

一种双级北斗导航接收机伪距误差补偿方法

张丽杰^{1,2}, 钱镞源^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古机电控制重点实验室, 呼和浩特 010051)

摘要: 伪距误差是影响北斗卫星导航接收机定位精度的关键因素, 本文提出一种基于伪距差分 and 自适应容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman filter, CKF)的双级北斗导航接收机伪距误差补偿方法。该方法将伪距误差分为自有性误差和公共性误差两类, 首先通过伪距差分方法补偿伪距自有性误差, 其次设计量测噪声自适应CKF滤波器, 对用户接收机运动系统状态进行估计, 补偿伪距公共性误差。实验结果表明: 载体静态时, 双级补偿方法略优; 载体动态时, 双级补偿比单级补偿的定位误差减小显著, 自适应CKF算法比CKF算法具有更好的对噪声和干扰的适应能力。

关键词: 北斗卫星导航; 伪距; 误差补偿; 差分; 容积卡尔曼滤波

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A

A Two-Stage Pseudorange Error Compensation Method of BeiDou Navigation Receiver

ZHANG Lijie^{1,2}, QIAN Leiyuan^{1,2}

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mechanical and Electrical Control, Hohhot 010051, China)

Abstract: Pseudorange error is a key factor affecting the positioning accuracy of the BeiDou satellite navigation receiver. A two-stage pseudorange error compensation method based on the pseudorange difference and the adaptive cubature Kalman filter (CKF) for BeiDou navigation receiver is proposed in this paper. Pseudorange error is divided into the self error and the common error. Firstly, the self error is compensated with the pseudorange difference method. Secondly, the measure noise adaptive CKF filter is designed to estimate the state of the receiver moving system in order to compensate the common error. Experimental results show that the the two-stage compensation method is slightly better under static conditions. The two-stage compensation reduces the localization error significantly than the single-stage compensation when the carrier is dynamic, and the adaptive CKF algorithm has better adaptability to noise and interference than the CKF algorithm.

Key words: BeiDou satellite navigation; pseudorange; error compensation; difference; cubature Kalman filter

引言

北斗卫星导航接收机根据北斗卫星发送的导航电文解析出伪距信息,进而计算得到用户的位置和速度。伪距由卫星和接收机之间的真实距离和多种误差组成^[1],是伪距单点定位、伪距差分定位和卫星/惯性紧组合导航系统中的常用观测量^[2-4],对伪距误差进行补偿可以提高定位系统的性能。根据伪距误差源的特点,伪距误差的补偿方法可以分为3类。第一类是固定值误差补偿,主要针对由卫星时钟、电离层和对流层引起的误差,通过相应的数学模型对其进行补偿^[5]。第二类是随机误差补偿,通过滤波估计算法对伪距中的随机误差进行实时估计和补偿,常用的滤波估计算法有扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)、无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman filter, UKF)和容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman filter, CKF)等^[6-8],在处理高维非线性问题时,CKF比UKF和EKF具有更高的滤波精度。第三类是对固定值误差和随机误差进行整体补偿,常用伪距差分的方法对其进行补偿^[9]。尽管整体补偿方法效果更为显著,但补偿后的距离信息中仍含有由用户接收机引起的接收机钟差、天线误差等随机误差^[10]。

为了进一步提高北斗卫星导航接收机的定位精度,本文根据误差来源相对用户是否相同,将伪距误差分为自有性误差和公共性误差两类,提出一种基于差分定位和自适应滤波的双级北斗卫星导航接收机伪距误差补偿方法。该方法首先对用户接收机和基准接收机的伪距观测值进行差分,用以补偿自有性误差。由于CKF更适用于非线性系统^[11],同时为了提高CKF的工程适用性,本文对其进行改进,针对量测噪声和干扰的不确定性,设计基于卡方检验和埃米尔特量测噪声估计方法的自适应CKF算法,再对自有性补偿后的伪距进行公共性误差估计和补偿。

1 伪距误差分类及伪距定位原理

1.1 伪距误差分类

北斗卫星导航系统中卫星信号的传播过程如图1所示,包括空间段、传播段和接收段,伪距误差来源于卫星信号传播的3个阶段。空间段和传播段产生的伪距误差包括电离层延迟、对流层延迟、卫星钟差和多路效应等,该过程产生的伪距误差因为卫星和卫星信号传播路径的不同而不同,本文将该类称为卫星的自有性误差。在接收段,接收机对卫星信号进行采集和解析,接收机钟差、器件老化、电路误差等导致伪距误差,该过程产生的伪距误差仅与用户接收机有关,因其对于同一用户而言具有近似性,本文将该类误差称为公共性误差。为了提高用户接收机定位精度,对于同一用户接收机输出的伪距信息,可分别对其自有性误差和公共性误差进行

