

doi: 10.7690/bgzd.2018.05.004

# 北斗三代卫星导航系统服务性能仿真评估

王郁茗, 邵利民

(海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 为了解第三代北斗卫星导航系统的星座构型及其全球范围内的服务性能, 建立北斗三代星座构型。利用星座可用性和覆盖性评估指标, 分别仿真评估在 4 个典型 MGEX 测站及全球范围进行观测的北斗三代星座服务性能。评估结果表明: 全球范围内北斗三代系统平均可见星 14 颗, GDOP 均值为 1.41, 服务性能与 GPS 相当, 且通过 4 个 MGEX 测站评估结果验证在 58.75°~160°E 区域北斗性能指标明显优于 GPS。该评估结果可为北斗三代系统全面建成时导航定位服务的有效利用及精度的提高提供参考。

**关键词:** 北斗三代系统; GDOP; 覆盖重数; 服务性能; 评估

**中图分类号:** TJ765.4 **文献标志码:** A

## BeiDou Navigation Satellite System Service Performance Simulation Evaluation

Wang Yuming, Shao Limin

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** In order to understand the constellation configuration of BeiDou Navigation Satellite System and its global service performance, the third-generation constellation configuration of BeiDou was established. Using constellation usability and coverage assessment indicators, the performance of the Beidou third-generation constellation at 4 typical MGEX stations and the global observatory are simulated and evaluated respectively. The evaluation results show that there are an average of 14 stars and a mean GDOP of 1.41 in the global system of BeiDou. The performance of the Beidou system is equivalent to that of the GPS. The performance evaluation of the Beidou in 58.75°-160°E is obviously better than that of the GPS. The results of this evaluation can provide reference for the effective utilization of navigation and positioning services and the improvement of accuracy when the BeiDou Navigation Satellite System are fully completed.

**Keywords:** BeiDou Navigation Satellite System ; GDOP; covered multiplicity; service performance; evaluation

## 0 引言

北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)的发展战略分“三步走”。“第一步”建立有源定位体制,于 2000 年发射 2 颗 GEO 卫星并投入使用,称为北斗卫星导航试验系统,俗称“北斗一代”系统;“第二步”采用“有源定位+无源定位”体制,于 2012 年完成“5GEO+5IGSO+4MEO”星座结构建设,服务范围覆盖亚太区域,称为北斗区域卫星导航系统,俗称“北斗二代”系统;“第三步”建设北斗全球卫星导航系统,在扩展“5+5+4”星座结构基础上,将区域服务拓展为全球服务,预计到 2020 年前后,完成 35 颗星组网,为全球提供服务<sup>[1-5]</sup>,俗称“北斗三代”系统。为充分了解第三代北斗卫星导航系统的星座构型及其全球范围内的服务性能,笔者根据文献[2]仿真得到北斗全球卫星导航系统星座构型,利用星座可用性和星座覆盖性 2 个评估指标<sup>[3]</sup>对北斗三代系统服务性能作系统性的评估分析。

## 1 星座性能评估指标

星座性能评估指标是卫星导航系统性能评估的基本依据,卫星导航系统服务性能受星座构型及可见星数量影响。星座可用性和星座覆盖性是卫星导航系统服务性能评估的主要指标。

### 1.1 星座可用性评估指标

星座的可用性是导航系统在评估区域内提供可用的导航服务的性能标志。可用的导航服务必须既能提供一定的导航定位精度,同时又能满足服务的完整性。特定区域、特定时间内的导航星座可用性主要与星座空间构型相关。星座空间构型指标主要评估某个观测历元可见卫星所处空间位置分布及其构成的几何形状强度,通常利用 3 维位置几何精度衰减因子(geometry dilution of precision, GDOP)加以评定<sup>[6-7]</sup>。GDOP 可直接影响定位、导航及测量的精度,其与空间信号误差无关,是只与卫星和用户几何布局相关的函数,可见星数量和空间拓扑结构

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(41571441)

作者简介: 王郁茗(1990—),男,山东人,满族,博士研究生,从事军事航海安全保障与防护技术研究。

会影响 GDOP 的大小<sup>[8]</sup>。GDOP 的求解公式与伪距观测方程最小二乘求解的权系数矩阵相关，伪距观测方程见下式：

$$\rho_i^j(t) = R_i^j(t) + c\delta t_i(t)。$$
 (1)

