

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102928858 A

(43) 申请公布日 2013. 02. 13

(21) 申请号 201210411647. 4

(22) 申请日 2012. 10. 25

(71) 申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街 5 号

(72) 发明人 许承东 宋丹 张鹏飞

(51) Int. Cl.

G01S 19/42 (2010. 01)

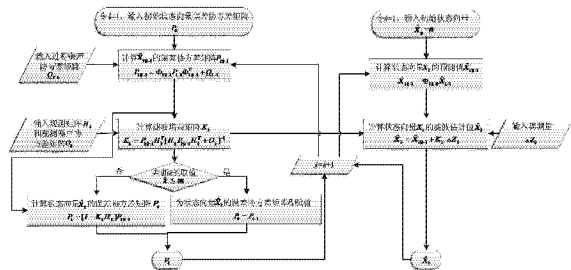
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 3 页

(54) 发明名称

基于改进扩展卡尔曼滤波的 GNSS 单点动态定位方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于改进扩展卡尔曼滤波的 GNSS 单点动态定位方法,属于卫星导航技术领域。本方法将 GNSS 接收机的位置速度、钟差与钟漂作为位置参数设为状态向量  $X_k$ , 通过状态转移方程, 由前一历元的状态向量推算当前历元状态向量的预测值; 并通过观测方程进一步获取状态向量预测值的修正量; 将预测值和修正量加权, 获取状态向量的估计值。在基于扩展卡曼滤波定位过程中, 本方法通过延迟对状态向量误差协方差矩阵的更新, 使得在初始取状态向量  $\hat{X}_0=0$  的情况下, 滤波估计值快速收敛在真值附近, 并达到很高的定位测速精度; 不需要保存每一步的计算数据, 占用计算机内存资源少; 适用于 GNSS 单点动态定位。





s 颗可见星的伪距方程 [6] 和多普勒方程 [7],  $s=1, \dots, n$ ,  $n$  为接收机观测到的参与定位计算的可见星总数;

$$R_k^s = \sqrt{(X_k^s - x_k^{\mu})^2 + (Y_k^s - y_k^{\mu})^2 + (Z_k^s - z_k^{\mu})^2} + c \cdot \Delta t_k^{\mu} \quad [6]$$

$$D_k^s = [(X_k^s - x_k^{\mu}) \cdot (V_k^{sx} - v_k^{\mu x}) + (Y_k^s - y_k^{\mu}) \cdot (V_k^{sy} - v_k^{\mu y}) + (Z_k^s - z_k^{\mu}) \cdot (V_k^{sz} - v_k^{\mu z})] / \rho_k^s + c \cdot \Delta f_k^{\mu} \quad [7]$$

其中,  $[X_k^s, Y_k^s, Z_k^s]$  和  $[V_k^{sx}, V_k^{sy}, V_k^{sz}]$  分别为 ECEF 坐标系下第 s 颗可见星在第 k 个历元的三维位置和速度,  $\rho_k^s$  是第 s 颗可见星与 GNSS 接收机之间的真实距离,  $\rho_k^s = \sqrt{(X_k^s - x_k^{\mu})^2 + (Y_k^s - y_k^{\mu})^2 + (Z_k^s - z_k^{\mu})^2}$ ;

$$H_k = \begin{bmatrix} h_{1x|k}^1 & 0 & h_{1y|k}^1 & 0 & h_{1z|k}^1 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{nx|k}^1 & 0 & h_{ny|k}^1 & 0 & h_{nz|k}^1 & 0 & 1 & 0 \\ h_{1x|k}^2 & h_{1x|k}^1 & h_{1y|k}^2 & h_{1y|k}^1 & h_{1z|k}^2 & h_{1z|k}^1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{nx|k}^2 & h_{nx|k}^1 & h_{ny|k}^2 & h_{ny|k}^1 & h_{nz|k}^2 & h_{nz|k}^1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [8]$$

$H_k$  中前 n 行由伪距方程线性化而来, 后 n 行由多普勒方程线性化而来;

$$h_{sx|k}^1 = \frac{\partial R_k^s}{\partial x_k^{\mu}} = \frac{\partial D_k^s}{\partial v_k^{\mu x}} = \frac{(\hat{x}_{k|k-1}^{\mu} - X_k^s)}{\rho_{k|k-1}^s}$$

$$h_{sx|k}^2 = \frac{\partial D_k^s}{\partial x_k^{\mu}} = \frac{(\hat{v}_{k|k-1}^{\mu x} - V_k^{sx})(\rho_{k|k-1}^s)^2 - (\hat{x}_{k|k-1}^{\mu} - X_k^s)J_{k|k-1}^s}{(\rho_{k|k-1}^s)^2}$$

$$\rho_{k|k-1}^s = \sqrt{(X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu})^2}$$

$$J_{k|k-1}^s = (X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sx} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu x}) + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sy} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu y}) + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sz} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu z})$$

用 y 和 z 分别代替  $h_{sx|k}^1$  和  $h_{sx|k}^2$  中的 x, 得到  $h_{sy|k}^1$  和  $h_{sz|k}^1$ ,  $h_{sy|k}^2$  和  $h_{sz|k}^2$ ;

$$(b) \text{ 过程噪声方差矩阵 } O_k = \begin{bmatrix} \beta_1 \cdot I_{n \times n} & 0 \\ 0 & \beta_2 \cdot I_{n \times n} \end{bmatrix} \quad [9]$$

其中,  $I_{n \times n}$  为 n 阶方阵,  $\beta_1$  为伪距观测噪声方差,  $\beta_2$  为多普勒频移观测噪声方差;

步骤 5: 根据步骤 2 得到的  $\hat{X}_{k|k-1}$ , 计算状态向量  $X_k$  的滤波估计值  $\hat{X}_k$ :

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \cdot \Delta Z_k$$

$$\Delta Z_k = [(r_k^1 - \hat{r}_{k|k-1}^1), \dots, (r_k^n - \hat{r}_{k|k-1}^n), (d_k^1 - \hat{d}_{k|k-1}^1), \dots, (d_k^n - \hat{d}_{k|k-1}^n)] \quad [10]$$

$r_k^s$  和  $d_k^s$  分别为第 s 颗可见星的伪距观测值和多普勒观测值;

$$\hat{r}_{k|k-1}^s = \sqrt{(X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu})^2} + c \cdot \Delta t_{k|k-1}^{\mu},$$

$$\hat{d}_{k|k-1}^s = [(X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sx} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu x}) + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sy} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu y}) + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sz} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu z})] / \rho_{k|k-1}^s + c \cdot \Delta f_{k|k-1}^{\mu}$$

步骤 6: 判断 k 的取值, 若  $k \leq m$ , 转到步骤 7, 若  $k > m$ , 转到步骤 8;

步骤 7: 令  $P_k = P_{k-1}$ ;