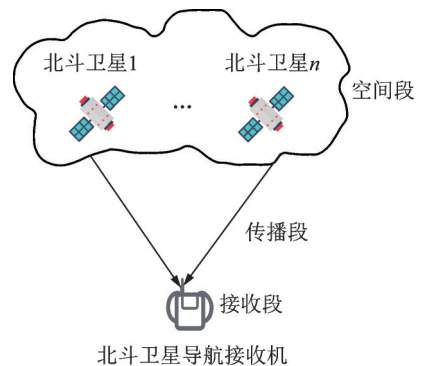


图1 北斗卫星导航信号传播过程

Fig.1 Propagation process of BeiDou satellite navigation signal

1.2 伪距定位原理

卫星导航接收机于 k 时刻输出的第 i 颗卫星伪距可表示为卫星至接收机的真实距离和各种误差的总和^[12]。根据1.1节中伪距误差的分类方法,卫星导航接收机于 k 时刻输出的第 i 颗卫星伪距可简化表示为

$$\rho_{ik} = r_{ik} + C_{ik} \quad (1)$$

式中: r_{ik} 为卫星至接收机的真实距离; $C_{ik} = d_k + M_{ik}$, d_k 为公共性误差, M_{ik} 为自有性误差的总和。

设 k 时刻第 i 颗卫星的位置和卫星导航接收机的位置分别为 (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) 和 (x_k, y_k, z_k) , 则式(1)可进一步写为

$$\rho_{ik} = \sqrt{(x_{ik} - x_k)^2 + (y_{ik} - y_k)^2 + (z_{ik} - z_k)^2} + C_{ik} \quad (2)$$

因卫星位置 (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) 和卫星伪距 ρ_{ik} 可由卫星导航接收机收到的导航电文得到, 所以为了求解式(2)中的 x_k, y_k, z_k 和 C_k 四个未知数, 需获得至少4颗卫星的伪距信息, 建立至少4个方程, 即令式(2)中的 i 分别为1、2、3、4。

2 基于差分的伪距自有性误差补偿

基于差分的伪距误差补偿方法需要额外部署一个距离用户接收机(移动站)较近(一般100 km以内)的基准接收机(固定站, 且位置已知)^[13], 通过推算用户接收机的伪距改正数对其伪距进行补偿^[14]。

根据式(1), k 时刻基准接收机输出的伪距和移动接收机输出的伪距可分别表示为

$$\rho_{ik}^* = r_{ik}^* + d_k^* + M_{ik}^* \quad (3)$$

$$\rho_{ik}' = r_{ik}' + d_k' + M_{ik}' \quad (4)$$

式中: r_{ik}^* 与 r_{ik}' 分别为基准接收机和移动接收机距离第 i 颗卫星的真实距离; d_k^* 和 d_k' 分别为两台接收机的公共性误差; M_{ik}^* 和 M_{ik}' 分别为两台接收机的自有性误差。

因为基准接收机的位置已知, 且基准接收机接收的卫星星历信息中包含卫星的位置, 所以可计算得到 r_{ik}^* , 进而可得基准接收机的伪距改正数为

$$\Delta\rho_{ik}^* = r_{ik}^* - \rho_{ik}^* = -(d_k^* + M_{ik}^*) \quad (5)$$

因为两台接收机所处环境相似, 二者距离相对卫星来说可近似为一点, 可认为基准接收机的伪距改正数与移动接收机的伪距改正数相近, 所以可采用基准接收机的伪距改正数对移动接收机的伪距误差进行补偿。根据式(4)和式(5), 采用基准接收机的伪距改正数 $\Delta\rho_{ik}^*$ 对移动接收机的伪距 ρ_{ik}' 进行修正, 即

$$\rho_{ik}' + \Delta\rho_{ik}^* = r_{ik}' + (d_k' - d_k^*) + (M_{ik}' - M_{ik}^*) \quad (6)$$

当基准接收机和移动接收机相距较近时, 二者的伪距自有性误差 $M_{ik}' \approx M_{ik}^*$, 因此式(6)可进一步写为

$$\rho_{ik}' + \Delta\rho_{ik}^* = r_{ik}' + \gamma_k \quad (7)$$

式中: $\gamma_k = d_k' - d_k^*$, 即 γ_k 由基准接收机和用户接收机的误差决定。

由式(7)可知, 采用伪距改正数补偿用户接收机伪距误差可消除由导航卫星及其信号传播引起的伪距自有性误差, 但补偿后的伪距中仍包含公共性误差——接收机误差。因此, 为了进一步提高定位精度, 仍需对伪距公共性误差进行补偿。

3 基于自适应CKF的伪距公共性误差补偿

3.1 移动接收机运动系统模型

将移动接收机的位置 (x_k, y_k, z_k) 、公共性误差 d_k 和公共性误差变化率 Δd_k 作为系统状态量, 即 $\mathbf{X}_k = [x_k, y_k, z_k, d_k, \Delta d_k]^T$, 则移动接收机运动系统的状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_{k-1} \quad (8)$$

式中:状态转移矩阵 $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, T 为采样间隔; W_{k-1} 为系统噪声矩阵,其协方差矩阵为

$Q_k = E\{W_k W_k^T\}$,且 $E\{W_k\} = 0$ 。

将经过自有性误差补偿后的移动接收机伪距信息作为系统的量测矢量,即 $Z_k = [\rho_{1k}, \rho_{2k}, \rho_{3k}, \rho_{4k}]^T$,系统的量测方程为

$$Z_k = \sqrt{(x_{ik} - x_k)^2 + (y_{ik} - y_k)^2 + (z_{ik} - z_k)^2} + d_k \quad (9)$$

