

GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位性能 定量提升分析

彭劲松

(湖南环境生物职业技术学院, 湖南 衡阳 421000)

摘 要: 地球静止轨道(GEO)卫星是北斗卫星导航系统(BDS)星座的主要组成部分,为分析其对北斗三号(BDS-3)定位性能的影响,本文基于 MGEX 跟踪站实测数据,分析了 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度的影响. 经研究发现, GEO 卫星能有效改善 BDS-3 卫星可见数与卫星空间几何构型,能有效提升 BDS-3 伪距单点定位精度,北斗二号(BDS-2)/BDS-3 GEO 卫星使 BDS-3 伪距单点定位精度的提升量优于任一单系统 GEO 卫星, GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位水平向定位精度提升在 30% 以内,对高程方向定位精度提升在 20% 以内.

关键词: GEO; BDS-3; 伪距单点定位; 精度

中国分类号: P228.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2020)05-0062-05

0 引 言

我国北斗卫星导航系统(BDS)遵循“三步走”发展战略,经历了北斗一号(BDS-1)和北斗二号(BDS-2)的建设,而建设完成的 BDS-2 能向亚太区域提供高精度导航与定位服务,目前已经完成了北斗三号(BDS-3)建设^[1-3]. BDS-3 卫星星座与 BDS-2 相同,同样由 GEO/IGSO/MEO 三种类型星座组合,完整的 BDS-3 星座由 24 颗中圆地球轨道(MEO)卫星、3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 3 颗地球静止轨道(GEO)卫星组成,2020 年 6 月底,最后一颗 GEO 卫星完成部署^[4-6]. 当前 BDS-2 在轨工作 GEO 卫星有 5 颗, BDS-3 在轨工作 GEO 卫星有 2 颗,都能同时播发 B1I 和 B3I 频率信号^[7-9]. 我国 BDS-3 自 2015 年开始建设以来,其定位性能一直是国内专家关注的热点,对 BDS-3 定位性能展开了大量研究. BDS-3 相比于 BDS-2 在卫星可见数与卫星空间几何构型上都有明显的改善,在 SPP 与动态精密单点定位(PPP)精度方面相比 BDS-2 也有较明显提升,为 BDS-3 的定位性能提供一定的参考^[10]. BDS-3 的信噪比优于

BDS-2 卫星,也要高于 GPS 和 Galileo 兼容频率信噪比, BDS-3 的数据完整率优于 Galileo 低于 GPS,而数据饱和度与连续性要优于 GPS 和 Galileo^[11]. BDS-3 新卫星与 BDS-2 组合定位具有较好的兼容性, BDS-3 卫星 B1C 与 GPS 系统兼容频率 L1 组合定位精度与 GPS 单系统相对,表明 BDS-3 与 GPS 组合定位是可行的^[12]. BDS-3 当前静态 PPP 水平精度优于 2 cm,高程精度优于 4 cm, BDS-2/BDS-3 组合定位动态 PPP 精度相比 BDS-2 有了较明显提升^[13].

鉴于当前对 BDS-3 定位性能的研究现状,本文基于 MGEX 连续跟踪站 BDS-3 实测数据,分析了 BDS-2 和 BDS-3 系统 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位性能的影响,考虑到 BDS-2 和 BDS-3 频率之间的兼容性,主要统计分析 GEO 卫星对 BDS-3 卫星 B1I、B3I 以及 B1I/B3I 组合伪距单点定位精度的影响.

