用户按照接收机收到的卫星 i 理论数据个数, n_{sat_i} 为用户收到的卫星 i 实际数据个数。

数据完整率统计结果如表 1 所示, 其中, 华北和东南测站结果如图 1 和图 2 所示。图 1 和图 2 中, 蓝色部分为 GPS 卫星, 红色部分为北斗 GEO-1 卫星。需要说明的是, 在 GPS 系统中, 只有 BLOCK IIF, BLOCK III 和未来新一代卫星才能发播 L5 射频信号。从图 1 和图 2 可看出, 多模接收机目前只能接收到 13 颗 GPS 卫星的 L5 观测数据^[10]。

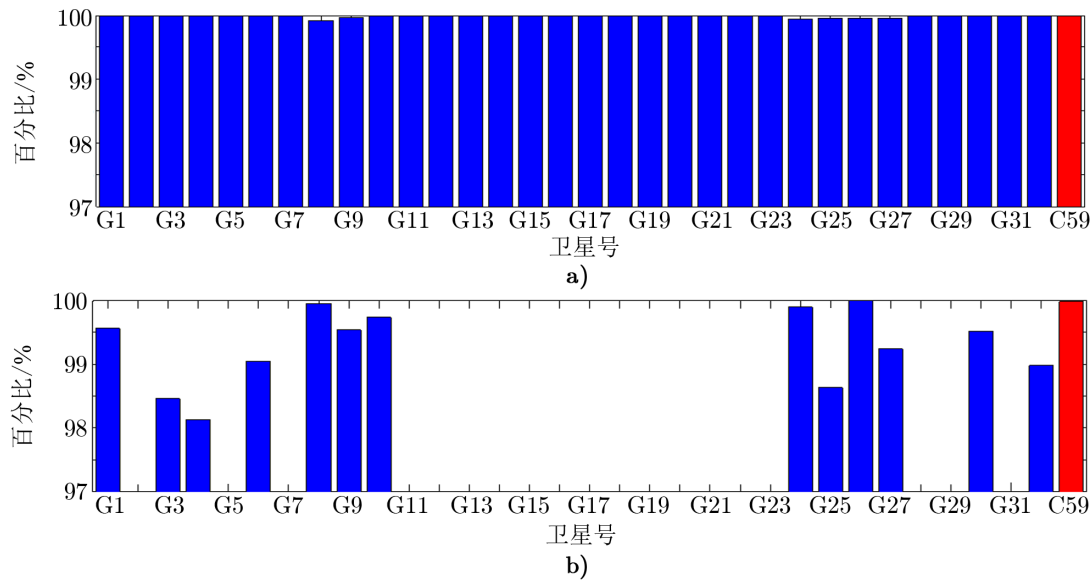
表 1 数据完整率统计表

测站位置	GPS 平均 (L1CA)	C59 (BDSBAS-B1C)	GPS 平均 (L5)	C59 (BDSBAS-B2a)
华北	99.97	100	99.68	100
东北	99.99	97.77	99.69	97.77
东南	99.99	99.99	99.28	99.99
西南	99.99	99.49	99.19	99.49
西北	99.97	98.70	99.68	98.70
平均	99.98	99.19	99.50	99.19



注: a) BDSBAS-B1C; b) BDSBAS-B2a.

图1 华北测站数据完整率



注: a) BDSBAS-B1C; b) BDSBAS-B2a.

