



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111650616 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 24

(21) 申请号 202010397037.8

G01S 19/41 (2010.01)

(22) 申请日 2020.05.12

G01S 19/42 (2010.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 陆玉琴

申请公布号 CN 111650616 A

(43) 申请公布日 2020.09.11

(73) 专利权人 烟台南山学院

地址 265713 山东省烟台市龙口市东海旅游度假区大学路12号

(72) 发明人 林雪原 董云云 张吉松 王美春

孙玉梅 张珊珊 王金虎 陈祥光

(74) 专利代理机构 烟台智宇知识产权事务所

(特殊普通合伙) 37230

专利代理师 李增发

(51) Int. Cl.

G01S 19/37 (2010.01)

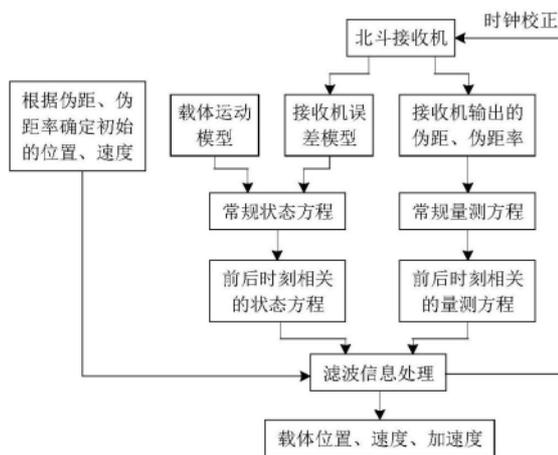
权利要求书3页 说明书6页 附图3页

## (54) 发明名称

一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,该方法首先在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型,结合北斗导航定位机的误差模型建立北斗导航定位系统动态滤波常规状态方程及量测方程;然后分别根据前后两时刻系统模型的相关性及北斗导航定位接收机伪距、伪距率观测的独立性,建立了地球坐标系下北斗高精度导航的系统状态方程与量测方程;最后设计并完成了北斗高精度导航的系统最优滤波算法。本发明计算量适中,在保证系统实时性的同时可显著提高北斗导航系统导航定位精度高,减小导航定位误差,并可高精度地估计载体的加速度。



1. 一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 根据北斗接收机测得的伪距、伪距率计算载体在地球坐标系三个坐标轴上的初始位置及速度分量,在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型,建立北斗导航的误差模型,二者模型合并形成动态滤波的常规系统模型;

(2) 建立北斗导航的观测模型,结合步骤(1),对系统进行离散化,建立北斗导航动态滤波的常规系统模型;

(3) 基于步骤(2)建立的北斗导航动态滤波的常规系统模型,考虑到前后两时刻常规系统模型的相关性及北斗导航定位接收机伪距、伪距率观测的独立性,建立地球坐标系下北斗高精度导航的系统状态方程、量测方程;

(4) 对前后两时刻常规系统模型中相同变量及伪距、伪距率观测量中相同变量进行正交变换,设计并完成北斗高精度导航的系统最优滤波算法;

(5) 进行反正交变换取出滤波结果中当前时刻的常规系统模型,滤波结果能够高精度表达载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度分量,还能够对载体的经度、纬度、高度及该三个方向速度进行高精度解算,滤波结果同时对北斗接收机进行反馈校正以减小时钟偏差及等效时钟漂移对导航定位精度的影响。

2. 根据权利要求1中所述的高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,其特征在于,步骤(1)中所述的在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型,建立北斗导航的误差模型,二者模型合并形成动态滤波的常规系统模型,具体如下:

在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型,载体运动状态取为:

$$\mathbf{X}_1 = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \ddot{z}]^T \quad (1)$$

其中状态变量 $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$ ,  $y$ ,  $\dot{y}$ ,  $\ddot{y}$ ,  $z$ ,  $\dot{z}$ ,  $\ddot{z}$ 分别为载体在地球坐标系下 $x, y, z$ 三个坐标轴上的位置、速度和加速度分量,由此建立系统的运动模型:

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{U}_1(t) + \mathbf{W}_1(t) \quad (2)$$

北斗导航定位接收机的误差取为:

$$\dot{\mathbf{X}}_G(t) = \mathbf{A}_G(t)\mathbf{X}_G(t) + \mathbf{W}_G(t) \quad (3)$$

其中: $\mathbf{X}_G(t) = [\delta l \quad \delta l_f]^T$ ,  $\delta l$ 为与时钟偏置对应的距离误差,  $\delta l_f$ 为等效时钟频漂所对应的速度误差;

以上(2)和(3)两式合并为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{U}(t) + \mathbf{W}(t) \quad (4)$$

将式(4)离散化后,得:

$$\mathbf{X}(k) = \Phi(k, k-1)\mathbf{X}(k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{U}(k-1) + \mathbf{W}(k-1) \quad (5)$$

3. 根据权利要求2中所述的高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,其特征在于,步骤(2)中所述的建立北斗导航的观测模型,结合步骤(1),对系统进行离散化,建立北斗导航动态滤波的常规系统模型,具体如下:

