

文章编号:1001-893X(2012)05-0629-05

# 测量船应用“北斗”二代导航系统的可行性分析<sup>\*</sup>

孙铁炬,鲁健辉,刘辉峰

(中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431)

**摘要:**通过建模理论分析和数值计算分析了“北斗”二代导航系统的定位性能及其对测量船应用的影响,论证了其应用的可行性。对其定位性能的仿真计算表明:“北斗”二代导航系统比 GPS 最大定位误差增大约 12 m。推导了船位误差与定位精度的关系,计算分析了船位误差对测量船引导数据精度和外测精度的影响,得出在该导航系统主要覆盖区域,其定位性能能够满足使用测量船需求的结论。

**关键词:**测控系统;航天测量船;GPS;卫星导航;“北斗”二代

**中图分类号:**TN967.1;V556      **文献标志码:**A      doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.05.005

## Feasibility Analysis of Applying Beidou Satellite Navigation System II in Space TT&C Ship

SUN Tie-ju, LU Jian-hui, LIU Hui-feng

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

**Abstract:** Through model theory analysis and numerical computation, the positioning capability of Beidou Satellite Navigation System II and its impact on TT&C ship are discussed. The results show that the positioning accuracy of Beidou Satellite Navigation System II is 12 meters more than that of GPS. The relationship between ship position accuracy and orientation accuracy is deduced and the impact of ship position accuracy on lead data and measurement accuracy of TT&C ship is analysed. It is concluded that in the covering area of Beidou satellite navigation system II, the positioning ability meets the demand of TT&C ship.

**Key words:** TT&C system; space TT&C ship; GPS; satellite navigation system; Beidou system II

## 1 引言

在航天测控系统中测量船作为陆地测量站的延伸,在目标飞行器入轨段及运行段的测控中发挥着重要作用,作为一个机动的测量站点,其船位的准确测量是保证测控精度的基础。为提高船位测量精度,测量船普遍采用惯性导航和 GPS 卫星导航相结合的组合导航方式,使用 GPS 系统对惯导的位置数据加以校正得到较高测量船的位置精度<sup>[1]</sup>。目前,“北斗”二代导航系统(以下简称二代导航系统)一期工程即将建成并投入运行,测量船使用我国自主研发的卫星导航系统的可行性研究方面还处于空白状态。因此,本文

针对我国正在建立的“北斗”二代卫星导航系统,对其定位性能进行仿真计算分析,并与 GPS 系统实测值进行比较,对测量船在海上测控任务中使用“北斗”二代导航系统的可行性进行了分析。

## 2 二代导航系统定位原理

“北斗”二代系统是无源被动式伪码单向测距三维导航系统,由用户设备独立解算自己的三维定位数据,根据高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据,采用空间距离后方交会的方法,确定待测点的位置,如图 1 所示。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2012-02-17;修回日期:2012-03-05

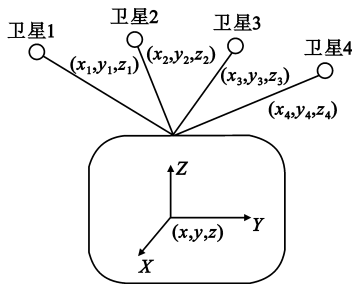


图 1 二代导航系统定位原理图

Fig.1 Principle of the satellite navigation system II

假设  $t$  时刻在地面待测点上安置二代卫星导航定位系统接收机,可以测定卫星信号到达接收机的时间  $\Delta t$ ,再加上接收机所接收到的卫星星历等其他数据可以确定以下 4 个方程式<sup>[2]</sup>:

$$p_1 = \sqrt{(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 + (Z_1 - Z)^2} + C\Delta t_u \quad (1)$$

$$p_2 = \sqrt{(X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2 + (Z_2 - Z)^2} + C\Delta t_u \quad (2)$$

$$p_3 = \sqrt{(X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2 + (Z_3 - Z)^2} + C\Delta t_u \quad (3)$$

$$p_4 = \sqrt{(X_4 - X)^2 + (Y_4 - Y)^2 + (Z_4 - Z)^2} + C\Delta t_u \quad (4)$$

上述 4 个方程式中,待测点坐标  $x, y, z$  和  $\Delta t_u$  为未知参数,  $p_1, p_2, p_3, p_4$  分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3 和卫星 4 到接收机之间的距离(伪距),  $C$  为 GPS 信号的传播速度(即光速)。4 个方程式中各个