图2 东南测站数据完整率

如表 1 所示, 在 L1CA (BDSBAS-B1C) 频点, GPS 卫星平均数据完整率为 99.98%, 北斗 C59 卫星平均数据完整率为 99.19%; 在 L5 (BDSBAS-B2a) 频点, GPS 卫星平均数据完整率为 99.50%, 北斗 C59 卫星平均数据完整率为 99.19%。

因此, 北斗 C59 卫星在 SBAS 频点上的平均数据完整率大于 99%, 与 GPS 卫星对应频点无明显差距, 基本满足联合增强定位和 SBAS 服务完好性、实时性的需求。

3 载噪比

载噪比是用于反映观测数据信号强度的指标, 其定义为载波信号强度与噪声信号强度之比。载噪比主要受到天线增益状态、接收机相关器件状态以及信号传播路径状态等的影响, 是表征信号从卫星端发射到用户端接收过程信号增益和损耗的综合品质参数^[11,12]。载噪比一般可从观测数据文件中直接获取。

本文选取 4 颗不同轨道面的健康的 GPS 卫星 G6, G10, G25, G32, 与北斗 C59 卫星进行对比, 载噪比平均值统计结果如表 2 所示。我们还得到华北和东南测站的载噪比, 如图 3 和图 4 所示。

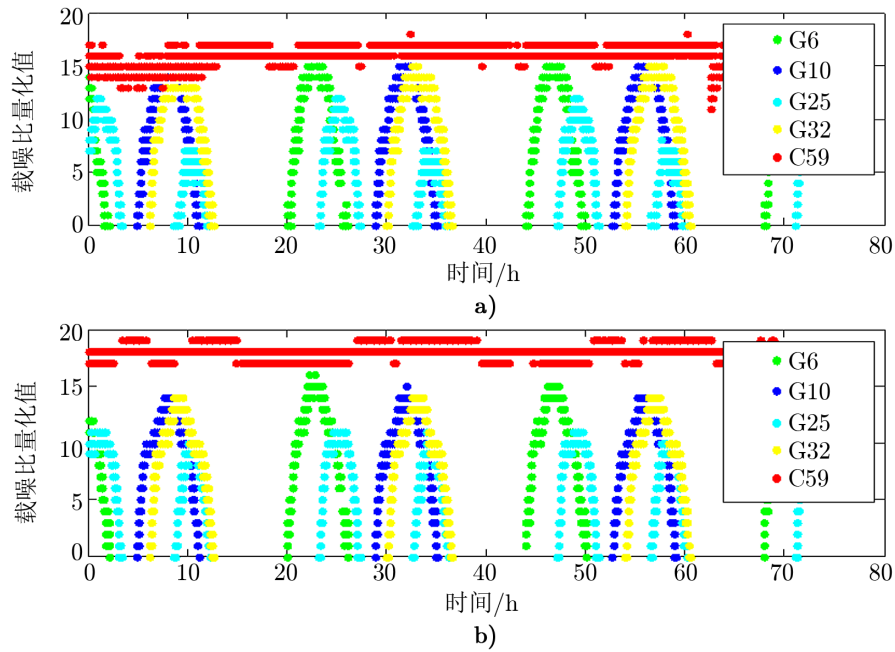
表 2 载噪比统计表

测站位置	GPS 平均 (L1CA)	C59 (BDSBAS-B1C)	GPS 平均 (L5)	C59 (BDSBAS-B2a)
华北	8.8	16.1	8.9	18.0
东北	7.2	16.7	8.5	18.7
东南	7.3	19.1	7.3	17.8
西南	7.0	15.3	7.3	16.2
西北	8.8	11.1	8.9	10.4
平均	7.8	15.7	8.2	16.2

需要说明的是, 本文试验所用接收机记录的是原始载噪比量化后的值, 量化单位为 1 dBHz, 具体量化规则为: 0 表示小于 40 dBHz; 1 表示 40~41 dBHz; 2 表示 41~42 dBHz; ……; 30 表示 69~70 dBHz。