北斗卫星 $i$ 测得的伪距 $\rho_i$ 经过线性化并取其线性部分,有

$$\delta \rho_i = \mathbf{H}_i \cdot \delta \mathbf{X} + v_i \quad (6)$$

得如下系统方程和量测方程:

$$\begin{cases} \mathbf{S}(t) = \boldsymbol{\rho} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) + \mathbf{v} \\ \delta \boldsymbol{\rho} = \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{X} + \mathbf{v} \end{cases} \quad (7)$$

建立离散的北斗导航动态滤波常规滤波模型如下：

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}(k, k-1) = \boldsymbol{\Phi}(k, k-1) \hat{\mathbf{X}}(k-1) + \boldsymbol{\Gamma}(k-1) \mathbf{U}(k) \\ \hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}(k, k-1) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{S}(k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}(k, k-1), k)] \\ \mathbf{P}(k, k-1) = \boldsymbol{\Phi}(k, k-1) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\Phi}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1) \\ \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k, k-1) \mathbf{H}^T(k) [\mathbf{H}(k) \mathbf{P}(k, k-1) \mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \\ \mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{H}(k)] \mathbf{P}(k, k-1) \end{cases} \quad (8)。$$

4. 根据权利要求3中所述的高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法，其特征在于，基于步骤(3)中所述的基于步骤(2)建立的北斗导航动态滤波的常规系统模型，考虑到前后两时刻常规系统模型的相关性及北斗导航定位接收机伪距、伪距率观测的独立性，建立地球坐标系下北斗高精度导航的系统状态方程与量测方程，具体如下：

取： $X_m(k) = [X^T(k-1) \ X^T(k)]^T$ 、 $X_m(k-1) = [X^T(k-3) \ X^T(k-2)]^T$ 、 $Z_m(k) = [Z^T(k-1) \ Z^T(k)]^T$ ， $X_m(k)$ 、 $X_m(k-1)$  和  $Z_m(k)$  相互间的关系为：

$$X_m(k) = \Phi_m(k, k-1) X_m(k-1) + \Gamma_m(k-1) U_m(k-1) + B_m(k-1) W_m(k-1) \quad (9)$$

$$Z_m(k) = H_m(k) X_m(k) + V_m(k) \quad (10)$$

其中：

$$\Phi_m(k, k-1) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Phi(k-1, k-3) & \Phi(k-1, k-2) \\ \Phi(k, k-3) & \Phi(k, k-2) \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_m(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Phi(k-1, k-2) \Gamma(k-3) & \Gamma(k-2) & 0 \\ \frac{1}{2} \Phi(k, k-2) \Gamma(k-3) & \Phi(k, k-1) \Gamma(k-2) & \Gamma(k-1) \end{bmatrix},$$

$$B_m(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Phi(k-1, k-2) & \mathbf{I} & 0 \\ \frac{1}{2} \Phi(k, k-2) & \Phi(k, k-1) & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad H_m(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(k-1) & 0 \\ 0 & \mathbf{H}(k) \end{bmatrix},$$

$$U_m(k-1) = \begin{bmatrix} U(k-3) \\ U(k-2) \\ U(k-1) \end{bmatrix}, \quad W_m(k-1) = \begin{bmatrix} W(k-3) \\ W(k-2) \\ W(k-1) \end{bmatrix}, \quad V_m(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k-1) \\ \mathbf{v}(k) \end{bmatrix}。$$

5. 根据权利要求4中所述的高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法，其特征在于，步骤(4)中所述的对前后两时刻常规系统模型中相同变量及伪距、伪距率观测量中相同变量进行正交变换，设计并完成北斗高精度导航的系统最优滤波算法，具体如下：

$$\bar{X}_m(k) = \mathbf{T} \cdot X_m(k) \quad (11)$$

其中： $T = T_i \cdot L$ ， $L$ 为将 $X_m(k)$ 变换成相同变量相邻的线性算子， $T_i$ 是对相同变量进行正交变换的块矩阵，且满足 $T_i^T T_i = I$ 及 $T^T T = I$ ；

将式(9)、(10)、(11)结合，并考虑到 $T_i^T T_i = I$ 、 $T^T T = I$ ；则有

$$\bar{X}_m(k) = \bar{\Phi}_m(k, k-1) \bar{X}_m(k-1) + \bar{\Gamma}_m(k-1) \bar{U}_m(k-1) + \bar{W}_m(k-1) \quad (12)$$

$$Z_m(k) = \bar{H}_m(k) \bar{X}_m(k) + V_m(k) \quad (13)$$

其中：

$$\bar{\Phi}_m(k, k-1) = T \Phi_m(k, k-1) T^T, \bar{\Gamma}_m(k-1) = T \Gamma_m(k-1) T^T, \bar{U}_m(k-1) = T U_m(k-1),$$

$$\bar{W}_m(k-1) = T B_m(k-1) W_m(k-1), \bar{H}_m(k) = H_m(k) T^T;$$

利用系统模型(12)和观测模型(13)进行卡尔曼最优滤波

$$\hat{X}_m(k, k) = \hat{X}_m(k, k-1) + \bar{K}_m(k) [Z_m(k) - \bar{H}_m \hat{X}_m(k, k-1)] \quad (14)$$