1 伪距单点定位原理

一般单频伪距观测方程可以表示为^[14-15]

收稿日期: 2020-06-22

基金项目: 湖南自然科学基金课题(2019JJ6028)

通信作者: 彭劲松 E-mail: 2879302286@qq.com

$$P_i^s = \rho^s - c \cdot dt_r + c \cdot dt^s - V_{\text{ion}} - V_{\text{trop}} - \epsilon, \quad (1)$$

式中: P_i^s 为伪距观测值; ρ^s 为站星间几何距离; c 为真空中的光速; dt_r 为接收机钟差; dt^s 为卫星钟差; V_{ion} 为电离层延迟; V_{trop} 为对流层延迟; ϵ 为观测噪声与未模型化误差。

在进行双频组合伪距单点定位时,常用的模型是双频无电离层组合模型,本文则是采用 B1I 和 B3I 频率的伪距观测值进行消电离层组合,模型如下^[10]:

$$P_{r,\text{IF}} = \rho_r^s + c \cdot dt_r - c \cdot dt^s + V_{\text{trop}} + b_{r,\text{IF}} - b_{\text{IF}}^s + \epsilon_{r,\text{IF}}, \quad (2)$$

式中: $P_{r,\text{IF}}$ 为无电离层组合伪距观测值; $b_{r,\text{IF}}$ 为接收机端卫星码延迟; b_{IF}^s 为卫星端码延迟; $\epsilon_{r,\text{IF}}$ 为无电离层组合观测噪声未模型化误差;其余符号与式(1)表示一致。

将式(1)~(2)按照泰勒级数展开后,按照最小二乘原理得到如下:

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{L}, \\ \delta\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}). \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta\mathbf{x} = [dX \ dY \ dZ \ cV_{\text{tr}}]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} l^1 & a^1 & b^1 & 1 \\ l^2 & a^2 & b^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^n & a^n & b^n & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{L} = [(\rho_i^1 - \rho^1) \ (\rho_i^2 - \rho^2) \ \cdots \ (\rho_i^n - \rho^n)]^T. \quad (6)$$

式中: n 为卫星数; $\mathbf{A}$ 为设计矩阵; (l, a, b) 表示站星矢量三个方向余弦; $\mathbf{P}$ 为权阵; $\mathbf{L}$ 表示常数项; $\delta\mathbf{x}$ 为解算得到的接收机坐标分量与钟差。

根据式(1)和式(2)进行 BDS-3 单频与双频伪距单点定位数据解算时,卫星位置与钟差由国际 GNSS 服务(IGS)官网下载的广播星历计算得到,

对流层改正模型采用 Saastamoinen 模型,单频伪距单点定位电离层改正模型采用 klobuchar 模型,而接收机端和卫星端码延迟由接收机钟差吸收。

2 实验与分析

2.1 数据来源

随着 BDS-3 的不断完善,当前部分 MGEX 站能接收到 BDS-3 最新卫星发射的信号,本文则是 WUH2 参考站观测数据,观测时间为 2020 年 5 月 20—26 日,数据采样频率为 30 s,共计 2 880 个历元。WUH2 站接收机类型为 JAVAD TRE 3,天线类型为 JAVRINGANT-G5T,能同时接收到 BDS-2 和 BDS-3 全部 GEO 卫星,BDS-2 GEO 卫星为 C01、C02、C03、C04、C05,BDS-3 GEO 卫星为 C59、C60,能同时接收到 BDS-2 和 BDS-3 GEO 卫星相同频率 B1I 和 B3I。

2.2 数据处理策略

采用根据开源软件 RTKLIB 自编程序采用伪距单点定位模式对 WUH2 站静态数据进行处理,以 GAMIT 经过平差处理后的 WUH2 站坐标作为参考值,统计分析 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位性能的影响。为详细分析 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位性能的影响,采用四种方案对 BDS-3 数据进行处理,第一种方案:对 BDS-3 系统 IGSO 卫星+MEO 卫星伪距单点定位模式下 B1I、B3I 以及 B1I/B3I 数据进行处理,并且统计其定位精度;第二种方案:在第一种方案的基础上加入 BDS-2 系统 5 颗 GEO 卫星进行数据处理;第三种方案:在第一种方案的基础上加入 BDS-3 系统 2 颗 GEO 卫星进行数据处理;第四种方案:在第一种方案的基础上加入 BDS-2 系统 5 颗 GEO 卫星和 BDS-3 系统 2 颗 GEO 卫星进行数据处理。计算结果如图 1、2 所示。

