

基于 STK 的 BDS 星座仿真和性能分析

倪育德¹, 陈君¹, 蔚保国², 邢兆栋²

(1. 中国民航大学 电子信息工程学院, 天津 300300; 2. 中国电子科技集团公司 第 54 所, 石家庄 050081)

摘要: 利用卫星仿真工具包 (STK) 设计和建立了北斗卫星导航系统 (BDS) 的全球星座; 在此基础上, 选取南北半球不同经纬度的 11 个城市作为观测点, 分别获得了 BDS 和全球定位系统 (GPS) 的可见星数和几何精度衰减因子 (GDOP) 的值, 并按照 $5^\circ \times 5^\circ$ 的空间分辨率, 仿真了全球范围内 BDS 和 GPS 的可见星数和 GDOP 值; 仿真结果表明, 全球星座的 BDS 具有与 GPS 同样优良的导航性能, 其在亚太地区的性能甚至更优于 GPS, 完全可以为用户提供高性能的满足所需导航性能 (RNP) 的导航服务。

关键词: 北斗卫星导航系统全球星座; 卫星仿真工具包; 可见星数; 几何精度衰减因子

Simulation and Performance Analysis of BDS Constellation Based on STK

Ni Yude¹, Chen Jun¹, Yu Baoguo², Xing Zhaodong²

(1. Institute of Electronic Information Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The global constellation of the Beidou satellite navigation system (BDS) is designed and built by means of the satellite simulation tool kit (STK). On the basis of this results, 11 cities are selected as observation points located in different latitudes and longitudes in north and south hemispheres, and the number of visible satellite and the value of the geometry dilution of precision (GDOP) of BDS and global positioning system (GPS) are obtained respectively. The number of visible satellite and GDOP value of BDS and GPS are also simulated worldwide according to the spatial resolution of $5^\circ \times 5^\circ$. The simulation results show that the BDS with global constellation also has fine navigation performance with GPS, and its performance is even better than that of GPS in the Asia Pacific region, and absolutely, the BDS can provide high performance navigation services for the users with the required navigation performance (RNP).

Keywords: BDS global constellation; STK; number of visible satellite; GDOP

0 引言

北斗卫星导航系统 (BDS) 是我国自主研发的卫星导航系统, 也是继全球定位系统 (GPS) 和格洛纳斯 (GLONASS) 之后第 3 个正式提供商用服务的全球卫星导航系统。2012 年 12 月 27 日, 中国卫星导航系统管理办公室公布了北斗系统的空间信号接口控制文件, BDS 开始正式为中国及周边地区提供导航、定位和授时服务。与 GPS 和 GLONASS 不同的是, BDS 还具有独有的短报文通信功能。

目前 BDS 有 14 颗在轨工作的卫星, 其中包括 5 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星、4 颗中圆地球轨道 (MEO) 卫星和 5 颗倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星。BDS 计划在 2020 年左右全面建成, 其全球星座将由 35 颗卫星构成, 届时可为全球用户提供满足所需导航性能 (RNP) 的导航、定位、授时和短报文通信服务^[1-2]。为了充分研究全球星座 BDS 的导航性能, 本文利用卫星仿真工具包 (STK) 的星座仿真和性能分析功能, 根据已公布的 BDS 的轨道参数, 设计并建立了 BDS 全球星座, 并对全球范围的 BDS 可见星数和几何精度衰减因子 (GDOP) 值进行了仿真和分析。

1 STK 软件简介

STK 是美国 Analytical Graphics 公司开发的一款在航天领域处于领先地位的商业分析软件, 它可以快速方便地分析复杂陆地、海洋、航空和航天任务, 提供分析引擎用于计算数据, 并可显示多种形式的二维地图, 以及卫星和其它对象如运载火箭、导弹、飞机、地面车辆、目标等, 并获得丰富的报告和图表形式的分析结果^[3]。另外, STK 还有三维可视化模块可提供逼真的三维显示环境。STK Pro 版更是扩展了 STK 的基本分析能力, 可以生成目标的位置和姿态数据, 进行卫星可见性及覆盖分析、通信链路分析和轨道机动分析, 以及雷达分析等。STK 是一款适用于全球导航卫星系统 (GNSS) 仿真与分析的强大系统分析软件。