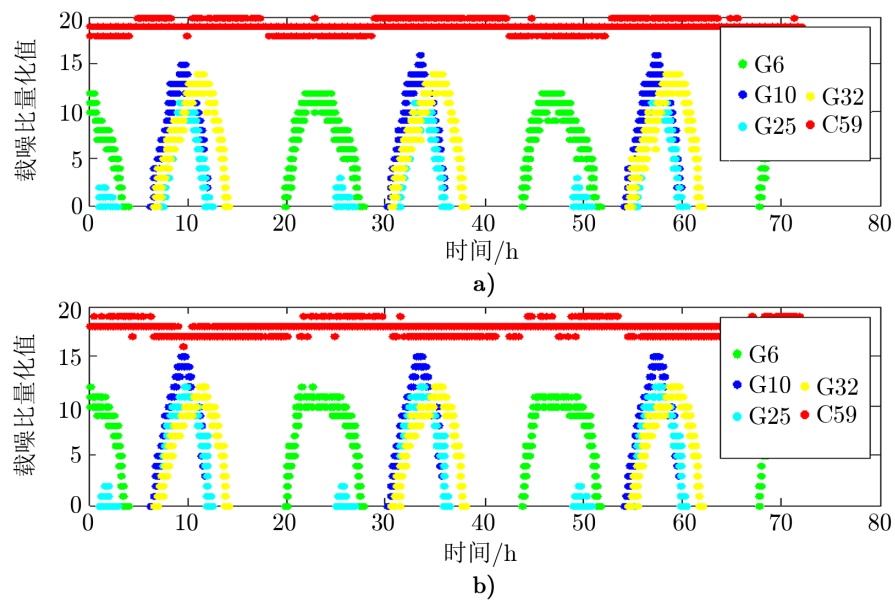
由图 3 和图 4 可知, 在 3 d 的统计时段内, 4 颗 GPS 卫星出现了 3 个完整的可视弧段, 其载噪比随着卫星仰角的升高而增加, 载噪比变化具有明显的周日特性; 在 3 d 的统计时段内, C59 卫星一直处于可视状态, 其载噪比处于一个相对稳定的区间, 仅在小范围内上下波动。

对于 4 颗 GPS 卫星, L1CA 频点载噪比量化均值为 7.8, L5 频点载噪比量化均值为 8.2, 如表 2 所示; 对于北斗 C59 卫星, BDSBAS-B1C 频点载噪比量化均值为 15.7, BDSBAS-B2a 频点载噪比量化均值为 16.2。因此, 在 L1CA (BDSBAS-B1C) 频点, 北斗 C59 卫星的载噪比要比 GPS 卫星平均值高 7.9 dBHz; 在 L5 (BDSBAS-B2a) 频点, 北斗 C59 卫星的载噪比要比 GPS 卫星平均值高 8.0 dBHz。



注: a) BDSBAS-B1C; b) BDSBAS-B2a。

图 3 华北测站载噪比



注: a) BDSBAS-B1C; b) BDSBAS-B2a。

图 4 东南测站载噪比

4 多路径效应

从卫星到接收机的传播过程中, 由于建筑物遮挡等原因导航信号会发生反射, 反射信号与直射信号相互干涉叠加导致观测失真, 这种现象称为多路径效应。多路径效应是 GNSS 定位的主要误差源之一, 与测站环境、卫星高度角、卫星性能、接收机天线性能等多种因素相关, 且多路径误差与观测噪声耦合在一起, 难以通过构建误差模型进行削弱^[13,14]。此外, 多路径误差不具有空间相关性, 也无法通过差分的手段进行削弱。一般可利用多路径组合法 (multipath combination, MPC) 提取伪距多路径误差^[15], 该方法利用伪距观测量和双频载波观测量组合, 消除几何误差和电离层误差, 从而实现伪距多路径误差提取。假设有 A, B 两路频点观测数据, 频点 A 观测数据多路径误差提取公式为:

$$\begin{cases} C_A = P_A + \frac{1+\alpha}{1-\alpha}\phi_A\lambda_A - \frac{2}{1-\alpha}\phi_B\lambda_B \\ MP_A = C_A - \bar{C}_A \end{cases}, \quad (2)$$