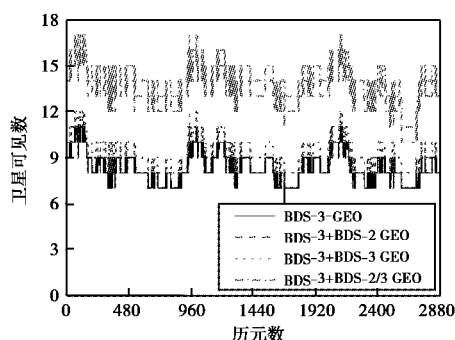


图1 卫星可见数

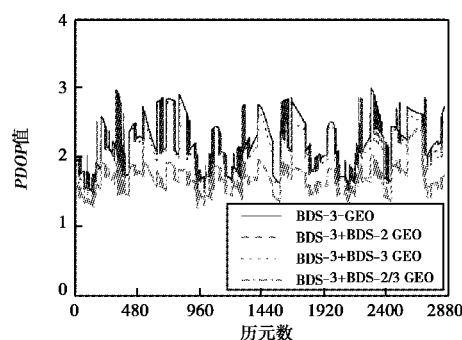


图2 PDOP 值

2.3 实验结果分析

卫星可见数与位置精度因子($PDOP$)值作为影响定位精度的因素,因此首先对其进行分析。由图1可知,随着GEO卫星的加入,BDS-3卫星可见数明显增加,BDS-2 GEO卫星使BDS-3卫星可见数增加量优于BDS-3 GEO卫星,这是因为BDS-2 GEO卫星数量优于BDS-3 GEO卫星。BDS-2 GEO卫星使BDS-3平均卫星可见数增加5颗,BDS-3 GEO卫星使BDS-3平均卫星可见数增加1颗,BDS-2/3 GEO卫星使BDS-3平均卫星可见数增加6颗。通过图2可以发现,随着GEO卫星的加

入,明显改善了BDS-3卫星空间几何构型。BDS-2 GEO卫星使BDS-3平均 $PDOP$ 值减少0.5,BDS-3 GEO卫星使BDS-3平均 $PDOP$ 值减少0.1,BDS-2/3 GEO卫星使BDS-3平均 $PDOP$ 值减少0.58。

2.3.1 单频伪距单点定位

根据数据处理策略,对不同数据处理方案下B1I和B3I频率数据进行频率伪距单点定位处理,将解算得到的单历元伪距单点定位结果与参考坐标做差,计算得到不同数据处理方案下B1I与B3I频率伪距单点定位精度(RMS 值),如图3、4所示。