式中： $\rho_i^j(t)$  为观测点  $i$  在历元  $t$  时对卫星  $j$  的伪距观测测量，定义其包含测量误差，因此方程将误差项略去； $R_i^j(t)$  为观测点  $i$  在历元  $t$  时与卫星  $j$  的几何距离； $\delta t_i(t)$  为观测点  $i$  在历元  $t$  时的接收机钟差； $c$  为光速。将方程按照泰勒级数线性化展开可得：

$$\rho_i^j(t) - R_{i0}^j(t) = l_i^j(t)\Delta x + m_i^j(t)\Delta y + n_i^j(t)\Delta z + \Delta t。$$
 (2)

式中： $l_i^j(t) = \frac{x^j(t) - x_{i0}(t)}{R_{i0}^j(t)}$ ； $m_i^j(t) = \frac{y^j(t) - y_{i0}(t)}{R_{i0}^j(t)}$ ； $n_i^j(t) = \frac{z^j(t) - z_{i0}(t)}{R_{i0}^j(t)}$ ； $\Delta t = c\delta t_i(t)$ 。由此可得方向余弦

矩阵为：

$$H = \begin{bmatrix} l_i^1(t) & m_i^1(t) & n_i^1(t) & 1 \\ l_i^2(t) & m_i^2(t) & n_i^2(t) & 1 \\ l_i^3(t) & m_i^3(t) & n_i^3(t) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_i^k(t) & m_i^k(t) & n_i^k(t) & 1 \end{bmatrix}。$$
 (3)

式中  $k$  代表第  $k$  颗星，权系数矩阵为

$$Q = [H^T H]^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix}。$$
 (4)

由权系数矩阵  $Q$  可得 GDOP 计算公式(5)。GDOP 是只与卫星和用户相对位置有关的函数，GDOP 值越小越好，通常小于等于 6 时，系统服务较好<sup>[2]</sup>，具体分级见表 1<sup>[9]</sup>。

$$GDOP = (q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44})^{1/2}。$$
 (5)

表 1 GDOP 等级划分

GDOP	等级
1	最优
2 ~ 3	优
4 ~ 6	良
7 ~ 8	中
9 ~ 20	合格
> 20	差

1.2 星座覆盖性评估指标

卫星星座由多颗导航卫星按照设计的形状构型排列，可提供一定区域的连续覆盖。星座覆盖性指标 (Coverage) 主要对评估区域评定星座连续提供 4

重以上信号覆盖的能力<sup>[10]</sup>，笔者从这个角度出发对全球区域的星座覆盖性进行评估。从实际应用出发，星座覆盖性指标通常被定义为造成信号或导航定位服务丢失的概率<sup>[6]</sup>，为能更有效地利用北斗卫星导航系统，必须对北斗星座覆盖性作详尽分析。

单颗卫星覆盖可定义为卫星在某个最小高度角下所观测到的最大地表面积，或该地表面边界对应的地心角，见图 1。图中： $\gamma$  为波束半张角； $h$  为卫星相对地面高度； $s'$  为地表星下点； $E$  为最小观测角； $R$  为地球半径。 $\theta$  为卫星覆盖角。导航卫星地表覆盖性见下式。

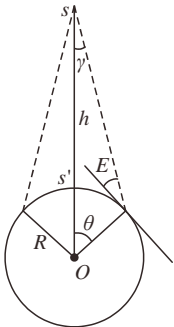


图 1 卫星覆盖示意图

$$\theta = \arccos(\frac{R \cos E}{R + h}) - E；$$
 (6)

$$A_s = 4\pi R^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}；$$
 (7)

$$A = \frac{A_s}{A_e} = \sin^2 \frac{\theta}{2} \times 100\%。$$
 (8)

式中： $A_s$  为卫星在地表覆盖区域面积； $A_e$  为地球表面积， $A$  为卫星覆盖区占全球面积百分比。北斗导航系统有 3 类卫星，高度  $h$  有所不同，直接影响卫星覆盖区域，最小观测角为  $5^\circ$  的 3 类卫星覆盖角  $\theta$  和覆盖面积比  $A$ ，如表 2<sup>[11]</sup>。