式中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。

考虑到式(9)的非线性特点,可将其简写为

$$Z_k = h(X_k) + V_k \quad (10)$$

式中: V_k 为量测噪声,其协方差矩阵为 $R_k = E\{V_k V_k^T\}$,且 $E\{V_k\} = 0$ 。

3.2 自适应CKF算法设计

卫星导航接收机伪距信息中包含的公共性误差属于随机误差,在移动接收机运动系统中体现为系统的量测噪声。量测噪声的未知时变特性将导致卡尔曼滤波精度急剧下降。为了解决此类问题,不同的自适应滤波算法被提出^[15-16]。针对广泛应用的 Sage-Husa 噪声估计方法易出现噪声矩阵非正定的问题,文献[17]结合残差序列和极大似然估计提出了一种带有滑动窗口的量测噪声估计方法(埃米尔特量测噪声估计方法),其基本思想是根据量测值和量测估计值之间的残差,通过滑动窗口构造时变残差协方差矩阵,实时估计量测噪声。

考虑载体运动过程中量测信息异常情况并非时刻发生,为了避免因对量测噪声的无效修正而增加算法运算量,甚至修正过量,本文将卡方检验和埃米尔特量测噪声估计方法引入到CKF中,得到基于卡方检验和埃米尔特量测噪声估计方法的自适应CKF算法,对移动接收机运动系统中的状态量进行滤波估计。该方法仅在出现量测异常的情况下对噪声估计进行修正,分为CKF状态估计、异常检验和埃米尔特量测噪声实时估计3个阶段。

阶段一 CKF状态估计

(1)根据三阶球面-径向容积准则,计算CKF的采样点 ξ_j 和权值 ω_j ,表达式为

$$\begin{cases} \xi_j = \sqrt{n} [1]_{2n} \\ \omega_j = 1/2n \end{cases} \quad (11)$$

式中: n 为系统状态的维数, $j = 1, 2, \dots, 2n$, $[1]_{2n}$ 为 $2n$ 维单位球面与各坐标轴的交点,其表达式为

$$[1]_{2n} = \left\{ \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}}_n, \underbrace{\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix}}_n \right\} \quad (12)$$

则采样点集可进一步表示成

$$\xi = [\sqrt{n} [1]_n \quad -\sqrt{n} [1]_n] \quad (13)$$

(2)计算基于状态估计的采样点,表达式为

$$P_{k-1}^+ = S_{k-1}^+ (S_{k-1}^+)^T \quad (14)$$

$$\chi_j^+ = S_{k-1}^+ \xi_j + \hat{x}_{k-1} \quad (15)$$

(3) 状态预测, 表达式为

$$\bar{x}_k = \sum_{j=1}^L \omega_j f(\chi_j^+) \quad (16)$$

式中 $L = 2n$ 。

(4) 计算状态预测误差的协方差矩阵, 表达式为

$$P_k^- = \sum_{j=1}^L \omega_j (f(\chi_j^+) - \bar{x}_k) (f(\chi_j^+) - \bar{x}_k)^T + Q_k \quad (17)$$

(5) 计算基于状态预测的采样点, 表达式为

$$P_k^- = S_k^- (S_k^-)^T \quad (18)$$

$$\chi_j^- = S_k^- \xi_j + \bar{x}_k \quad (19)$$

(6) 量测预测, 表达式为

$$\bar{z}_k = \sum_{j=1}^L h(\chi_j^-) \omega_j \quad (20)$$

(7) 计算新息的协方差矩阵, 表达式为

$$P_k^{zz} = \sum_{j=1}^L (h(\chi_j^-) - \bar{z}_k) (h(\chi_j^-) - \bar{z}_k)^T \omega_j + R_k \quad (21)$$

(8) 计算状态向量与量测向量之间的互协方差矩阵, 表达式为

$$P_k^{xz} = \sum_{j=1}^L (\chi_j^- - \bar{x}_k) (h(\chi_j^-) - \bar{z}_k)^T \omega_j \quad (22)$$

(9) 计算卡尔曼滤波增益, 表达式为

$$K_k = P_k^{xz} (P_k^{zz})^{-1} \quad (23)$$

(10) 状态估计, 表达式为

$$\hat{x}_k = \bar{x}_k + K_k (z_k - \bar{z}_k) \quad (24)$$

(11) 更新协方差矩阵, 表达式为

$$P_k^+ = P_k^- - K_k P_k^{zz} K_k^T \quad (25)$$

阶段二 量测异常检验

(12) 构造量测残差序列, 表达式为

$$\epsilon_k = z_k - \bar{z}_k \quad (26)$$

(13) 构造检测函数。当量测噪声无异常时, ϵ_k 是均值为零的高斯白噪声, 其方差为 P_k^{zz} 。当量测噪声异常时, ϵ_k 会产生偏差, 其均值就不再为零。因此, 可将 ϵ_k 的均值是否为零作为判断依据, 构造检测函数, 表达式为

$$U_k = \epsilon_k^T (P_k^{zz})^{-1} \epsilon_k \quad (27)$$

式中: U_k 服从自由度 n 的卡方分布, n 为量测向量维数。

(14) 构造量测噪声异常判断准则, 表达式为

$$\begin{cases} U_k > M_D \Rightarrow \text{量测噪声异常} \\ U_k \leq M_D \Rightarrow \text{量测噪声正常} \end{cases} \quad (28)$$

