

引用格式:张鹏飞,陈鹏云,胡春生.北斗及其与GNSS组合的定位性能分析[J].电光与控制,2018,25(6):90-94. ZHANG P F, CHEN P Y, HU C S. Positioning performance analysis of BDS and BDS/GNSS[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):90-94.

北斗及其与GNSS组合的定位性能分析

张鹏飞¹, 陈鹏云¹, 胡春生²

(1. 中北大学,太原 030051; 2. 宁夏大学,银川 750021)

摘要: 结合我国北斗全球卫星导航系统BDS的建设需求,对现阶段北斗区域服务系统BD2和未来BDS以及多星座GNSS组合的定位性能进行分析是十分必要的。针对BD2,通过仿真和实测数据两种方法分别对BD2、GPS/BD2和GPS/BD2/GLONASS进行了分析,分析结果表明BD2完全满足北斗公开服务性能规范中的定位性能要求,而且随着星座数的增加,定位性能逐渐增强,加入GLONASS后对高纬度区域定位性能的改善尤为明显。针对BDS,主要通过仿真的方法,对BDS和未来四大全球导航系统组合进行了分析,分析结果表明,未来BDS仍然对亚太地区的定位性能有明显的增强效果,而且未来BDS在其他地区的位置精度因子(PDOP)平均值也达到1.2~1.6,此外,未来四大导航系统组合对极区的定位性能改善较为明显。

关键词: 全球导航卫星系统; 北斗区域导航卫星系统; 北斗全球导航卫星系统; 定位性能

中图分类号: TN96 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.019

Positioning Performance Analysis of BDS and BDS/GNSS

ZHANG Peng-fei¹, CHEN Peng-yun¹, HU Chun-sheng²

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. College of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Considering the construction demand of Beidou global navigation satellite system (BDS) in China, it is necessary to analyze the positioning performance of Beidou regional service satellite system (BD2), BDS and their combination with GPS, GLONASS and Galileo system. To BD2, the positioning performance of BD2, GPS/BD2 and GPS/BD2/GLONASS is analyzed by using two methods, simulation and factual observation data. Results show that BD2 completely meet the requirements of positioning performance in Beidou public service performance specification, and with the increase of the number of constellations, the positioning accuracy gradually improves, and the improvement of positioning performance in high-latitude regions is obvious when GLONASS is joined. To BDS, an analysis is made mainly by the method of simulation. The simulation results show that the positioning performance of the Asian-Pacific region still shows obvious improvement, and the mean value of PDOP in other regions reaches 1.2 to 1.6. In addition, the combination of the four major navigation systems will make obvious improvement on the positioning performance for polar regions.

Key words: GNSS; Beidou regional service satellite system; BDS; positioning performance

0 引言

2012年底,我国宣布正式运行服务亚太地区的区域性卫星导航系统,目前,北斗全球卫星导航系统仍在建设中,预计2020年完成^[1]。定位精度是卫星导航系统服务性能最基本的指标,结合我国北斗全球卫星导

航系统的建设需求,对现阶段北斗区域导航卫星系统BD2、未来北斗全球导航系统BDS以及多星座GNSS组合的定位性能进行分析十分必要,不仅可以提高BDS对用户终端的服务性能,而且能够使不同时空环境的用户选择合适的导航系统以提供最优的定位性能。随着四大全球卫星导航系统的组网,多星座GNSS定位性能的分析已成为国内外学者和科研机构广泛关注的研究课题^[2-5]。随着北斗区域服务系统的正式运行,对北斗系统的研究逐渐升温,国外对北斗导航系统与其他系统组合定位性能分析的相关文献并不是很多。国内对现阶段北斗区域导航系统与其他导航系统

收稿日期:2017-07-12 修回日期:2017-08-03

基金项目:国家自然科学基金(61502257)

