

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.08.015

引用格式:王尔申,岳孝东,何赫,等.“北斗”卫星导航系统仿真与全球覆盖分析[J].电讯技术,2016,56(8):919-922. [WANG Ershen, YUE Xiaodong, HE He, et al. Simulation and global coverage analysis of Beidou navigation satellite system[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(8):919-922.]

“北斗”卫星导航系统仿真与全球覆盖分析*

王尔申**a,b,岳孝东^a,何 赫^c,曲萍萍^a

(沈阳航空航天大学 a. 电子信息工程学院;b. 辽宁省通用航空重点实验室;c. 图书馆,沈阳 110136)

摘 要:为了解“北斗”卫星导航系统(BDS)的星座分布及其正式运行后卫星在全球范围内的覆盖情况,依据 BDS 卫星轨道参数,使用卫星工具包(STK)构建了完整的 BDS 空间星座,对 BDS 卫星轨道信息、可见性以及地对地覆盖品质进行分析。在对可见性及覆盖品质的分析中,分别仿真分析了在 4 个不同的城市和全球范围进行观测得到的几何精度因子(GDOP)和导航精度等参数性能。研究结果对分析 BDS 系统的服务性能以及提高 BDS 的导航精度有一定的参考意义。

关键词:“北斗”卫星导航系统;全球覆盖;几何精度因子;导航精度;仿真分析

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)08-0919-04

Simulation and Global Coverage Analysis of Beidou Navigation Satellite System

WANG Ershen^{a,b}, YUE Xiaodong^a, HE He^c, QU Pingping^a

(a. School of Electronic and Information Engineering;b. Liaoning General Aviation Key Laboratory;
c. Library, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract:To learn constellation distribution and satellites global coverage after formal operation of Beidou navigation satellite system(BDS), this paper simulates the complete constellation of BDS by Satellite Tool Kit(STK) with the published information of BDS satellite orbit parameters. The orbital parameters, access and coverage of satellites are analyzed based on the simulated constellation of BDS. The performance of geometric dilution of precision(GDOP) and navigation accuracy in four different stations and global area are simulated. The results of this study have a certain reference value for analyzing the service performance and improving BDS navigation accuracy.

Key words:Beidou navigation satellite system(BDS); global coverage; geometric dilution of precision; navigation accuracy; simulation analysis

1 引 言

“北斗”卫星导航系统(Beidou Navigation Satel-

lite System, BDS)区域导航服务能力于 2012 年底正

式提供,系统计划 2020 年全面建成,届时可为全球

* 收稿日期:2016-01-29;修回日期:2016-03-15 Received date:2016-01-29;Revised date:2016-03-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61571309,61101161);航空科学基金资助项目(2011ZC54010);辽宁省自然科学基金联合基金资助项目(2013024003)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No.61571309,61101161);The Aeronautical Science Foundation of China(2011ZC54010);The Natural Science Joint Foundation of Liaoning Province(No.2013024003)

** 通信作者:wanges_2016@126.com Corresponding author:wanges_2016@126.com

用户提供定位、测速、授时等服务^[1]。为了解 BDS 的星座分布及全球范围内的可见性,对 BDS 进行仿真是必要的。使用 STK 对 BDS 进行研究主要是对“北斗”区域系统相关参数进行分析^[2]。文献[3]统计了“北斗”区域星座在全球范围内的几何精度因子(Geometric Dilution of Precision,GDOP)值,验证了“北斗”星座足以全天候满足我国全境范围内用户定位导航需求。文献[4]分析了 BDS 在亚太地区的精度因子(Dilution of Precision,DOP),验证了 BDS 在亚太地区的可用性。文献[5]对所选区域的 GDOP 值和可见卫星数随纬度变化值进行了仿真计算,验证了区域范围内 BDS 相对于全球定位系统(Global Position System,GPS)的优势。文献[6]就中国境内的可见卫星数及空间分布进行了分析。文献[7]对不同最低仰角下“北斗”二代导航星座及 GPS 星座多星覆盖变化进行了分析。但上述研究并未涉及 BDS 星座对全球地区的覆盖及导航性能差异方面的内容。为此,本文分析了 BDS 卫星在全球范围内以及区域内的星座覆盖及导航精度。

本文利用 STK 全面的数据分析及图形处理功能对 BDS 进行分析:首先,根据 BDS 星座分布及卫星轨道信息,在 STK 中构建完整的 BDS 模型;然后,对单一卫星分析在惯性坐标系下的位置、速度、方位角、高度角以及几何距离;最后,对不同观测站和全球范围 BDS 的可见卫星数、几何精度因子以及导航精度进行详细分析。