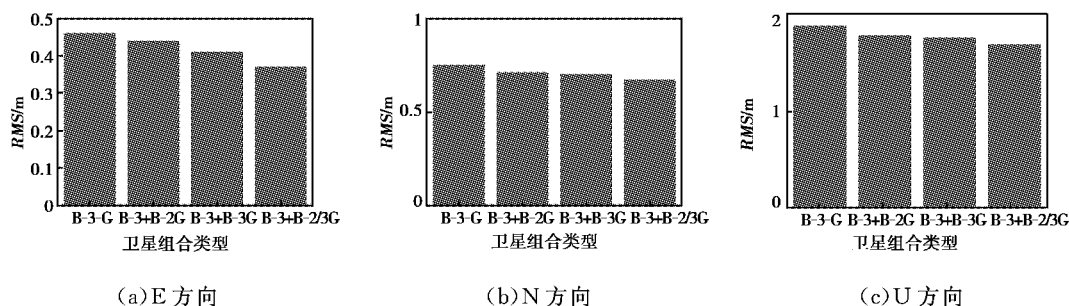


图3 BDS-3与加入BDS-2/3 GEO卫星组合B1I频率对伪距单点定位精度

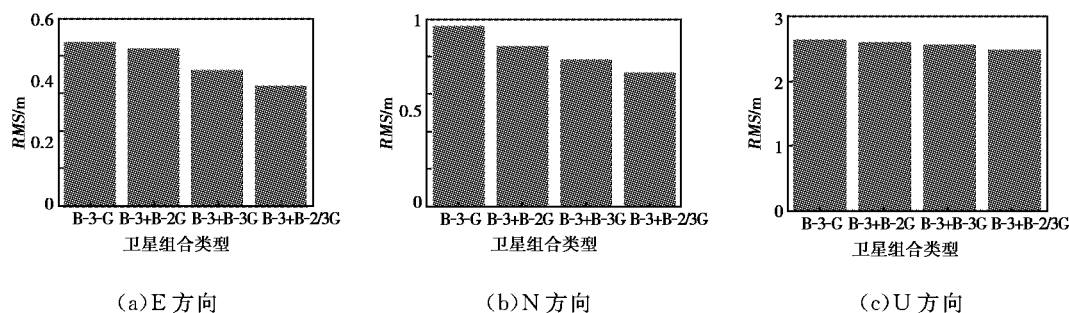


图4 BDS-3与加入BDS-2/3 GEO卫星组合B3I频率对伪距单点定位精度

由图3可知,BDS-3卫星B1I伪距单点定位E方向定位精度优于0.5 m,N方向定位精度优于0.8 m,U方向定位精度优于2 m。加入GEO卫星后,BDS-3卫星B1I频率伪距单点定位精度明显提升,BDS-2 GEO卫星使BDS-3卫星B1I频率伪距单点定位精度的提升量优于BDS-3 GEO卫星,而BDS-2/BDS-3 GEO卫星使BDS-3卫星B1I频率伪距单点定位精度的提升量优于任一单一系统GEO卫星。

由图4可知,BDS-3卫星B3I伪距单点定位E

方向定位精度优于0.6 m,N方向定位精度优于1 m,U方向定位精度优于3 m。不同GEO卫星使BDS-3卫星B3I频率伪距单点定位精度的提升程度与B1I频率相当。

2.3.2 双频伪距单点定位

根据数据处理方案,对不同数据处理方案下B1I/B3I双频组合频率数据进行频率伪距单点定位处理,并且根据参考坐标统计不同数据处理方案下B1I/B3I双频组合频率伪距单点定位精度,如图5所示。

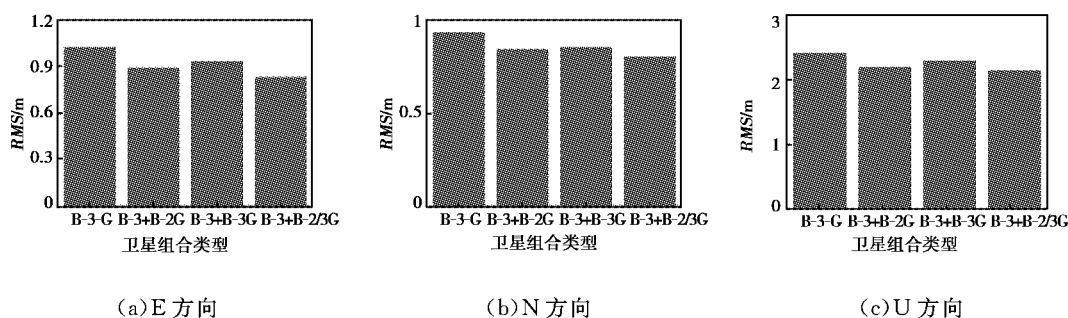


图5 BDS-3 与加入 BDS-2/3 GEO 卫星组合 B1I/B3I 频率对伪距单点定位精度

由图5可知,BDS-3 卫星 B1I/B3I 双频组合伪距单点定位 E 方向定位精度优于 1.1 m,N 方向定位精度优于 1 m,U 方向定位精度优于 2.5 m. 加入 GEO 卫星后,BDS-3 卫星 B1I/B3I 双频组合伪距单点定位精度明显提升,BDS-3 GEO 卫星使 BDS-3 卫星 B1I/B3I 双频组合单点定位精度的提升量优于 BDS-2 GEO 卫星,而 BDS-2/BDS-3 GEO 卫星使 BDS-3 卫星 B1I/B3I 双频组合伪距单点定位

