



# 利用卫星分布概率对BDS-3性能的评估

崔浩猛<sup>1</sup> 王解先<sup>1</sup> 王明华<sup>1</sup> 王虎<sup>2</sup> 朱卫东<sup>3</sup> 侯阳飞<sup>1</sup>

1 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

2 中国测绘科学研究院,北京,100830

3 上海海洋大学海洋科学学院,上海,201306

**摘要:**为了研究北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)在全球范围内的服务性能,基于卫星的分布概率,分别对北斗全球卫星导航系统(简称北斗三号系统,BDS-3)和北斗二号系统(BDS-2)在“一带一路”沿线,以及BDS-3在全球范围的可见卫星数和精度因子进行了预测和评估,重点分析了BDS-3与BDS-2在中国及全球区域的定位精度差异。结果表明,现阶段BDS在“一带一路”沿线的可见卫星数为8~20颗,几何精度因子小于1.85,在中国区域其值为1.3~1.4;BDS-3完整系统在全球的可见卫星数为7~15颗,相比于BDS-2,其地球同步轨道卫星+倾斜地球同步轨道卫星的覆盖率有所下降,但中国地球轨道卫星的可见卫星数可增加6~8颗;在中国及周边区域,BDS-3的平均空间精度因子、水平精度因子、高程精度因子和钟差精度因子分别为1.356、0.759、1.123和0.682,相比于其在全球范围的平均值提升了4%~13%,相比于BDS-2在该区域的定位精度提升了19%~37%。

**关键词:**北斗全球系统;分布概率;可见卫星数;服务性能

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

随着中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)全球化进程的推进,在2018年底,北斗全球卫星导航系统(简称北斗三号系统,BDS-3)已经完成基本系统建设,在轨服务卫星达到33颗(15颗BDS-2卫星和18颗BDS-3卫星),并于2020年完成BDS全球组网<sup>[1-3]</sup>。

自2015年发射BDS-3试验卫星以来,很多学者对BDS-3的服务性能进行了研究和分析,文献[4]通过对BDS-3试验卫星的卫星钟、时间同步、定轨性能等进行研究,分析了BDS-3民用信号的信噪比、空间信号综合质量、授时精度等问题,并利用仿真技术模拟了北斗全球系统的定位、导航和授时性能;文献[5]利用实际观测数据验证了BDS-3试验卫星与BDS-2在B1I和B2I频点上不存在系统偏差,并比较不同测站组合下BDS-3试验卫星和BDS-2、GPS卫星组合定轨的精度;文献[6]评估了BDS-3试验卫星与GPS、欧盟的伽利略(Galileo)卫星导航系统重叠频率系统间的偏差,结果表明,其值接近于0,并基于此对三系统短基线单历元紧组合相对定位性能进行了分

析;文献[7-8]分别选取了能够接收到BDS-3试验卫星的十余个测站,对BDS-3和BDS-2观测数据的质量进行了比较,验证了BDS-3试验卫星能够满足正常工作的需求,且数据质量总体上优于BDS-2;文献[9]分析了BDS-3试验卫星对定位精度的影响,结果显示,加入BDS-3试验卫星后,空间精度因子(position dilution of precision, PDOP)有所提升,在东半球的低纬度区域,高程方向的定位精度有明显提升。在BDS-3建设全面开始后,文献[10-11]利用最早发射的8颗BDS-3卫星数据,分别分析了BDS-3卫星新旧数据信号质量及定位精度,以及其与BDS-2在可见卫星数和单点定位精度两方面的差异,结果显示,虽然BDS-3的卫星数目少于BDS-2,但由于BDS-3卫星钟不存在系统偏差,定位精度反而更高;文献[12]则在观测数据质量和单点定位精度分析的基础上,开展了对BDS-2与BDS-3不同频点观测数据进行相对定位的研究,结果表明,增加BDS-3后,短基线的相对定位精度更高,BDS-3可以参与并实现精密定位;文献[13]则全面介绍了BDS-3的星座设计、服务类型、导航信号体制、时

收稿日期:2019-12-03

第一作者:崔浩猛,硕士,研究方向为卫星大地测量。673522782@qq.com

通讯作者:王解先,博士,教授。wangjiexian@tongji.edu.cn

空基准以及轨道确定与时间同步机制等技术体制,并提出了评估BDS-3导航定位服务性能指标体系,共涵盖时空基准、空间信号质量、空间信号精度和服务性能4个方面。

由于北斗全球系统的建设尚未完善,因此各测站能观测到的BDS-3卫星数目有限,且能够接收BDS-3卫星观测数据的跟踪站较少,所以对于BDS-3在全球范围内服务性能分析的文献不多。因此,本文根据不同轨道类型卫星的分布概率,采用了数值积分的方法<sup>[14-15]</sup>,对BDS-3基本系统和BDS-2在“一带一路”沿线区域的卫星可见性和精度因子(dilution of precision, DOP)进行了解算和分析,进而对BDS-3完整系统在全球范围内的服务性能进行了预估,并分析了其与BDS-2在可见卫星数和定位精度等方面的差异。

## 1 北斗系统定位模型

卫星 $s$ 至测站 $a$ 的伪距观测方程为:

$$P_a^s = \rho_a^s + (dt^s - dt_a)c + I_a^s + T_a^s + \epsilon_{\rho_a^s} \quad (1)$$