作者简介:张鹏飞(1986—),男,山西太原人,博士,讲师,研究方向为卫星导航、飞行器控制与仿真。

的组合定位性能的研究还处于起步阶段,对未来北斗全球导航系统定位性能进行仿真分析的相关文献也相对较少。曾庆化对北斗系统及 GNSS 多星座组合导航的性能进行了研究^[6],实现四系统多模定位,但其采用的北斗数据是仿真数据,并不是实际数据;杨鑫春利用北斗导航系统针对中国大陆区域进行定位性能仿真,同样缺少组合相关内容和全球定位的效果表现^[7]。本文结合仿真数据和实测数据对北斗区域导航系统、北斗全球导航系统及多星座 GNSS 的定位性能逐步进行分析,分析结果可以对未来北斗全球卫星导航系统的建设与发展提供参考。

1 基本原理

GNSS 定位性能主要指定位精度,定位精度指在规定用户条件下,GNSS 提供给用户的位置与用户真实位置之差的统计值。卫星导航定位解算精度取决于卫星的伪距观测量误差和几何精度因子 GDOP,而 GDOP 是由用于定位解算的卫星几何分布决定的。由 GNSS 确定的位置/时间解的精度最终可表示为几何精度因子和用户测距误差的乘积^[8],即

$$\sigma = G_{\text{GDOP}} \times \sigma_{\text{URE}} \quad (1)$$

式中: σ 为定位精度的标准偏差; G_{GDOP} 为几何精度因子; σ_{URE} 为用户测距误差的标准偏差。从式(1)可以看出,几何精度因子是从用户测距误差到定位误差的线性映射。在用户测距误差相同的情况下,几何精度因子值越小,定位误差越小。因此,通过分析几何精度因子可以间接地反映 GNSS 的定位性能。

假设伪距观测量方程为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: \mathbf{Y} 为伪距观测量; \mathbf{H} 为观测矩阵; \mathbf{X} 为状态向量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测噪声向量。

则伪距观测量方程的最小二乘定位解为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y} \quad (3)$$

假设 $d\boldsymbol{\rho}$ 为伪距测量值误差,而 $d\mathbf{x}$ 则是对位置和时间估计的误差, d 表示差值,由式(3)可知

$$d\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T d\boldsymbol{\rho} \quad (4)$$

通常假定误差矢量 $d\boldsymbol{\rho}$ 具有一些分量,这些分量均值为零且为联合高斯分布。在认为几何分布固定的情况下,由此得出 $d\mathbf{x}$ 也是高斯分布,且均值为零。按定义得出

$$\text{cov}(d\mathbf{x}) = E[d\mathbf{x}d\mathbf{x}^T] \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),则得

$$\text{cov}(d\mathbf{x}) = E[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T d\boldsymbol{\rho} d\boldsymbol{\rho}^T \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}] = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \text{cov}(d\boldsymbol{\rho}) \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \quad (6)$$

由于 $d\boldsymbol{\rho}$ 的各分量分布相同且相互独立,其方差可表示

为卫星 UERE 的平方,则 $d\boldsymbol{\rho}$ 的协方差可表示为

$$\text{cov}(d\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{I}_{n \times n} \sigma_{\text{URE}}^2 \quad (7)$$

式中, $\mathbf{I}_{n \times n}$ 为 $n \times n$ 单位矩阵。代入式(6)即得

$$\text{cov}(d\mathbf{x}) = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \sigma_{\text{URE}}^2 \quad (8)$$

假设 $d\mathbf{x}$ 对应的位置和时间偏差的计算误差为 $(\sigma_{x_u}, \sigma_{y_u}, \sigma_{z_u}, \sigma_{ct})$,则几何精度因子最早是由 $\text{cov}(d\mathbf{x})$ 各分量之和与 σ_{URE} 之比来定义的,算式为

$$G_{\text{GDOP}} = \frac{\sqrt{\sigma_{x_u}^2 + \sigma_{y_u}^2 + \sigma_{z_u}^2 + \sigma_{ct}^2}}{\sigma_{\text{URE}}} \quad (9)$$