步骤 8: 根据步骤 4 得到的  $K_k$ , 计算  $P_k: P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}$ ;

步骤 9:输出  $\hat{\mathbf{X}}_k$ :

$$\hat{\mathbf{X}}_k = [\hat{x}_k^u, \hat{v}_k^{ux}, \hat{a}_k^{ux}, \hat{y}_k^u, \hat{v}_k^{uy}, \hat{a}_k^{uy}, \hat{z}_k^u, \hat{v}_k^{uz}, \hat{a}_k^{uz}, c\Delta t_k^u, c\Delta f_k^u]^T;$$

$[\hat{x}_k^u, \hat{y}_k^u, \hat{z}_k^u], [\hat{v}_k^{ux}, \hat{v}_k^{uy}, \hat{v}_k^{uz}]$ 即为第 k 个历元的定位和测速结果;

步骤 10:令  $k = k+1$ ,转入步骤 2,继续计算并输出下一个历元的状态向量的滤波估计值,直到不需要进行接收机载体的定位测速时,停止计算。

2. 根据权利要求 1 所述的基于改进扩展卡尔曼滤波的 GNSS 单点动态定位方法,其特征在于: $\varepsilon_p, \varepsilon_v, \varepsilon_a, \varepsilon_t$  和  $\varepsilon_f$  均为正数,取值在数量级上与接收机真实情况相近。

3. 根据权利要求 1 所述的基于改进扩展卡尔曼滤波的 GNSS 单点动态定位方法,其特征在于: $2 < m < 6$ 。

## 基于改进扩展卡尔曼滤波的 GNSS 单点动态定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于改进扩展卡尔曼滤波的 GNSS 单点动态定位方法,属于卫星导航技术领域。

### 背景技术

[0002] GNSS 单点动态定位由于只需要一台单频接收机,获取 4 颗或 4 颗以上可见卫星与接收机间的测码伪距和多普勒频移观测量,便可解算载体的位置、速度、钟差和钟漂等信息而广泛应用于各种车辆、船只的导航和监控、海上定位、野外勘测等领域。扩展卡尔曼滤波(EKF)是在 GNSS 单点动态定位中除最小二乘(LS)外最常用的解算方法。

[0003] 卡尔曼滤波(KF)是卡尔曼于 1960 年提出的从与被提取信号有关的观测量中,通过算法估计出所需信号的一种滤波方法。这种方法将信号过程视为白噪声作用下的一个线性系统,利用高斯白噪声的统计特性,以系统的观测量为输入,以所需要的估计值(称为系统的状态向量)为输出,将输入和输出由时间更新和观测更新联系在一起,根据系统的状态转移方程和观测方程获取状态向量的最优估计值。

[0004] KF 的原理是:将系统中需求解的所有参数设为一个状态向量;通过状态转移方程建立两个相邻历元的状态向量之间的关系,由前一历元的状态向量推算当前历元状态向量的预测值;通过观测方程建立当前历元状态向量与观测量之间的关系,从而获取一个状态向量预测值的修正量;将状态向量的预测值和修正量通过滤波增益加权,获得状态向量的最优滤波估计。

[0005] KF 适用于线性系统,而大多数情况下,系统是非线性的。要使 KF 适用于非线性系统,需要将状态转移方程和观测方程进行线性化处理,若线性化处理的方法是泰勒级数展开法,则所对应的 KF 被称为扩展卡尔曼滤波(EKF)。

[0006] 以线性的状态转移方程和非线性的观测方程所构成的系统为例:

$$[0007] \text{ 状态转移方程: } X_k = \Phi_{k|k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k|k-1} \omega_{k-1} \quad [1]$$

$$[0008] \text{ 观测方程: } Z_k = f_k(X_k) + v_k \quad [2]$$

[0009] 由于  $f_k(\cdot)$  是非线性的,需要对方程 [2] 进行线性化处理,在  $\hat{X}_{k|k-1}$  处进行泰勒展开,并取其一阶近似,可得到方程 [3]。

$$[0010] \Delta Z_k = H_k \Delta X_k + v_k \quad [3]$$

[0011] 其中,  $k$  表示观测历元数;  $X_k$  和  $X_{k-1}$  为第  $k$  个和第  $k-1$  个观测历元的状态向量;  $\Phi_{k|k-1}$  是状态转移矩阵;  $\Gamma_{k|k-1}$  为噪声驱动矩阵;  $Z_k$  为第  $k$  个历元的观测量;  $f_k$  描述了第  $k$  个历元,  $Z_k$  和  $X_k$  之间的函数关系;  $\omega_{k-1}$  和  $v_k$  分别为过程噪声和观测噪声,二者皆为高斯白噪声;  $\Delta X_k = X_k - \hat{X}_{k|k-1}$ ,  $\Delta Z_k = Z_k - f(\hat{X}_{k|k-1})$ ,  $\hat{X}_{k|k-1}$  为  $X_k$  的预测值。

[0012] 基于方程 [1] 和 [3] 的 EKF 步骤如下:

[0013] a) 推算状态向量  $X_k$  的预测值  $\hat{X}_{k|k-1}$ :

$$[0014] \hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \hat{X}_{k-1}$$

[0015] 其中,  $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$  是  $X_{k-1}$  的最优滤波估计;

[0016] b) 计算  $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$  的协方差矩阵  $P_{k|k-1}$ :

$$[0017] \quad P_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} P_{k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_{k-1}$$

[0018] 其中,  $Q_{k-1}$  为  $\omega_{k-1}$  的协方差矩阵;

[0019] c) 计算滤波增益矩阵  $K_k$ :

$$[0020] \quad K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + O_k]^{-1}$$

[0021] 其中,  $O_k$  为  $v_k$  的协方差矩阵;

[0022] d) 计算状态向量  $X_k$  的滤波估计值  $\hat{\mathbf{X}}_k$ :

$$[0023] \quad \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + K_k \cdot \Delta \mathbf{Z}_k$$

[0024] 其中,  $\hat{\mathbf{X}}_k$  即为第  $k$  个历元状态向量  $X_k$  的滤波解算结果;

[0025] e) 计算  $X_k$  的误差协方差矩阵  $P_k$ :

$$[0026] \quad P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}$$

[0027] f) 令  $k-1 = k$ , 转入步骤 a) ……

[0028] 与基于 LS 的 GNSS 单点动态定位方法 (LS 方法) 相比, 基于 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法可达到较高的定位测速精度, 但是, 这种方法存在一个问题: 在不了解初始状态的统计特性的情况下, 如果初始状态向量  $\hat{\mathbf{X}}_0$  及其协方差矩阵  $P_0$  取值不合适, 滤波收敛极慢。 $\hat{\mathbf{X}}_0$  和  $P_0$  的常用取值方法有两种: 1. 取  $\hat{\mathbf{X}}_0$  为零向量, 取  $P_0$  为对角阵, 其对角线元素取大数量级的正数; 2. 取  $\hat{\mathbf{X}}_0$  为与真实的  $X_0$  相近的概略值, 取  $P_0$  为对角阵, 其对角线元素取大数量级的正数; 2. 取  $\hat{\mathbf{X}}_0$  为与真实的  $X_0$  相近的概略值。第一种方法操作简便, 但会使滤波收敛速度变慢, 延长首次定位时间; 第二种方法可使滤波快速收敛, 但是  $\hat{\mathbf{X}}_0$  与真实的  $X_0$  接近到何种程度可使滤波快速收敛很难界定, 且接收机的大概位置、速度信息不是在任何时间地点都可轻易获取。