精度的提升量优于任一单一系统 GEO 卫星.

2.3.3 GEO 使 BDS-3 伪距单点定位精度提升定量分析

为进一步详细分析 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度的提升,统计 BDS-2、BDS-3、BDS-2/BDS-3 GEO 卫星对 B1I、B3I、B1I/B3I 伪距单点定位精度的提升量,如图6所示.

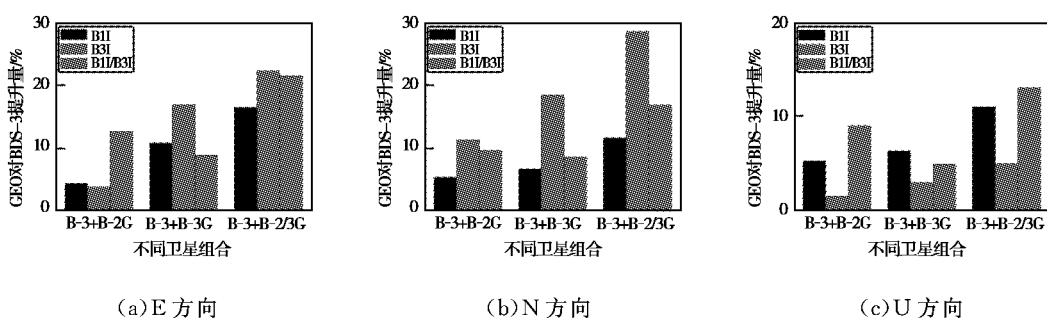


图6 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度提升

由图6可知,不同类型 GEO 卫星对 BDS-3 卫星 B1I、B3I、B1I/B3I 组合伪距单点定位精度提升量不同,对于单频伪距单点定位,BDS-2 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度的提升量优于 BDS-3 GEO 卫星,而对于双频伪距单点定位,BDS-3 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度的提升量优于 BDS-2 GEO 卫星,而不管单频还是双频伪距单点定位,BDS-2/BDS-3 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位精度的提升量优于任一单一系统 GEO 卫星. 同时发现,GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位水平向定位精度提升在 30% 以内,对高程方向定位精度提升在 20% 以内.

3 结论

针对 GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位性能的影响,本文根据 MGEX 机构发布的跟踪站实测

数据,分析了 BDS-2、BDS-3、BDS-2/BDS-3 GEO 卫星对 BDS-3 卫星 B1I、B3I、B1I/B3I 伪距单点定位精度的影响,经研究发现:

1) GEO 卫星有效改善了 BDS-3 卫星可见数与卫星空间几何构型,使 BDS-3 平均卫星可见数最大增加 6 颗,使平均 $PDOP$ 值最大减少 0.58.

2) GEO 卫星使 BDS-3 伪距单点定位精度有较明显的提升,BDS-2 GEO 卫星使 BDS-3 单频伪距单点定位精度的提升量优于 BDS-3 GEO 卫星,BDS-3 GEO 卫星使 BDS-3 双频伪距单点定位精度的提升量优于 BDS-2 GEO 卫星,而 BDS-2/BDS-3 GEO 卫星使 BDS-3 单双频伪距单点定位精度的提升量优于任一单一系统 GEO 卫星.