其中：

$$\hat{X}_m(k, k-1) = \bar{\Phi}_m(k, k-1) \hat{X}_m(k-1) + \bar{\Gamma}_m(k-1) \bar{U}_m(k-1)$$

$$\bar{P}_m(k, k-1) = \bar{\Phi}_m(k, k-1) \bar{P}_m(k-1) \bar{\Phi}_m^T(k, k-1) + \bar{Q}_m(k-1)$$

$$\bar{K}_m(k) = \bar{P}_m(k, k-1) \bar{H}_m^T(k) [\bar{H}_m(k) \bar{P}_m(k, k-1) \bar{H}_m^T(k) + \bar{R}_m(k)]^{-1}$$

$$\bar{P}_m(k, k) = [I - \bar{K}_m(k) \bar{H}_m(k)] \bar{P}_m(k, k-1).$$

6. 根据权利要求1中所述的高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法，其特征在于，步骤(5)中所述的进行反正交变换取出滤波结果中当前时刻的常规系统模型，滤波结果能够高精度表达载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度分量，还能够对载体的经度、纬度、高度及该三个方向速度进行高精度解算，滤波结果同时对北斗接收机进行反馈校正以减小时钟偏差及等效时钟漂移对导航定位精度的影响，具体如下：

根据式(14)的滤波结果 $\hat{X}_m(k, k)$ 进行反正交变换，有：

$$\hat{X}_m(k, k) = T^T \cdot \hat{X}_m(k, k) \quad (15)$$

利用式(15)， $\hat{X}_m(k, k)$ 中当前时刻的系统状态估计值 $\hat{X}(k, k)$ 能够精确表达载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度、加速度分量以及北斗接收机时钟偏差及等效时钟漂移估计值；利用载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度分量能够计算载体的经度、纬度、高度及该三个方向速度信息；同时利用 $\hat{X}(k, k)$ 还能够以对北斗接收机时钟偏差及等效时钟漂移进行校正。

## 一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,属于卫星导航技术领域,可用于测绘、航天、航空等领域的导航参数确定。

### 背景技术

[0002] 北斗卫星导航系统(BDS)是中国自行研制的全球卫星导航系统,是继GPS、GLONASS之后第三个成熟的卫星导航系统,其主要误差源包括:①卫星测量误差。可分为:卫星时钟误差、星历误差、电离层的附加延时误差、对流层的附加延时误差、多路径误差、接收机本身的噪声。②卫星的几何位置造成的定位误差。由卫星测量误差造成的BDS定位误差可分为两类:一类是随时间、空间快速变化,相关性极弱的随机误差,如接收机噪声,用户、卫星钟噪声,多路径误差,电离层、大气层附加延时的随机变化部分。另一类是随时间、空间缓慢变化,相关性很强的随机偏移误差,如卫星空间位置的误差,卫星钟对BDS时的偏移,用户钟对BDS时的偏移,电离层、对流层的附加延时等。

[0003] 为了提高BDS的导航定位精度,已有大量的研究成果,如多星座、载波相位定位中的周跳探测与修复、差分定位、BDS可见星优化选择、组合导航方式等,毋庸置疑上述算法为提高BDS的定位精度提供了有效途径,然而上述方法中有的需更多的、价格昂贵的硬件支持,有的无法满足实时性要求。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供了一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,以提供一种计算简单、易于实现的导航定位解算算法,该算法还能够提高定位解算精度。

[0005] 本发明为了实现上述目的,采用如下技术方案:

[0006] 本发明基于一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,包括以下步骤:

[0007] (1)根据北斗接收机测得的伪距、伪距率计算载体在地球坐标系三个坐标轴上的初始位置及速度分量,在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型,建立北斗导航的误差模型,二者模型合并形成动态滤波的常规系统模型;

[0008] (2)建立北斗导航的观测模型,结合步骤(1),对系统进行离散化,建立北斗导航动态滤波的常规系统模型;

[0009] (3)基于步骤(2)建立的北斗导航动态滤波的常规系统模型,考虑到前后两时刻系统状态模型的相关性及北斗导航定位接收机伪距、伪距率观测的独立性,建立地球坐标系下北斗高精度导航的系统状态方程、量测方程;

[0010] (4)对前后两时刻系统状态模型中相同变量及伪距、伪距率观测量中相同变量进行正交变换,设计并完成了北斗高精度导航的系统最优滤波算法;

[0011] (5)进行反正交变换取出滤波结果中当前时刻的系统状态模型,滤波结果能够高精度表达载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度分量,还能够对载体的经度、纬度、高度

及该三个方向速度的高精度解算,滤波结果同时对北斗接收机进行反馈校正以减小时钟偏差及等效时钟漂移对导航定位精度的影响。

[0012] 本发明与现有技术相比,利用数据处理手段取代北斗导航接收机内部对伪距伪距率的求解过程,消除了大部分的随机误差,构建了一种高精度北斗导航定位系统导航定位参数计算方法,它具有如下优点:(1)该方法构建的滤波方法在地球坐标系三个坐标轴上是解耦的,计算量与单独求解伪距、伪距率方程相当,但求解精度高;(2)相对于现有的提高北斗定位精度的技术而言,不需额外的硬件成本,如:相对于差分技术不需要基准站及数据通讯装置,不受差分技术所面临的信号作用范围的限制;(3)该方法能够与现有的提高北斗定位精度的技术方法相互协作,能够进一步提高北斗定位精度。