## 发明内容

[0029] 本发明目的是为解决 GNSS 单点动态定位时, EKF 滤波不收敛或收敛很慢的问题, 提出一种基于改进 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法。

[0030] 本发方法采用一种基于改进 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法, 采用状态向量误差协方差矩阵延迟更新的方法 (DU-EKF), 通过对状态向量误差协方差矩阵更新的延迟, 使得在初始取状态向量  $\hat{\mathbf{X}}_0 = \mathbf{0}$  的情况下, 滤波估计值快速收敛在真值附近, 并达到很高的定位测速精度。

[0031] 本发明的具体技术方案如下:

[0032] 预设 GNSS 接收机处于 ECEF 坐标系下, 其的状态向量为:

$$[0033] \quad \mathbf{X}_k = [x_k^u, v_k^{ux}, a_k^{ux}, y_k^u, v_k^{uy}, a_k^{uy}, z_k^u, v_k^{uz}, a_k^{uz}, e_{\Delta} t_k^u, e_{\Delta} f_k^u]^T$$

[0034] 其中,  $k$  为观测历元数,  $[x_k^u, y_k^u, z_k^u], [v_k^{ux}, v_k^{uy}, v_k^{uz}], [a_k^{ux}, a_k^{uy}, a_k^{uz}]$  分别为 ECEF 坐标下 GNSS 接收机载体的三维位置、速度和加速度,  $e_{\Delta} t_k^u$  和  $e_{\Delta} f_k^u$  分别为接收机的钟差和钟漂。该状态向量包含了导航定位所求解的全部信息。



$$[0052] \quad R_k^s = \sqrt{(X_k^s - x_k^{\mu})^2 + (Y_k^s - y_k^{\mu})^2 + (Z_k^s - z_k^{\mu})^2} + c \cdot \Delta t_k^{\mu} \quad [6]$$

$$[0053] \quad D_k^s = [(X_k^s - x_k^{\mu}) \cdot (V_k^{sx} - v_k^{\mu x}) + (Y_k^s - y_k^{\mu}) \cdot (V_k^{sy} - v_k^{\mu y}) + (Z_k^s - z_k^{\mu}) \cdot (V_k^{sz} - v_k^{\mu z})] / \rho_k^s + c \cdot \Delta f_k^{\mu} \quad [7]$$

[0054] 其中,  $[X_k^s, Y_k^s, Z_k^s]$  和  $[V_k^{sx}, V_k^{sy}, V_k^{sz}]$  分别为 ECEF 坐标系下第 s 颗可见星在第 k 个历元的三维位置和速度,  $\rho_k^s$  是第 s 颗可见星与 GNSS 接收机之间的真实距离,

$$[0055] \quad \rho_k^s = \sqrt{(X_k^s - x_k^{\mu})^2 + (Y_k^s - y_k^{\mu})^2 + (Z_k^s - z_k^{\mu})^2}。$$

[0056]

$$H_k = \begin{bmatrix} h_{1x|k}^1 & 0 & h_{1y|k}^1 & 0 & h_{1z|k}^1 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{nx|k}^1 & 0 & h_{ny|k}^1 & 0 & h_{nz|k}^1 & 0 & 1 & 0 \\ h_{1x|k}^2 & h_{1x|k}^1 & h_{1y|k}^2 & h_{1y|k}^1 & h_{1z|k}^2 & h_{1z|k}^1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{nx|k}^2 & h_{nx|k}^1 & h_{ny|k}^2 & h_{ny|k}^1 & h_{nz|k}^2 & h_{nz|k}^1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [8]$$

[0057]  $H_k$  中前 n 行由伪距方程线性化而来, 后 n 行由多普勒方程线性化而来。

$$[0058] \quad h_{sx|k}^1 = \frac{\partial R_k^s}{\partial x_k^{\mu}} = \frac{\partial D_k^s}{\partial v_k^{\mu x}} = \frac{(\hat{x}_{k|k-1}^{\mu} - X_k^s)}{\rho_{k|k-1}^s}$$

$$[0059] \quad h_{sx|k}^2 = \frac{\partial D_k^s}{\partial x_k^{\mu}} = \frac{(\hat{v}_{k|k-1}^{\mu x} - V_k^{sx})(\rho_{k|k-1}^s)^2 - (\hat{x}_{k|k-1}^{\mu} - X_k^s)J_{k|k-1}^s}{(\rho_{k|k-1}^s)^2}$$

$$[0060] \quad \rho_{k|k-1}^s = \sqrt{(X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu})^2}$$

[0061]

$$J_{k|k-1}^s = (X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sx} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu x}) + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sy} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu y}) + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sz} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu z})$$

[0062] 用 y 和 z 分别代替  $h_{sx|k}^1$  和  $h_{sx|k}^2$  中的 x, 得到  $h_{sy|k}^1$  和  $h_{sz|k}^1$ ,  $h_{sy|k}^2$  和  $h_{sz|k}^2$ 。

[0063] (b) 过程噪声方差矩阵

$$O_k = \begin{bmatrix} \beta_1 \cdot I_{m \times n} & 0 \\ 0 & \beta_2 \cdot I_{m \times n} \end{bmatrix} \quad [9]$$

[0064] 其中,  $I_{n \times n}$  为 n 阶方阵,  $\beta_1$  为伪距观测噪声方差,  $\beta_2$  为多普勒频移观测噪声方差。

[0065] 步骤 5: 根据步骤 2 得到的  $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ , 计算状态向量  $\mathbf{X}_k$  的滤波估计值  $\hat{\mathbf{X}}_k$ :

$$[0066] \quad \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + K_k \cdot \Delta \mathbf{Z}_k$$

$$[0067] \quad \Delta \mathbf{Z}_k = [(r_k^s - \hat{r}_{k|k-1}^s), \dots, (r_k^{\mu} - \hat{r}_{k|k-1}^{\mu}), (d_k^s - \hat{d}_{k|k-1}^s), \dots, (d_k^{\mu} - \hat{d}_{k|k-1}^{\mu})]^T \quad [10]$$

