DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.02.022

北斗三号在远洋船舶上的导航服务性能仿真与分析

曹翔

（江苏航运职业技术学院，江苏 南通 226010）

摘　要：为分析北斗三号在远洋船舶上的导航服务性能，基于 STK 仿真平台建立了北斗三号系统的星座模型，并在全球海域选取了 7 个典型观测站点，仿真分析了各观测点的可见卫星数及 GDOP 值。结果表明中国沿海及印度洋平均可见星数最多达 13 ~ 15 颗，GDOP 值较小；而大西洋平均可见星数最少仅 8 颗左右，GDOP 值较大。但在全球海域 GDOP 值维持在“优”的等级，完全满足远洋船舶对导航定位精度的要求。

关键词：北斗三号；STK；可见星；GDOP；船舶

中图分类号：U644　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2022）02-0070-03

1 引言

北斗卫星导航系统是完全由我国自主建设运行的全球卫星导航系统，先后经历了北斗一号，北斗二号，于 2020 年 7 月已全面建成北斗三号系统，向全球提供服务。2014 年 11 月 23 日，IMO（国际海事组织）海上安全委员会审议通过了对北斗导航系统认可的航行安全通函，标志着北斗导航系统已获得 IMO 的认可，从此正式成为全球无线电导航系统的重要组成部分[1]。因此，全面了解建成后的北斗三号系统在全球海域的导航服务性能，显得非常及时和必要。

STK（Satellite Tool Kit）是一款广泛应用于卫星导航系统的仿真分析软件[2-3]，本文基于该平台，建立了北斗三号星座仿真模型，并在全球海域选取了 7 个典型观测站点，最后对各观测点的卫星可见性和 GDOP（几何精度因子）值进行了仿真分析，从而探讨北斗三号在远洋船舶上的导航服务性能。

2 北斗三号系统星座仿真

北斗三号系统空间段共由 30 颗卫星组成，其中 3 颗地球静止轨道卫星（GEO），3 颗倾斜同步轨道卫星（IGSO）和 24 颗中轨道（MEO）卫星。根据北斗官方发布的 ICD 文件[4]对轨道参数的描述如下：

（1）3 颗 GEO 卫星轨道高度 35786km，分别定点于 80° E、110.5° E 和 140° E。

（2）3 颗 IGSO 卫星轨道高度 35786km，分布在三个轨道面，轨道倾角 55° ，轨道面间相距 120° ，卫星星下点轨迹呈 8 字形，中心位置为 118° E。

（3）24 颗 MEO 卫星轨道高度 21528km，分布在三个轨道面，每个轨道面 8 颗，轨道倾角 55° ，轨道面间相距 120° 。

基于以上信息，本文利用 STK 软件，建立了北斗三号星座，仿真结果如图 1 和图 2 所示：

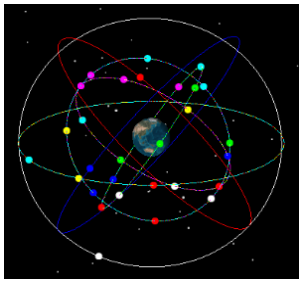

图 1　北斗三号系统星座模型

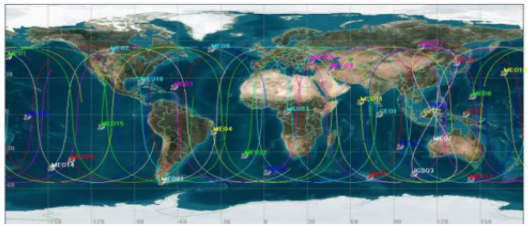

图 2　北斗三号卫星星下点轨迹

3 典型观测站点选取

为研究北斗三号在远洋船舶上的导航服务性能，在全球船舶航行的不同海域选取了 7 个典型观测站点，分别是：东海（123° E，31° N），北太平洋（167° W，42° N），南太平洋（161° W，18° S），北印度洋（83° E，2° N），南印度洋（73° E，33° S），北大西洋（38° W，40° N），南大西洋（16° W，26° S）。将这些典型观测站点插入仿真场景，如图 3 所示：

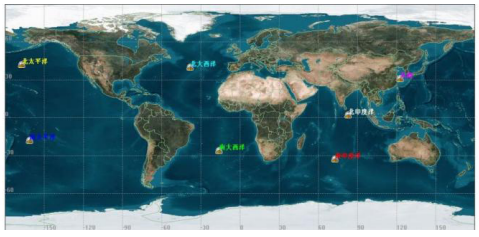

图 3　全球海域典型观测站点分布图

4 北斗三号在全球海域卫星可见性分析

由卫星定位原理可知，用户进行三维定位时，至少需要观测到四颗卫星，只有当卫星出现在测者地平线以上时，接收机天线才能收到卫星信号[5]。此外，当卫星仰角过低时，卫星信号在传播过程中，会引起较大的电离层折射误差、对流层折射误差及多路径效应误差，降低定位精度。因此，选星定位时，通常选取仰角大于等于 5° 的卫星来保障定位精度[6]。