3) GEO 卫星对 BDS-3 卫星单点定位水平向定位精度的提升量优于高程方向,GEO 卫星对 BDS-3 伪距单点定位水平向定位精度提升在 30%

以内,对高程方向定位精度提升在20%以内。

当前只分析了BDS-3系统2颗GEO卫星对BDS-3伪距单点定位精度的提升,以后还将会分析全部建设发射完成的GEO卫星对BDS-3定位性能的影响。

参考文献

- [1] 刘凡,李雷,刘国林,等. BDS-2与BDS-3卫星空间信号精度评估[J]. 测绘科学,2020,45(1):54-61,76.
- [2] 章繁,刘长建,张熙,等. 顾及GEO卫星伪距偏差的BDS-2非组合PPP模型与算法[J]. 测绘科学技术学报,2019,36(5):464-469.
- [3] 张乾坤,刘小生,何琦敏. BDS-3多频点伪距单点定位性能研究[J]. 测绘通报,2020(1):71-75.
- [4] 金俭俭,高成发,高旺,等. 固定GEO卫星为参考的BDS与GPS紧组合定位方法[J]. 测绘科学,2019,44(11):1-8.
- [5] 尹斌权,岳东杰,陈健,等. 北斗GEO卫星多路径特性在SPP中的应用[J]. 地理空间信息,2019,17(3):31-34.
- [6] 王洋,史俊波,周吕,等. GEO/IGSO/MEO卫星对北斗伪距差分定位精度的作用分析[J]. 地理空间信息,2019,17(2):18-21,33.
- [7] 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.
- [8] 高天杭,崔先强,王勋. 数据缺失情况下BDS定位性能分析[J]. 测绘科学,2019,44(12):102-108.
- [9] 汪宇豪,孟瑞祖,田先才. BDS GEO卫星对GPS精密单点定位的影响分析[J]. 全球定位系统,2019,44(6):52-57.
- [10] 徐宗秋,庄典,杨瑞雪,等. BDS-3基本系统的动态单点定位性能评估[J]. 测绘科学,2020(6):1-7.
- [11] 尹志豪,王广兴,胡志刚,等. 北斗三号观测数据质量分析[J]. 测绘科学,2020,45(6):37-45.
- [12] 孔豫龙,柴洪洲,潘宗鹏,等. BDS-3新卫星的标准单点定位结果分析[J]. 测绘科学,2019,44(4):152-157,195.
- [13] 戴金倩,吴迪,戴小蕾,等. BDS-3实时精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报,2020(1):30-34.
- [14] 邵银星,赵春梅. 低轨卫星增强BDS单频伪距单点定位[J]. 测绘通报,2020(3):69-72.
- [15] 方欣顺,范磊. BDS-2/BDS-3伪距单点定位精度分析[J]. 全球定位系统,2020,45(1):19-25.

作者简介

彭劲松 (1975—),男,硕士,副教授/高级工程师,主要从事园林工程测量、建筑工程测量教学及GPS全球定位、无人机摄影测绘技术应用推广等工作。

GEO satellite's quantitative improvement analysis of BDS-3 pseudorange single point positioning performance

PENG Jinsong

(Hunan Environmental Biotechnology College, Hengyang 421000, China)

Abstract: GEO satellites are the main components of the BDS constellation. In order to analyze its impact on the positioning performance of BDS-3, this paper analyzed the impact of GEO satellites on the positioning accuracy of BDS-3 pseudorange single point based on the measured data of MGEX tracking station. The research found that the GEO satellite can effectively improve the BDS-3 satellite visible number and satellite space geometry, and can effectively improve the BDS-3 pseudorange single-point positioning accuracy. The BDS-2/BDS-3 GEO satellites make the BDS-3 pseudorange single-point positioning accuracy better than that of any single-system GEO satellite. The horizontal positioning accuracy of BDS-3 GEO satellites pseudorange single-point positioning is improved within 30%, and the positioning accuracy for elevation direction is improved within 20%.

Keywords: GEO; BDS-3; pseudo-range single-point positioning; accuracy