参数意义如下:  $X, Y$  和  $Z$  为待测点坐标的空间直角坐标;  $X_i, Y_i$  和  $Z_i (i = 1, 2, 3, 4)$  分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3 和卫星 4 在  $t$  时刻的空间直角坐标,可由卫星导航电文求得;  $\Delta t_u (u = 1, 2, 3, 4)$  为接收机用户的钟差。由以上 4 个方程即可解算出待测点的坐标  $X, Y, Z$  和接收机的钟差  $\Delta t_u$ 。

### 3 二代导航星座 GDOP 仿真计算

#### 3.1 星座动力学模型

运用二体问题的运动方程,在地心固联系下分别建立地球静止轨道卫星(GEO)、中高度圆轨道卫星(MEO)和倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)轨道动力学模型。

GEO 卫星动力学模型:

$$\begin{cases} X_E^i = a \cdot \cos \lambda_i \\ Y_E^i = a \cdot \sin \lambda_i \\ Z_E^i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $i$  表示第  $i$  颗卫星 ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ );  $a$  表示卫星轨道长半径(地心距),即卫星到地心的距离;  $\lambda_i$  表示第  $i$  颗卫星星下点在赤道上的经度。

IGSO 卫星动力学模型:

$$\begin{pmatrix} X_E^i \\ Y_E^i \\ Z_E^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \Omega + \sin \theta \sin \Omega & \sin \theta \cos \Omega \cos i - \cos \theta \sin \Omega \cos i & \cos \theta \sin \Omega \sin i - \sin \theta \cos \Omega \sin i \\ \cos \theta \sin \Omega - \sin \theta \cos \Omega & \sin \theta \sin \Omega \cos i + \cos \theta \cos \Omega \cos i & -\sin \theta \sin \Omega \sin i - \cos \theta \cos \Omega \sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \cdot \cos E \\ a \cdot \sin E \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

MEO 卫星动力学模型:

$$\begin{pmatrix} X_E^k \\ Y_E^k \\ Z_E^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i & -\sin \omega \cos \Omega - \sin \Omega \cos i \cos \omega & \sin \Omega \sin i \\ \sin \Omega \cos \omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i & \cos \Omega \cos i \cos \omega - \sin \omega \sin \Omega & -\cos \Omega \sin i \\ \sin i \sin \omega & \sin i \cos \omega & \cos i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \cdot \cos E \\ a \cdot \sin E \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\theta$  为格林尼治子午面在赤道上与春分点的时角,  $\Omega$  为升交点赤经,  $\omega$  为近地点角,  $i$  为轨道倾角。

#### 3.2 星座 GDOP 值计算分析

##### 3.2.1 某测控站点 GDOP 值分析比较

如表 1 和图 2 所示,二代导航定位系统在某测控站点 GDOP 值基本稳定在 3.5 以下, GPS 系统为 3.0,总体相差范围在 0.3 ~ 0.7 之间,最大相差为 1.8,如果选定测距误差为 2.84 m,那么二代导航定位系统相比 GPS 系统,平均定位精度只相差 2 ~ 3 m,最大相差约 8.4 m。但二代导航定位系统 GDOP

值小于 3 的比例仅为 66.90%,与 GPS 相差较大,二代导航定位系统不如 GPS 系统稳定。

表 1 某测控站点两导航系统 GDOP 值统计

Table 1 GDOP of two satellite navigation systems in a station

| 导航系统     | 最小值   | 最大值   | 平均值   | 方差    | ≤3 比例  | ≤3.5 比例 | ≤4 比例   |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 二代卫星导航定位 | 1.276 | 4.188 | 2.621 | 0.371 | 66.90% | 91.52%  | 99.24%  |
| GPS      | 1.520 | 3.840 | 2.324 | 0.241 | 90.39% | 94.33%  | 100.00% |

