

# 双星系统工作方式改进的探讨

孙国良, 丁子明

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘要:** 本文对北斗卫星导航系统工作方式的改进方法进行了探讨, 借助于这些改进措施可以使北斗系统能够无节点、无源、实时工作。作者对这些改进方案进行了计算机仿真, 所得改善结果明显。

**关键词:** 导航; 计算机仿真

**中图分类号:** TN967 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1217-04

## Working Method Improvements of Beidou Satellite System

SUN Guo-liang, DING Zi-ming

(Dept. of E. E., Beijing Univ. of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Some improvements to BeiDou Satellite Navigation System are shown in this paper. With these improvements, it can work as a no-node, real-time and one-way positioning system. These improvements have been simulated by computer, and the improvements are obvious.

**Key words:** navigation; computer simulation

### 1 引言

卫星导航是六十年代发展起来的一种新型导航方式。它不仅可以为国民经济的发展带来巨大的经济效益, 而且也为国家安全提供了强有力的保障。

自九十年代以来, GPS 卫星导航在经济和军事上的成功应用充分体现了卫星导航的潜力。拥有卫星导航将会增强国家的制空权, 但是限于国力, 中国不可能像美国那样在短时期内发展 GPS 卫星导航系统, 因此在八十年代中期提出了“双星快速定位系统”的发展计划。但是作为中国的卫星导航系统, 由于受到一些先天因素的限制, 北斗系统目前尚不具备卫星导航的能力。

因此, 在尽可能不对目前系统硬件结构作较大改动的前提下, 将北斗系统改造成为能够同时满足民用和军事用途的具有高精度和高动态性能的卫星导航系统就成为必需。

### 2 系统的组成、工作原理及特点

#### 2.1 系统组成

(1) 导航通信卫星: 即空间中继站, 是两颗距地面 36,000km 与地球同步的静止卫星, 两者升交点赤经相差 60°。卫星上带有信号转发装置, 用于用户和地面站之间的转发通信。

(2) 地面站组: 包括主控站、计算中心、测轨站、测高站以及校准站等, 主要用来对卫星定位、测轨和制备星历, 调整卫星运行轨道、姿态, 控制卫星的工作, 测量和收集校正导航定位参量, 以形成用户定位修正数据并对用户进行精确定位。

(3) 用户设备: 为仅带有定向天线的收/发器, 用于接收中心站通过卫星转发来的信号和向中心站发射通信信息; 不含定位解算处理器, 设备比较简单。

#### 2.2 系统工作原理

中心站通过测量信号在中心站-卫星-用户之间往返的时间延迟, 从而测定用户和两颗卫星之间的距离, 再利用用户的高度测量数据(或数字地图)经过解算就可以确定用户的位置。

#### 2.3 系统的特点

(1) 仅用两颗卫星就可以进行导航通讯, 资金投入少; 同时由于采用静止卫星, 可以对大覆盖区内的用户进行连续实时定位;

(2) 用户设备比较简单, 导航定位数据完全由中心站计算完成;

(3) 具有通信功能, 信息高度集中, 便于集中指挥控制和管理;

(4) 由于采用数字地图, 用户数据修正等措施, 使系统具有较高的定位精度。

同时该系统也有其局限性:

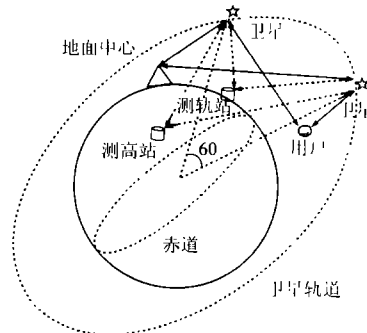


图1 双星定位系统组成框图

收稿日期: 2000-07-06; 修回日期: 2001-03-07

(1)由于系统采用集中式处理,从而导致了该系统为节点系统.一旦中心被毁坏,将导致整个系统瘫痪,这对于军事用户尤其重要;同时由于所有用户的定位都是在中心站完成,这就导致了中心站设备的处理能力要求极高,而且也导致定位数据有较大的滞后误差;

(2)系统采用的是有源工作方式,一方面导致军用用户隐蔽性差,另一方面导致用户定位数据更新率低,不能满足高机动用户的要求,而且限制了系统的用户数目;

(3)不能进行全球覆盖,同时由于两颗卫星均在赤道上空,对于较高纬度的几何定位误差系数较大.