2 BDS 全球星座的设计与建立

BDS 系统的空间段计划由 35 颗卫星组成, 包括 5 颗 GEO 卫星、27 颗 MEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星。

GEO 卫星的轨道高度为 35 786 km, 长半轴为 42 164.1 km, 分别定点于东经 58.75° 、 80° 、 110.5° 、 140° 和 160° 。IGSO 卫星的轨道高度为 35 786 km, 长半轴为 42 164.1 km, 轨道倾角为 55° , 分布在 3 个轨道面上, 升交点赤经分别相差 120° , 星下点轨迹重合, 交叉经度为东经 118° ^[4]。

MEO 卫星的轨道高度为 21 528 km, 长半轴为 27 906.1 km, 轨道倾角为 55° ^[4]。27 颗 MEO 卫星采用 Walker 27/3/1 星座布局, 分布在 3 个轨道面上, 每个轨道面均匀分布 9 颗卫星, 第一轨道面升交点赤经为 0° 。目前 GPS 和 GLONASS 均采用 Walker 星座布局。Walker 星座由一组运行于相同轨道周期和倾角的圆轨道卫星组成, 记为 Walker T/P/F (卫星数目/轨道平

收稿日期: 2015-08-05; 修回日期: 2015-09-07。

基金项目: 国家空管委科研项目 (GKG201410004); 民航安全能力建设基金项目 (AADS0007); 中电科 54 所新技术研究高校合作项目 (KX14260033)。

作者简介: 倪育德 (1963-), 男, 江西鹰潭人, 教授, 工学硕士, 主要从事无线电导航与监视方向的研究。

面数/相位因子), 每个轨道上的卫星等间距均匀分布, 各轨道面间的升交点经度间距也以相同角度平均分布, 两条相邻轨道面卫星的相对相位由相位参数 F 确定, F 为 0 到 $P-1$ 的整数^[5]。初始时刻 BDS 星座的第 i 个轨道面的升交点赤经 $\Omega_{0,i}$, 以及第 i 个轨道面的第 j 颗卫星的升交点角距 $u_{0,ij}$ (分别) 为

$$\begin{cases} \Omega_{0,i} = \Omega_{0,1} + \frac{2\pi}{P}(i-1) (i = 1, \dots, P) \\ u_{0,ij} = u_{0,11} + \frac{2\pi}{T}F(i-1) + \frac{2\pi}{S}(j-1) \\ (i = 1, \dots, P; j = 1, \dots, S) \end{cases} \quad (1)$$

式中, S 为每一个轨道面上分布的卫星个数。

综合以上星座参数, 利用 STK 软件对星座进行设计仿真。利用 Orbit Wizard (轨道向导) 输入轨道参数建立 GEO 和 IG-SO 卫星, 使用 Walker Tool 工具输入参数建立 Walker 27/3/1 星座布局的 MEO 卫星^[6]。仿真得到的星座卫星星下点轨迹和三维轨道分布分别如图 1 和图 2 所示。