令

$$\mathbf{D} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \quad (10)$$

结合式(8)~(10)可知

$$G_{\text{GDOP}} = \sqrt{D(1,1) + D(2,2) + D(3,3) + D(4,4)} \quad (11)$$

几何精度因子除最一般形式的 G_{GDOP} 外,还可分为位置精度因子 P_{PDOP} ,水平精度因子 H_{HDOP} ,垂向精度因子 V_{VDOP} 和时间精度因子 T_{TDOP} ,其算式为

$$P_{\text{PDOP}} = \sqrt{D(1,1) + D(2,2) + D(3,3)} \quad (12)$$

$$H_{\text{HDOP}} = \sqrt{D(1,1) + D(2,2)} \quad (13)$$

$$V_{\text{VDOP}} = \sqrt{D(3,3)} \quad (14)$$

$$T_{\text{TDOP}} = \sqrt{D(4,4)} \quad (15)$$

其中, P_{PDOP} 表征了 GNSS 的定位精度,因此,本文重点分析其特性。

2 定位性能仿真分析

在 BDS 公开服务性能规范中,明确了 P_{PDOP} 的约束条件,即 $P_{\text{PDOP}} \leq 6$ 。

为了分析 BDS 及其与其他 GNSS 组合的定位性能,本文设计了以下 5 个方案,利用自编软件进行仿真分析。

方案 1 目前运行的北斗区域导航系统 BD2 (5GEO + 5IGSO + 4MEO),共 14 颗卫星。

方案 2 未来服务全球的北斗系统 BDS(5GEO + 3IGSO + 27MEO),共 35 颗卫星。

方案 3 目前运行的 GPS (32 颗卫星) + BD2 (5GEO + 5IGSO + 4MEO),共 46 颗卫星。

方案 4 目前运行的 GPS (32 颗卫星) + BD2 (5GEO + 5IGSO + 4MEO) + GLONASS(24 颗卫星),共 70 颗卫星。

方案 5 未来完整的四大卫星导航系统组合 GPS (32 颗卫星) + BDS (5GEO + 3IGSO + 27MEO) + GLONASS(24 颗卫星) + Galileo 系统(27 颗卫星),共 118 颗卫星。

其中,北斗区域星座 BD2, GPS 星座和 GLONASS 星座均采用 2013-01-01 的广播星历,未来服务全球的

北斗系统 BDS 按 35 颗卫星(5 颗 GEO,3 颗 IGSO,27 颗 MEO)进行仿真,Galileo 系统按 27 颗卫星进行仿真,具体参数如表 1 所示。

表 1 BDS 和 Galileo 系统星座参数

Table 1 Parameters of BDS and Galileo system constellations

轨道类型	BDS			Galileo 系统
	GEO	IGSO	MEO	MEO
轨道面	1	3	3	3
卫星数	5	3	27	27
长半轴/km	42 164	42 164	27 906	29 978
轨道偏心率	0	0	0	0
轨道倾角/(°)	0	55	55	56
近地点角距/(°)	0	0	0	0
升交点赤经	定点于东经 58.75°,80°,110.5°,140°,160°	交叉点经度为东经 118°	70°,190°,310°	0°,120°,240°
平近点角			每个轨道上首颗卫星初始时刻平近点角分别为 0°,15°和 30°,其余依次增加 40°	

在全天 24 h 内,对 5 种方案的 P_{PDOP} 特性分别进行仿真分析。其中,纬度取样步长 $\Delta B = 5^\circ$,经度取样步长 $\Delta L = 5^\circ$,时间取样步长 $\Delta T = 5 \text{ min}$ 。各方案 P_{PDOP} 分布如图 1 ~ 图 5 所示。