### 3 系统定位方式的改进方案及仿真

通过对双星定位系统缺点的分析可以得到以下结论:

(1)为了取消该系统的节点性,可将定位计算的处理器分散到各个用户端机.但是这样为了完成定位解算,两颗卫星的观测量将不充分,必须引入其他的观测量;数字地图虽有很好的定位精度,但限制了其使用区域(无数字地图的区域),因此一般引入高度观测量,而高度表的测量噪声又比较大,从而导致定位精度大幅度降低.

(2)为了满足高机动用户的定位要求,势必要减小用户定位时间间隔,这样不仅限制了用户数目的上限,而且目前的工作机制也难以做到这一点.

据此,笔者提出以下三种改进方案:

**方案 1(分散处理):**将有节点系统改为无节点系统,各用户带有导航处理器,其工作方式为:

用户按照一定的时间间隔向卫星发射信号,卫星收到信号后立即将信号转发回去,据此用户可以分别测量出用户到两颗星的距离;另外,再根据用户高度表的测量数据及已知星历就可以进行三维定位.

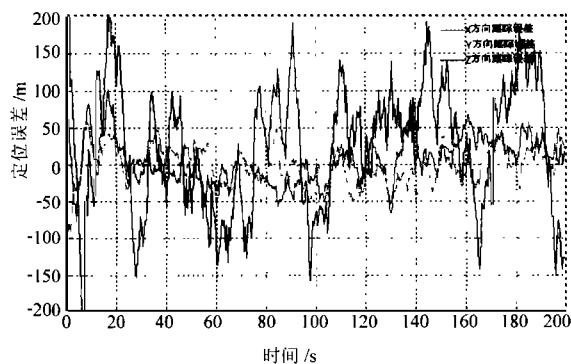


图2 分散处理的 X、Y、Z 方向滤波误差曲线  
(方案 1, 经度 120°, 纬度 30°)

采用卡尔曼滤波定位的仿真结果如图 2 所示.

定位间隔为  $T = 0.5s$ ; 对 ECEF 坐标系中 X、Y、Z 方向定位误差结果进行统计得标准差分别为:  $StdX = 29.4751m$ ;  $StdY = 24.1971m$ ;  $StdZ = 82.5284m$ .

评价:卫星的设备不需要作任何改动,只是用户端增加了导航处理器,将节点系统改为无节点系统;同时,由于信号所经历的路径缩短一半,可提高数据更新率(或相当于提高了定

位精度),但是系统仍然有用户上限.

**方案 2(冗余内插):**采用无源定位方式和有源定位方式相结合的方案,其本质是利用无源冗余信息内插滤波来减小长时间间隔的有源定位误差.仅根据有源信息进行滤波定位,即使仅对一个用户进行定位,其定位间隔也至少大于 0.3 秒,在多用户共用一个转发器的情况下难以满足高机动用户的要求.仔细考察该系统可以发现,系统存在无最小时间间隔限制的无源信息,即高度表的数据和用户到两颗星之间的距离差数据.用户到两颗星之间的距离差的测量方法如下:

一颗卫星发射线性调频信号(或有较好相关性的伪码序列信号),另一颗卫星接收到后立即转发,用户通过测量两颗星信号的频差(或时间差)就可以测量出用户到两颗星之间的距离差(两颗星位置可由星历中得出).这样,利用这些无源冗余信息进行内插滤波不但可以满足高机动用户的要求,而且

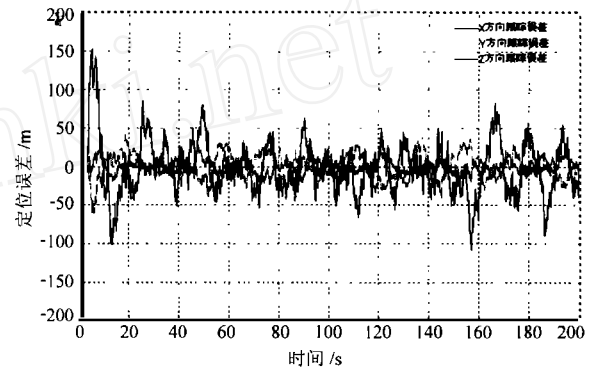


图3 冗余信息内插的 X、Y、Z 方向滤波误差曲线  
(方案 2, 经度 120°, 纬度 30°)

能够进一步提高定位精度.采用卡尔曼滤波定位的仿真结果如图 3 所示.