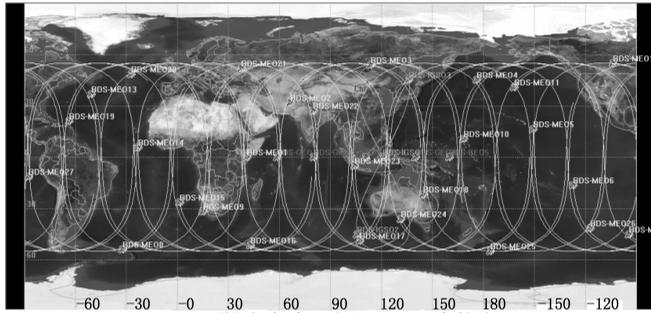


图 1 BDS 全球星座卫星星下点轨迹

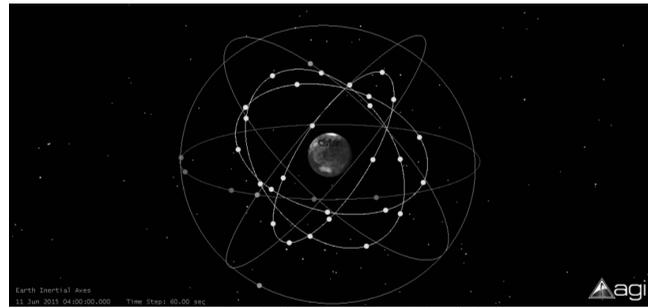


图 2 BDS 全球星座卫星三维轨道分布

3 BDS 的性能仿真与分析

BDS 的性能主要由 RNP 涉及的 4 个指标, 即精度、完好性、连续性和可用性来刻画, 而这 4 个指标都与 BDS 的精度衰减因子 (DOP) 和可见星数密切相关。因此, 本文主要考虑和分析 STK 建立的完整的 BDS 星座能够提供的可见星数目和 GDOP 值, 并利用 STK 导入 GPS 的 TLE 格式文件建立 31 颗卫星的 GPS 星座, 利用所得的 GPS 的可见星数和 GDOP 值作为参考, 与北斗卫星导航系统星座的性能进行对比分析。

3.1 精度衰减因子

BDS 系统的位置精度取决于用户等效距离误差 (UERE) 和 DOP 值, 两者之间的关系如式 (2) 所示。显然, 当 UERE 一定时, DOP 值越小, 用户的定位精度就越高。DOP 值是评价 BDS 系统定位精度的一个重要指标^[7]。DOP 包括几何精度衰减因子 (GDOP)、位置精度衰减因子 (PDOP)、水平精度衰减因子 (HDOP)、垂直精度衰减因子 (VDOP) 和时间精度衰减因子 (TDOP)^[9]。

$$\text{cov}(dx) = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \sigma_{\text{UERE}}^2 \quad (2)$$

式中, $\text{cov}(dx)$ 表示位置和钟差误差的协方差, $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 是用户相对几何分布造成的测距误差转换到位置误差的放大因子矩阵, 它表示卫星空间分布特性的好坏, 是衡量卫星系统性能的重要指标^[8]。矩阵 \mathbf{H} 是用户一可见星方向余弦矩阵, 在定位中可通过对误差方程线性化得到。

方向余弦矩阵 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $a_{i1} = \frac{x_0 - x_i}{r_{i0}}$, $a_{i2} = \frac{y_0 - y_i}{r_{i0}}$, $a_{i3} = \frac{z_0 - z_i}{r_{i0}}$, ($i = 0, \dots, m$), m 为可见星的数目, (x_0, y_0, z_0) 为接收机位置, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 颗可见星的位置, r_{i0} 为第 i 颗可见星与接收机之间的距离。

设

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

则 DOP 值可以用 $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ 中的各分量表示为

$$\text{HDOP} = \sqrt{D_{11} + D_{22}} \quad (5)$$

$$\text{VDOP} = \sqrt{D_{33}} \quad (6)$$

$$\text{TDOP} = \sqrt{D_{44}} \quad (7)$$

$$\text{PDOP} = \sqrt{\text{HDOP}^2 + \text{VDOP}^2} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33}} \quad (8)$$

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{PDOP}^2 + \text{TDOP}^2} = \sqrt{D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{44}} \quad (9)$$

根据 GDOP 值可将定位精度划分为如表 1 所示的不同等级^[10]。

表 1 GDOP 值对应的定位精度分级

GDOP 值	1	2-3	4-6	7-8	9-20	21-50
等级	理想	优	良	中等	合格	差

3.2 观测点的选取

为了精确分析 BDS 在全球范围内的可见星数和 GDOP 值, 选取表 2 所示的南北半球不同经纬度的 11 个城市作为观测点, 观测点的高度截止角设为 5° 。