式中: M_D 为预先设置的故障门限值,其取值可对应某个误警率 p_f 。由卡方分布表可得到 M_D 和 p_f 的对应关系,误警率 p_f 越小,其故障诊断能力越高。

(15)当式(28)判断量测噪声异常时,启动阶段三的埃米尔特量测噪声估计方法,否则量测噪声不变,即

$$\hat{R}_k = R_k \quad (29)$$

阶段三 埃米尔特噪声实时估计

(16)根据式(25)的状态估计结果计算新的采样点,表达式为

$$\hat{\chi}_j^+ = \hat{S}_k^+ \lambda_j + \hat{x}_k \quad (30)$$

(17)基于新的采样点预测量测值,表达式为

$$\hat{z}_k = \sum_{j=1}^L h(\hat{\chi}_j^+) \omega_j \quad (31)$$

式中 $L = 2n$ 。

(18)基于量测预测值计算新息协方差矩阵,表达式为

$$\hat{P}_k^{\hat{z}} = \sum_{j=1}^L (h(\hat{\chi}_j^+) - \hat{z}_k)(h(\hat{\chi}_j^+) - \hat{z}_k)^T \omega_j \quad (32)$$

(19)求取残差序列,表达式为

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{z}_k - \hat{z}_k \quad (33)$$

(20)通过滑动窗口估计残差协方差矩阵,表达式为

$$\hat{C}_{r_k} = \frac{1}{M} \sum_{l=k-M+1}^k \mathbf{r}_l \mathbf{r}_l^T \quad (34)$$

式中: M 为滑动窗口长度,算法迭代初期,因迭代次数小于 M ,滑动窗口长度即为迭代次数,每迭代一步则滑动窗口长度增加1,直到达到 M 为止,本文取 $M = 25^{[15]}$ 。

(21)估计量测噪声,表达式为

$$\hat{R}_k = \hat{C}_{r_k} + \hat{P}_k^{\hat{z}} \quad (35)$$

4 实验及结果

本文采用和芯星通公司的UB482北斗卫星导航接收机作为移动站,采用和芯星通公司的UB280北斗卫星导航接收机作为固定站,二者均支持B1、B2两个频点,实验中接收到的信号为B1频点,采用荷兰Xsens公司的MTi-710组合导航模块输出信息作为参考,实验系统如图2所示。通过串口将接收机和参考模块输出的数据传输至上位机,由MTi-710的上位机软件MT Manager和串口通讯软件XCOM2.0采集和记录数据,在MATLAB中进行伪距误差补偿算法实验。系统参数取为: $\mathbf{Q}_0 = \text{diag}[0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01]$ 、 $\mathbf{R}_0 = \text{diag}[0.016 \ 0.016 \ 0.016 \ 0.016]$ 、 $\mathbf{P}_0 = \text{diag}[0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01]$ 。因北斗卫星导航接收机提供的伪距信息和卫星位置相关信息为地心地固(Earth-centered earth-fixed, ECEF)坐标系下的位置数据,所以

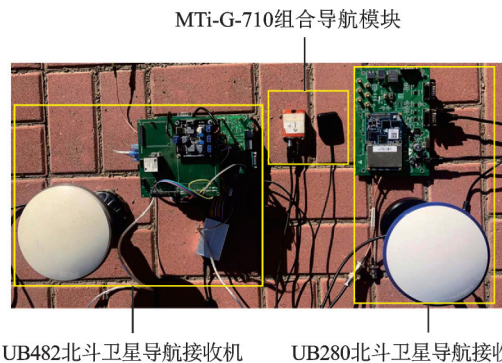


图2 双级北斗卫星导航接收机伪距误差补偿方法实验系统
Fig.2 Experimental system of pseudorange error compensation method for BeiDou satellite navigation receiver

本文中的位置解算算法均采用ECEF坐标系,而MTi-710位置参考模块的输出为东北天坐标系下的数据,因此需要先将其转换至ECEF坐标系,再用转换后数据计算各位置解算算法的定位误差。

本文在MATLAB中编写的双级伪距误差补偿程序流程如图3所示。因为伪距自有性误差是根据固定站提供的伪距改正数进行补偿,而100 km内固定站的伪距改正数接近常数^[13],所以可离线得到伪距改正数,将伪距自有性误差视为固定误差进行补偿。因此,移动站与固定站之间无需实时的信息交互,双级伪距误差补偿算法的运算量主要由北斗卫星星历解析和自适应CKF算法决定。在图3中,解析一组原始伪距的平均时间为0.010 7 s,自适应CKF算法静态和动态条件下迭代一次的平均时间分别为0.000 45 s和0.000 42 s,因此若为实时采集和处理数据,输出数据的刷新频率约达90 Hz,具有较高的实时性。