2 BDS 星座仿真

BDS 星座由 5 颗地球静止同步轨道卫星(Geo-

stationary Earth Orbit,GEO)、27 颗中地球轨道卫星(Medium Earth Orbit,MEO)和 3 颗倾斜地球同步轨道卫星(Inclined Geo-synchronization Satellite Orbit,IGSO)组成。GEO 卫星轨道高度 35 786 km。在 STK 中构建仿真环境,基于开普勒参数对 BDS 星座中的卫星轨道进行描述。STK 的仿真场景提供了高精度地球引力势、大气阻力以及太阳光压模型。设定仿真时间为 2015 年 5 月 19 日 04:00~2015 年 5 月 20 日 04:00,使用 Walker 星座生成 BDS 的仿真星座。BDS 星座卫星的星下点运行轨迹中 3 颗倾斜地球同步轨道卫星星下点轨道为“8”字形,在对中国大陆区域增强覆盖的同时也可以克服高纬度地区始终是低仰角的问题,27 颗 MEO 在 3 个中轨道上运行覆盖全球。BDS 星座布局相较于其他三大导航系统有着独特优势——整个星座中不同轨道卫星布局合理完善,GEO 及 IGSO 的非均匀星座设计概念使得 BDS 除了为中国及周边地区提供区域增强的服务外,还使得 BDS 继承了“北斗”一代的位置报告及短报文等特色服务。

3 BDS 卫星轨道仿真

描述卫星的轨道信息可以使用三维坐标或者是轨道根数。这里使用 STK 以协议地心惯性坐标系 J2000 坐标系对卫星位置进行表述。本文创建的 BDS 星座模型仿真起始协调世界时(Coordinated Universal Time,UTC)时间为 2015 年 5 月 19 日 04 时,结束时间为 2015 年 5 月 20 日 04 时,限于篇幅,表 1 列出了仿真时间内前 12 个历元(历元间隔 300 s)下 MEO133 卫星(BDS 星座中第三轨道面第三颗中轨道卫星)在 J2000 惯性坐标系下的位置及速度信息。

表 1 仿真时间内 MEO133 卫星在 J2000 坐标系下的坐标及速度
Tab. 1 Coordinates and velocity of satellite MEO133 based on J2000 coordinate system in simulation time

Time(UTC)	x/km	y/km	z/km	$v_x/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_y/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_z/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
04:00:00.000	8 253.654 145	15 786.228 404	21 480.749 597	-2.417 808	2.704 933	-1.058 852
04:05:00.000	7 521.712 712	16 584.463 558	21 145.444 512	-2.461 212	2.615 863	-1.176 147
04:10:00.000	6 777.358 913	17 355.327 029	20 775.236 391	-2.500 554	2.522 476	-1.291 501
04:15:00.000	6 021.821 280	18 097.546 463	20 370.736 307	-2.535 769	2.424 925	-1.404 723
04:20:00.000	5 256.346 801	18 809.896 783	19 932.611 935	-2.566 799	2.323 371	-1.515 626
04:25:00.000	4 482.198 861	19 491.202 207	19 461.586 449	-2.593 592	2.2179 83	-1.624 028
04:30:00.000	3 700.655 156	20 140.338 192	18 958.437 334	-2.616 104	2.108 933	-1.729 748
04:35:00.000	2 913.005 587	20 756.233 290	18 423.995 095	-2.634 299	1.996 403	-1.832 614
04:40:00.000	2 120.550 129	21 337.870 916	17 859.141 892	-2.648 146	1.880 577	-1.932 455
04:45:00.000	1 324.596 684	21 884.291 025	17 264.810 082	-2.657 623	1.761 647	-2.029 106
04:50:00.000	526.458 927	22 394.591 698	16 641.980 679	-2.662 713	1.639 810	-2.122 408
04:55:00.000	-272.545 868	22 867.930 629	15 991.681 735	-2.663 409	1.515 266	-2.212 206

STK 中内置有各种摄动量模型,本文仿真中考虑了地球非对称引力、其他天体引力、大气阻力、光压以及章动等摄动量。根据表 1 中获取的位置速度矢量信息可以推算卫星在某一时间的瞬时位置及运动趋势。本文生成了单一卫星某一时间段的位置信息,同理,可对星座中其他卫星进行仿真。

3.1 单颗卫星的可见性分析

利用 STK 工具对 BDS 单颗卫星进行跟踪仿真分析。给定地面站 Beijing_Station,其位置为经度 116°、纬度 40°、高度 0.038 km。仿真开始时间是 2015 年 05 月 19 日 04 时,时间为 24 h。STK 可以预定义 AER 报告,计算每个历元卫星的方位角、高度角、几何距离并以不同的形式输出。