式中, $P_a^s$ 为伪距观测量; $\rho_a^s$ 为站星几何距离; $dt^s$ 和 $dt_a$ 分别为卫星钟差和接收机钟差; $c$ 为光速; $I_a^s$ 和 $T_a^s$ 分别为电离层延迟和对流层延迟误差,可通过模型进行修正; $\epsilon_{\rho_a^s}$ 为观测噪声。其中,站星几何

$$N = A^T A = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^n \left( \frac{\Delta x_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \right)^2 & \sum_{s=1}^n \frac{\Delta x_{a0}^s \Delta y_{a0}^s}{(\rho_{a0}^s)^2} & \sum_{s=1}^n \frac{\Delta x_{a0}^s \Delta z_{a0}^s}{(\rho_{a0}^s)^2} & - \sum_{s=1}^n \frac{\Delta x_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \\ & \sum_{s=1}^n \left( \frac{\Delta y_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \right)^2 & \sum_{s=1}^n \frac{\Delta y_{a0}^s \Delta z_{a0}^s}{(\rho_{a0}^s)^2} & - \sum_{s=1}^n \frac{\Delta y_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \\ & & \sum_{s=1}^n \left( \frac{\Delta z_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \right)^2 & - \sum_{s=1}^n \frac{\Delta z_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \\ & & & n \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\Delta x_{a0}^s = x^s - x_{a0}$ , $\Delta y_{a0}^s = y^s - y_{a0}$ , $\Delta z_{a0}^s = z^s - z_{a0}$ 。

由式(6)可知,求解法方程式系数阵 $N$ ,需要首先确定测站的可见卫星数 $n$ 。假设卫星在 $(\lambda_i, \phi_j)$ 处出现的概率为 $P$ ,则矩阵中 $N_{11}$ 元素可以表达为:

$$\sum_{s=1}^n \left( \frac{\Delta x_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \right)^2 = \iint_D P \left( \frac{\Delta x_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \right)^2 d\phi d\lambda \quad (7)$$

式中, $(\lambda, \phi)$ 是卫星的地心经纬度坐标; $D$ 为卫星轨道面。式(7)很难直接求解,因此本文采用了文献[14]中提出的数值积分的方法,将轨道球面按地心经纬度分成 $1^\circ \times 1^\circ$ 小格网,每个格网的中心经纬度为 $(\lambda_i, \phi_j)$ ,通过计算每个格网中卫星出现的概率 $P_{ij}$ 来确定测站的可见卫星数,则式(7)可以表

距离计算如下:

$$\rho_a^s = \sqrt{(x^s - x_a)^2 + (y^s - y_a)^2 + (z^s - z_a)^2} \quad (2)$$

式中, $(x^s, y^s, z^s)$ 为卫星坐标; $(x_a, y_a, z_a)$ 为测站坐标。对式(1)进行线性化后得到:

$$v_a^s = \frac{x_{a0} - x^s}{\rho_{a0}^s} \cdot \delta x_a + \frac{y_{a0} - y^s}{\rho_{a0}^s} \cdot \delta y_a + \frac{z_{a0} - z^s}{\rho_{a0}^s} \cdot \delta z_a - c \delta t_a - l_a^s \quad (3)$$

式中, $v_a^s$ 为伪距观测值残差; $(x_{a0}, y_{a0}, z_{a0})$ 为测站近似坐标; $\rho_{a0}^s$ 为由测站近似坐标和卫星坐标计算得到的距离; $l_a^s$ 为经误差改正后的常数项。

当测站在一个历元观测到 $n$ 颗卫星时,可得误差方程式如下:

$$V = A X - L \quad (4)$$

式中, $V$ 为残差向量; $A$ 为误差方程式系数阵; $X$ 为未知数向量; $L$ 为常数向量。其中 $A$ 的表达式为:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_{a0}^1}{\rho_{a0}^1} & \frac{\Delta y_{a0}^1}{\rho_{a0}^1} & \frac{\Delta z_{a0}^1}{\rho_{a0}^1} & -1 \\ \frac{\Delta x_{a0}^2}{\rho_{a0}^2} & \frac{\Delta y_{a0}^2}{\rho_{a0}^2} & \frac{\Delta z_{a0}^2}{\rho_{a0}^2} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\Delta x_{a0}^n}{\rho_{a0}^n} & \frac{\Delta y_{a0}^n}{\rho_{a0}^n} & \frac{\Delta z_{a0}^n}{\rho_{a0}^n} & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其相应法方程式系数阵 $N$ 为:

示为:

$$\iint_D P \left( \frac{\Delta x_{a0}^s}{\rho_{a0}^s} \right)^2 d\phi d\lambda = \sum_i \sum_j P_{ij} \left( \frac{\Delta x_{a0}^{ij}}{\rho_{a0}^{ij}} \right)^2 \quad (8)$$

本文将重点介绍对式(8)中卫星分布概率 $P_{ij}$ 的求解过程。

## 2 BDS卫星分布概率的确定

BDS采用异构星座设计,卫星运行高度、轨道倾角等参数不尽相同,其中地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星的理论位置是固定的,即分别位于设计经度 $\lambda_i$ 的赤道上空<sup>[1]</sup>,因此GEO卫星在 $(\lambda_i, 0)$ 处出现的概率为1,在其余位置出现的概率为0。与GEO卫星不同的是,中圆地

球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星和倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星的位置随时间而不断变化,因此本文分析了MEO和IGSO卫星在全球的分布概率,并由此确定不同地区测站的BDS可见卫星数。

### 2.1 MEO 卫星

MEO卫星分布于轨道高度为21 528 km的轨道面内,轨道倾角为55°,运行周期为12 h 55 min,角速度 $\omega$ 为0.486 44 rad/s<sup>[16]</sup>。根据克莱劳定理,可以得到:

$$r \cdot \sin A = c \tag{9}$$

式中, $r$ 为平行圈半径; $A$ 为轨道方位角; $c$ 为常数。在升交点处卫星运行方位角为35°,即:

$$\cos\phi \sin A = \sin 35^\circ \tag{10}$$

则卫星的地心经纬度速度为:

$$\begin{cases} \omega_\phi = \omega \cos A = \omega \sqrt{1 - \left(\frac{\sin 35^\circ}{\cos\phi}\right)^2} \\ \omega_\lambda = \frac{\omega \sin A}{\cos\phi} = \frac{\omega \sin 35^\circ}{\cos^2\phi} - \omega_e \end{cases} \tag{11}$$