表 2 11 个观测点的位置分布

站点名称	经度($^\circ$)	纬度($^\circ$)
BJ 北京(中国)	116.41 $^\circ$ E	39.90 $^\circ$ N
ROS 罗萨里奥(阿根廷)	63.73 $^\circ$ W	25.93 $^\circ$ S
WA 华盛顿(美国)	77.03 $^\circ$ W	38.90 $^\circ$ N
CBR 堪培拉(澳大利亚)	149.12 $^\circ$ E	35.31 $^\circ$ S
MOW 莫斯科(俄罗斯)	37.62 $^\circ$ E	55.75 $^\circ$ N
MUM 孟买(印度)	72.83 $^\circ$ E	18.98 $^\circ$ N
LIS 里斯本(葡萄牙)	9.13 $^\circ$ W	38.72 $^\circ$ N
ABU 阿布贾(尼日尼亚)	7.53 $^\circ$ E	9.08 $^\circ$ N
CPT 开普敦(南非)	18.42 $^\circ$ E	33.92 $^\circ$ S
UIO 基多(厄尔多瓜)	78.50 $^\circ$ W	0.22 $^\circ$ S
ANC 安克雷奇(美国阿拉斯加)	85.53 $^\circ$ W	61.22 $^\circ$ N

3.3 观测点的可见星数和 GDOP 值

利用 STK Facility 选项里的 Coverage 工具, 仿真时间为 2015 年 6 月 11 日 04 时至 2015 年 6 月 12 日 04 时, 共 24 h, 采样间隔为 60 s。表 3 为仿真时间段内 11 个城市的 BDS 和 GPS 可见星数目和 GDOP 值。

表 3 11 个城市 BDS 和 GPS 的可见星数目和 DOP 值

站点名称	可见星数目		GDOP 最大值		GDOP 最小值		GDOP 平均值	
	BDS	GPS	BDS	GPS	BDS	GPS	BDS	GPS
北京(中国)	13~19	7~13	1.87	3.03	1.16	1.22	1.46	1.82
罗萨里奥(阿根廷)	6~12	7~14	3.38	3.18	1.45	1.31	2.05	1.80
华盛顿(美国)	6~12	7~12	3.35	3.66	1.44	1.30	1.95	1.78
堪培拉(澳大利亚)	13~19	6~12	1.80	3.05	1.31	1.28	1.48	1.82
莫斯科(俄罗斯)	10~15	8~13	2.01	2.84	1.20	1.23	1.55	1.72
孟买(印度)	13~18	7~14	1.91	3.38	1.15	1.29	1.43	1.72
里斯本(葡萄牙)	7~13	7~14	2.44	3.46	1.36	1.21	1.71	1.80
阿布贾(尼日尼亚)	11~14	9~13	2.30	2.29	1.35	1.24	1.69	1.63
开普敦(南非)	9~14	7~13	2.25	2.66	1.34	1.25	1.72	1.82
基多(厄尔多瓜)	8~11	9~13	2.87	2.19	1.47	1.25	1.96	1.65
安克雷奇(美国阿拉斯加)	10~14	8~14	1.98	4.07	1.26	1.23	1.54	1.77

可以看出, 北京、堪培拉和孟买 3 个城市 BDS 的可见星数比 GPS 的多 6 颗左右; 莫斯科、阿布贾、安克雷奇和开普敦 4 个城市 BDS 的可见星数也比 GPS 的多 3 颗左右; 其他 4 个城市的则相差不多, GPS 略优于 BDS。总体上看, 这 11 个城市 GPS 的可见星分布比较均匀, 而 BDS 的则变化较大。例如, 北京的 BDS 可见星数比华盛顿的要多出 7 颗。出现这种现象是由于与 GPS 系统相比, BDS 系统的 5 颗 GEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星增强了覆盖区域范围内观测点的可见星数。

11 个城市可见星数的不同也直接影响到 GDOP 值。北京、堪培拉和孟买 3 个城市 BDS 的 GDOP 值变化比较平稳, 其平均值要优于 GPS GDOP 的平均值; 而基多、华盛顿和罗萨里奥 3 个城市 BDS 的 GDOP 值的变化起伏比较大, 其平均值比 GPS 的差; 其他 5 个城市 BDS 的 GDOP 值变化较平缓, 而个别城市 GPS 的 GDOP 值会在某个时刻突然增加。总体而言, BDS 的 GDOP 平均值要略优于 GPS 的 GDOP 平均值。