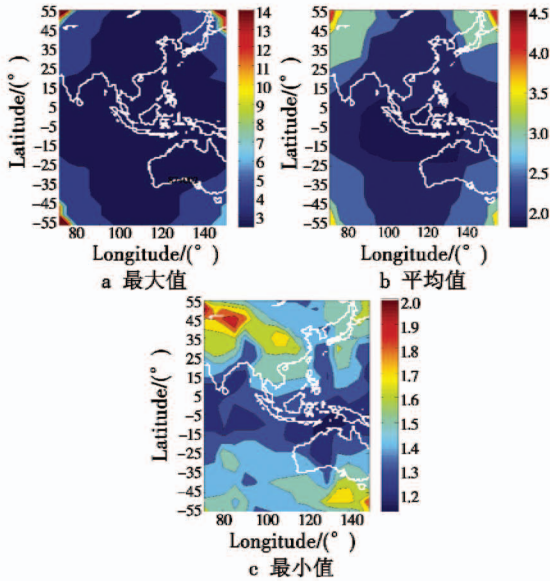


图 1 方案 1 服务区域的 P_{PDOP} 值分布

Fig.1 Distribution of P_{PDOP} value in the service area of Scheme 1

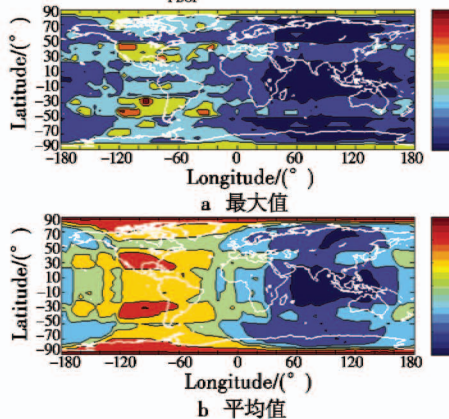


图 2 方案 2 全球 P_{PDOP} 值分布

Fig.2 Global distribution of P_{PDOP} value in Scheme 2

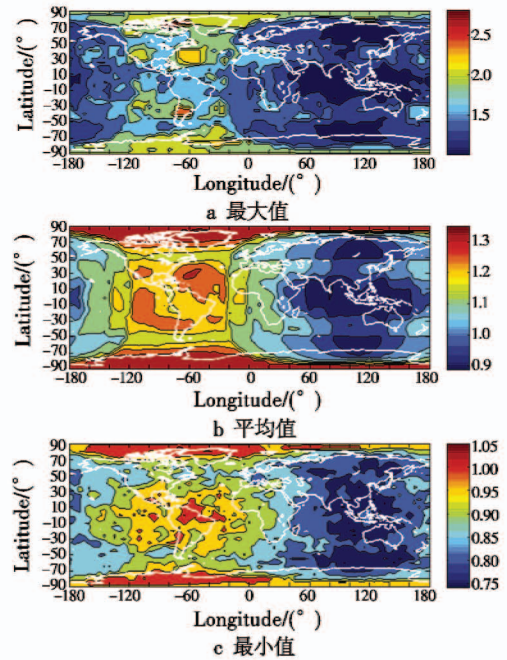


图 3 方案 3 全球 P_{PDOP} 值分布

Fig.3 Global distribution of P_{PDOP} value in Scheme 3

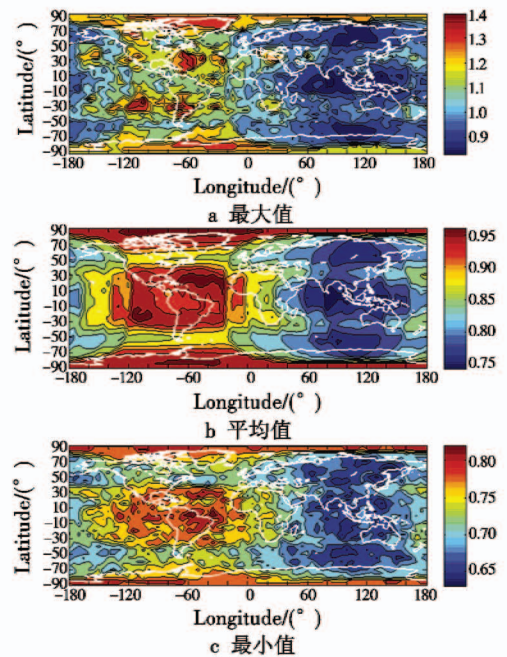


图 4 方案 4 全球 P_{PDOP} 值分布

Fig.4 Global distribution of P_{PDOP} value in Scheme 4

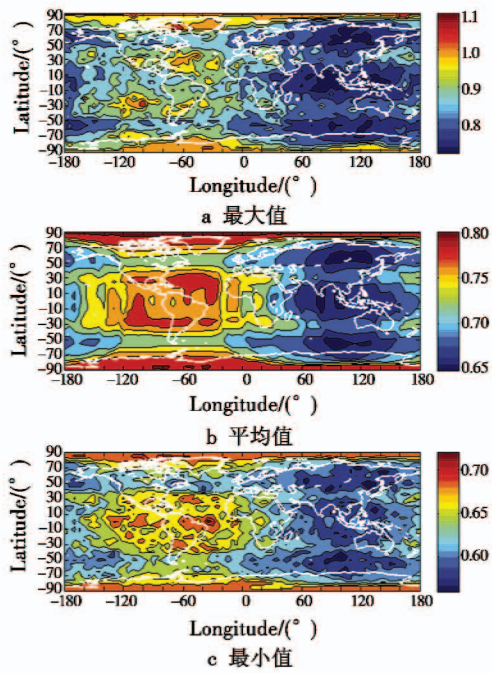


图 5 方案 5 全球 P_{PDOP} 值分布

Fig. 5 Global distribution of P_{PDOP} value in Scheme 5

由图 1 可以看出, 24 h 内, 中国大陆区域内的 P_{PDOP} 最大值均小于 6, 服务区域内的平均值均小于 4.5, 在服务区域中只有 4 个拐角处的值较大, 也就是说, 只有服务区域的边界地区(经度和纬度同时取得边界值的地区)在仿真时间段内 P_{PDOP} 最大值会超过 6。

对比 5 种方案可以得到以下结论。