式中, $\omega_\phi$ 为卫星沿纬度方向的角速度; $\omega_\lambda$ 为卫星沿经度方向的角速度; $\omega_e$ 为地球自转角速度。文献[14]认为卫星在某处的角速度越大,则卫星在该处被观测到的概率越小,反之被观测到的概率越大,从而可计算出各格网卫星观测概率。然而,文献[15]通过进一步的分析,发现对于MEO卫星,在一个格网内被观测到的概率应只与沿纬度方向的角速度有关,与沿经度方向的角速度无关,因此卫星分布概率 $P$ 可以表示为:

$$P = \frac{K}{\omega_\phi} \tag{12}$$

式中, $K$ 为常数。对式(12)在全球范围内进行积分,可以得到:

$$\iint_D P d\phi d\lambda = n_{\text{MEO}} \tag{13}$$

式中, $D$ 为MEO卫星运行的轨道面; $n_{\text{MEO}}$ 为MEO的卫星数。将轨道面 $D$ 按 $1^\circ \times 1^\circ$ 划分为小格网,则式(13)可以表示为:

$$\iint_D P d\phi d\lambda = \sum_{\lambda_i} \sum_{\phi_j} P_{ij} = n_{\text{MEO}} \tag{14}$$

显然,当 $\phi_j < -55^\circ$ 或者 $\phi_j > 55^\circ$ 时, $P_{ij} = 0$ ,因此MEO卫星的分布概率 $P$ 满足:

$$\sum_{\lambda_i=0}^{359} \sum_{\phi_j=-55}^{55} P_{\lambda_i\phi_j} = n_{\text{MEO}} \tag{15}$$

### 2.2 IGSO 卫星

IGSO卫星采用倾斜地球同步轨道,轨道倾角为55°,运行周期为23 h 56 min 4 s,卫星运行角

速度 $\omega$ 近似为0.261 80 rad/s<sup>[16]</sup>。根据§2.1中的分析,IGSO卫星的分布概率同样满足式(13)的函数关系。但考虑到IGSO卫星的轨道特点,即相对于地球上某一固定点,一颗IGSO卫星只分布于某个确定的“8”字形的轨迹上,因此,卫星的分布概率 $P$ 应由纬度方向的角速度 $\omega_\phi$ 和经度方向的角速度 $\omega_\lambda$ 共同决定<sup>[15]</sup>,所以其分布概率 $P$ 与角速度的函数关系可以表示为:

$$P = \frac{K}{\omega_{\max}} \tag{16}$$

式中, $\omega_{\max} = \max\{\omega_\phi, \omega_\lambda\}$ 。同时,根据星下点轨迹公式<sup>[17]</sup>,可以获取IGSO卫星的轨道面 $D$ :

$$\begin{cases} \lambda_i = \Omega_0 + \arctan(\cos I \tan \Omega) - \omega_e t \\ \phi_j = \arcsin(\sin I \sin \Omega) \end{cases} \tag{17}$$

式中, $\Omega_0$ 为升交点经度; $I$ 为轨道倾角; $\Omega$ 为从升交点( $\Omega_0, 0$ )开始经过 $t$ 时间卫星转过的幅角。显然,卫星轨道面与卫星的升交点经度有关,且关于升交点经度所在的经线对称。因此IGSO卫星的分布概率 $P$ 满足:

$$2 \sum_{\phi_j=-55}^{55} P_{\lambda_i\phi_j}^{\Omega_0} = n_{\text{IGSO}} \tag{18}$$

式中, $n_{\text{IGSO}}$ 为IGSO卫星数。

### 2.3 测站可见卫星数的确定

设测站的大地坐标为( $B_0, L_0, H_0$ ),则其空间坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H_0) \cos B_0 \sin L_0 \\ (N + H_0) \cos B_0 \cos L_0 \\ (N(1 - e^2) + H_0) \sin B_0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

式中, $N = a/\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$ ,为卯西圈曲率半径; $a$ 为椭球长半轴; $e$ 为第一偏心率。在2000国家大地坐标系(China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000)参考椭球下, $a, e$ 分别为6 378.137 km、0.818 19<sup>[3]</sup>。为简化计算,假设地面上的测站刚好位于椭球面上,即 $H_0 = 0$ 。

当卫星处于中心经纬度为( $\lambda_i, \phi_j$ )区域时,其空间直角坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos\phi_j \sin\lambda_i \\ R \cos\phi_j \cos\lambda_i \\ R \sin\phi_j \end{bmatrix} \tag{20}$$

式中, $R$ 为卫星轨道半径。则卫星在测站站心坐标系中的坐标可以表示为:

$$\begin{bmatrix} U \\ E \\ N \end{bmatrix} = R_2(-B_0) R_3(L_0) \begin{bmatrix} X_a - X_0 \\ Y_a - Y_0 \\ Z_a - Z_0 \end{bmatrix} \tag{21}$$

式中, $R_2(-B_0), R_3(L_0)$ 分别为绕对应坐标轴旋转

— $B_0$ 、 $L_0$ 角得到的旋转矩阵。由此可以解算卫星对测站的高度角  $\theta = \arcsin(U/\sqrt{U^2 + E^2 + N^2})$ 。考虑到卫星高度角过低时,会影响定位精度,因此本文选择高度角大于  $5^\circ$  的观测卫星进行求解。

### 3 BDS-3 基本系统定位精度分析

#### 3.1 可见卫星数计算

BDS-3 基本系统由 18 颗 MEO(BDS-3M) 卫星组成,现阶段,它们与 15 颗 BDS-2 在轨卫星一起,为“一带一路”沿线国家和地区提供服务,其卫星基本参数如表 1 所示,其中,5 颗 GEO(BDS-2G) 卫星分别位于经度为  $58.75^\circ\text{E}$ 、 $84^\circ\text{E}$ 、 $110.5^\circ\text{E}$ 、 $140^\circ\text{E}$  以及  $160^\circ\text{E}$  的赤道上空;7 颗 IGSO(BDS-2I) 卫星则分布在升交点经度为  $95^\circ\text{E}$ 、 $112^\circ\text{E}$  和  $118^\circ\text{E}$  的 3 个轨道面上,每个轨道面上的卫星数分别为 3、1、3 颗<sup>[2-3]</sup>。