表 2 北斗卫星  $5^\circ$  最小观测角的卫星覆盖统计

卫星类型	轨道高度 $h/\text{km}$	覆盖角 $\theta(^{\circ})$	覆盖面积比 $A/\%$
GEO/IGSO	357 86	76.34	38.19
MEO	215 28	71.86	34.43

以上为单颗卫星覆盖的定义及算法，有  $n$  颗卫星覆盖评估区域，该评估区域的卫星覆盖重数就是  $n_0$ 。利用式 (6 ~ 8) 即推出评估区域的卫星覆盖重数。

2 北斗三代系统星座仿真及评估策略

2.1 北斗三代系统星座仿真建立

北斗全球卫星导航系统俗称北斗三代系统，其空间星座由 35 颗卫星组成，包括 3 颗倾斜地球同步

轨道卫星 (IGSO)、5 颗地球静止轨道卫星 (GEO) 及 27 颗中圆地球轨道卫星 (MEO)<sup>[2]</sup>。

3 颗 IGSO 卫星轨道呈“8”字形, 高度 35 786 km, 轨道倾角 55°。3 颗卫星位于 3 个轨道面内, 各卫星同间隔分布, 间隔角度 120°, 星下点轨迹重合, “8”字形轨道交点位于 118°E 的赤道上。5 颗 GEO 卫星轨道高度 35 786 km, 与地球同步静止, 分别定点于 58.75°E、80°E、110.5°E、140°E 及 160°E 的赤道上。27 颗 MEO 卫星轨道高度 21 528 km, 轨道倾角 55°。采用 Walker 星座布局: 卫星总数 27, 轨道面个数 3, 相位参数 1。3 个轨道面分别呈正交分布, 每个轨道面各有 9 颗卫星均匀分布, 其中第一轨道面的升交点赤经为 0°。

北斗系统时间基准为北斗时, 采用国际单位制“秒”为基本单位连续累计, 以周和周内秒计数, 不闰秒。北斗时与国际 UTC 时保持同步, 两者之间的闰秒信息在卫星导航电文中播报<sup>[2]</sup>。图 2 为北斗三代系统卫星星下点轨迹, 系统仿真北斗时为 2017 年 3 月 5 日 12:00。

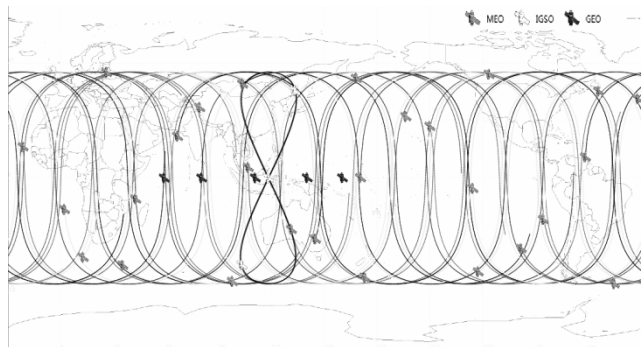


图 2 北斗三代系统卫星星下点轨迹

## 2.2 评估策略

为精确评估北斗三代星座在全球范围内的服务性能, 评估分为单站评估和全球区域评估。单站选

取国内国外不同经纬度的多模 GNSS 实验跟踪网 (multi-GNSS experiment, MGEX) 的跟踪站进行评估; 全球区域按照经纬度间隔为 2.5°×5°的网格划分, 以网格中心作为评估点。统计各跟踪站、网格测试得到的 GDOP 和 Coverage 的最大值、最小值、平均值及均方差 4 类评估结果。为横向比较, 以实测的 GPS 性能评估结果作为参考, GPS 卫星轨道数据采用德国地球科学中心 (GFZ) 发布的精密星历 (SP3) 产品。系统仿真历元选择 2017 年 3 月 5 日 12:00 至 3 月 6 日 12:00 时共 24 h, 数据采样间隔 600 s, 最小观测角为 5°。