卫星有源应答数据更新率仍为  $0.5s$ ; 其中均匀内插 10 个无源数据点,对 ECEF 坐标系中 X、Y、Z 方向定位误差结果进行统计得标准差分别为:  $StdX = 8.1070m$ ;  $StdY = 15.8373m$ ;  $StdZ = 29.4189m$ .

评价:以上的改进需要在一颗卫星上增加一套无线电发射设备(或收发设备)以提供距离差信息.这样作的代价可能比较大,但在不增加卫星的条件下将用户定位精度提高 1~2 倍,而且满足了高机动用户的实时定位的要求.

**方案 3(三星无源):**如果利用备份卫星,再将方法 2 推广后就可以得到无节点、无用户上限、无最小时间间隔的无源定位方式,其实质为双曲线定位系统.工作方式如下:

主卫星(位于赤道上空东经 110°处的备份卫星)发射线性调频信号(或有较好相关性的伪码序列信号),其他两颗辅卫星接收并转发,用户通过测量两颗星信号的频差(或时间差)就可以分别测量出用户到主卫星和两颗辅卫星之间的距离差(卫星位置已知).用户利用这两个距离差和高度表的输入就可以进行滤波定位.

采用卡尔曼滤波定位的仿真结果如图 4 所示.

定位间隔为  $T = 0.05s$ ; 对 ECEF 坐标系中 X、Y、Z 方向定位误差结果进行统计得标准差分别为:  $StdX = 9.4278m$ ;  $StdY = 9.4278m$ ;  $StdZ = 9.4278m$ .

= 22.9719m; Std Z = 45.6373m.

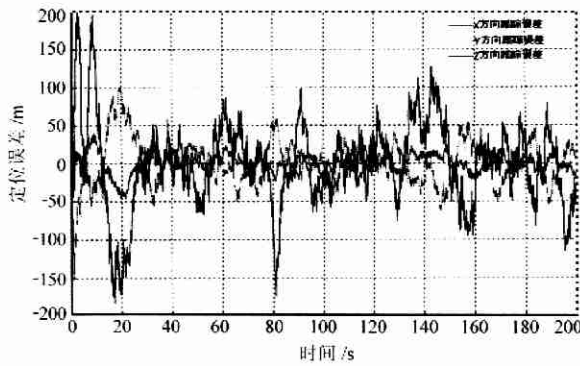


图 4 三星无源定位的 X、Y、Z 方向的滤波误差曲线 (方案 3, 经度 120°, 纬度 30°)

评价:该方法在利用备份卫星的基础上实现了无节点、无用户上限的无源定位方式;但是由于三颗卫星全都在赤道平面上,且采用双曲线定位,从而导致几何误差系数较大.

### 4 几何因素对定位精度的影响

几何误差系数表示相对几何位置对测量误差  $\sigma_m$  的放大倍数,即  $\sigma_p = \text{GDOP} * \sigma_m$ ;其中  $\sigma_p$  表示用户的定位误差, $\sigma_m$  表示测量误差,GDOP 表示几何误差系数.下面分别讨论三种改进方案中几何误差的影响:

方案 1 为测距定位,其定位方程为:

$$\begin{cases} Re + H = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ Rus1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ Rus2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \end{cases}$$

其中  $(x, y, z)$  为用户位置; $(x_1, y_1, z_1)$  为卫星 1 的位置; $(x_2, y_2, z_2)$  为卫星 2 的位置; $H$  为高度测量值,含有噪声  $N$