[0068]  $r_k^s$  和  $d_k^s$  分别为第 s 颗可见星的伪距观测值和多普勒观测值。

$$[0069] \quad \hat{r}_{k|k-1}^s = \sqrt{(X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu})^2 + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu})^2} + c \cdot \Delta t_{k|k-1}^{\mu},$$

[0070]

$$\hat{d}_{k|k-1}^s = [(X_k^s - \hat{x}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sx} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu x}) + (Y_k^s - \hat{y}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sy} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu y}) + (Z_k^s - \hat{z}_{k|k-1}^{\mu}) \cdot (V_k^{sz} - \hat{v}_{k|k-1}^{\mu z})] / \rho_{k|k-1}^s + c \cdot \Delta f_{k|k-1}^{\mu}$$

[0071] 步骤 6: 判断 k 的取值, 若  $k \leq m$ , 转到步骤 7, 若  $k > m$ , 转到步骤 8。



[0072]  $m$  取值范围为  $2 < m < 6$ 。

[0073] 若  $m \leq 2$ , 滤波收敛速度慢; 如果  $2 < m < 6$ , 状态向量的滤波估计值在前 5 个历元就收敛到真值附近, 解算误差与 LS 方法的解算误差相当, 在第 10 个历元取得很好的解算精度, 随着历元数的积累, 解算精度略有提高; 如果  $m \geq 6$ , 状态向量在第 10 个历元才能收敛到真值附近, 收敛速度慢。

[0074] 步骤 7: 令  $P_k = P_{k-1}$ 。

[0075] 步骤 8: 根据步骤 4 得到的  $K_k$ , 计算  $P_k: P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}$ 。

[0076] 步骤 9: 输出  $\hat{X}_k = [\hat{x}_k^u, \hat{v}_k^u, \hat{a}_k^u, \hat{y}_k^u, \hat{v}_k^v, \hat{a}_k^v, \hat{z}_k^u, \hat{v}_k^z, \hat{a}_k^z, c\Delta\hat{t}_k^u, c\Delta\hat{f}_k^u]^T$ 。

[0077]  $[\hat{x}_k^u, \hat{y}_k^u, \hat{z}_k^u]$ ,  $[\hat{v}_k^u, \hat{v}_k^v, \hat{v}_k^z]$  即为第  $k$  个历元的定位和测速结果。

[0078] 步骤 10: 令  $k = k+1$ , 转入步骤 2, 继续计算并输出下一个历元的状态向量的滤波估计值, 直到不需要进行接收机载体的定位测速时, 停止计算。

[0079] 有益效果

[0080] 本发明的 DU-EKF 方法不需要保存每一步的计算数据, 占用计算机内存资源少; 直接令  $\hat{X}_0 = \mathbf{0}$ , 不需要考虑  $\hat{X}_0$  的取值, 操作简便, 且滤波收敛快, 解算精度与 LS 方法相比有数量级上的提升, 与 EKF 方法相当; 这种方法从第 5 个历元起, 所得的解算结果就是有效的。

## 附图说明

[0081] 图 1 为本发明的基于改进 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法流程图;

[0082] 图 2 为具体实施方式中 ECEF 坐标系下, LS 方法、CEKF 方法、DU-EKF 方法解算所得的接收机 Z 向位置误差对比图, 图中将三种方法分别记作 LSM、CEKFM 和 DU-EKFM;

[0083] 图 3 为具体实施方式中 ECEF 坐标系下, LS 方法、CEKF 方法、DU-EKF 方法解算所得的接收机 Z 向速度误差对比图, 图中将三种方法分别记作 LSM、CEKFM 和 DU-EKFM;

[0084] 图 4a 和图 4b 分别为具体实施方式中 ECEF 坐标系下, DU-EKF 方法和 ZEKF 方法解算所得的接收机 Z 向定位和测速误差, 图中将两种方法分别记作 DU-EKFM 和 ZEKFM。

## 具体实施方式

[0085] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步的详细说明。

[0086] 本发明提供一种基于改进 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法, 所述方法流程如图 1 所示, 实施例中以 GPS 系统为卫星导航系统。

[0087] 在基于改进 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法中, 接收机载体的状态转移方程来自动力学模型, 常用的动力学模型有 CV 模型、CA 模型和 Singer 模型; 对应于载体的动力学模型, 接收机的钟差和钟漂之间的关系由时钟模型描述; 观测方程来自观测模型, 常用的观测模型有伪距观测模型和多普勒观测模型。实施例中, 选取 Singer 模型和石英钟模型来描述状态转移方程, 选取伪距和多普勒两种观测模型来描述观测方程, 选取地心地固坐标系 (ECEF) 为参考坐标系。以下为实施例的具体执行步骤:

[0088] 预设接收机处于 ECEF 坐标系下, 其状态向量  $\hat{X}_k = [\hat{x}_k^u, \hat{v}_k^u, \hat{a}_k^u, \hat{y}_k^u, \hat{v}_k^v, \hat{a}_k^v, \hat{z}_k^u, \hat{v}_k^z, \hat{a}_k^z, c\Delta\hat{t}_k^u, c\Delta\hat{f}_k^u]^T$ , 包含了导航定位所求解的全部信息, 其中,  $[\hat{x}_k^u, \hat{y}_k^u, \hat{z}_k^u]$ ,  $[\hat{v}_k^u, \hat{v}_k^v, \hat{v}_k^z]$ ,  $[\hat{a}_k^u, \hat{a}_k^v, \hat{a}_k^z]$  分别为 ECEF 坐标下载体的三维位置、速度和加速度,  $\Delta\hat{t}_k^u$  和  $\Delta\hat{f}_k^u$  分别为接收机的钟差和钟漂。

[0089] 则  $X_k$  的滤波估计  $\hat{X}_k = [\hat{x}_k^u, \hat{v}_k^{ux}, \hat{a}_k^{ux}, \hat{y}_k^u, \hat{v}_k^{uy}, \hat{a}_k^{uy}, \hat{z}_k^u, \hat{v}_k^{uz}, \hat{a}_k^{uz}, c_{\Delta} \hat{t}_k^u, c_{\Delta} \hat{f}_k^u]^T$ 。

[0090] 步骤 1: 令  $k = 1$ , 设置初始状态向量  $\hat{X}_0 = \mathbf{0}$  (维数为 11), 初始状态向量误差协方差矩阵  $P_0 = \text{diag}[1/\varepsilon_p \ 1/\varepsilon_v \ 1/\varepsilon_a \ 1/\varepsilon_p \ 1/\varepsilon_v \ 1/\varepsilon_a \ 1/\varepsilon_p \ 1/\varepsilon_v \ 1/\varepsilon_a \ 1/\varepsilon_t \ 1/\varepsilon_f]$ 。

[0091] 步骤 2: 计算状态向量预测值  $X_k$  的预测值  $\hat{X}_{k|k-1}, \hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \hat{X}_{k-1}$ 。