## 3 评估结果分析

### 3.1 单站评估分析

单站评估选择 4 个分散各地的 MGEX 跟踪站: 武汉的九峰站 (JFNG)、澳大利亚的佩斯站 (CUTO)、秘鲁的阿雷基帕站 (AREG) 和马约特岛的藻德济站 (MAYG), 坐标数据如表 3, 全球分布见图 3。GDOP 和 Coverage 评估结果统计见表 4。

表 3 MGEX 跟踪站坐标数据

MGEX 跟踪站	纬度	经度
JFNG	30.3056°N	114.2927°E
CUTO	32.0014°S	115.5341°E
MAYG	12.7819°S	45.2580°E
AREG	16.4652°S	71.4927°W

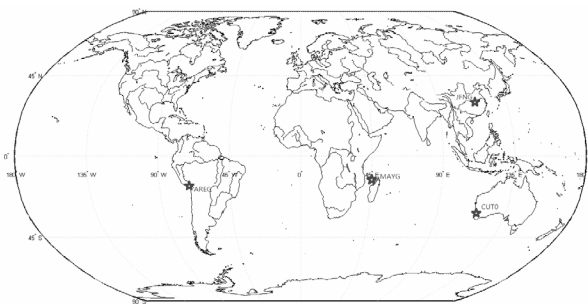


图 3 MGEX 跟踪站分布

表 4 MGEX 跟踪站 Coverage 及 GDOP 评估结果比较

MGEX 测站	Coverage				GDOP			
	范围		均值		范围		均值	
	BDS	GPS	BDS	GPS	BDS	GPS	BDS	GPS
JFNG	15 ~ 20	7 ~ 13	17.4	10.2	1.05 ~ 1.58	1.30 ~ 3.01	1.28	1.94
CUTO	14 ~ 19	6 ~ 12	17.7	9.7	1.08 ~ 1.62	1.28 ~ 3.04	1.36	2.11
MAYG	9 ~ 14	7 ~ 13	12.3	10.6	1.35 ~ 2.77	1.25 ~ 2.66	1.92	1.82
AREG	6 ~ 12	7 ~ 12	9.3	9.9	1.56 ~ 3.30	1.30 ~ 3.23	2.32	2.25

由表 4 可以看出: 九峰站和佩斯站观测到的 BDS 卫星数量一致, 且都比观测到的 GPS 卫星多 6~7 颗; 阿雷基帕站和藻德济站观测到的 BDS 卫星数量与 GPS 较为一致。总体来看, 4 个观测站 GPS 可见星数量较为一致, 而 BDS 可见星数量变化

较大。由于北斗三代星座较 GPS 在 58.75°~160°E 区域多布设 5 颗 GEO 和 3 颗 IGSO 卫星, 因此该区域 BDS 卫星观测能力得到增强。

各跟踪站可观测到卫星数量直接影响 GDOP 大小。九峰站和佩斯站 BDS 的 GDOP 值变化较小, 其

均值明显小于 GPS 的均值,而阿雷基帕站和藻德济站 BDS 的 GDOP 值变化较大,平均值略大于 GPS,但相差不大,总体与 GPS 的 GDOP 值变化较为一致。

3.2 全球区域评估分析

北斗三代与 GPS 系统在全球范围内 Coverage 及 GDOP 测试数据统计结果见表 5 及图 4。整个评估历元中,全球范围内北斗三代星座可观测卫星数量在 6~20 之间,平均值达到 13.8,效果理想,均方差维持在 2.8 左右,说明全球范围内整个评估历元中,可观测的北斗卫星数量较为稳定。Coverage 最小值大于 6,满足北斗性能服务的基本需求。GPS 星座 Coverage 最大值为 19,最小值为 7,平均值为 12.3,北斗三代系统卫星覆盖指标评估结果与 GPS

较为一致。如图 4(b)所示,GPS 的 Coverage 均方差呈周期性波动,北斗三代较之更加稳定。

在整个评估历元中,北斗三代星座 GDOP 最大值为 3.38,等级达到优,其中 GDOP 最大值达到 1 的历元占 42%,即全球范围内约 42%的历元,GDOP 能达到最优的等级;GDOP 最小值为 0.96,均方差维持在 0.22 左右,整体波动小,星座几何构型稳定。GPS 星座 GDOP 最大值为 3.57,最小值为 0.95,平均值为 1.53。整体上北斗三代星座与 GPS 相比,卫星几何构型等级基本一致。