表 1 BDS-3 基本系统和 BDS-2 在轨卫星参数

Tab.1 Parameters of BDS-3 Preliminary System and the On-orbit Operational BDS-2

轨道类型	所属系统	星座卫星数	轨道高度/km	运行周期
GEO	BDS-2	5	35 786	23 h 56 min 4 s
IGSO	BDS-2	7	35 786	23 h 56 min 4 s
MEO	BDS-2	3	21 528	12 h 55 min
	BDS-3	18		

根据 §2 中卫星分布概率  $P$  的计算式,在“一带一路”沿线区域 ( $6^\circ\text{W} \sim 146^\circ\text{E}$ ,  $6^\circ\text{S} \sim 75^\circ\text{N}$ ) 对 BDS-3 基本系统和 BDS-2 进行数值积分,求解得到各地区 BDS 的可观测卫星数如图 1 所示。

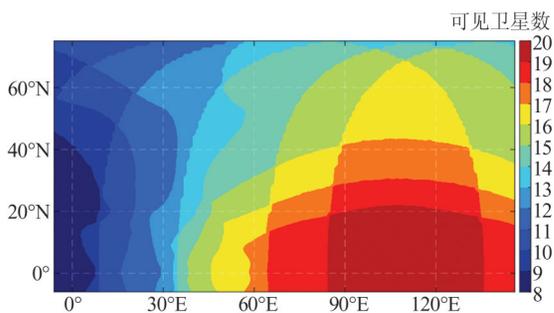


图 1 BDS 可见卫星数空间分布

Fig.1 Spatial Distribution of BDS Visible Satellites

从图 1 中可以看出,在研究区域内,BDS 的可

$$Q_{\text{UENT}} = \begin{bmatrix} R_3(-L)R_2(B) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T N \begin{bmatrix} R_3(-L)R_2(B) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (23)$$

进而对不同位置测站的 PDOP、水平精度因子 (horizontal dilution of precision, HDOP)、高程精度

见卫星数至少为 8 颗,绝大部分地区能够观测到 10 颗以上卫星,尤其在中国及周边区域内 ( $73^\circ\text{E} \sim 136^\circ\text{E}$ ,  $3^\circ\text{N} \sim 54^\circ\text{N}$ ),可见卫星数基本在 16 颗以上,整体呈现以  $110^\circ\text{E}$  经线为中心向两侧递减、从低纬度向高纬度递减的趋势,并且在  $35^\circ\text{E}$ 、 $65^\circ\text{E}$ 、 $85^\circ\text{E}$  和  $135^\circ\text{E}$  经线,以及  $20^\circ\text{N}$ 、 $25^\circ\text{N}$  和  $40^\circ\text{N}$  纬线附近,出现非连续性的变化,这种分布特点与 BDS 系统采用异构星座有关,BDS-2G 和 BDS-2I 卫星可以有效地增加中国区域的可见观测卫星数,提高 BDS 在中国地区的定位精度。

#### 3.2 定位精度分析

根据卫星的分布概率,对式 (6) 进行求解,可以得到法方程式的系数阵  $N$ ,则其逆阵即为协因数阵  $Q$ 。则几何精度因子 (geometry dilution of precision, GDOP) 的表达式为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}(Q)} \quad (22)$$

根据式 (22) 对研究区域的 GDOP 值进行求解,得到如图 2 所示的 GDOP 等值线图。

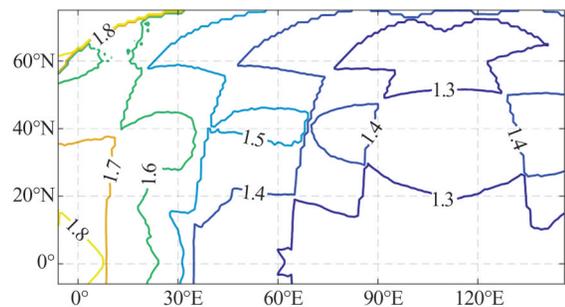


图 2 几何精度因子的空间分布

Fig.2 Spatial Distribution of GDOP

从图 2 中可以发现,在研究区域内,GDOP 值分布在 1.2~1.8 之间 (平均值为 1.433),其中,绝大部分中国地区的 GDOP 值分布在 1.3~1.4 之间 (平均值为 1.323)。由于 BDS-2G 和 BDS-2I 卫星轨道特性和服务范围的影响,GDOP 值在经度方向上以  $110^\circ\text{E}$  经线为中心向东西方向递增;而在纬度方向上,则随纬度的增加,出现先增大后减小而后再增大的变化规律。

为进一步分析研究区域内不同位置测站定位结果的平面精度、高程精度等,可以根据式 (21) 将式 (6) 中的测站空间直角坐标转换到站心坐标系中。根据协方差传播定律,可得:

因子 (vertical dilution of precision, VDOP) 和钟差精度因子 (time dilution of precision, TDOP) 进行求解:

$$\begin{cases} \text{PDOP} = \sqrt{Q_{\text{UENT}}(1,1) + Q_{\text{UENT}}(2,2) + Q_{\text{UENT}}(3,3)} \\ \text{HDOP} = \sqrt{Q_{\text{UENT}}(2,2) + Q_{\text{UENT}}(3,3)} \\ \text{VDOP} = \sqrt{Q_{\text{UENT}}(1,1)} \\ \text{TDOP} = \sqrt{Q_{\text{UENT}}(4,4)} \end{cases} \quad (24)$$