其中, P_A 为频点 A 伪距观测量, ϕ_A 为频点 A 载波观测量, λ_A 为频点 A 载波波长, ϕ_B 为频点 B 载波观测量, λ_B 为频点 B 载波波长, α 为 A, B 两路频点观测数据频率平方之比, 即 $\alpha = f_A^2/f_B^2$, C_A 为频点 A 中间序列, MP_A 为频点 A 多路径误差序列。

频点 B 观测数据多路径误差提取公式为:

$$\begin{cases} C_B = P_B + \frac{2\alpha}{1-\alpha}\phi_A\lambda_A - \frac{1+\alpha}{1-\alpha}\phi_B\lambda_B \\ MP_B = C_B - \bar{C}_B \end{cases}, \quad (3)$$

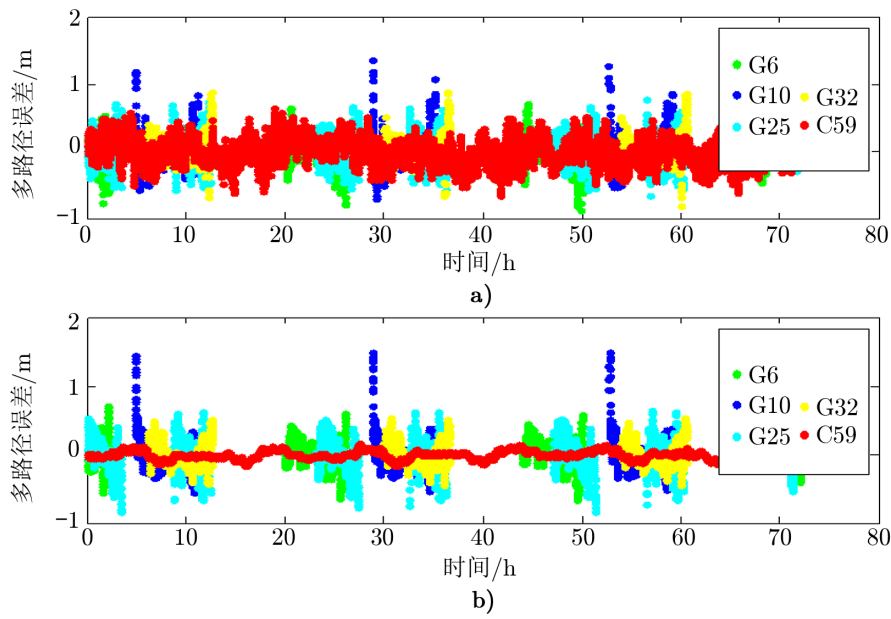
其中, P_B 为频点 B 伪距观测量, C_B 为频点 B 中间序列, MP_B 为频点 B 多路径误差序列。

本文选取 4 颗不同轨道面的健康的 GPS 卫星 G6, G10, G25, G32, 与北斗 C59 卫星进行对比, 并得到多路径误差均方根值 (RMS) 统计结果如表 3 所示。我们还得到华北和东南测站的多路径误差, 如图 5 和图 6 所示。