## 附图说明

- [0013] 图1为本发明的原理框图。  
 [0014] 图2为利用伪距方程直接求解的地球坐标系x轴方向的位置误差曲线。  
 [0015] 图3为利用常规滤波方法求解的地球坐标系x轴方向的位置误差曲线。  
 [0016] 图4为利用本发明方法求解的地球坐标系x轴方向的位置误差曲线。  
 [0017] 图5为利用伪距率方程直接求解的地球坐标系x轴方向的速度误差曲线。  
 [0018] 图6为利用常规滤波方法求解的地球坐标系x轴方向的速度误差曲线。  
 [0019] 图7为利用本发明方法求解的地球坐标系x轴方向的速度误差曲线。  
 [0020] 图8为利用常规滤波方法求解的地球坐标系x轴方向的加速度误差曲线。  
 [0021] 图9为利用本发明方法方法求解的地球坐标系x轴方向的加速度误差曲线。

## 具体实施方式

[0022] 下面结合附图对本发明的技术方案进行详细说明:

[0023] 本发明的原理如图1所示:首先根据北斗接收机测得的伪距、伪距率计算载体在地球坐标系三个坐标轴上的初始位置及速度分量,并在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型,结合北斗导航定位机的误差模型,进而建立北斗导航定位系统动态滤波常规状态方程及量测方程;然后分别根据前后两时刻系统模型的相关性及北斗导航定位接收机伪距、伪距率观测的独立性,建立地球坐标系下北斗高精度导航的系统状态方程与量测方程;最后设计并完成了北斗高精度导航的系统最优滤波算法,滤波结果能够直接作为载体在地区坐标系下三个轴方向的位置速度解,还能够用于载体的经度、纬度、速度、及与此方向对应速度的高精度解算,并对北斗接收机的时钟偏差、等效时钟漂移进行信息校正。具体实施方法如下:

[0024] 一、根据北斗接收机测得的伪距、伪距率计算载体在地球坐标系三个坐标轴上的初始位置及速度分量

[0025] 根据北斗接收机测得的四个伪距量测量 $\rho_i$  ( $i=1,2,3,4$ ):

$$[0026] \quad \rho_i = \sqrt{(x-x_{si})^2 + (y-y_{si})^2 + (z-z_{si})^2} + c \cdot \Delta t_u + er$$

[0027] 利用泰勒级数展开法计算载体在地球坐标系三个轴方向上的位置。其中:载体的真实位置为 $X_U = [x \ y \ z \ c \cdot \Delta t_u]^T$ 或 $X_U = [x \ y \ z \ 1_u]^T$ ,第*i*颗卫星的真实位置为 $X_{Si} = [x_{si}$

$y_{si} \ z_{si}]^T$ , er代表各项测距误差。

[0028] 根据北斗接收机测得的四个伪距率量测量 $\dot{\rho}_i$  ( $i=1,2,3,4$ ):

$$[0029] \quad \dot{\rho}_i = \frac{(x-x_{si})(\dot{x}-\dot{x}_{si})+(y-y_{si})(\dot{y}-\dot{y}_{si})+(z-z_{si})(\dot{z}-\dot{z}_{si})}{[(x-x_{si})^2+(y-y_{si})^2+(z-z_{si})^2]^{\frac{1}{2}}} + \dot{i}_u + err$$

[0030] 利用泰勒级数展开法计算载体在地球坐标系三个轴方向上的速度。其中: $\dot{i}_u$ 代表用户时钟频率误差对应的距离率, err代表测量误差, 载体真实速度为 $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 以及卫星真实速度为 $(\dot{x}_{si}, \dot{y}_{si}, \dot{z}_{si})$ 。

[0031] 二、根据载体的运动学原理建立载体运动模型, 建立北斗导航的误差模型, 二者模型合并形成动态滤波的常规系统模型

[0032] 在地球坐标系中根据载体的运动学原理建立载体运动模型, 载体运动状态取为:

$$[0033] \quad \mathbf{X}_1 = [x \ \dot{x} \ \ddot{x} \ y \ \dot{y} \ \ddot{y} \ z \ \dot{z} \ \ddot{z}]^T \quad (1)$$

[0034] 其中状态变量 $x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}$ 分别为载体在地球坐标系下 $x, y, z$ 三个坐标轴上的位置、速度和加速度分量, 由此建立系统的运动模型:

$$[0035] \quad \dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{U}_1(t) + \mathbf{W}_1(t) \quad (2)$$

$$[0036] \quad \text{其中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_x & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_y & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{A}_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1/\tau_i \end{bmatrix}, \quad (i=x, y, z),$$

$$[0037] \quad \mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{a}_x/\tau_x & 0 & 0 & \bar{a}_y/\tau_y & 0 & 0 & \bar{a}_z/\tau_z \end{bmatrix}^T$$