[0092] (a) 状态转移矩阵  $\Phi_{k|k-1}$  参见公式 [4]。Singer 模型下, 载体的状态转移矩阵如下描述, 以 ECEF 坐标系下 X 向运动为例:

$$[0093] \quad \Phi_{k|k-1}^x = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & T & \frac{1}{\alpha_x^2}(-1 + \alpha_x + e^{-\alpha_x T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha_x}(1 - e^{-\alpha_x T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha_x T} \end{bmatrix}$$

[0094]  $\Phi_{k|k-1}^y$  和  $\Phi_{k|k-1}^z$  参见  $\Phi_{k|k-1}^x$ , 只需将  $\alpha_x$  轮换为  $\alpha_y$  和  $\alpha_z$ 。  $\alpha_x, \alpha_y$  和  $\alpha_z$  分别为 X 向, Y 向和 Z 向的机动加速度频率, T 为观测步长, 即相邻两个观测历元间的时间差。

[0095] 实施例中选取的石英钟模型由二阶马尔科夫过程来描述,

$$[0096] \quad \Phi_{k|k-1}^c = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0097] (b) 将  $\hat{X}_{k-1}$  和  $\Phi_{k|k-1}$  代入  $\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \hat{X}_{k-1}$ , 求  $\hat{X}_{k|k-1}$ 。

[0098] 步骤 3: 计算  $\hat{X}_{k|k-1}$  的协方差矩阵  $P_{k|k-1}, P_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} P_{k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_{k-1}$ 。

[0099] (a) 过程噪声协方差矩阵  $Q_{k-1}$  参见公式 [5], 仍以 X 向运动为例:

$$[0100] \quad Q_{k-1}^x = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix}$$

$$[0101] \quad q_{11} = (1 - e^{-2\alpha_x T} + 2\alpha_x T + 2\alpha_x^3 T^3 / 3 - 2\alpha_x^2 T^2 - 4\alpha_x T e^{-\alpha_x T}) / 2\alpha_x^5$$

$$[0102] \quad q_{22} = (4e^{-\alpha_x T} - 3 - e^{2\alpha_x T} + 2\alpha_x T) / 2\alpha_x^3$$

$$[0103] \quad q_{33} = (1 - 2e^{-2\alpha_x T}) / 2\alpha_x$$

$$[0104] \quad q_{12} = q_{21} = (e^{-2\alpha_x T} + 1 - 2e^{-\alpha_x T} + 2\alpha_x T e^{-\alpha_x T} - 2\alpha_x T + \alpha_x^2 T^2) / 2\alpha_x^4$$

$$[0105] \quad q_{13} = q_{31} = (1 - e^{-2\alpha_x T} - 2\alpha_x T e^{-\alpha_x T}) / 2\alpha_x^3$$

$$[0106] \quad q_{23} = q_{32} = (1 + e^{-2\alpha_x T} - 2e^{-\alpha_x T}) / 2\alpha_x^2$$

[0107]  $Q_{k-1}^y$  和  $Q_{k-1}^z$  参见  $Q_{k-1}^x$ , 将  $\alpha_x$  轮换为  $\alpha_y$  和  $\alpha_z$  即可,  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$  分别是 X, Y, Z 三向的机动加速度方差。

[0108] 有关时钟的过程噪声解释如下:

$$[0109] \quad Q_{k-1}^c = \begin{bmatrix} q_c^{11} & q_c^{12} \\ q_c^{21} & q_c^{22} \end{bmatrix}$$

$$[0110] \quad q_c^{11} = \frac{h_0}{2} T + 2h_1 T^2 + \frac{2}{3} \pi^2 h_2 T^3, \quad q_c^{12} = q_c^{21} = 2h_1 T + \pi^2 h_2 T^2, \quad q_c^{22} = \frac{h_0}{2T} + 2h_1 + \frac{8}{3} \pi^2 h_2 T,$$

对于石英钟而言,  $h_0 = 9.4 \times 10^{-20}$ ,  $h_1 = 1.8 \times 10^{-19}$ ,  $h_2 = 3.8 \times 10^{-21}$ ;

- [0111] (b) 将  $\Phi_{k|k-1}$ ,  $P_{k-1}$  和  $Q_{k-1}$  代入  $P_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} P_{k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_{k-1}$ , 计算  $P_{k|k-1}$ 。
- [0112] 步骤 4: 计算滤波增益矩阵  $K_k$ ,  $K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + O_k]^{-1}$ 。
- [0113] (a) 观测矩阵  $H_k$  参见公式 [8];
- [0114] (b) 过程噪声协方差矩阵  $O_k$  参见公式 [9];
- [0115] (c) 将  $P_{k|k-1}$ ,  $H_k$  和  $O_k$  代入  $K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + O_k]^{-1}$  ( $k=1$ ), 求得  $K_k$ 。
- [0116] 步骤 5: 计算状态向量  $X_k$  的滤波估计值  $\hat{X}_k$ ,  $\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \cdot \Delta Z_k$ 。
- [0117] (a) 观测量  $\Delta Z_k$  参见公式 [10];
- [0118] (b) 将  $\hat{X}_{k|k-1}$ ,  $K_k$  和  $\Delta Z_k$  代入  $\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \cdot \Delta Z_k$  ( $k=1$ ), 求得  $\hat{X}_k$ 。
- [0119] 步骤 6: 判断  $k$  的取值, 若  $k \leq m$ , 转到步骤 7, 若  $k > m$ , 转到步骤 8。
- [0120] 步骤 7: 直接令  $P_k = P_{k-1}$ 。
- [0121] 步骤 8: 对  $P_k$  进行计算,  $P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}$ ;
- [0122] 步骤 9: 输出  $\hat{X}_k$ 。
- [0123] 步骤 10: 令  $k = k+1$ , 转入步骤 2, 继续计算得到下一个历元的  $\hat{X}_k$ 。

[0124] 下面以具体数值进一步说明本发明。

[0125] 本实施例在数学仿真环境中进行, 设定仿真开始时间为 UTC 时间 2011-6-202:00:00, 仿真步长为 1s ( $T = 1s$ )。接收机初始位置为纬度  $5^\circ$ , 经度  $5^\circ$ , 高度 0m, 在 ECEF 坐标系中的位置是 [6329853.79, 553790.45, 552184.40]m, 接收机的速度为 ECEF 坐标系中 [5, 5, 5]m/s。观测量(伪距和多普勒频移)是根据 GPS 的 RINEX 星历和载体的真实运动轨迹计算所得的真距和真实多普勒频移分别加上 8m 和 0.2Hz 的高斯白噪声构成的, 符合实际情形中排除电离层、对流层和多径误差后伪距和多普勒频移观测量的真实情况。

[0126] DU-EKF 方法具体实施步骤如下, 如图 1 所示, 取  $m = 3$ :