表 3 多路径误差统计表

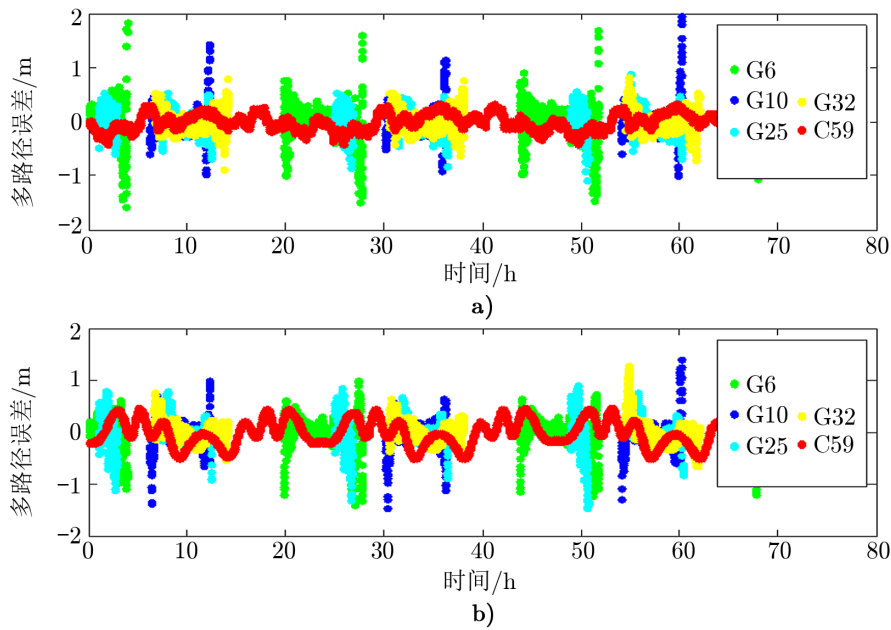
测站位置	GPS 平均 (L1CA)	C59 (BDSBAS-B1C)	GPS 平均 (L5)	C59 (BDSBAS-B2a)
华北	0.20	0.19	0.21	0.06
东北	0.21	0.20	0.27	0.26
东南	0.22	0.15	0.26	0.25
西南	0.38	0.15	0.31	0.14
西北	0.20	0.22	0.21	0.33
平均	0.24	0.18	0.25	0.21

与载噪比类似, 从图 5 和图 6 可看出在 3 d 的统计时段内, 4 颗 GPS 卫星出现了 3 个完整的可视弧段, 其多路径误差在卫星仰角较低时偏大, 随着仰角升高逐渐减小, 多路径误差具有明显的周日变化特性; 还可看出在 3 d 的统计时段内 C59 卫星一直处于可视状态, 其多路径误差也具有较明显的周日变化特性。



注: a) BDSBAS-B1C; b) BDSBAS-B2a。

图 5 华北测站多路径误差



注: a) BDSBAS-B1C; b) BDSBAS-B2a。

图 6 东南测站多路径误差

如表 3 所示, 对于 4 颗 GPS 卫星, L1CA 频点多路径误差均方根平均为 0.24 m, L5 频点多路径误差均方根平均为 0.25 m; 对于北斗 C59 卫星, BDSBAS-B1C 频点多路径误差均方根平均为 0.18 m, BDSBAS-B2a 频点多路径误差均方根平均为 0.21 m。

因此, 在 L1CA (BDSBAS-B1C) 频点, 北斗 C59 卫星的多路径误差比 GPS 卫星平均值低 0.06 m; 在 L5 (BDSBAS-B2a) 频点, 北斗 C59 卫星的多路径误差比 GPS 卫星平均值低 0.04 m。

5 结 论

为在中国及其周边地区实现北斗三号 GEO 卫星与 GPS 卫星无系统偏差的联合增强定位, 本文从数据完整率、载噪比以及伪距多路径误差三个角度对北斗三号 GEO-1 卫星和 GPS 卫星在 L1CA (BDSBAS-B1C) 频点和 L5 (BDSBAS-B2a) 频点的信号质量进行了对比分析, 并得到以下结果。

1) 北斗三号 GEO-1 卫星在 BDSBAS-B1C 频点和 BDSBAS-B2a 频点上的平均数据完整率达到 99% 以上, 与 GPS 卫星对应频点无明显差距。

2) 在 L1CA (BDSBAS-B1C) 频点, 北斗三号 GEO-1 卫星的载噪比要比 4 颗 GPS 卫星平均值高出 7.9 dBHz; 在 L5 (BDSBAS-B2a) 频点, 北斗三号 GEO-1 卫星的载噪比要比 4 颗 GPS 卫星平均值高出 8.0 dBHz。

3) 在 L1CA (BDSBAS-B1C) 频点, 北斗三号 GEO-1 卫星的多路径误差比 4 颗 GPS 卫星平均值低 0.06 m; 在 L5 (BDSBAS-B2a) 频点, 北斗三号 GEO-1 卫星的多路径误差比 4 颗 GPS 卫星平均值低 0.04 m。