3.2 星座的可见性分析

本文选取截至高度角为 5°条件下,BDS 星座卫星在 Beijing、Kunming、Ohr、Washington 空域的进出场时间。在利用 STK 对星座可见性仿真结果分析中,除了 5 颗 GEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星持续可见外,其余卫星大部分在跟踪时间内出现 1~2 次,这与 BDS 卫星约 12.9 h 的周期相符。在仿真中 STK 分别以报表和报文的形式输出仿真结果,统计在某一时刻可视空域内的卫星数及编号。限于篇幅,只给出统计结果,见表 2。

表 2 BDS 在各城市可见卫星数的统计

Tab.2 Statistics of visible BDS satellites number in different cities

城市	可见卫星数	平均值	标准差
北京	12~19	14.7	1.8
昆明	11~18	14.8	1.6
Ohr	7~15	11.1	1.8
Washington	6~14	9.6	1.5

4 BDS 卫星覆盖分析

导航系统卫星的空间几何分布通常采用 DOP 值对定位精度进行描述。

本文首先对 Beijing (40°N,116°E)、Kunming (25°N,103°E)、Ohr (52°N,9°E)、Washington (39°N,77°W) 4 个观测站的 GDOP 值以及导航精度进行仿真分析。这 4 个城市分布在东西半球,纬度高低各不相同;同时,Beijing、Kuming 是国内纬度跨度较大的两个城市,Ohr、Washington 是国外经度跨度较大的两个城市,有助于 BDS 在国内外不同区域性能参数分析。同时,为分析 BDS 的全球性能,本文依据经纬度对 BDS 的全球几何精度因子以及导航精度进行了分析。

4.1 不同地区城市的 GDOP 值分析

位于全球不同地区 4 个城市中的观测站对 GDOP 进行分析,对各城市的 GDOP 在仿真时间内的取值情况(在仿真时间 24 h 内每 60 s 取样一次)进行分析,如表 3 所列,各城市的 GDOP 最大值没有超过等级评价为优的最高临界值 3。

表 3 各城市 GDOP 值分布统计

Tab.3 Statistics of GDOP distribution in different cities

城市	GDOP	平均值	标准差
北京	1~2	1.5	0.19
昆明	1.2~2.4	1.6	0.28
Ohr	1.2~2.9	1.6	0.29
Washington	1.4~3.4	1.9	0.29

4.2 不同城市的导航精度分析

4 个城市导航精度的数据进行统计(在仿真时间 24 h 内每 60 s 取样一次)结果见表 4。从表 4 可以看出,BDS 导航精度能够达到 10 m 级。中国地区的数据表现优于其他地区,导航精度可以稳定在 8 m 左右。境外的两个城市的结果是导航精度随时间的变化跳跃性较大,最高精度为 6.0 m,最低精度为 17.8 m。

表 4 不同城市导航精度值统计

Tab.4 Navigation accuracy for different cities

城市	精度/m	平均值/m	标准差/m
北京	5.5~10.1	7.7	0.98
昆明	5.9~11.9	7.9	1.36
Ohr	6.0~14.7	8.1	1.47
Washington	6.8~17.8	9.3	1.50

4.3 全球范围内 BDS 的 GDOP 分析

依据经纬度划分网格进行取样,本文按照经纬度每 1°×1°选取一个采样点进行分析得出仿真时间内不同经纬度上几何精度因子。统计每个经度下的 GDOP 最大值、最小值和平均值共计 1 080 个样本值,如表 5 所列。统计每个纬度下 GDOP 最大值、最小值和平均值共 543 个样本值,如表 6 所列。

表 5 GDOP 随经度变化统计

Tab.5 Statistics of GDOP varying with longitude

参数	最大值	平均值	最小值
GDOP	1.271~1.666	1.193~1.656	1.14~1.655
平均值	1.587	1.403	1.323
标准差	0.111	0.108	0.118

表 6 GDOP 随纬度变化统计

Tab.6 Statistics of GDOP varying with latitude

参数	最大值	平均值	最小值
GDOP	1.473~1.666	1.345~1.656	1.14~1.649
平均值	1.573	1.424	1.255
标准差	0.054	0.084	0.136

4.4 全球范围内 BDS 的导航精度分析

在全球范围内依据经纬度划分网格进行取样,每 1°×1°选取一个采样点,得出仿真时间内不同经纬度上导航精度的变化。统计每个经度下的导航精度最大值、最小值和平均值共计 1 080 个样本值,如表 7 所列。统计每个纬度下导航精度最大值、最小值和平均值共 543 个样本值,如表 8 所列。