[0127] 预设接收机处于 ECEF 坐标系下, 其状态向量  $X_k = [x_k^u, y_k^u, z_k^u, \dot{x}_k^u, \dot{y}_k^u, \dot{z}_k^u, \ddot{x}_k^u, \ddot{y}_k^u, \ddot{z}_k^u, c\Delta t_k^u, c\Delta f_k^u]^T$ , 包含了导航定位所需求解的全部信息, 其中,  $[x_k^u, y_k^u, z_k^u]$ ,  $[\dot{x}_k^u, \dot{y}_k^u, \dot{z}_k^u]$ ,  $[\ddot{x}_k^u, \ddot{y}_k^u, \ddot{z}_k^u]$  分别为 ECEF 坐标下载体的三维位置、速度和加速度,  $\Delta t_k^u$  和  $\Delta f_k^u$  分别为接收机的钟差和钟漂。

[0128] 则  $X_k$  的滤波估计  $\hat{X}_k = [\hat{x}_k^u, \hat{y}_k^u, \hat{z}_k^u, \hat{\dot{x}}_k^u, \hat{\dot{y}}_k^u, \hat{\dot{z}}_k^u, \hat{\ddot{x}}_k^u, \hat{\ddot{y}}_k^u, \hat{\ddot{z}}_k^u, c\Delta \hat{t}_k^u, c\Delta \hat{f}_k^u]^T$ 。

[0129] 步骤 1: 令  $k = 1$ , 设  $\hat{X}_0 = \mathbf{0}$  (维数为 11),

[0130]  $P_0 = \text{diag}[1/\varepsilon_p \ 1/\varepsilon_v \ 1/\varepsilon_a \ 1/\varepsilon_p \ 1/\varepsilon_v \ 1/\varepsilon_a \ 1/\varepsilon_p \ 1/\varepsilon_v \ 1/\varepsilon_a \ 1/\varepsilon_t \ 1/\varepsilon_f]$  其中  $\varepsilon_p = 10^{-14}$ ,  $\varepsilon_a = 0.01$ ,  $\varepsilon_v = 10^{-3}$ ,  $\varepsilon_t = \varepsilon_f = 10^{-5}$ 。

[0131] 步骤 2: 计算  $X_{k-1}$  的预测值  $\hat{X}_{k|k-1}$ 。

[0132] (a) 求取状态转移矩阵  $\Phi_{k|k-1}$ , 参见公式 [4],  $\Phi_{k|k-1}$  中  $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = 10^6$ ;

[0133] (b) 将  $\hat{X}_{k-1}$  和  $\Phi_{k|k-1}$  代入  $\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \hat{X}_{k-1}$ , 求  $\hat{X}_{k|k-1}$ 。

[0134] 步骤 3: 计算  $\hat{X}_{k|k-1}$  的误差协方差矩阵  $P_{k|k-1}$ 。

[0135] (a) 求取过程噪声协方差矩阵  $Q_{k-1}$ , 参见公式 [5],  $Q_{k-1}$  中  $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = 10^6$ ,

[0136]  $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_z^2 = 100$ ;

[0137] (b) 将  $\Phi_{k|k-1}$ ,  $P_{k-1}$  和  $Q_{k-1}$  代入  $P_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} P_{k-1} \Phi_{k|k-1}^T + Q_{k-1}$ , 计算  $P_{k|k-1}$ 。

[0138] 步骤 4: 计算滤波增益矩阵  $K_k$ 。

[0139] (a) 求  $H_k$

[0140] 将第  $k$  个历元中参与定位的可见星的三维位置和三维速度以及  $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$  代入公式 [8], 求得  $H_k$ , 表 1 为  $k=1$  时 12 颗可见星在 ECEF 坐标系下的三维位置和速度;

[0141] 表 1. 第 1 个历元 GPS 可见星的三维位置和速度

[0142]

s	位置 (m)			速度 (m/s)		
	$X_1^s$	$Y_1^s$	$Z_1^s$	$V_1^{sx}$	$V_1^{sy}$	$V_1^{sz}$
1	20031143.96	11472378.85	-13830536	-1694.45	163.80	-2360.45
2	16177936.53	13872610.99	-15840249.14	-2050.27	-34.77	-2080.48
3	19842996.38	4936687.70	16788943.79	1006.95	1987.36	-1706.07
4	19329972.39	-6459176.09	-17212355.76	2043.65	672.35	2053.68
5	10184643.73	10849155.90	-21973500.42	-1904.62	2039.77	153.92
6	25262548.36	8537939.11	-2204118.90	-334.34	174.08	-3131.34
7	20545927.98	-10387959.16	13047226.13	-812.82	1510.74	2461.83
8	25692403.96	-165881.26	-7423331.50	871.93	403.26	2972.61
9	16114023.88	847002.17	21190911.61	706.33	2584.09	-613.08
10	10337628.46	-21983031.81	10945686.92	1054.08	-820.82	-2801.41
11	6779924.66	25439034.47	2681950.43	-327.06	-223.87	3206.66
12	19246933.37	-664646.85	18384185.14	-1513.82	1734.73	1714.21

[0143]

[0144] (b) 根据公式 [9] 求得  $0_k$ ,  $0_k$  中  $\beta_1=64$ ,  $\beta_2=0.04$ 。

[0145] (c) 将  $P_{k|k-1}$ ,  $H_k$  和  $0_k$  代入  $K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + O_k]^{-1} (k=1)$ , 求得  $K_k$ 。

[0146] 步骤 5: 计算状态向量  $X_k$  的滤波估计值  $\hat{\mathbf{X}}_k$ ;

[0147] (a) 将可见星的伪距和多普勒观测值代入公式 [10], 求得  $\Delta Z_k$ , 表 2 为  $k=1$  时 12 颗可见星的伪距和多普勒频移观测值;

[0148] 表 2. 第 1 个历元 GPS 可见星的伪距观测值  $r_1^s$  和多普勒观测值  $d_1^s$

[0149]

s	$r_1^s$ (m)	$d_1^s$ (Hz)
1	22667242.48	550.10
2	23304226.86	575.64
3	21574229.16	-257.32
4	23103340.28	-631.12
5	25065132.92	408.14
6	20731389.15	172.04
7	21861949.66	118.68
8	20953173.41	-342.12
9	22842351.63	-224.92
10	25139513.38	-252.71
11	24980261.99	38.76
12	22052569.91	397.04

[0150] (b) 将  $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ ,  $K_k$  和  $\Delta Z_k$  代入  $\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + K_k \cdot \Delta Z_k (k=1)$ , 求得  $\hat{\mathbf{X}}_k$ 。