1) 东半球的 P_{PDOP} 值整体优于西半球, 尤其是亚太地区, P_{PDOP} 值明显小于其他地区, 这是由北斗系统的混合星座决定的, 北斗系统中的 GEO 卫星和 IGSO 卫星对亚太地区有明显的增强效果。

2) 由图 1 和图 2 可以看出, 未来服务全球的北斗

系统在亚太地区 P_{PDOP} 平均值可达到 1.0 ~ 1.3, 比北斗区域服务系统在亚太地区的 2.0 ~ 4.5 平均增加 1.0 ~ 3.2, 说明未来服务全球的北斗系统仍然对亚太地区的定位性能有明显的增强效果, 而且未来服务全球的北斗系统在其他地区的 P_{PDOP} 平均值也达到 1.2 ~ 1.6。

3) 对比图 1、图 3 和图 4, 北斗区域服务系统在加入当前的 GPS 和 GLONASS 后, P_{PDOP} 值明显减小。只加入 GPS, P_{PDOP} 平均值减小 1.1 ~ 3.15, 同时加入 GPS 和 GLONASS, P_{PDOP} 平均值减小 1.25 ~ 3.45。

4) 对比图 3 和图 4, P_{PDOP} 值较大即定位性能相对较差的区域均出现在高纬度区域, 但是, 加入 GLONASS 后对高纬度区域定位性能的改善尤为明显, 高纬度区域的 P_{PDOP} 平均值由 1.35 降低到 0.95, 改善幅度达到 29.6%, 中低纬度区域的 P_{PDOP} 平均值由 0.9 降低到 0.75, 改善幅度仅为 16.7%, 由此可见, GLONASS 的加入能够提高高纬度区域的定位性能, 这与 GLONASS 的星座构型有关, GLONASS 卫星较高的轨道倾角能更好地覆盖极地区域, 对俄罗斯本土的定位性能有一定的优势。而 GPS, Galileo 系统和 BDS 的卫星轨道倾角均为 $55^\circ \sim 56^\circ$, 对高纬度区域的覆盖能力有限, 因此, 加入 GPS 和 Galileo 系统后对高纬度区域的定位性能改善并不是很明显。