[0038]  $\mathbf{W}_1 = [0 \ 0 \ w_x \ 0 \ 0 \ w_y \ 0 \ 0 \ w_z]^T$ ,  $\tau_i$  ( $i=x, y, z$ ) 分别为对应三个坐标轴的相关时间常数,  $w_i$  ( $i=x, y, z$ ) 为高斯白噪声,  $\bar{a}_i$  ( $i=x, y, z$ ) 分别为三个坐标轴上的加速度分量的均值。

[0039] 北斗导航定位接收机的误差取为:

$$[0040] \quad \dot{\mathbf{X}}_G(t) = \mathbf{A}_G(t)\mathbf{X}_G(t) + \mathbf{W}_G(t) \quad (3)$$

[0041] 其中: $\mathbf{X}_G(t) = [\delta l \ \delta l_f]^T$ ,  $\delta l$ 为与时钟偏置对应的距离误差,  $\delta l_f$ 为等效时钟频漂所对应的速度误差。

[0042] 以上(2)和(3)两式合并为:

$$[0043] \quad \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{U}(t) + \mathbf{W}(t) \quad (4)$$

[0044] 离散化后, 得:

$$[0045] \quad \mathbf{X}(k) = \Phi(k, k-1)\mathbf{X}(k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{U}(k-1) + \mathbf{W}(k-1) \quad (5)$$

[0046] 三、建立北斗导航的观测模型, 建立北斗导航动态滤波的常规系统模型

[0047] 北斗卫星 $i$ 测得的伪距 $\rho_i$ 及伪距率 $\dot{\rho}_i$ 经过线性化并取其线性部分, 如对 $\rho_i$ 有

[0048]  $\delta\rho_i = H_i \cdot \delta X + v_i$  (6)

[0049] 其中： $H_i = [-e_{i1} \ 0 \ 0 \ -e_{i2} \ 0 \ 0 \ -e_{i3} \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$ ,  $e_{i1} = \frac{x-x_{si}}{R_{si}}$ ,  $e_{i2} = \frac{y-y_{si}}{R_{si}}$ ,

$e_{i3} = \frac{z-z_{si}}{R_{si}}$ ,  $R_{si} = [(x-x_{si})^2 + (y-y_{si})^2 + (z-z_{si})^2]^{1/2}$ 。

[0050] 得如下系统方程和量测方程：

[0051] 
$$\begin{cases} \mathbf{S}(t) = \boldsymbol{\rho} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) + \mathbf{v} \\ \delta\boldsymbol{\rho} = \mathbf{H} \cdot \delta\mathbf{X} + \mathbf{v} \end{cases} \quad (7);$$

[0052] 建立离散的北斗导航动态滤波常规滤波模型如下：

[0053] 
$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}(k, k-1) = \boldsymbol{\Phi}(k, k-1)\hat{\mathbf{X}}(k-1) + \mathbf{U}'(k) \\ \hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}(k, k-1) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{S}(k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}(k, k-1), k)] \\ \mathbf{P}(k, k-1) = \boldsymbol{\Phi}(k, k-1)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\Phi}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1) \\ \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) [\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \\ \mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}(k, k-1) \end{cases}$$

[0054] 其中：

[0055] 
$$\boldsymbol{\Phi}(k, k-1) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_x(k, k-1) & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \boldsymbol{\Phi}_y(k, k-1) & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \boldsymbol{\Phi}_z(k, k-1) & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \boldsymbol{\Phi}_i(k, k-1) \end{bmatrix},$$

[0056] 
$$\boldsymbol{\Phi}_i(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & T & \tau_i^2(T/\tau_i - 1 + e^{-T/\tau_i}) \\ 0 & 1 & \tau_i(1 - e^{-T/\tau_i}) \\ 0 & 0 & e^{-T/\tau_i} \end{bmatrix}, \quad (i = x, y, z);$$

[0057] 四、考虑到前后两时刻系统状态模型的相关性及北斗导航定位接收机伪距、伪距率观测的独立性,建立地球坐标系下北斗高精度导航的系统状态方程与量测方程

[0058] 取： $X_m(k) = [X^T(k-1) \ X^T(k)]^T$ ,  $X_m(k-1) = [X^T(k-3) \ X^T(k-2)]^T$ ,  $Z_m(k) = [Z^T(k-1) \ Z^T(k)]^T$ ,  $X_m(k)$ 、 $X_m(k-1)$  和  $Z_m(k)$  相互间的关系为：

[0059]  $X_m(k) = \boldsymbol{\Phi}_m(k, k-1)X_m(k-1) + \Gamma_m(k-1)U_m(k-1) + B_m(k-1)W_m(k-1)$  (9)

[0060]  $Z_m(k) = H_m(k)X_m(k) + V_m(k)$  (10)