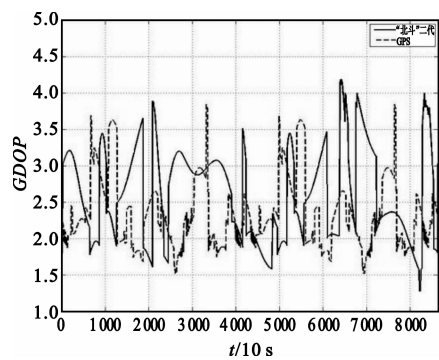


图 2 某测控站点 GDOP 值曲线  
Fig.2 GDOP curve of a station

3.2.2 西太平洋海域 GDOP 值分析比较

在西太平洋海域第三个采样点(135°E, 15°N), 如表 2、表 3 和图 3 所示, 二代导航定位系统在西太平洋海域 GDOP 值基本稳定在 4 以下, GPS 系统为 3.0, 总体相差范围在 0.5 ~ 1.1 之间, 最大相差为 2.6, 如果选定测距误差为 2.84 m, 那么二代导航定位系统相比 GPS 系统, 平均定位精度只相差 2.6 ~ 5.4 m, 最大相差约 12 m。

表 2 西太平洋海域两导航系统 GDOP 值统计  
Table 2 GDOP of two satellite navigation systems in West Pacific Ocean

| 导航系统     | 最小值   | 最大值   | 平均值   | 方差    | ≤3 比例  | ≤3.5 比例 | ≤4 比例   |
|----------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 二代卫星导航定位 | 1.470 | 4.687 | 2.873 | 0.642 | 56.35% | 76.62%  | 91.79%  |
| GPS      | 1.463 | 3.973 | 2.040 | 0.270 | 93.68% | 96.97%  | 100.00% |

表 3 西太平洋海域二代系统 GDOP 值统计  
Table 3 GDOP of satellite navigation system in West Pacific Ocean

| 采样点        | 最小值   | 最大值   | 平均值   | 方差    | ≤3 比例  | ≤3.5 比例 | ≤4 比例  |
|------------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|
| 121°E 31°N | 1.276 | 4.188 | 2.621 | 0.371 | 66.90% | 91.52%  | 99.24% |
| 125°E 25°N | 1.333 | 4.589 | 2.700 | 0.382 | 62.38% | 89.47%  | 99.21% |
| 130°E 20°N | 1.455 | 4.351 | 2.815 | 0.470 | 59.20% | 82.70%  | 95.79% |
| 135°E 15°N | 1.470 | 4.687 | 2.873 | 0.642 | 56.35% | 76.62%  | 91.79% |

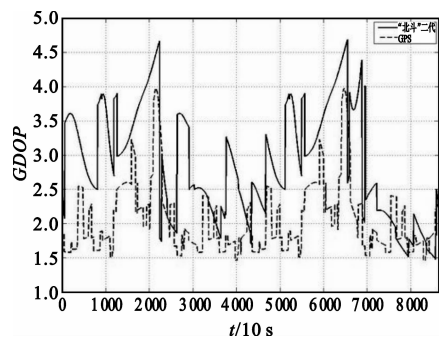


图 3 西太平洋海域 GDOP 值曲线  
Fig.3 GDOP curve of West Pacific Ocean

在整个二代导航定位系统覆盖范围内的西太平洋海域, 系统整体的 GDOP 值能保持在 4.0 以内, 随着不断向东南端靠近, 系统 GDOP 平均值和方差不断增大, 小于 3.5 的比例减小幅度较大, 说明从覆盖中心到东南端边缘的过程中, 系统定位性能逐渐降低。

4 测量船使用二代导航定位系统的可行性分析

4.1 对引导数据精度影响分析

中心机数字引导是根据已知的空间目标位置和测量船的船姿船位数据计算出测控设备的方位角和俯仰角, 引导测控设备指向目标方向, 进而发现、捕获目标。因而, 船位的数据误差将会引起数引数据的误差, 如表 4 所示。