[0151] 步骤 6: 判断  $k$  的取值, 若  $k \leq 3$ , 转入步骤 7; 若  $k > 3$ , 转入步骤 8。

[0152] 步骤 7: 令  $P_k = P_{k-1}$ 。

[0153] 步骤 8 :令  $P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1}$ 。

[0154] 步骤 9 :输出  $\hat{X}_k$ 。

[0155] 步骤 10 :令  $k = k+1$ , 转入步骤 2, 继续计算输出  $\hat{X}_k$ 。

[0156] 本实施例中, 将现有技术中基于 EKF 的 GNSS 单点动态定位方法分为两种, 第一种称为 ZEKF 方法, 其特点为  $\hat{X}_0$  取零向量,  $P_0$  取为对角阵, 其对角线元素取大数量级的正数; 第二种称为 CEKF 方法, 其特点为  $\hat{X}_0$  取与真实的  $X_0$  相近的概略值,  $P_0$  取为对角阵, 其对角线元素取大数量级的正数。

[0157] 按本实施例中的步骤 1-10, 计算 305 个历元, 统计从第 5 个历元到第 305 个历元的定位和测速结果, 以相同仿真条件下 LS 方法和 CEKF 方法的解算结果作对比。定位误差如表 3 所示, 测速误差如表 4 所示。

[0158] 表 3. 不同方法的各向定位误差 单位 :m

方向	方法	均值	标准差	均方根
X	LS	-0.3041	8.9346	8.9397
	EKF	0.0213	1.4897	1.4898
	DU-EKF	-0.0269	1.3784	1.3786
Y	LS	0.4654	5.0010	5.0226
	CEKF	-0.0427	0.8759	0.8769
	DU-EKF	-0.1841	0.7081	0.7316
Z	LS	-0.0109	3.9734	3.9734
	CEKF	-0.0913	0.4778	0.4864
	DU-EKF	-0.4672	0.5392	0.7135

[0160] 表 4. 不同方法的各向测速误差 单位 :m/s

方向	方法	均值	标准差	均方根
X	LS	-0.0038	0.0407	0.0409
	CEKF	-0.0071	0.0154	0.0170
	DU-EKF	0.0038	0.0129	0.0134
Y	LS	0.0006	0.0259	0.0259
	CEKF	0.0031	0.0077	0.0083
	DU-EKF	-0.0012	0.0084	0.0084
Z	LS	-0.0018	0.0184	0.0185
	CEKF	-0.0011	0.0070	0.0071
	DU-EKF	-0.0051	0.0073	0.0089

[0162] 图 2 和图 3 分别是 LS 方法、CEKF 方法和 DU-EKF 方法下, Z 向的定位和测速精度。由于从第 1 个历元到第 4 个历元, DU-EKF 方法和 CEKF 方法的定位和测速误差有 5 个数量级的提升, 若展示在图中, 后续历元的解算结果是一条 0 值附近的直线, 不利于对三种方法解算结果的比较, 因此图中横轴观测历元的取值从第 5 个历元开始。

[0163] 分析表 3 和表 4, 结合图 2 和图 3 可得, 算例中 LS 方法的定位误差在 10m 以内, 测速误差在 0.05m/s 以内; CEKF 方法的定位误差在 2m 以内, 测速误差在 0.02m/s 以内; DU-EKF 方法的定位误差在 1.5m 以内, 测速误差在 0.02m/s 以内。与 LS 方法相比, DU-EKF 方法的解算精度有数量级上的提升; 与 CEKF 方法相比, DU-EKF 方法的解算精度并没有明显的提高,

但是 DU-EKF 方法不需要获知载体的概略位置和速度。

[0164] 如图 4 所示,在初始状态向量同为  $\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{0}$  的情况下, DU-EKF 方法的收敛速度要比 ZEKF 方法快很多,体现了 DU-EKF 方法的优越性。

[0165] 本发明的 DU-EKF 方法对 EKF 方法进行了改进,在接收机的 GNSS 单点动态定位中,本方法收敛速度快,不需要在滤波开始时获知接收机的概略位置和速度,且解算精度与 CEKF 方法相当。将本方法运用到实际导航仪中,用户不需要在其位置发生大范围变动时对导航仪的概略位置进行重新设定,且获取首次定位测速信息的时间短,定位测速的精度高,能够为用户提供方便、快捷和高质量的定位测速服务。本发明所提供的方法适用于 GNSS 单点动态定位。