5) 图 5 展示了未来四大全球卫星导航系统全部建成后的 P_{PDOP} 值分布情况, 届时 P_{PDOP} 平均值将达到 0.65 ~ 0.8。对比图 2 和图 5, 北斗全球导航卫星系统在加入 GPS, GLONASS 和 Galileo 系统后, P_{PDOP} 值相比三系统组合依然呈现减小的趋势, P_{PDOP} 平均值减小 0.35 ~ 1.0。

在仿真生成的伪距中添加标准差为 5 m 的高斯白噪声作为观测量, 5 种方案各向定位误差统计结果如表 2 所示。

表 2 各向定位误差统计结果

Table 2 Positioning error of each orientation

m

方案	东向(E)误差		北向(N)误差		垂向(U)误差	
	均值	RMS	均值	RMS	均值	RMS
1 BD2	3.632	6.452	1.956	4.190	-3.669	6.182
2 BDS	1.005	2.859	1.027	2.292	-2.495	3.844
3 GPS + BD2	-1.073	2.385	-1.077	1.953	1.328	2.925
4 GPS + BD2 + GLONASS	0.849	1.472	-0.562	1.346	1.083	1.953
5 GPS + BDS + GLONASS + Galileo	-0.528	0.818	-0.365	0.606	-0.859	1.081

各方案的垂向误差均比东向误差和北向误差大, 也就是高程定位性能均比水平定位性能差; 方案 2 ~ 方案 4 各向的定位误差均值和 RMS 值均明显优于方案 1 北斗区域服务系统的统计结果; 随着仿真卫星数的增多, 定位误差均值和 RMS 值均减小; 对比方案 1、方案 3、方案 4, 目前运行的北斗区域服务系统加入 GPS 后, 定位性能得到明显提升, 在此基础上再加入 GLONASS, 定位性能也得到相应提升, 但是提升幅度较前者偏小。

3 实测数据定位性能分析

国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS) 组织于 2011 年建立了多星座 GNSS 试验网(Multi-GNSS Experiment, MGEX), 并于 2012 年 2 月首次对多星座 GNSS 卫星的信号进行了跟踪并开展试验。MGEX 监测站能够跟踪、收集和分析所有可用的 GNSS 信号, 包括四大卫星导航系统的信号, 其分析中心能够利用研

发的处理软件同时处理多个 GNSS 的卫星信号,并将处理得到的导航数据和观测数据以 RINEX 格式免费提供给全球用户^[9-10]。目前全球共有 100 多个跟踪站,中国大陆地区有 3 个多星座 GNSS 跟踪站。

本文选取某跟踪站 2014 年第 342 天的混合观测数据和导航数据进行实验,其真实位置大地坐标略,对现阶段 BD2, GPS/BD2 和 GPS/BD2/GLONASS 方案分别进行实验,处理结果如图 6 和表 3 所示。