本文在中国境内选取了均匀分布的 5 个 GNSS 多模接收机测站对北斗三号 GEO 卫星与 GPS 卫星的 SBAS 信号质量进行了对比分析, 结果表明北斗三号 GEO-1 卫星对应频点的载噪比明显高于 GPS 卫星, 多路径误差略低于 GPS 卫星, 数据完整率水平与 GPS 卫星基本一致, 说明北斗三号 GEO-1 卫星的 SBAS 信号质量优于 GPS 卫星, 因而可服务于 BDSBAS 系统 GPS 用户。待星座部署完成后, 我们将对其余北斗三号 GEO 卫星进行类似的评估, 并对联合增强定位所涉及的空间基准、时间基准、轨道产品、钟差产品、硬件延迟等问题进行详细论证, 最终完成联合增强定位试验。

参考文献:

- [1] 杨赛男. 博士论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2017: 2
- [2] 邵搏, 耿永超, 丁群, 等. 现代导航, 2017, 8(3): 157
- [3] 陆畅, 胡小工, 周善石, 等. 天文学进展, 2018, 36(2): 1
- [4] 冉承其. 北斗卫星导航系统建设与发展. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/201905/t20190522_18131.html, 2019

- [5] Radio Technical Commission for Aeronautics. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment, DO-229D. Washington D C: RTCA Inc, 2006: 30
- [6] Satellite-Based Augmentation System Interoperability Working Group. SBAS L5 DFMC Interface Control Document, Issue1 Rev 3. Dakar: SBAS IWG, 2016: 35
- [7] 杜娟. 博士论文. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2015: 35
- [8] 刘明亮. 硕士论文. 北京: 北京建筑大学, 2019: 22
- [9] 何义磊, 王志文, 王潜心, 等. 测绘通报, 2018, 12: 1
- [10] GPS Directorate. NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces, IS-GPS-705F, EI Segundo: SAIC(GPS SE&I), 2019: 4
- [11] 王姣, 姜苏洋, 狄世超, 等. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(6): 1087
- [12] 巴晓辉, 刘海洋, 郭睿, 等. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 457
- [13] 朱响. 硕士论文. 西安: 长安大学, 2017: 9
- [14] Wu X L, Zhou J H, Wang G, et al. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(7): 1297
- [15] Estey L H, Meertens C M. GPS solutions, 1999, 3(1): 42

SBAS Signal Quality Assessment of Beidou Global System

PU Jun-yu¹, LI Xiao-jie¹, GUO Rui¹, TANG Cheng-pan², WANG Meng-lan¹

(1. 32021 Troop, Beijing 100094, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: In addition to basic navigation service, Beidou-3 satellite navigation system will also provide Satellite-Based Augmentation Service (SBAS) in China and its surrounding areas. Relying on BDSBAS-B1C and BDSBAS-B2a channel of GEO satellite, SBAS messages of RTCA DO-229D and DFMC-SBAS are respectively broadcast. According to SBAS Interface Control Document(ICD), on BDSBAS-B1C and BDSBAS-B2a channel, Beidou-3 GEO satellite can realize joint augmentation positioning with GPS satellites without systematic deviation, which will to some degree improve the PDOP of BDSBAS GPS users. In this paper, signal quality of Beidou-3 GEO-1 satellite on BDSBAS-B1C and BDSBAS-B2a channel is evaluated from three aspects — data integrity ratio, carrier-to-noise ratio and multipath error. The comparisons with GPS satellites respectively on L1CA and L5 channel are also completed. The results show that the signal quality of Beidou-3 GEO-1 satellite in China is better than that of GPS satellites.

Key words: Beidou-3; GEO Satellite; SBAS; Data Integrity Ratio; Carrier-to-Noise Ratio; Multipath Error