表 5 全球区域 Coverage 及 GDOP 评估结果统计

名称	Coverage			GDOP		
	max	min	Average	max	min	Average
BDS	20	6	13.8	3.38	0.96	1.41
GPS	19	7	12.3	3.57	0.95	1.53

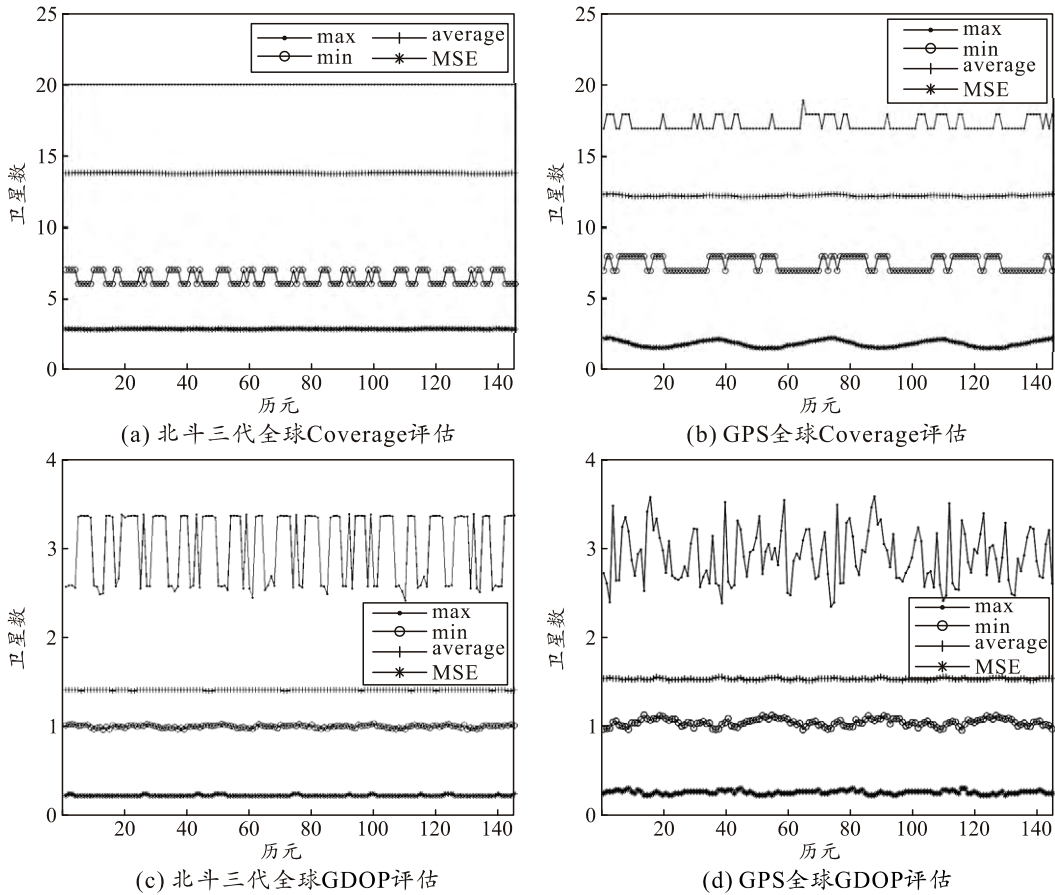


图 4 北斗三代与 GPS 全球区域 Coverage 及 GDOP 指标评估结果

4 结论

笔者采用卫星几何构型(GDOP)及星座覆盖重数(Coverage)2 个性能评估指标,对北斗三代仿真星座进行了系统性的评估,并与 GPS 评估结果进行比较分析,结论如下:

1) 北斗三代系统在全球范围平均可见星数为 14 颗, GDOP 均值为 1.41, 服务性能与 GPS 相当,

等级达到优以上,能够为全球区域内的用户提供性能优良的服务;

2) 由于北斗三代星座的 5 颗 GEO 及 3 颗 IGSO 卫星对 58.75°~160°区域(主要为中国大陆及周边地区)有服务增强作用,该区域北斗三代系统的服务性能明显优于 GPS。