为了验证本文提出的双级北斗接收机伪距误差补偿方法的有效性,分别采集移动站静止和运动时的数据,进行以下两组实验。

(1) 静态实验

将图2的实验系统静止放置,采集188 s静态数据。针对移动接收机输出的伪距信息,分别采用差分单级补偿(下文简称单级补偿)和图3中的双级补偿对伪距误差进行补偿,之后采用最小二乘法^[18]进行伪距定位解算,得到移动接收机的位置。定位误差如图4所示,位置均方根误差^[19]见表1。由图4和表1可知,移动站静止时,伪距误差经过差分单级补偿后,定位误差减小显著,定位误差与未补偿前相比减小了至少86.14%;因接收机状态为静止,载体状态和所处环境稳定,伪距双级补偿相对单级补偿的定位误差降低较小,仅减小了至少6.15%。

为了验证本文提出的基于卡方检验和埃米尔特量测噪声估计方法的自适应CKF算法在静态时的有效性,采用单级补偿后的伪距作为CKF、基于埃米尔特噪声估计方法的CKF算法和本文算法的量测信息,对伪距进行公共性误差补偿,再采用最小二乘法进行伪距定位解算,得到移动接收机的位置。定位误差如图5所示,位置均方根误差见表2。由图5和表2可知,移动站静止时,3种算法的定位误差相近,综合考虑三轴定位误差,本文算法略优。

(2) 动态实验

将实验系统固定于汽车上,在一双向车道往返行驶一周,共计时长为513 s,汽车启动至稳定行驶时间间隔约为48 s,直线行驶速度保持在26 km/h左右。针对移动接收机输出的伪距信息,分别进行单级补偿和双级补偿,并采用最小二乘法进行伪距定位解算,得到移动接收机的位置。定位误差如图6所示,位置均方根误差见表3。由图6和表3可知,移动站运动时,伪距单级补偿后,定位误差减小显著,位置误差与未补偿前相比减小了至少76.79%;因接收机受车辆振动、行驶环境等影响,引入了较大的伪距公共性误差(噪声),本文所提算法比单级补偿的定位误差减小了至少35.29%,与未补偿前相比减小了至少84.98%。因此,移动站动态情况下,本文所提的双级补偿方法有明显优势。

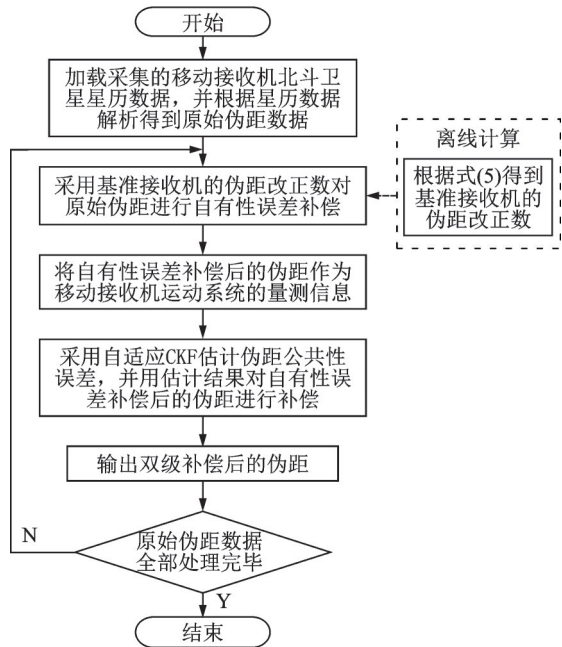


图3 双级北斗卫星导航接收机伪距误差补偿程序流程图

Fig.3 Flow chart of the two-stage pseudorange error compensation program for BeiDou navigation receiver

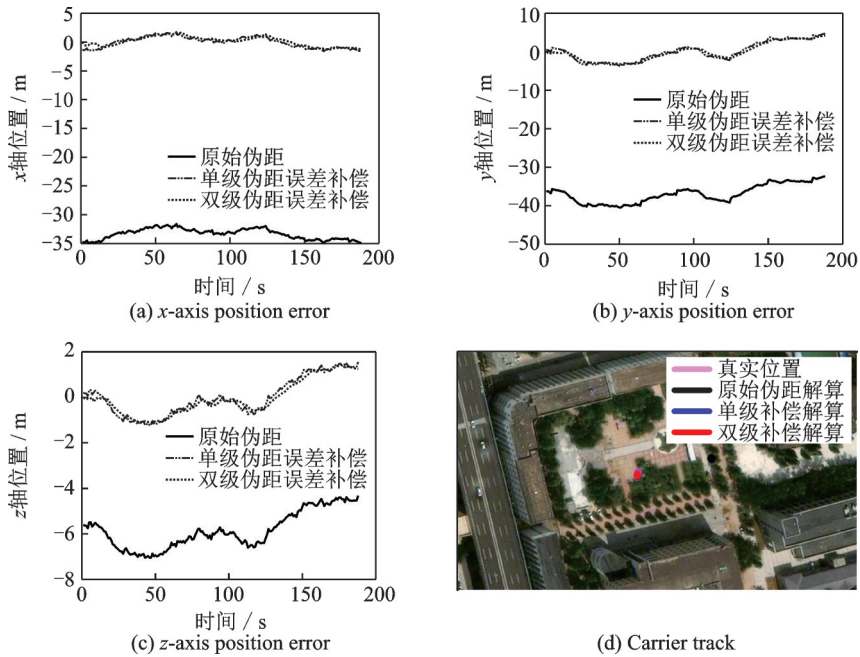


图4 静态情况下伪距误差补偿方法比较

Fig.4 Comparison of pseudorange error compensation methods in static conditions

表1 静态情况下各伪距误差补偿方法的位置均方根误差

Table 1 Position root mean square error of each pseudorange error compensation method in static conditions