表 4 船位对数引精度的影响  
Table 4 Precision of guide angle by ship's position

| 船位                     | 方位角/(°)     | 俯仰角/(°)   | 距离/km        |
|------------------------|-------------|-----------|--------------|
| 120.216 4°E 31.934 1°N | 330.867 101 | 0.006 584 | 13 789.480 9 |
| 120.216 6°E 31.934 1°N | 330.867 319 | 0.006 423 | 13 789.498 8 |
| 120.216 4°E 31.934 3°N | 330.867 013 | 0.006 392 | 13 789.502 2 |

如图 4 所示, S 为出地平时卫星位置, A 为船实际位置, A' 为由船位误差引起的误差船位, 已知由船位误差引起的方位角误差大小等于角  $\theta$  的值。当误差距离 AA' 和船与卫星的实际距离 AS 一定, 则角  $\alpha$  等于 90° 时, 角  $\theta$  值达到最大, 即:

$$\theta = \arctan(AA' / AS)$$
 (8)

同理, 当卫星过顶时, 引起的俯仰角误差也达到最大, 计算公式相同。

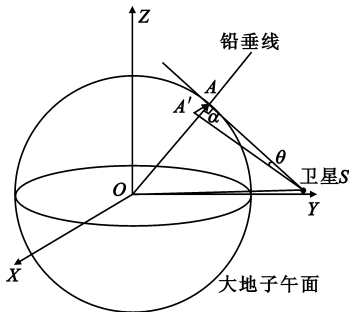


图 4 船位误差引起的数引数据角度误差  
Fig.4 Error of guide angle by ship's position

对无线电测控设备来说, 理论上只要将目标引入主波束范围内, 即可发现目标。

目前船用 GPS 系统定位误差约为 20 m, 根据上

文计算分析,二代系统与 GPS 系统相比最大定位误差相差为12 m,即定位误差约为30 m。表 4 中第一组数据为测量船某次演练时的船位和相应的目标出地平时的数引数据,后两组为模拟的最大误差船位和相应数引数据,可知由船位误差导致的引导数据角度误差增量约为0.000 2°,小于当前测量船外测引导数据角度误差上限,能够满足在引导数据计算中的应用。

4.2 对外测精度影响分析

在测量船航天测控任务中,船位误差引起的目标定位误差是一种平移偏倚误差,并因地球曲率而被放大。如图 5 所示, $M$  和  $T$  为某测量时刻的真实船位和目标位置。

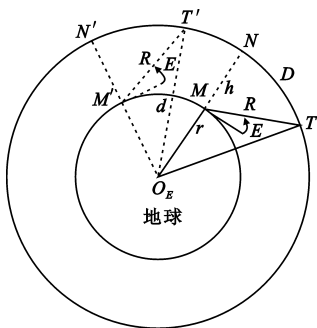


图 5 船位误差引起的目标定位误差  
Fig.5 Error of orientation by ship's position

如果存在船位误差  $d$ ,即船姿船位系统给出的船位为  $M'$ ,  $\widehat{MM'} = d$ ,测量给出的目标位置为  $T'$ ,目标的位置误差为  $D$ ,则:

$$D = \widehat{TT'} = \widehat{NN'}$$

设  $h = MN = M'N'$  为目标高度, $R$  和  $E$  为目标距离和仰角, $r$  为地球半径,有:

$$\frac{D}{d} = \frac{r+h}{r} = 1 + \frac{h}{r} \tag{9}$$

经简化,可以得到以下近似公式<sup>[3]</sup>:

$$D \approx d(1 + \frac{R^2}{2r^2} + \frac{R}{r} \sin E) \tag{10}$$

在对火箭弹道进行测量时,目标的测量位置误差  $D$  可以表示为火箭在地固直角坐标系中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个分量上的误差( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )<sup>[4]</sup>。表 5 中第一组数据为测量船某次任务演练时的船位及在火箭到达航捷时的地固系直角坐标值,后两组为模拟的最大误差船位下到达航捷时的地固系直角坐标值,可知在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个分量上的最大误差分别为17 m、36.6 m和