[0061] 其中：

[0062] 
$$\boldsymbol{\Phi}_m(k, k-1) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}(k-1, k-3) & \boldsymbol{\Phi}(k-1, k-2) \\ \boldsymbol{\Phi}(k, k-3) & \boldsymbol{\Phi}(k, k-2) \end{bmatrix},$$

$$[0063] \quad \mathbf{\Gamma}_m(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi}(k-1, k-2)\boldsymbol{\Gamma}(k-3) & \boldsymbol{\Gamma}(k-2) & 0 \\ \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi}(k, k-2)\boldsymbol{\Gamma}(k-3) & \boldsymbol{\Phi}(k, k-1)\boldsymbol{\Gamma}(k-2) & \boldsymbol{\Gamma}(k-1) \end{bmatrix},$$

$$[0064] \quad \mathbf{B}_m(k-1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi}(k-1, k-2) & \mathbf{I} & 0 \\ \frac{1}{2}\boldsymbol{\Phi}(k, k-2) & \boldsymbol{\Phi}(k, k-1) & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_m(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(k-1) & 0 \\ 0 & \mathbf{H}(k) \end{bmatrix},$$

$$[0065] \quad \mathbf{U}_m(k-1) = \begin{bmatrix} \mathbf{U}(k-3) \\ \mathbf{U}(k-2) \\ \mathbf{U}(k-1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_m(k-1) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}(k-3) \\ \mathbf{W}(k-2) \\ \mathbf{W}(k-1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_m(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k-1) \\ \mathbf{v}(k) \end{bmatrix}.$$

[0066] 五、对前后两时刻系统状态模型中相同变量及伪距、伪距率观测量中相同变量进行正交变换,设计并完成了北斗高精度导航的系统最优滤波算法

[0067] 定义如下变换:

$$[0068] \quad \bar{\mathbf{X}}_m(k) = \mathbf{T} \cdot \mathbf{X}_m(k) \quad (11)$$

[0069] 其中: $\mathbf{T} = \mathbf{L}^T \cdot \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{L}$ ,  $\mathbf{L}$ 为将 $\mathbf{X}_m(k)$ 变换成相同变量相邻的线性算子,  $\mathbf{T}_i$ 是对相同变量进行正交变换的块矩阵,且满足 $\mathbf{T}_i^T \mathbf{T}_i = \mathbf{I}$ 及 $\mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{I}$ 。

[0070] 将式(9)、(10)、(11)结合,并考虑到 $\mathbf{T}_i^T \mathbf{T}_i = \mathbf{I}$ 、 $\mathbf{T}^T \mathbf{T} = \mathbf{I}$ 。则有

$$[0071] \quad \bar{\mathbf{X}}_m(k) = \bar{\boldsymbol{\Phi}}_m(k, k-1)\bar{\mathbf{X}}_m(k-1) + \bar{\boldsymbol{\Gamma}}_m(k-1)\bar{\mathbf{U}}_m(k-1) + \bar{\mathbf{W}}_m(k-1) \quad (12)$$

$$[0072] \quad \mathbf{Z}_m(k) = \bar{\mathbf{H}}_m(k)\bar{\mathbf{X}}_m(k) + \mathbf{V}_m(k) \quad (13)$$

[0073] 其中:

$$\bar{\boldsymbol{\Phi}}_m(k, k-1) = \mathbf{T}\boldsymbol{\Phi}_m(k, k-1)\mathbf{T}^T, \quad \bar{\boldsymbol{\Gamma}}_m(k-1) = \mathbf{T}\boldsymbol{\Gamma}_m(k-1)\mathbf{T}^T, \quad \bar{\mathbf{U}}_m(k-1) = \mathbf{T}\mathbf{U}_m(k-1),$$

$$\bar{\mathbf{W}}_m(k-1) = \mathbf{T}\mathbf{B}_m(k-1)\mathbf{W}_m(k-1), \quad \bar{\mathbf{H}}_m(k) = \mathbf{H}_m(k)\mathbf{T}^T.$$

[0074] 利用系统模型(12)和观测模型(13)进行卡尔曼最优滤波

$$[0075] \quad \hat{\bar{\mathbf{X}}}_m(k, k) = \hat{\bar{\mathbf{X}}}_m(k, k-1) + \bar{\mathbf{K}}_m(k) \left[ \mathbf{Z}_m(k) - \bar{\mathbf{H}}_m \hat{\bar{\mathbf{X}}}_m(k, k-1) \right] \quad (14)$$

[0076] 其中:

$$[0077] \quad \hat{\bar{\mathbf{X}}}_m(k, k-1) = \bar{\boldsymbol{\Phi}}_m(k, k-1)\hat{\bar{\mathbf{X}}}_m(k-1) + \bar{\boldsymbol{\Gamma}}_m(k-1)\bar{\mathbf{U}}_m(k-1)$$

$$[0078] \quad \bar{\mathbf{P}}_m(k, k-1) = \bar{\boldsymbol{\Phi}}_m(k, k-1)\bar{\mathbf{P}}_m(k-1)\bar{\boldsymbol{\Phi}}_m^T(k, k-1) + \bar{\mathbf{Q}}_m(k-1)$$

$$[0079] \quad \bar{\mathbf{K}}_m(k) = \bar{\mathbf{P}}_m(k, k-1)\bar{\mathbf{H}}_m^T(k) \left[ \bar{\mathbf{H}}_m(k)\bar{\mathbf{P}}_m(k, k-1)\bar{\mathbf{H}}_m^T(k) + \bar{\mathbf{R}}_m(k) \right]^{-1}$$

$$[0080] \quad \bar{\mathbf{P}}_m(k, k) = \left[ \mathbf{I} - \bar{\mathbf{K}}_m(k)\bar{\mathbf{H}}_m(k) \right] \bar{\mathbf{P}}_m(k, k-1)$$