本文计算了研究区域内不同位置测站的PDOP、HDOP、VDOP和TDOP值,并绘制了相应的等值线图,结果如图3所示。

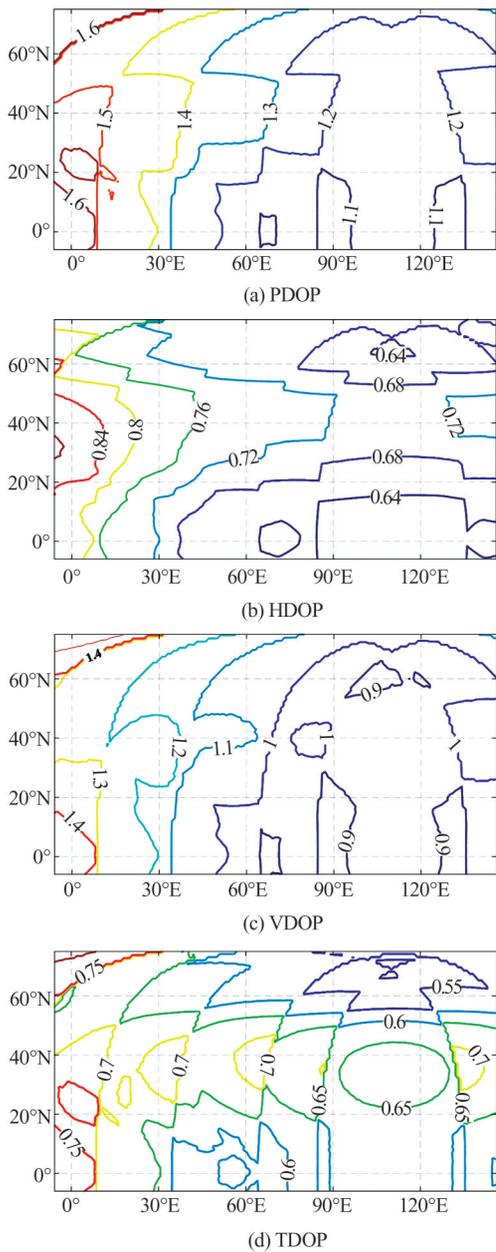


图3 PDOP、HDOP、VDOP和TDOP值的空间分布  
Fig.3 Spatial Distribution of PDOP, HDOP, VDOP and TDOP

从图3中可以发现,研究区域内,BDS系统的PDOP值在1.0~1.7之间(平均值为1.280),其

中,中国地区基本分布于1.1~1.2之间(平均值为1.157);HDOP和VDOP值分别分布在0.62~0.86和0.8~1.5之间,且相同位置的测站HDOP相比于VDOP相差约0.3~0.8左右,说明水平方向的定位精度要优于高程方向;TDOP值分布在0.6~0.8之间(平均值为0.642)。各DOP值的变化趋势与GDOP类似,基本与各测站可见卫星数的分布特征一致。

根据式(23)求解得到的协因数阵 $Q_{\text{UENT}}$ ,可以计算得到不同区域测站的大地高和钟差的相关系数 $\rho(U, T)$ (见图4);以及南北向定位误差和东西向定位误差的比值 $k$ (见图5)。其计算如下:

$$\rho(U, T) = \frac{Q_{\text{UENT}}(1,4)}{\sqrt{Q_{\text{UENT}}(1,1)Q_{\text{UENT}}(4,4)}} \quad (25)$$

$$k = \frac{\sqrt{Q_{\text{UENT}}(3,3)}}{\sqrt{Q_{\text{UENT}}(2,2)}} \quad (26)$$

从图4中可以看出,大地高和钟差的相关系数在经度方向上以110°E经线为中心向两侧递减;在纬度方向上,大部分区域随纬度的增加而降低,但其最小值也达到了0.82,说明大地高和钟差之间存在着较强的相关性。

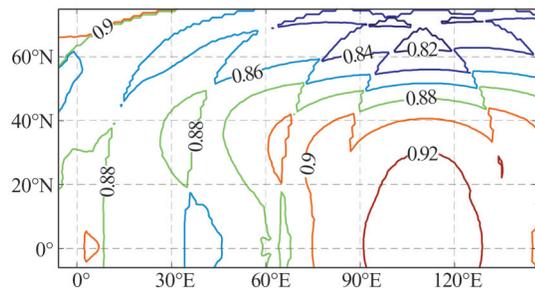


图4 大地高与钟差的相关系数的空间分布  
Fig.4 Spatial Distribution of the Correlation Between the Geodetic Height and the Receiver Clock Solution

由图5可以发现,两者的比值近似关于40°N纬线对称,在(50°E~140°E, 55°N~75°N)和(50°E~140°E, 6°S~20°N)范围内,南北向误差小于东西向,而在其他区域则要大于东西向误差。

## 4 BDS-3与BDS-2服务性能对比分析

### 4.1 可见卫星数

BDS-3组网完成后,可以为全球用户提供服务,其与BDS-2的设计参数如表2所示。其中,BDS-3的GEO(BDS-3G)卫星固定于80°E、110.5°E和140°E的赤道上空;BDS-3的IGSO(BDS-3I)卫星分布于升交点经度为118°E的轨道

面上;BDS-2G 卫星固定于 58.75°E、80°E、110.5°E、140°E 以及 160°E 的赤道上空, BDS-2I 卫星中, 3 颗卫星分布于升交点经度为 115°E 的轨道面上, 2 颗位于升交点经度为 95°E 的轨道面<sup>[3]</sup>。

根据 BDS-3 和 BDS-2 卫星设计参数, 分别对 BDS-3 和 BDS-2 在全球范围内进行数值积分。图 6 为 BDS-3 和 BDS-2 GEO+IGSO 卫星的全球分布图。

由图 6 可知, GEO+IGSO 的可见卫星数在 (70°E~140°E, 20°S~20°N) 之间达到最大值, BDS-3 和 BDS-2 分别为 6 颗和 10 颗, 并由此向各方向逐渐下降, 同时由于 BDS-3G 和 BDS-3I 卫星数目的减少, 其覆盖范围也有所降低, 尤其在