26 m,满足测量船火箭外弹道测量误差要求。

表 5 船位对弹道测量的影响

| Table 5 Precision of trajectory measurement by ship's position |            |              |             |           |  |
|----------------------------------------------------------------|------------|--------------|-------------|-----------|--|
| 船位                                                             |            | X/m          | Y/m         | Z/m       |  |
| 174.989 10°E                                                   | -3.824 4°N | -6 264 048.2 | 1 913 868.9 | 564 160.9 |  |
| 174.989 37°E                                                   | -3.824 4°N | -6 264 031.2 | 1 913 905.5 | 564 186.9 |  |
| 174.989 10°E                                                   | -3.824 7°N | -6 264 039.7 | 1 913 932.0 | 564 175.3 |  |

在对卫星目标进行测量时,目标的测量位置误差  $D$  可以表示为卫星初始轨道根数的误差,主要为轨道半长轴误差  $\Delta a$ <sup>[5]</sup>。表 6 中第一组数据为测量船某次任务演练时的船位及计算出的主要初轨根数,后两组为模拟的最大误差船位及计算出的初轨根数,可知由船位误差引起的半长轴误差约为 0.03 km,而测量船外测初始轨道计算半长轴精度要求为千米级,因此,使用“北斗”二代导航定位系统能够满足测量船外测定轨要求。

表 6 船位对定轨结果的影响

| Table 6 Precision of orbit determination by ship's position |            |            |           |           |  |
|-------------------------------------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|--|
| 船位                                                          |            | 半长轴/km     | 偏心率       | 轨道倾角/(°)  |  |
| 174.989 10°E                                                | -3.824 4°N | 24 471.569 | 0.731 191 | 20.495 97 |  |
| 174.989 37°E                                                | -3.824 4°N | 24 471.541 | 0.731 191 | 20.496 06 |  |
| 174.989 10°E                                                | -3.824 7°N | 24 471.565 | 0.731 191 | 20.495 90 |  |

5 结 论

本文通过动力学模型计算得出了二代导航系统的 GDOP 指标,得出其定位最大误差比 GPS 大12 m。通过理论推导和数值计算分析了该误差对测量船引导数据和计算飞行器外测轨道的影响,结果表明,引导角度误差不大于0.000 2°,外测误差约0.03 km。综上所述,在二代导航定位系统一期工程的主要覆盖区域内,其导航定位性能与 GPS 系统基本相当,二代导航定位导航定位系统完全可以满足测量船航天测控需求。本文的结论主要得自仿真结果和计算推导,下一步计划在测量船加装二代导航系统接收机以实际验证其性能。

参考文献:

[1] 江文达. 航天测量船[M]. 北京:国防工业出版社,2003.  
JIANG Wen-da. Aerospace Measuring Ships [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2003. (in Chinese)  
[2] 罗兵,王海丽,逯亮清. 导航定位技术[M]. 长沙:国防科学技术大学,2007.

LUO Bin, WANG Hai - li, LU Liang-qing. Technology of Satellite Navigation [ M ]. Changsha: National University of Defense & Technology, 2007. (in Chinese)

[3] 潘良. 航天测量船船位测量技术 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

PAN Liang. Measure Technology of Position Measure in Aerospace Measuring Ships [ M ]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)

[4] 刘利生. 外弹道测量数据处理 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

LIU Li - sheng. Data Processing of Trajectory [ M ]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

[5] 张玉祥. 人造卫星测轨方法 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

ZHANG Yu - xiang. Method of Manmade Satellite Orbit Measuring [ M ]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:

孙铁炬(1986—),男,浙江诸暨人,2008 年获学士学位,现为助理工程师,主要研究方向为航天测控;

SUN Tie - ju was born in Zhuji, Zhejiang Province, in 1986. He received the B.S. degree in 2008. He is now an assistant engineer. His research concerns spacecraft TT&C.

Email:suntieju@126.com

鲁健辉(1979—),男,江苏启东人,2001 年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为航天测控;

LU Jian - hui was born in Qidong, Jiangsu Province, in 1979. He received the B.S. degree in 2001. He is now an engineer. His research concerns spacecraft TT&C.

刘辉峰(1974—),男,安徽桐城人,2008 年获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为通信与信息系统。

LIU Hui - feng was born in Tongcheng, Anhui Province, in 1974. He received the M.S. degree in 2008. He is now a senior engineer. His research concerns communication and information systems.