在仿真场景中设置 7 个观测站点卫星截止高度角为 5° ，仿真时间设置为 2021 年 3 月 2 日 04:00 至 3 月 3 日 04:00。在 STK 中利用 Coverage（覆盖性分析）工具，对每个观测点进行卫星可见性分析。仿真结果如图 4 ~ 6 所示：

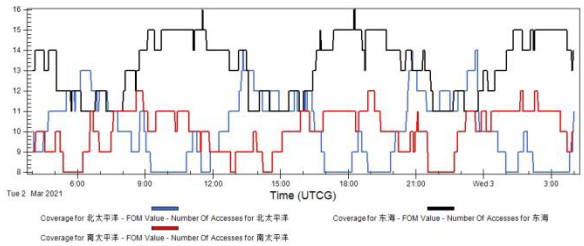

图 4 东海、北太平洋、南太平洋 24 小时可见星数随时间变化

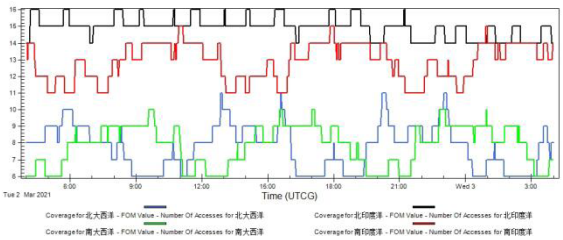

图 5 北印度洋、南印度洋、北大西洋、南大西洋 24 小时可见星数随时间变化

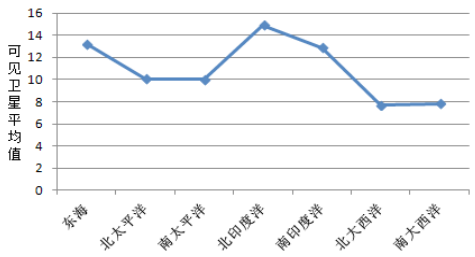

图 6 各观测点平均可见星数

从图 4 和图 5 可以看出，24 小时内最大可见星数出现在东海和北印度洋为 16 颗，尤其北印度洋靠近赤道的观测站点，可见星数稳定在 14 ~ 16 颗之间；最小可见星数出现在北大西洋和南大西洋为 6 颗。由卫星定位原理可知，船舶用户进行二维定位时，至少需要 3 颗卫星，因此，从仿真结果来看，船舶在全球海域范围内均可利用北斗三号系统进行定位。但可见星数越多，定位精度越高[7]。

从图 6 统计的各观测点平均可见星数发现，北印度洋靠近赤道的观测点平均可见星数最多，可达到 15 颗左右；位于东海的观测点平均可见星数 13 颗左右；北太平洋和南太平洋平均可见星数 10 颗左右；北大西洋和南大西洋平均可见星数最少，不到 8 颗。因此在全球海域范围，中国沿海及印度洋海域平均可见星数最多，太平洋次之，大西洋最少。

5 北斗三号在全球海域 GDOP 值分析

卫星导航系统的定位精度主要取决于两方面因素：用户等效测距误差（UERE）和几何精度因子（GDOP）[8]。GDOP 值反映了用户与卫星间的几何关系对定位误差的影响，当 UERE 一定时，GDOP 值越小，说明用户与卫星间的几何位置好，定位误差小[9]。GDOP 值计算方法如下：

GDOP 对北斗定位精度的影响可表示为：

$$cov(dx) = [A^T A]^{-1}\sigma^2_{UERE} \quad (1)$$

其中 $cov(dx)$ 表示位置和钟差误差的协方差；$[A^T A]^{-1}$ 表示把测距误差转换为位置误差时的放大因子矩阵，表征北斗卫星空间几何分布的好坏；σ^2_{UERE} 表示用户等效测距误差方差。

设船载北斗接收机位置为 (x_0, y_0, z_0)，第 i 颗可见卫星的位置为 (x_i, y_i, z_i)，第 i 颗可见卫星与接收机之间的距离为 r_{io}。

则矩阵 A 为：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中，$a_{i1} = \frac{x_0 - x_i}{r_{i0}}$，$a_{i2} = \frac{y_0 - y_i}{r_{i0}}$，$a_{i3} = \frac{z_0 - z_i}{r_{i0}}$，$(i=0, \cdots, m)$。

设

$$[A^T A]^{-1} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则 $GDOP = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}}$ (4)

由式（1）可以看出，GDOP 值越小，定位精度越高，GDOP 值对应的定位精度等级如表 1 所示[10]：

表 1 与 GDOP 值对应的定位精度等级划分

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

利用 Coverage 工具中的 Figure of Merit（覆盖品质参数）模块，选择 GDOP 性能指标对 7 个观测站点仿真分析，仿真结果如图 7 ~ 9 所示：