[0081] 六、对上述滤波结果 $\hat{\bar{\mathbf{X}}}_m(k, k)$ 进行反正交变换,有:

$$[0082] \quad \hat{\mathbf{X}}_m(k, k) = \mathbf{T}^T \cdot \hat{\mathbf{X}}_m(k, k) \quad (15)$$

[0083] 利用式(15),  $\hat{\mathbf{X}}_m(k, k)$  中当前时刻的系统状态估计值  $\hat{\mathbf{X}}(k, k)$  能够精确表达载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度、加速度分量以及北斗接收机时钟偏差及等效时钟漂移估计值;利用载体在地球坐标系三个轴上的位置、速度分量还能够以计算载体的经度、纬度、高度及该三个方向速度信息;同时利用  $\hat{\mathbf{X}}(k, k)$  还能够以对北斗接收机时钟偏差及等效时钟频漂进行校正。

[0084] 以某次在机动环境下的北斗导航定位实验为例,以说明本发明方法在提高导航定位参数的优越性。图2、图5为利用伪距、伪距率方程进行泰勒级数展开而解算的位置与速度误差,而图3、图6、图8为利用常规滤波方法对北斗导航定位系统进行直接估计的位置、速度、加速度误差,而图4、图7、图9为利用本发明方法对北斗导航定位系统进行直接估计的位置、速度、加速度误差。由图能够看出本发明方法不仅能够高精度地给出北斗导航定位系统的位置、速度,并且能够高精度地估计载体的加速度,而这是普通算法无法完成的。

[0085] 通过前述还能够以看出本发明方法在估计载体在地球坐标系三个坐标轴方向的位置、速度及加速度时,是相互解耦的,这样能够大幅降低计算量进而保证系统的实时性。为此,本发明计算量适中,在保证系统实时性的同时能够显著提高北斗导航系统导航定位精度高,减小导航定位误差,并能够高精度地估计载体的加速度。