区域内, BDS-3G+BDS-3I 的可见卫星数为 5~6 颗, 相比于 BDS-2G+BDS-2I (7~10 颗) 要减少 2~4 颗。

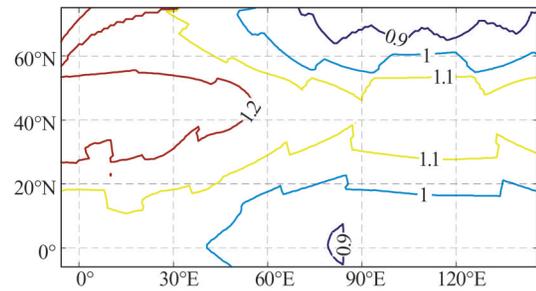


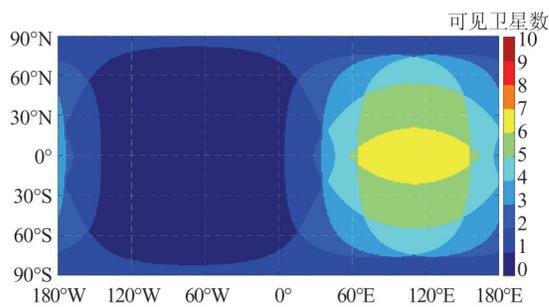
图 5 南北向与东西向定位误差比值

Fig.5 Positioning Error Ratios of the South-North and East-West Components

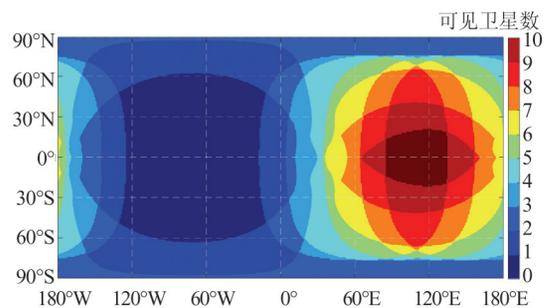
表 2 BDS-3 和 BDS-2 卫星设计参数

Tab.2 Design Parameters of BDS-3 and BDS-2

卫星参数	BDS-3			BDS-2		
	GEO	IGSO	MEO	GEO	IGSO	MEO
星座卫星数	3	3	24	5	5	4
轨道高度	35 786 km	35 786 km	21 528 km	35 786 km	35 786 km	21 528 km
运行周期	23 h 56 min 4 s	23 h 56 min 4 s	12 h 55 min	23 h 56 min 4 s	23 h 56 min 4 s	12 h 55 min



(a) BDS-3G+BDS-3I



(b) BDS-2G+BDS-2I

图 6 GEO+IGSO 可见卫星数的空间分布

Fig.6 Spatial Distribution of GEO+IGSO Visible Satellites

图 7 展示了 BDS-3 和 BDS-2 MEO 卫星在不同纬度的分布情况, 并计算了两者可见卫星数的差异值  $\Delta$ MEO。从图 7 中可以看出, BDS-3M 卫

星可见性要明显优于 BDS-2M, 其在全球范围内的可见卫星数为 7~9 颗 (左轴), 而 BDS-2M 数目不足 2 颗 (右轴), 增加了 6~8 颗可见卫星。

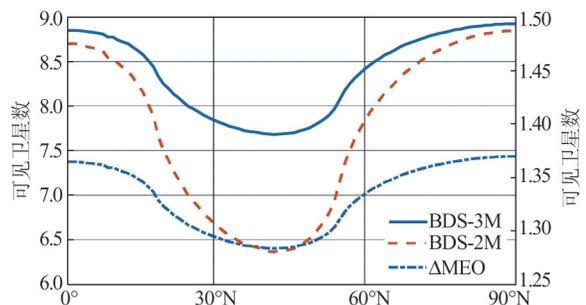


图 7 MEO 可见卫星数的空间分布

Fig.7 Spatial Distribution of MEO Visible Satellites

为了更好地展示 BDS-3 卫星在全球的可见性, 图 8 展示了全 30 颗 BDS-3 卫星的全球分布情况。从图 8 中可以发现, BDS-3 的全球可见卫星数在 7~15 颗之间, 具备了为全球用户提供定位和导航服务的基础, 其中, 在 (70°E~140°E, 20°S~20°N) 范围内可见卫星数最多, 而在 (130°W~0°, 25°S~50°S) 和 (130°W~0°, 25°N~50°N) 之间最少, 在中国及周边区域内, BDS-3 可观测卫星数达到 12 颗以上。整体而言, 相比于 BDS-2, BDS-3 在全球的可见卫星数提升了 2~7 颗。