表 7 导航精度随经度变化统计

Tab.7 Statistics of global navigation accuracy varying with longitude

参数	最大值	平均值	最小值
精度/m	6.354~8.33	5.964~8.282	5.701~8.276
平均值/m	7.935	7.016	6.613
标准差/m	0.555	0.540	0.588

表 8 导航精度随纬度变化统计

Tab.8 Statistics of global navigation accuracy varying with latitude

参数	最大值	平均值	最小值
精度/m	7.364~8.33	6.726~8.279	5.701~8.244
平均值/m	7.867	7.867	6.276
标准差/m	0.272	0.420	0.678

5 结束语

本文通过 STK 软件的仿真与数据分析功能对 BDS 星座进行建模,分析了位于不同地区的地面站和全球区域对几何分布及导航精度的影响,得到以下结论:BDS 在中国境内的可见卫星数、几何分布及导航精度优于境外,符合 BDS 的星座分布;BDS 可以为全球提供较为稳定的导航服务,与其他三大卫星导航系统竞争还需提高境外的导航精度,可以考虑通过星基、陆基增强系统提高系统的性能。本文的研究对更好地掌握 BDS 系统性能和提升 BDS 的全球服务性能具有重要的意义。在此基础上,可进一步通过实测数据对“北斗”卫星导航系统的性能进行研究和分析。

参考文献:

[1] 王尔申,张述杰,雷虹,等.“北斗”导航系统和无线电台在无人机监控系统中的应用[J]. 电讯技术,2013,53(7):831-834.
WANG Ershen,ZHANG Shujie,LEI Hong,et al. Application of Beidou satellite navigation system and data transceiver in UAV monitoring system[J]. Telecommunication Engineering,2013,53(7):831-834. (in Chinese)

[2] 周李春. 基于 STK 的侦察卫星系统效能仿真[J]. 电讯技术,2012,52(4):595-599.
ZHOU Lichun. Efficiency simulation of reconnaissance

satellite system based on STK[J]. Telecommunication Engineering,2012,52(4):595-599. (in Chinese)

[3] 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.
ZHANG Haizhong,LIU Xuerui,GAI Pengfei,et al. GDOP simulation and analysis of BDS regional system[J]. Hydrographic Surveying and Charting,2013,33(5):31-33. (in Chinese)

[4] 雷浩,廉保旺,何伟,等. STK“北斗”二代卫星导航系统在亚太地区 DOP 值仿真分析[J]. 火力与指挥控制,2014,39(6):52-55.
LEI Hao,LIAN Baowang,HE Wei,et al. Analysis of DOP for Beidou navigation system in asia-pacific regions based on STK[J]. Fire Control& Command Control,2014,39(6):52-55. (in Chinese)

[5] 许建利,王俊峰,董伟.“北斗”Ⅱ卫星导航系统星座仿真分析研究[J]. 计算机工程设计,2012,33(10):3913-3917.
XU Jianli,WANG Junfeng,DONG Wei. Research on analysis and simulation of Beidou Ⅱ navigation system constellation[J]. Computer Engineering and Design,2012,33(10):3913-3917. (in Chinese)

[6] 郭斐,张小红,于兴旺,等. 基于 STK 软件的 GALILEO 系统仿真与分析[J]. 测绘信息与工程,2009,34(1):3-6.
GUO Fei,ZHANG Xiaohong,YU Xingwang,et al. Simulation and analysis of Galileo system using STK software[J]. Journal of Geomatics,2009,34(1):3-6. (in Chinese)

[7] 王小静,王俊文. 基于 STK 的 GPS 卫星可见性仿真分析[J]. 航天电子对抗,2014,30(5):16-19.
WANG Xiaojing,WANG Junwen. Analysis of visibility simulation of GPS satellite based on STK[J]. Aerospace Electronic Warfare,2014,30(5):16-19. (in Chinese)

作者简介:



王尔申(1980—),男,辽宁辽阳人,2009 年于大连海事大学获博士学位,现为副教授,主要从事卫星导航、接收机信号处理算法研究;
WANG Ershen was born in Liaoyang, Liaoning Province, in 1980. He received the Ph. D. degree from Dalian Maritime University in 2009. He is now an associate professor. His research concerns satellite navigation and receiver signal processing.

Email:wanges_2016@126.com

岳孝东(1990—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要从事卫星导航算法研究;

YUE Xiaodong was born in Zibo, Shandong Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns satellite navigation algorithm.

何 赫(1982—),女,硕士,主要研究方向为信息与数据处理;

HE He was born in 1982. She is with the M. S. degree. Her research concerns information and data processing.

曲萍萍(1979—),女,博士,主要研究方向为导航制导。

QU Pingping was born in 1979. She is with the Ph. D. degree. Her research concerns navigation guide.