$(0, \sigma_h^2)$ ;Rus1 为用户和卫星 1 之间距离的测量值,含有噪声  $N$   $(0, \sigma_r^2)$ ;Rus2 为用户和卫星 2 之间距离的测量值,含有噪声  $N$   $(0, \sigma_r^2)$ ;各噪声互相独立.由定位方程可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta Rus1 \\ \Delta Rus2 \end{bmatrix} = \mathbf{G} * \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial H/\partial x & \partial H/\partial y & \partial H/\partial z \\ \partial Rus1/\partial x & \partial Rus1/\partial y & \partial Rus1/\partial z \\ \partial Rus2/\partial x & \partial Rus2/\partial y & \partial Rus2/\partial z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

从而得:

$$\mathbf{C} = \text{cov} \left( \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y & \Delta z \end{bmatrix} \right) = \mathbf{G}^{-1} * \begin{bmatrix} \sigma_h^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r^2 \end{bmatrix} * (\mathbf{G}^{-1})^T$$

矩阵  $\mathbf{C}$  代表了由测量误差以及几何因素共同决定的用户定位误差,现定义 GDOPXY、GDOPZ、GDOPXYZ 分别为 E-CEF 坐标系中 XOY 平面、Z 方向、XYZ 三维位置的用户定位误差(符号上含有“GDOP”仅仅表示与几何因素有关):

$$\text{GDOPXY} = \sqrt{C_{11} + C_{22}}$$

$$\text{GDOPZ} = \sqrt{C_{33}}$$

$$\text{GDOPXYZ} = \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33}}$$

利用上式可以计算在地球表面各点的几何定位精度,结果如图 5、6、7 所示.由图可知,图 5 相当于双星平面定位,其定位误差随纬度的增大而增大,但是数值范围变化不大.图 6 所示是 Z 方向的定位误差随纬度的增大而降低,而且数值范围变化比较大.图 7 说明在引入高度测量数据后,进行三维定位的精度将主要取决于 Z 方向的定位误差,即随纬度的增大而降低.

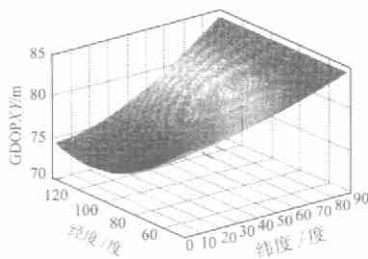


图 5 方案 1 XOY 平面几何定位精度

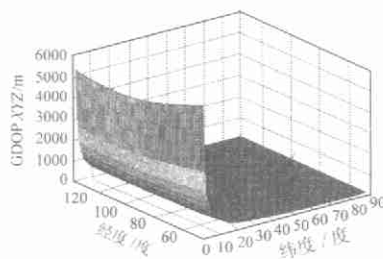


图 6 方案 1 Z 方向几何定位精度

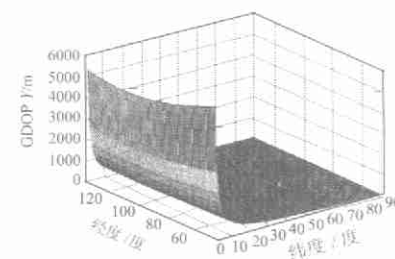


图 7 方案 1 XYZ 三维几何定位精度

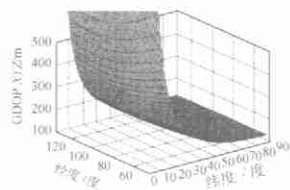


图 8 方案 1 XYZ 三维几何定位精度

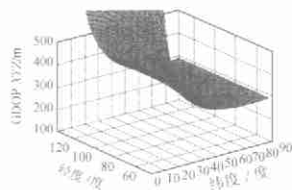


图 9 方案 3 XYZ 三维几何定位精度

$$\begin{cases} Re + H = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ Rus1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ \quad - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \\ Rus2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ \quad - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \end{cases}$$

同理可以计算其几何定位精度(图 9).

可以看出其定位误差大于方案 1 的定位误差,因此也大于方案 2 的定位误差.但是由于其观测量无最小时间间隔的限制,可以有任意高的数据更新率.在方案 1、2 引入滞后误差

由于方案 2 是在方案 1 测距定位的基础上内插测距差的观测量,因而几何位置的影响同方案 1.