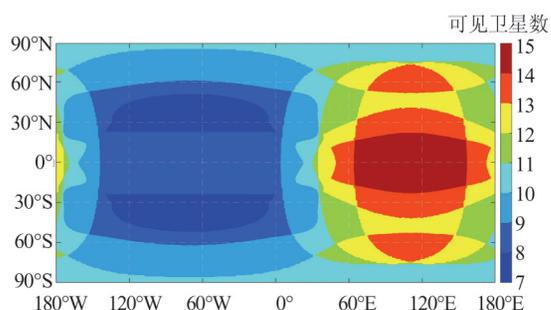


图8 BDS-3可见卫星数的空间分布

Fig.8 Spatial Distribution of BDS-3 Visible Satellites

#### 4.2 定位精度分析

根据式(22)~式(25),同样可以对BDS-3在全球范围的DOP值进行求解,计算结果如图9所示。

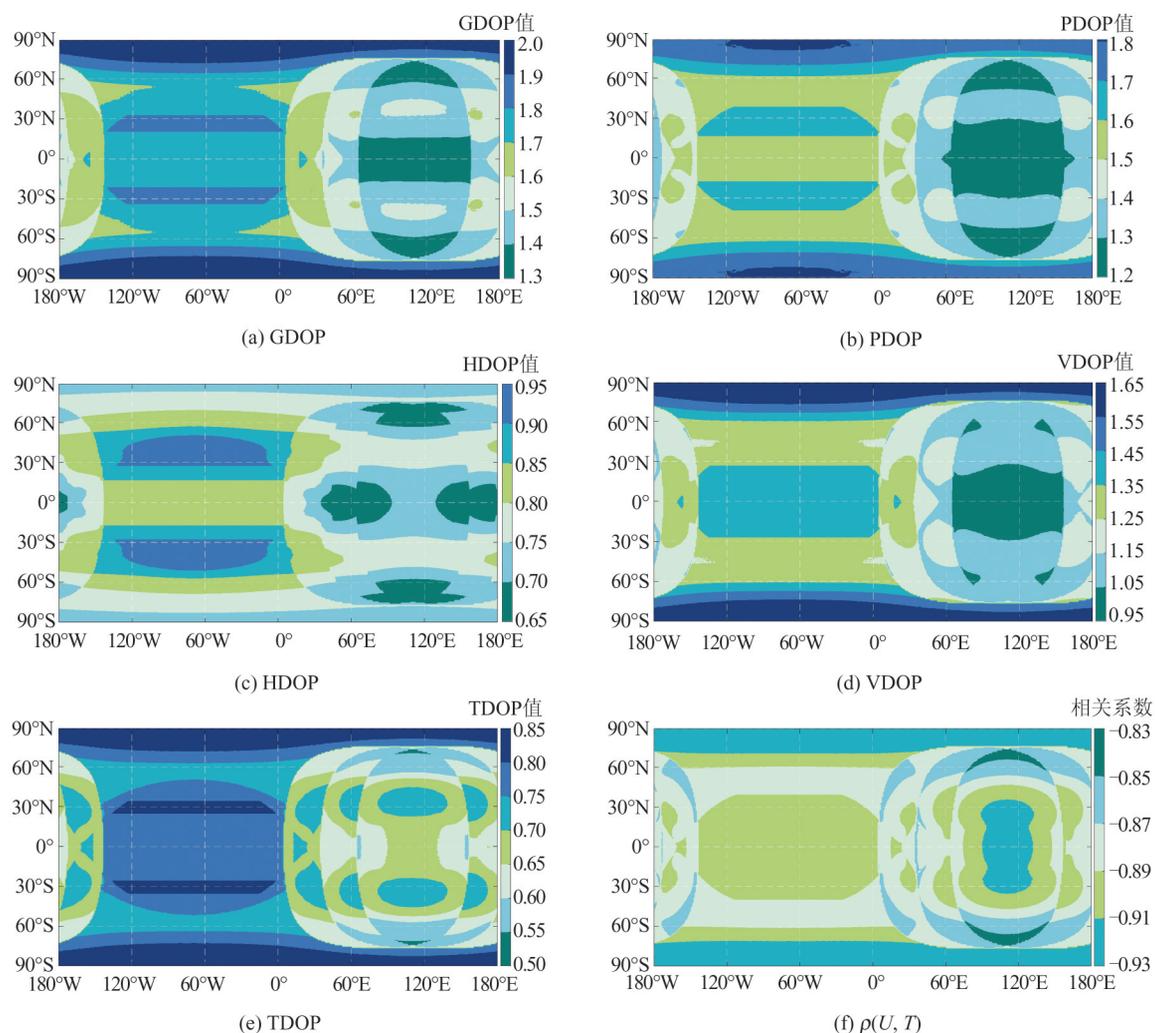


图9 BDS-3精度因子的空间分布

Fig.9 Spatial Distribution of DOP of BDS-3

表3对BDS-3在全球和中国地区,以及BDS-2在中国地区各类精度因子的平均值进行了统计。从表3中可以发现,BDS-3在中国地区的精

从图9中可以看到,由于BDS-3G和BDS-3I的增强作用,BDS-3在亚太地区的整体定位精度要优于全球其他区域。BDS-3定位的GDOP值在1.3~2.0之间,其中,在中国范围内,其值基本分布在1.4~1.5之间;PDOP值在1.2~1.8之间,而在中国范围内,其值基本小于1.4;HDOP和VDOP分别分布于0.65~0.95和0.95~1.65范围内,显然,HDOP要低于VDOP,两者的差异在0.3~0.7,而在中国地区,其差异基本在0.35~0.45;TDOP值主要分布于0.50~0.85之间,其中,中国区域主要位于0.7~0.75范围,要略高于周边地区;不同区域测站的大地高和钟差的相关系数则在0.83~0.93之间,尤其在中国地区基本在0.9以上,说明两者之间存在着比较强的相关性。

度因子要优于其在全球的平均值,而两者相比于BDS-2的定位精度均有所提升。其中,BDS-3在中国地区的GDOP、PDOP、HDOP、VDOP和

TDOP 值较 BDS-2 分别降低了 26.3%、22.6%、28.8%、19.2% 和 37.0%;比其在全球范围内的值降低幅度为 4%~13%。

表 3 BDS-3 和 BDS-2 各精度因子的平均值

Tab.3 Average DOP Values of BDS-3 and BDS-2

系统	区域	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP	TDOP
BDS-3	全球	1.682	1.517	0.788	1.293	0.726
	中国地区	1.518	1.356	0.759	1.123	0.682
BDS-2	中国地区	2.060	1.752	1.066	1.389	1.082

## 5 结 语

本文采用一种对卫星分布概率进行数值积分的计算方法,分析了目前 BDS 在“一带一路”沿线的定位精度,并评估了 BDS-3 完整系统在全球范围的服务性能,得到以下结论:(1)BDS-3 基本系统和 BDS-2 在“一带一路”沿线的可见卫星数至少在 8 颗以上;在中国及周边区域(73°E~136°E, 3°N~54°N),可见卫星数在 16 颗以上。(2)根据 BDS-3 和 BDS-2 设计参数,对其卫星可见性和 DOP 计算发现,相比于 BDS-2, BDS-3G+BDS-3I 可见卫星数减少 2~4 颗(在中国地区);但 BDS-3M 可见卫星数比 BDS-2M 要增加 6~8 颗(在全球范围)。整体而言, BDS-3 在全球范围的可见卫星数为 7~15 颗。