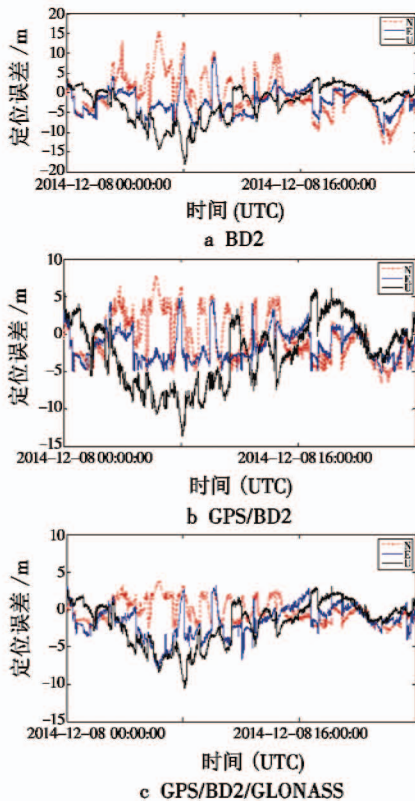


图 6 3 种方案的定位误差

Fig. 6 Positioning error of the three schemes

表 3 不同方案定位精度比较

Table 3 Positioning accuracy of different schemes

		BD2	GPS/BD2	GPS/BD2/GLONASS
均值	N/m	-3.259	-1.963	-0.589
	E/m	6.298	2.358	1.092
	U/m	9.492	4.827	2.983
RMS	N/m	4.548	2.921	1.192
	E/m	5.214	3.048	1.527
	U/m	7.596	5.292	3.039

北斗公开服务性能规范中,服务精度指标为水平和垂直均不大于 10 m,由以上结果可以看出,现阶段北斗区域服务系统的定位精度满足北斗公开服务性能规范中的要求,且其与 GPS 和 GLONASS 组合,随着星座数的增加,各向定位精度均有所提升,以高程定位精度为例,双星座、三星星座相对单星座的定位误差均值分别减小约 49.15% 和 68.57%,其 RMS 分别减小约 30.33% 和 59.99%。

4 结束语

本文通过对多星座 GNSS 定位理论分析,结合仿真数据和实测数据对北斗区域导航系统、北斗全球导航系统及多星座 GNSS 的定位性能逐步进行了分析。针对现阶段北斗区域服务系统,本文通过仿真和实测数据两种方法分别对单系统、双系统组合和三系统组合进行了分析,分析结果表明,北斗区域服务系统完全满足北斗公开服务性能规范中的定位性能要求,而且随着星座数的增加,定位性能逐渐增强,加入 GLONASS 后对高纬度区域定位性能的改善尤为明显。针对未来北斗全球导航系统,本文主要通过仿真的方法,对单系统和未来四大全球导航系统组合进行了分析,分析结果表明,未来服务全球的北斗系统仍然对亚太地区的定位性能有明显的增强效果,而且未来服务全球的北斗系统在其他地区的 P_{PDOP} 平均值也达到 1.2 ~ 1.6,此外,未来四大导航系统组合对极区的定位性能改善也较为明显。

参考文献

- [1] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [2] VIANDIER N, RABAOUI A, MARAIS J. Enhancement of Galileo and multi-constellation accuracy by modeling pseudorange noises[C]//The 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), IEEE, 2009, 459-464.
- [3] 王解先,刘红新. Galileo、GPS 和 Galileo/GPS 组合系统实用性的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(1): 113-117.
- [4] 刘帅,赵国荣,高超,等. GPS/北斗组合卫星导航系统快速选星算法[J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 32-35.
- [5] VERHAGEN S. Performance analysis of GPS, Galileo and integrated GPS-Galileo [C]//Proceedings of ION GPS 2002, Portland, Oregon, 2002: 2208-2215.
- [6] 曾庆化,刘建业,胡倩倩,等. 北斗系统及 GNSS 多星座组合导航性能研究[J]. 全球定位系统, 2011(1): 53-57.
- [7] 杨鑫春,李征航,吴云. 北斗卫星导航系统的星座及 XPL 性能分析[J]. 测绘学报, 2011, 40(s): 68-72.
- [8] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. 全球卫星导航系统 GPS, GLONASS, Galileo 及其他系统[M]. 程鹏飞,蔡艳辉,文汉江,等译. 北京:测绘出版社, 2009.
- [9] DOW J, NEILAN R, RIZOS C. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3/4): 191-198.
- [10] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, KHACHIKYAN R, et al. IGS-MGEX: preparing the ground for multi-constellation GNSS science[J]. Inside GNSS, 2014, 9(1): 42-49.