(下转第 35 页)

表 1 2 种方法计算的俯仰角和偏航角误差 (′)

类型	常用方法		文中方法	
	均值	方差	均值	方差
偏航角	0.129	0.532	0.019	0.436
俯仰角	0.149	0.759	0.067	0.484

表 2 计算的俯仰角和偏航角与遥测比较差值 (°)

类型	常用方法				
	时间/s				
	20	40	70	100	130
偏航角	0.135	-0.243	-0.163	1.310	-0.089
俯仰角	-0.178	-0.219	-0.152	-0.717	-0.132

类型	文中方法				
	时间/s				
	20	40	70	100	130
偏航角	0.055	-0.157	-0.071	0.128	-0.005
俯仰角	-0.048	-0.052	-0.281	-0.542	-0.002

从图 2 可以看出：文中方法结果更接近遥测结果，该方法和常用方法结果趋势一致，在目标成像小，头尾识别不清时，误差较大，可见 2 种方法的精度均取决于判读误差，而判读误差取决于导弹成像的几何尺寸及清晰程度，成像尺寸越大，精度越高。从表 1 和表 2 可以看出：常用方法的俯仰角和偏航角误差稍大于文中方法，其主要原因是常用方法先计算坐标，再经坐标相减得到  $X_d$ 、 $Y_d$ 、 $Z_d$ ，而此时计算的  $\varphi$ 、 $\psi$  包含很大的坐标误差。

4 结论

笔者在提取图像导弹的头部和尾部基础上，推

\*\*\*\*\*

(上接第 15 页)

参考文献：

[1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010(1): 1-6.

[2] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗导航系统空间信号接口控制文件[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2016.

[3] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn>, 2011.

[4] 薛树强, 杨元喜. 最小 GDOP 组合 Walker 星座构型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016(3): 380-387.

[5] 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学(地球科学), 2014(1): 72-81.

导了高精度偏航角及俯仰角的计算方法和精度估计模型，通过在任务中应用表明：高精度方法不包含计算中的坐标误差，其精度较高，常用方法精度差于文中方法。但是实际应用一定要注意高精度方法是 2 台经纬仪交会而得，故交会角接近 0°或 180°时误差较大，导致结果失真，因而选择交会计算时应避免这种情况。

参考文献：

[1] 李清安. 空间目标姿态测量技术及其仿真实验研究[D]. 中国科学院研究生院. 2006: 5.

[2] 李喆. 光学测量的飞行器空间姿态测量方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(3): 232-236.

[3] 周慧. 基于小波变换的外测设备动态精度评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(12): 75-79.

[4] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.

[5] 李喆, 丁振良, 袁峰, 等. 飞行器姿态参数的光学测量方法及其精度的蒙特卡罗模拟[J]. 吉林大学学报(工), 2009, 39(5): 1401-1406.

[6] 刘英慧. 运动目标姿态参数的一种 CCD 测量方法[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(4): 459-461.

[7] 赵怀, 赵建科, 田留德, 等. 光电经纬仪动态测角精度随机误差检测方法研究[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1010-1013.

[8] 张涛, 李雪雷, 米阳. 光电经纬仪交会数据误差分析[J]. 智能计算机与应用, 2013, 3(3): 50-52.

[6] XU Z L, HE D L, LI J, et al. Analysis of Location Ambiguity, GDOP and Station Layout of Threestation in Multilateration[C]. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016: 44.

[7] 薛树强, 杨元喜. 最小 GDOP 组合 Walker 星座构型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016(3): 380-387.

[8] 李志亮, 李小将, 翟明明. 敏捷成像卫星任务动态调度仿真系统设计与实现[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 4-8.

[9] 张海忠, 刘雪瑞, 盖鹏飞, 等. 基于 STK 的北斗区域系统 GDOP 仿真分析[J]. 海洋测绘, 2013, 33(5): 31-33.

[10] 张玉馄, 戴金海. 基于仿真的星座设计与性能评估[J]. 计算机仿真, 2001, 18(3): 5-7.

[11] 徐华君, 王海涛. 利用广播星历确定 BDS 卫星飞行区域[J]. 测绘科学, 2016(5): 1-4, 20.