## 参 考 文 献

- [1] Yang Y, Tang J, Montenbruck O. Chinese Navigation Satellite Systems [J]. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 2017, (10): 273-304
- [2] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0) [EB/OL]. [2018-12-27]. <http://www.beidou.gov.cn>(中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0版)[EB/OL]. [2018-12-27]. <http://www.beidou.gov.cn>)
- [3] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1I (Version 3.0) [EB/OL]. [2019-02-26]. <http://www.beidou.gov.cn>(中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1I(3.0版)[EB/OL]. [2019-02-26]. <http://www.beidou.gov.cn>)
- [4] Yang Y, Xu Y, Li J, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5):614-624
- [5] Li X, Yuan Y, Zhu Y, et al. Precise Orbit Determination for BDS3 Experimental Satellites Using iGMAS and MGEX Tracking Networks [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1):103-117
- [6] Wu Mingkui, Liu Wanke, Zhang Xiaohong, et al. Initial Assessment of Tightly Combined Relative Positioning for Short Baselines with Observations from GPS, Galileo, and BDS-3 Experimental Satellites [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 13-20 (吴明魁,刘万科,张小红,等. BDS-3 试验星/GPS/Galileo 短基线紧组合相对定位性能初步评估[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(1): 13-20)
- [7] Xin X, Tao G, Qile Z, et al. Performance of BDS-3: Measurement Quality Analysis, Precise Orbit and Clock Determination [J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1 233-1 240
- [8] He Yilei, Wang Qianxin, Wang Zhiwen, et al. Quality Analysis of Observation Data of BeiDou-3 Experimental Satellites[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC), Harbin, China, 2018
- [9] Zhang R, Tu R, Liu J, et al. Impact of BDS-3 Experimental Satellites to BDS-2: Service Area, Precise Products, Precise Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(4):829-844
- [10] Huang Chao, Song Shuli, Chen Qinming, et al. Preliminary Analysis of BDS-3 Data Based on iGMAS [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2019, 60(2): 52-63 (黄超,宋淑丽,陈钦明,等.基于 iGMAS 的北斗三号组网星数据初步分析[J]. *天文学报*, 2019, 60(2):52-63)
- [11] Li Guoliang, Qian Yuyang. Accuracy Analysis of Standard Single Point Positioning of BDS-3 [J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(4):113-118 (李国梁,钱雨阳.北斗三号系统标准单点定位精度分析[J]. *全球定位系统*, 2019, 44(4):113-118)
- [12] Cheng Junlong, Wang Wang, Ma Liye, et al. Preliminary Analysis of Observation Quality and Positioning Precision for BDS-3 Satellites [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(8): 1-7 (程军龙,王旺,马立烨,等.北斗三号观测数据质量及定位精度初步评估[J]. *测绘通报*, 2019(8):1-7)
- [13] Guo Shuren, Cai Hongliang, Meng Yinan, et al. BDS-3 RNSS Technical Characteristics and Service Performance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7):810-821 (郭树人,蔡洪亮,

- 孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821)
- [14] Wang J, Iz B H, Lu C. Dependency of GPS Positioning Precision on Station Location[J]. *GPS Solutions*, 2002, 6(1):91-95
- [15] Wang M, Wang J, Dong D, et al. Performance of BDS-3: Satellite Visibility and Dilution of Precision [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2):56-62
- [16] Xie Gang, Zhao Jie, Li Yudong, et al. The Effects of GEO Satellites on BDS Positioning PDOP[C]// China Satellite Navigation Conference(CSNC), Harbin, China, 2018
- [17] Li Hong, Bao Haitao. Design and Application of Synchronous Orbit with Ground Track of “∞” [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(8): 1 194-1 196 (李红,包海涛.星下点轨迹为“∞”字形同步卫星轨道的实现及应用[J].系统工程与电子技术, 2006, 28(8):1 194-1 196)

## Service Performance Assessment of BDS-3 Using Satellite Distribution Probability

CUI Haomeng<sup>1</sup> WANG Jiexian<sup>1</sup> WANG Minghua<sup>1</sup> WANG Hu<sup>2</sup>  
ZHU Weidong<sup>3</sup> HOU Yangfei<sup>1</sup>

1 College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China

3 College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

**Abstract: Objectives:** The BeiDou global navigation satellite system (BDS-3), which provides high-accuracy positioning, navigation and timing (PNT) services to global users, has completed the construction in 2020. **Methods:** To analyze the performance of BDS-3, the total number of visible satellites of BDS-3 preliminary system and BDS-2 over the ‘Belt and Road’ area is calculated by using a method based on satellite distribution probability, then the satellite visibility of the full constellation BDS-3 over the global areas is also estimated with the same method. In addition, the dilution of precision (DOP) and their differences between BDS-3 and BDS-2 for stations at different geographical locations are investigated. **Results:** Results indicate that, over the ‘Belt and Road’ area, the total number of visible BDS-3 preliminary system and BDS-2 satellites is 8-20, and the geometrical DOP (GDOP) is less than 1.85. In China and its surrounding areas, the visible number is more than 16, the GDOP is between 1.3 and 1.4. For the full constellation BDS-3-only, the number of visible satellite is 7-15 over the global areas. The total number of visible full constellation BDS-3 geostationary earth orbit satellites and inclined geosynchronous orbit satellites is less than that of BDS-2, but for medium earth orbit satellites, the number of visible satellites of the former system is more than that of the latter system by 6-8. With a better satellite visibility, the average BDS-3 position DOP, horizontal DOP, vertical DOP and time DOP are 1.356, 0.759, 1.123 and 0.682 over China and its surrounding areas, respectively, which are 22.6%, 28.8%, 19.2% and 37.0% lower than those of BDS-2, and have 4%-13% improvement compared to the global DOP averages. **Conclusions:** Compare to the BDS-2, BDS-3 satellite visibility has been improved significantly, while it will provide higher accuracy and more reliable PNT services to global users for its better satellite constellation.

**Key words:** BDS-3; distribution probability; number of visible satellite; service performance

**First author:** CUI Haomeng, master, specializes in satellite geodesy. E-mail: 673522782@qq.com

**Corresponding author:** WANG Jiexian, PhD, professor. E-mail: wangjiexian@tongji.edu.cn

**引文格式:** CUI Haomeng, WANG Jiexian, WANG Minghua, et al. Service Performance Assessment of BDS-3 Using Satellite Distribution Probability[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6):938-946. DOI:10.13203/j.whugis.20190172(崔浩猛,王解先,王明华,等.利用卫星分布概率对BDS-3性能的评估[J].武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6):938-946. DOI:10.13203/j.whugis.20190172)