补偿方法	x轴均方根误差/m	y轴均方根误差/m	z轴均方根误差/m
原始伪距	33.354 5	37.007 2	5.905 1
单级伪距误差补偿	0.934 5	2.415 8	0.818 6
双级伪距误差补偿	0.829 2	2.267 2	0.767 7

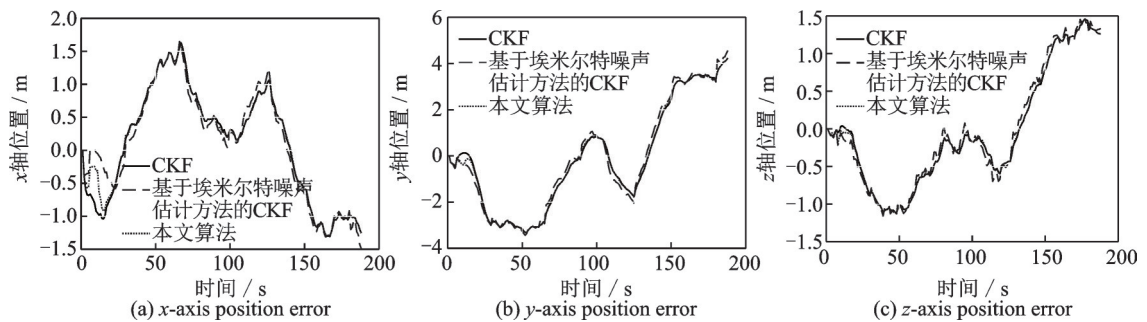


图5 静态情况下不同滤波算法的位置误差

Fig.5 Position error of different filter algorithms in static conditions

表2 静态情况下不同滤波算法的位置均方根误差

Table 2 Position root mean square error of different filter algorithms in static conditions

算法	x轴均方根误差/m	y轴均方根误差/m	z轴均方根误差/m
CKF	0.850 0	2.266 2	0.767 4
基于埃米尔特噪声估计方法的CKF算法	0.823 1	2.322 5	0.788 1
本文算法	0.829 2	2.267 2	0.767 7

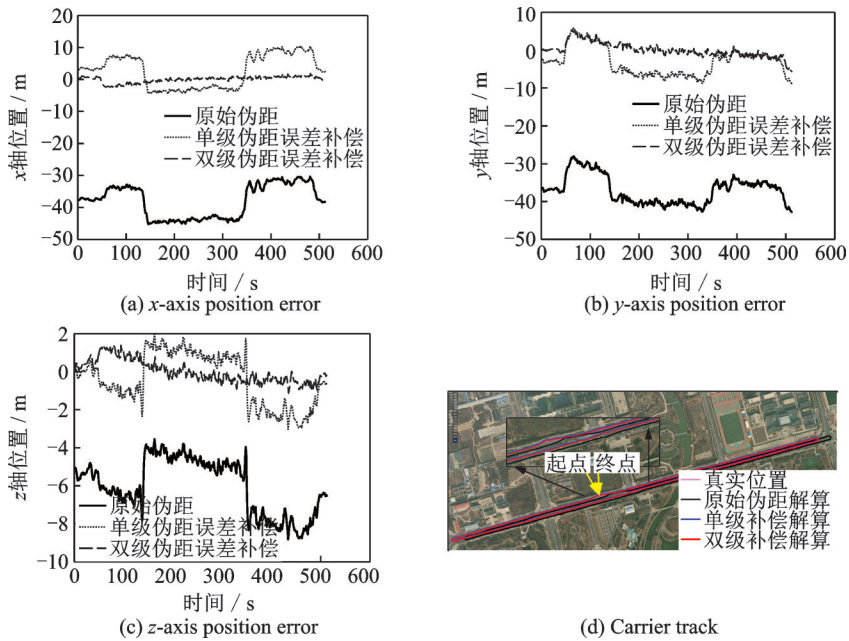


图6 动态情况下伪距误差补偿方法比较

Fig.6 Comparison of pseudorange error compensation methods in dynamic conditions

表3 动态情况下各伪距误差补偿方法的位置均方根误差

Table 3 Position root mean square error of each pseudorange error compensation method in dynamic conditions

补偿方法	x轴均方根误差/m	y轴均方根误差/m	z轴均方根误差/m
原始伪距	38.357 6	37.167 6	6.196 8
单级伪距误差补偿	5.817 0	4.825 1	1.438 2
双级伪距误差补偿	0.930 7	1.860 4	0.930 7