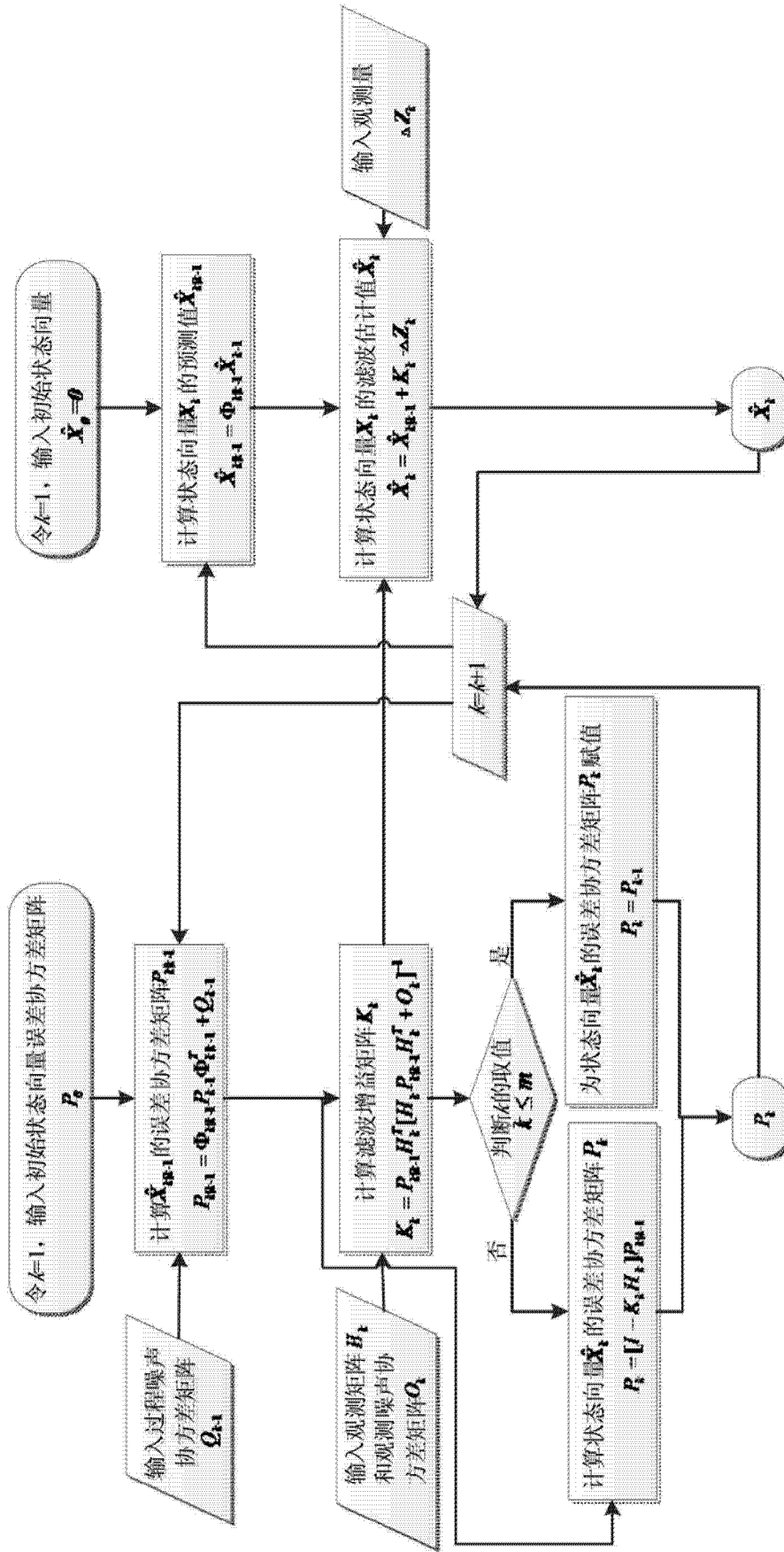


图 1

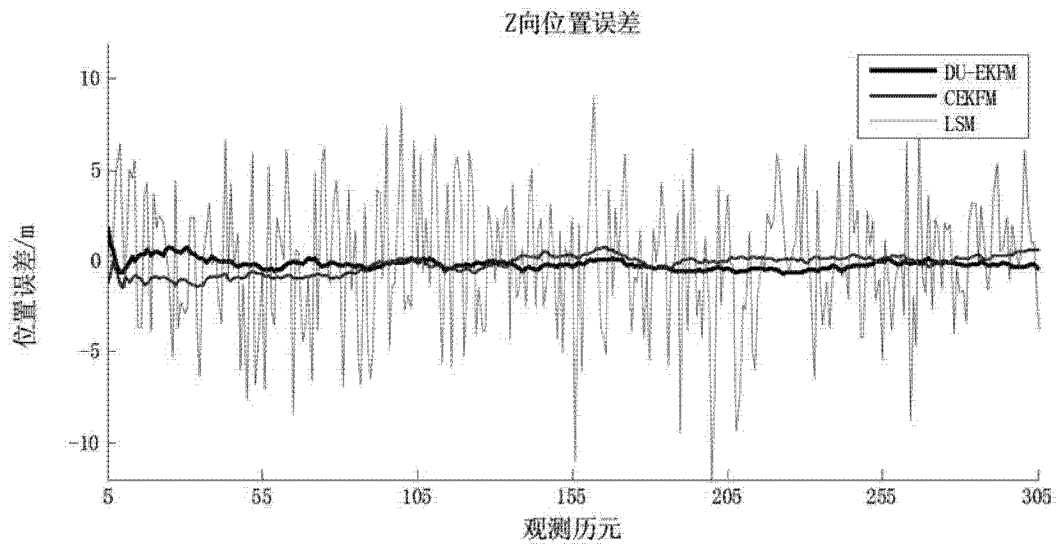


图 2

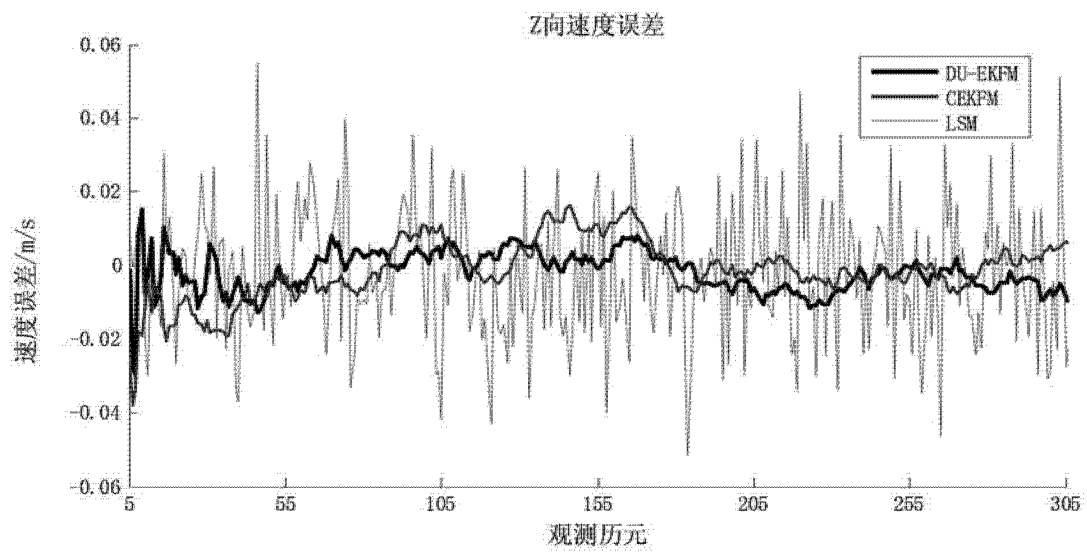


图 3



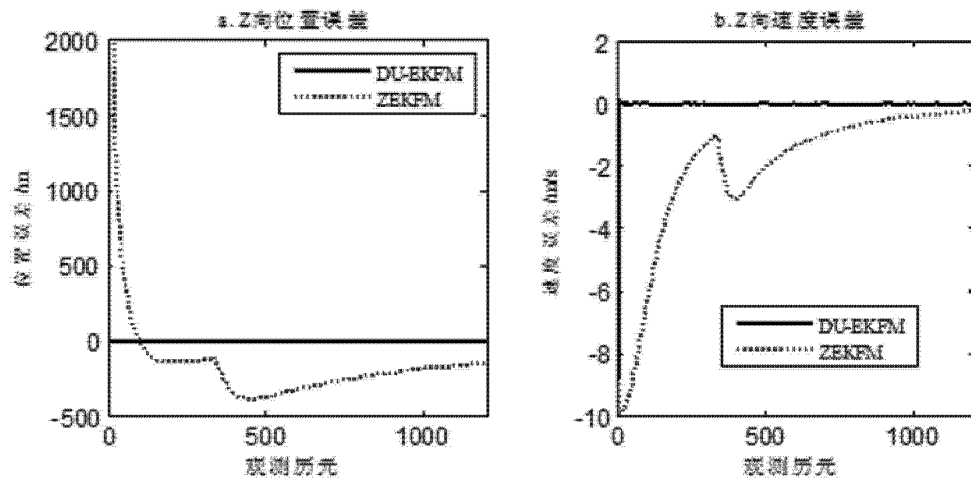


图 4