方案 3 采用的是测距差系统,其定位方程为:

的情况下方案 3 的定位精度与方案 2 相差不大,而高于方案 1 的定位精度。

为了更清楚地看出以上方案在我国各地区的定位精度,我们给出了用蒙特卡洛方法统计的在不同纬度的定位精度(由于定位精度随在我国区域内经度的变化不很明显),如下表所示:

表 1

纬度/度		10	30	50	70
方案 1	X	29.8	29.5	29.9	30.5
	Y	24.0	24.2	24.8	25.6
	Z	214	82.5	56.8	48.8
方案 2	X	8.1	8.1	8.3	8.7
	Y	14.5	15.8	17.1	18.4
	Z	66.1	29.4	20.5	16.9
方案 3	X	8.7	9.4	10.2	11.2
	Y	20.7	23.0	25.2	27.9
	Z	108	45.6	29.5	21.5

可见表中的统计数据与我们在几何因素分析中所得到的结果是一致的。

## 5 结论

综合以上的讨论及仿真结果可知:从有节点系统改进到无节点系统比较简单,除了用户端要配备导航处理器之外对卫星无须做任何改动,但是它的定位精度和实时性都比较差。引入无源冗余信息的内插滤波之后,不仅满足了实时性的要求,而且将定位精度提高了 1~2 倍,但需要在一颗卫星上增加一套能够提供距离差信息的无线电设备(如调频发射机等),并且仍然有用户数目的上限。对于第 3 种改进方案,由于双曲线测距差定位的几何误差系数比测距定位的几何误差系数大一些,从而定位精度不如第二种方法的定位精度高(几何误差的影响见附录)。然而,由于该方案已能满足一定区域内的民用、军事用户的定位精度要求,而且整个系统无须作时钟同步即能实现无节点、无用户上限的无源定位,且满足实时性的要求,具有较强的抗毁和避免暴露军事用户位置等性能,因而具有更强的军事应用效益。

## 附录

仿真条件:(不考虑无线电波的电离层传播延迟误差等)

- (1)宇宙直角坐标系(ECEF 坐标系);
- (2)地球模型为标准圆球;

- (3)测距误差:50m;
- (4)高度表误差:100m;
- (5)卫星在 X、Y、Z 方向上分别有相互独立的 50m 摄动误差;
- (6)卫星位置:卫星 1(80°,0°,36000km);  
卫星 2(140°,0°,36000km);  
卫星 3(110°,0°,36000km);(备份卫星)
- (7)用户的轨迹模拟:  
 $S = S_0 + R * [\cos(w * t); \sin(w * t); 0];$   
 $S_0$ :用户圆周运动的圆心位置;  
 $S$ :用户当前位置;  
 $R$ :用户圆周运动半径(10km);  
 $W$ :用户圆周运动角速率(0.01 $\pi$ ).

## 参考文献:

- [1] M Kayton, W Fried. Avionics Navigation Systems [M]. John Wiley & Sons Inc, N. Y. 1962.
- [2] Simon Haykin. Adaptive Filter Theory [M]. Prentice Hall, Inc., A Simon & Schuster Company, 1996.
- [3] 陈炳和. 随机信号处理 [M]. 国防工业出版社, 1996.
- [4] 言中. 卫星无线电导航 [M]. 国防工业出版社, 1989.
- [5] 丁子明, 等. 卫星导航与微波着陆 [M]. 国防工业出版社, 1984.

## 作者简介:



孙国良 男, 1976 年 7 月生于山东潍坊, 1998 年于烟台大学物理系获学士学位, 1998 年至今在北京航空航天大学电子工程系攻读硕士。主要研究领域为数据通信、无线电导航、卫星导航及组合导航。



丁子明 男, 1930 年 11 月生于江西临川, 1953 年清华大学无线电系毕业, 1956 年于北京航空学院研究生毕业, 中国电子学会理事、会士、学术委员会委员。现在北京航空航天大学从事航空无线电导航、卫星导航、组合导航、空中交通管制等教学和科研工作。