为了验证本文提出的基于卡方检验和埃米尔特量测噪声估计方法的自适应CKF算法在动态情况下的有效性,采用单级误差补偿后的伪距作为CKF、基于埃米尔特噪声估计方法的CKF算法和本文算法的量测信息,并采用最小二乘法进行伪距定位解算,得到移动接收机的位置。定位误差如图7所示,位置RMSE见表4。由图7和表4可知,当车辆由静止变为运动时,埃米尔特噪声估计方法存在对噪声统计特性修正过量的问题,且因 x 轴、 y 轴、 z 轴的噪声水平不同,三轴噪声统计特性修正过量的程度也不相同;与CKF和基于埃米尔特量测噪声估计方法的CKF相比,本文算法的定位误差至少分别降低了60.41%和20.89%,说明当接收机运动状态变化(汽车启动至稳定行驶)时,本文算法具有更好的噪声或干扰适应性。

进一步对比上述3种滤波算法的运行时间,见表5。由表5可知,因本文算法和基于埃米尔特噪声估计的CKF算法均含有噪声估计环节,运行时间比CKF算法均有所增加,但因本文算法加入了卡方检验,仅在量测出现异常时采用埃米尔特噪声估计方法修正量测噪声,所以本文算法的运行时间比基于埃米尔特噪声估计的CKF的运行时间降低了13.64%。因此,本文算法在定位精度和实时性方面的综合性能更优。

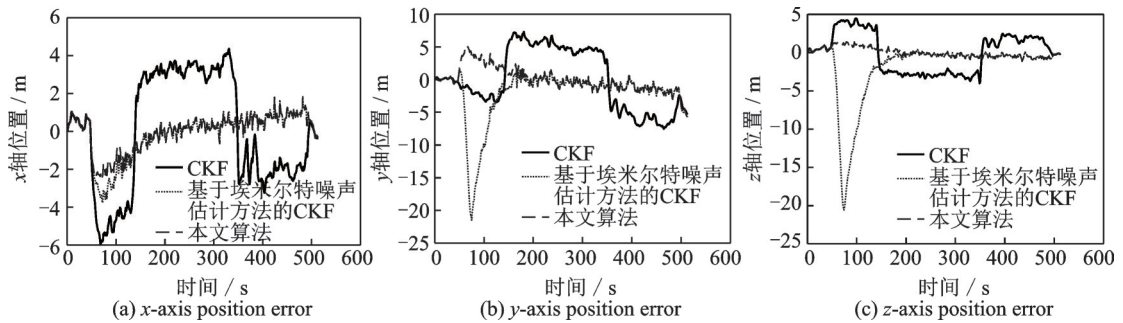


图7 动态情况下不同滤波算法的位置误差

Fig.7 Position error of different filter algorithms in dynamic conditions

表4 动态情况下不同滤波算法的位置均方根误差

Table 4 Position root mean square error of different filter algorithms in dynamic conditions

算法	x轴均方根误差/m	y轴均方根误差/m	z轴均方根误差/m
CKF	3.010 0	4.699 7	2.573 9
基于埃米尔特噪声估计方法的CKF算法	1.176 6	4.612 7	4.508 4
本文算法	0.930 7	1.860 4	0.584 8

表5 动态情况下不同滤波算法的平均运行时间

Table 5 Average running time of different filter algorithms in dynamic conditions

算法	平均运行时间/s
CKF	0.000 26
基于埃米尔特噪声估计方法的CKF算法	0.000 44
本文算法	0.000 38

5 结束语

针对伪距误差影响北斗卫星导航接收机定位精度的问题,本文提出了一种基于差分定位和自适应CKF的双级北斗接收机伪距误差补偿方法。该方法将伪距误差分为自有性误差和公共性误差两类,增设一台北斗卫星接收机作为基准站,通过伪距差分方法和自适应CKF算法先后分别对用户接收机输出伪距中的自有性误差和公共性误差进行补偿。实验结果表明,与单级补偿相比,本文提出的伪距误差补偿方法能够更加有效地补偿伪距误差,提出的基于卡方检验和埃米尔特噪声估计方法的CKF具有更好的降噪性能和适应能力。另外,本文所提的伪距误差补偿方法可进一步用于卫星/惯性紧组合、室内定位等涉及距离解算的场合。本文的研究结果对于扩大北斗卫星导航接收机低成本产品的应用范围、推动北斗卫星导航系统的应用具有重要意义。

参考文献:

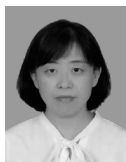
[1] MIAO Zhibin, ZHANG Hongtian, ZHANG Jinzhu. A robust method of vehicle stability accurate measurement using GPS and INS[J]. Measurement Science Review, 2016, 15(6): 294-303.

[2] 徐宁辉,陆杰,梁月吉.单系统伪距单点定位在不同地区的精度分析[J].全球定位系统,2019,44(5): 77-84.
XU Ninghui, LU Jie, LIANG Yueji. Accuracy analysis of single-system pseudo-range single-point positioning in different regions[J]. Global Positioning System, 2019, 44(5): 77-84.