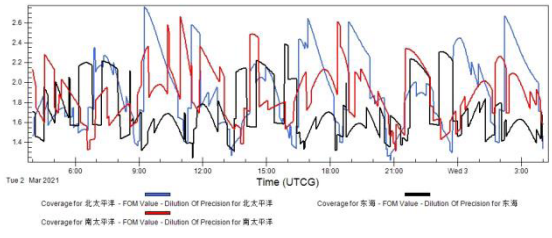

图 7 东海、北太平洋、南太平洋 24 小时 GDOP 随时间变化

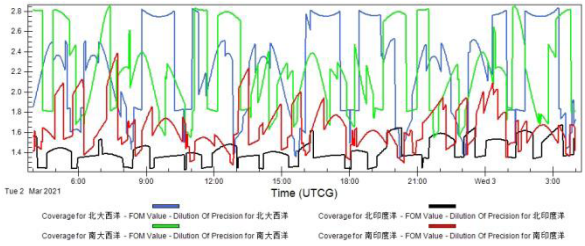

图 8 北印度洋、南印度洋、北大西洋、南大西洋 24 小时 GDOP 随时间变化

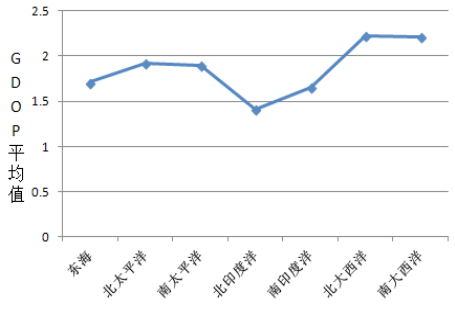

图 9 各观测点 GDOP 平均值

结合图 7、8 及图 9 的 GDOP 平均值统计结果，进行对比分析，得出如下结论：

7 个典型观测站点中 GDOP 值最大出现在南大西洋，为 2.85，因此在全球海域中，GDOP 值维持在“优”的等级，完全满足船舶对导航定位的精度要求。GDOP 值最小出现在北印度洋，为 1.23，从图 8 中可以看出，北印度洋 GDOP 值维持在 1.23–1.68 之间，且波动范围很小，几乎达到理想的卫星空间分布状态。

从图 9 可以看出 GDOP 平均值在北印度洋最小为 1.4 左右，东海及南印度洋为 1.7 左右，北太平洋和南太平洋为 1.9 左右，北大西洋和南大西洋最大为 2.2 左右。因此，中国沿海及印度洋水域可获得更高的定位精度，太平洋水域次之，而大西洋水域定位精度较差。

对比图 6，还可以发现 GDOP 值与可见卫星数有直接关系，可见星数越多时，选星定位时，可获得更好的卫星空间几何分布，GDOP 值也越小，定位精度越高。

6 结论

本文基于 STK 仿真平台，建立了北斗三号星座轨道模型，并在全球海域范围内合理选取了 7 个典型观测站点，仿真分析了各观测站点的可见卫星数和 GDOP 值，结果表明：

（1）中国沿海及印度洋水域平均可见星数最多达 13 ~ 15 颗左右，太平洋平均可见星数次之约 10 颗左右，大西洋平均可见星数最少仅 8 颗左右。

（2）最大可见星数出现在北印度洋和东海观测点为 16 颗，最小可见星数出现在北大西洋和南大西洋观测点仅 6 颗。任何海域可见星数满足船舶定位至少观测 3 颗卫星的要求。

（3）在全球海域中 GDOP 值维持在“优”的等级，满足船舶导航定位的要求。但中国沿海及印度洋水域 GDOP 值最小，定位精度更高，而大西洋水域 GDOP 值偏大，定位精度较差。

综合分析，北斗三号系统完全可以为全球海域的船舶提供优质的导航定位服务，因此，北斗船载终端未来将广泛应用于远洋船舶上，打破 GPS 的垄断地位，更好地服务于我国远洋航运事业。

参考文献：

[1] 田向阳，乔文长．北斗导航系统在船舶海上航行中的应用研究 [J]. 数字技术与应用，2017(8):54–56.

[2] 王宇谱，李跃跃，孙江艳，等．基于 STK/Matlab 的导航星座性能分析 [C]. 第九届中国卫星导航学术年会．2018.

[3] 李厚朴，边少锋，于成金，等．STK 在北斗卫星导航系统教学中的应用 [J]. 大学教育，2018, 000(007):55–58.

[4] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件（公开服务信号 B2b（1.0 版））[s]. 北京：中国卫星导航系统管理办公室 ,2020.

[5] 李士明，曹凯．一种 GPS 定位实时选星改进算法研究 [J]. 计算机仿真，2009,26(07):65–68.

[6] 张柯，白燕．基于 STK 的新一代北斗导航卫星可见性仿真分析 [J]. 电子设计工程，2017(15).

[7] 倪煜淮，许杰，邹永刚，等．北斗三号系统与 GPS 定位性能仿真对比分析 [J]. 海洋测绘，2019(4).

[8] 王菁，田秋丽，王晓璐．北斗星座导航服务性能仿真与分析 [J]. 电子技术与软件工程，2018, 000(010):P.26–27.

[9] 倪育德，陈君，蔚保国，等．基于 STK 的 BDS 星座仿真和性能分析 [J]. 计算机测量与控制，2016(1 期):281–283.

[10] 倪博文．基于 STK 的典型机场 BDS 性能分析 [J]. 全球定位系统，2020, v.45(05):52–56.

基金项目：江苏省航海学会科研项目（202001）。