3.4 全球范围内可见星数和 GDOP 值

下面在全球范围内考察 BDS 和 GPS 的可见星数以及 GDOP 值随地理位置的空间变化情况, 空间分辨率取 $5^\circ \times 5^\circ$ 。通过 STK 仿真, 得到 BDS 和 GPS 系统全球范围内在 2015 年 6 月 11 日 04 时的可见星数和 GDOP 值的分布, 如图 3 和图 4 所示。图 5 和图 6 则分别为 2015 年 6 月 11 日 04 时 BDS 和 GPS 系统的 GDOP 值随经纬度的变化。

从图 3 和图 4 可以看出, BDS 和 GPS 的可见星数及 GDOP 值都随经纬度的变化而改变, 两个卫星导航系统在低纬度地区的可见星数、GDOP 值都要优于高纬度地区的相应值。BDS 系统在全球范围内可见星数平均值分布在 8~20 颗之间,

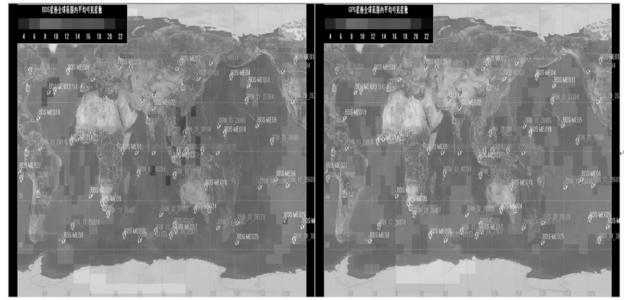


图 3 BDS 和 GPS 星座在全球范围内可见星分布

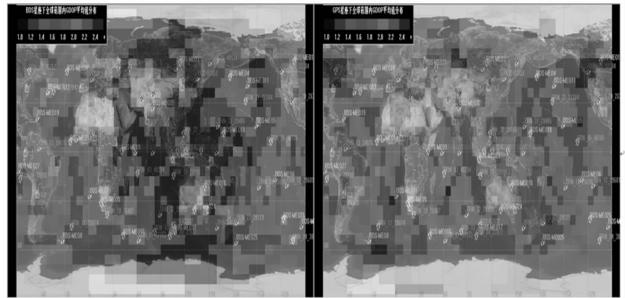


图 4 BDS 和 GPS 星座在全球范围内 GDOP 值分布

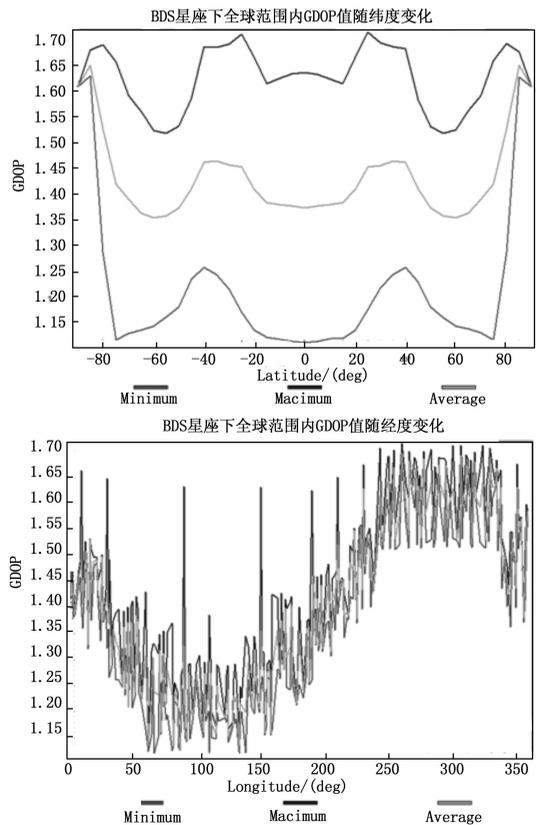


图 5 BDS 全球范围内 GDOP 值随经纬度的变化曲线

效果非常理想。由图 5 和图 6 可以看出 GDOP 值随经度变化的程度较纬度的更为明显。中低纬度地区的 GDOP 值相对较小且稳定, 这点在 GPS 上表现得更为明显。由于北斗系统卫星 (下转第 288 页)