[3] 王趁香,葛茂荣,祝会忠,等.GPS、BDS与GPS/BDS伪距单点定位与差分定位精度分析[J].导航定位学报,2017,5(3):84-89.
WANG Chenxiang, GE Maorong, ZHU Huizhong, et al. Accuracy analysis of GPS, BDS and GPS/BDS pseudorange single

- point positioning and differential positioning [J]. *Journal of navigation and positioning*, 2017, 5(3): 84-89.
- [4] RABBOU M A, EL-RABBANY A. Tightly coupled integration of GPS precise point positioning and MEMS-based inertial systems[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 601-609.
- [5] 李德辉, 黄继勋, 吉云飞, 等. 北斗接收机伪距与伪距率的计算及其误差补偿[J]. *导航与控制*, 2013, 12(1): 7-12.
LI Dehui, HUANG Jixun, JI Yunfei, et al. Calculation and error compensation of BeiDou receiver pseudorange and pseudorange rate[J]. *Navigation and Control*, 2013, 12(1): 7-12.
- [6] 耿剑, 张玲华. 一种基于修正卡尔曼滤波的蜂窝定位算法[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(2): 201-206.
GENG Jian, ZHANG Linghua. Cellular location method based on modified Kalman filter[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(2): 201-206.
- [7] ZHANG Mengde, DAI Haifa, HU Baiqing, et al. Robust adaptive UKF based on SVR for inertial based integrated navigation [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(4): 846-855.
- [8] ZHANG An, BAO Shuida, GAO Fei, et al. A novel strong tracking cubature Kalman filter and its application in maneuvering target tracking[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(11): 2489-2502.
- [9] 吴海金, 刘心龙, 李建龙, 等. GNSS多系统伪距差分定位算法及结果分析[J]. *测绘地理信息*, 2019, 44(4): 59-64.
WU Haijin, LIU Xinlong, LI Jianlong, et al. GNSS multi-system pseudo-distance differential positioning algorithm and result analysis [J]. *Surveying and Mapping Geographic Information*, 2019, 44(4): 59-64.
- [10] 胡浩, 彭正梁. 卫星导航接收机误差分析[J]. *中国设备工程*, 2020(10): 145-147.
HU Hao, PENG Zhengliang. Error analysis of satellite navigation receiver[J]. *China Equipment Engineering*, 2020(10): 145-147.
- [11] 李晓明, 赵长胜, 谭兴龙. 改进的容积卡尔曼滤波的组合导航定位算法[J]. *测绘科学*, 2020, 45(9): 25-30, 36.
LI Xiaoming, ZHAO Changsheng, TAN Xinglong. Integrated navigation positioning algorithm based on improved cubature Kalman filter[J]. *Science and Surveying and Mapping*, 2020, 45(9): 25-30, 36.
- [12] CHOI M, AHN J, SUNG S, et al. Performance improvement of satellite navigation system using inter-satellite distance information[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2018, 19(2): 470-477.
- [13] 姜志奇, 陈波波, 王习东, 等. 一种多参考站的GPS伪距差分定位方法[J]. *测绘科学技术学报*, 2019, 36(2): 133-138.
JIANG Zhiqi, CHEN Bobo, WANG Xidong, et al. A GPS pseudo-range differential positioning method with multiple reference stations[J]. *Journal of Surveying and Mapping Science and Technology*, 2019, 36(2): 133-138.
- [14] 徐伟男. 微惯性/GPS组合导航系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
XU Weinan. Research on micro-inertial/GPS integrated navigation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 李宁, 祝瑞辉, 张勇刚. 基于Sage-Husa算法的自适应平方根CKF目标跟踪方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(10): 1899-1905.
LI Ning, ZHU Ruihui, ZHANG Yonggang. Adaptive square root CKF target tracking method based on Sage-Husa algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(10): 1899-1905.
- [16] 张抒扬, 董鹏, 敬忠良. 变分贝叶斯自适应容积卡尔曼的SLAM算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(4): 12-18.
ZHANG Shuyang, DONG Peng, JING Zhongliang. SLAM algorithm for variable Bayesian adaptive volume Kalman[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(4): 12-18.
- [17] DEY A, SADHU S, GHOSHAL T K. Adaptive Gauss-Hermite filter for non-linear systems with unknown measurement noise covariance[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2015, 9(8): 1007-1015.
- [18] 孙茂军, 李霞, 赵利江. 基于卡尔曼滤波方法的BDS动态伪距差分定位算法研究[J]. *全球定位系统*, 2019, 44(3): 69-73.
SUN Maojun, LI Xia, ZHAO Lijiang. Research on BDS dynamic pseudorange differential positioning algorithm based on Kalman filtering method [J]. *Global Positioning System*, 2019, 44(3): 69-73.
- [19] 张锡越, 赵春梅, 王权, 等. 多系统融合单频精密单点定位[J]. *测绘科学*, 2018, 43(3): 29-34.
ZHANG Xiyue, ZHAO Chunmei, WANG Quan, et al. Multi-system fusion single frequency precision single point positioning [J]. *Science of surveying and Mapping*, 2018, 43(3): 29-34.

作者简介:



张丽杰(1973-), 通信作者, 女, 博士, 教授, 研究方向: 导航、检测技术与自动控制, E-mail: zhanglijie@imut.edu.cn.



钱镛源(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 导航与控制。