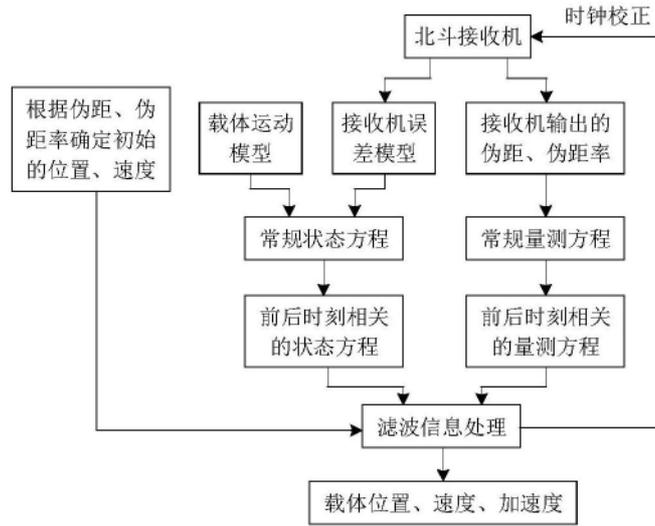


图1

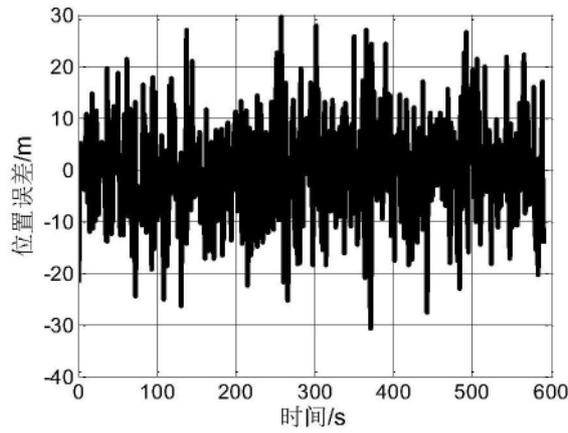


图2

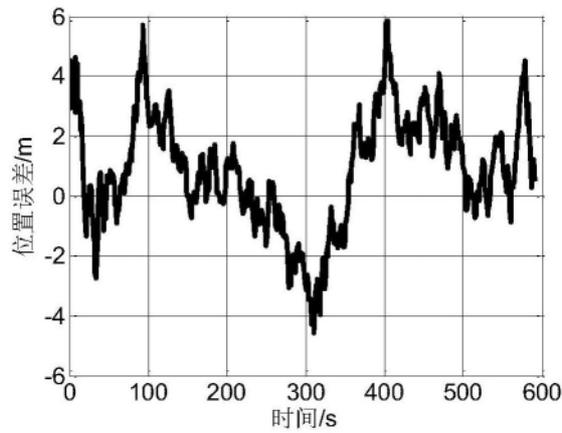


图3

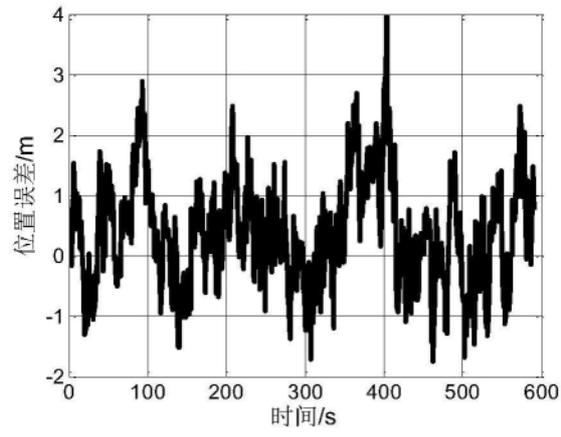


图4

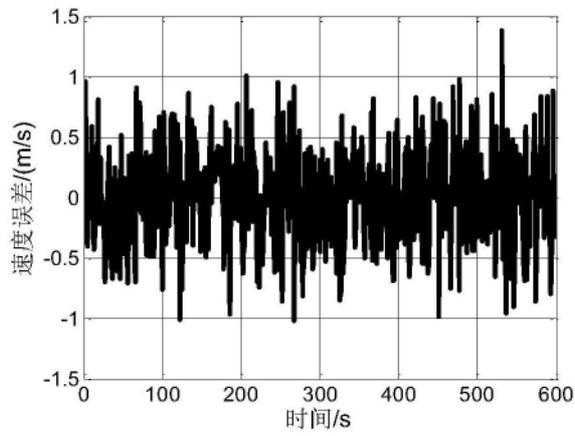


图5

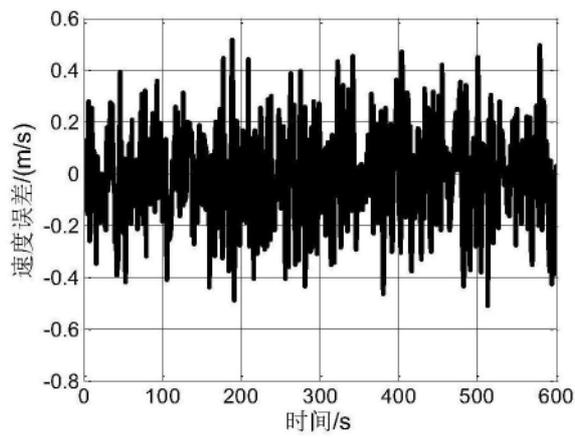


图6

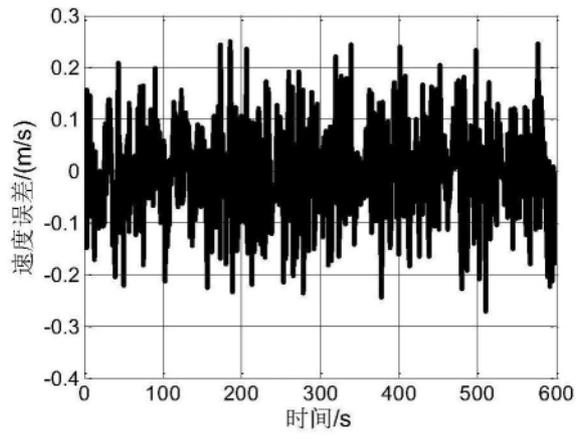


图7

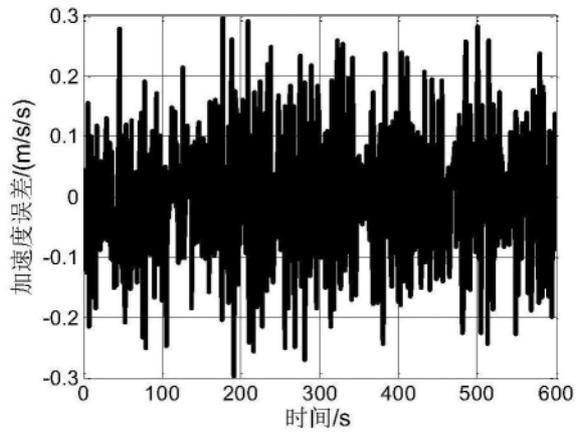


图8

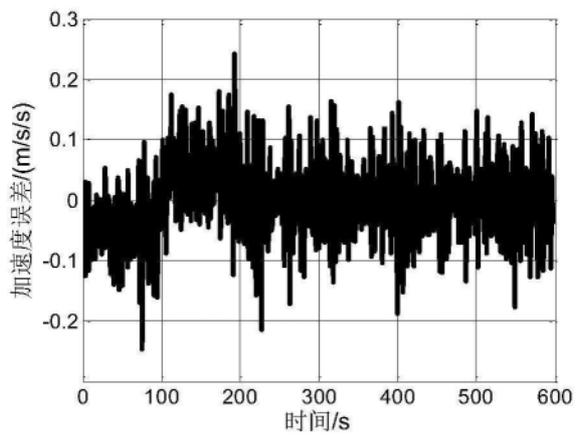


图9