

DOI: 10. 13382/j. jemi. B1902880

改进的自适应卡尔曼滤波在北斗伪距单点定位中的研究^{*}

刘 春 卫吉祥 李维华 汪志宁 刘 滔
(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘 要:针对加权最小二乘法定位精度不高,卡尔曼滤波对初始位置敏感以及噪声协方差固定不变的缺点,提出了一种将加权最小二乘法和改进的卡尔曼滤波相结合的伪距单点定位解算方法。该方法首先利用加权最小二乘法解算出接收机初始位置,然后将该位置作为改进的自适应卡尔曼滤波的初始值,再建立动力学模型来进行滤波。实验结果表明基于移动窗口协方差估计的自适应卡尔曼滤波相比于传统卡尔曼滤波,能将单点定位精度提高 50%,收敛速度也提高了 90%。该算法可以用在对精度要求不高的民用导航和定位中。

关键词: 伪距单点定位;加权最小二乘法;卡尔曼滤波;移动窗口协方差估计;自适应因子

中图分类号: P228. 1;TN911. 72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420. 1010

Research on improved adaptive Kalman filter in Beidou pseudorange single point positioning

Liu Chun Wei Jixiang Li Weihua Wang Zhining Liu Tao
(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to solve the defects as low positioning accuracy of weighted least squares method, sensitive to initial position and fixed noise covariance of kalman filter, a pseudo-range single-point positioning method combining weighted least squares and improved Kalman filtering is proposed. This method first uses the weighted least squares to calculate the initial receiver position, then uses this position as the initial value of the improved adaptive Kalman filter, and finally establishes a dynamic model for filtering. Experimental results show that compared with traditional Kalman filtering, adaptive Kalman filtering based on moving window covariance estimation can improve the accuracy of single-point positioning by 50% and the convergence speed by 90%. The algorithm can be used in civil navigation and positioning with little high accuracy requirements.

Keywords: pseudo-range single-point positioning; weighted least squares method; Kalman filtering; moving window covariance estimation; adaptive factor

0 引 言

北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)在国防建设、森林防火、抗震救灾、海洋渔业、交通、水利等行业发挥了重要作用^[1]。其应用的显著特点是集定位、授时、短报文通信及用户监测于一体^[2]。就定位而言,北斗卫星伪距定位^[3]的技术主要有伪距单点定位^[4]和伪距差分定位^[5],伪距差分定位因有信息辅助,其定位精度可达亚米级,但差分定位的缺点在于需要许多基站,且基

站与接收机间要保持高度的同一性,故而对定位环境有较高的要求。而伪距单点定位设备简单,对环境要求低和流动性强,在实际环境中具有较强的实用性。截止到目前,北斗系统 B1 单频伪距单点定位水平精度高于 6 m,高程精度高于 10 m,三点定位精度高于 12 m^[6-7]。

伪距单点定位由于设备简单,在特定的环境下定位效果不够理想。为了提高单点定位的精度,国内外许多学者不断提出新的算法,目前主流的算法有牛顿迭代法、最小二乘法(least square, LS)、卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)和粒子滤波等。



相对于伪距差分定位,单点定位主要应用于对精度要求一般的民用导航和定位中。文献[8]采用最小二乘法定位,将误差方程泰勒展开后利用最小二乘迭代求解数据增量,但是该算法没有将不同时刻的定位结果联系起来相互制约,并且忽略了卫星的仰角对定位结果的影响,故而定位结果粗糙且误差较大。文献[9]采用卡尔曼滤波进行定位,直接将位置与钟差信息作为状态变量求解,该方法对定位的初始位置比较敏感,且状态噪声和量测噪声都是固定不变的,导致了定位精度不高。文献[10]将加权最小二乘法(weighted least squares, WLS)与卡尔曼滤波结合起来,该算法先用加权最小二乘法将非线性系统线性化,再用卡尔曼滤波进行预测。相对于文献[9]提升了线性化的精度,但整体定位精度仍需要提高。本文主要介绍了一种基于移动窗口协方差估计的自适应卡尔曼滤波方法来进行伪距单点定位,首先通过加权最小二乘法来解算出接收机的位置,然后将解算出的位置作为卡尔曼滤波的初始状态位置,再结合自适应移动加窗算法进行定位解算,从而提高定位精度,缩短收敛时间。

1 伪距单点定位原理

伪距^[11]是指在卫星定位中,测距码受卫星钟差与接收机钟差之间同步误差的影响,导致了接收机接收的信号延迟,从而得到了叠加了许多误差的卫星和接收机之间距离测量值。伪距单点定位是指通过卫星时钟与某一卫星接收机之间的伪距测量值来确定接收机接收信号的天线在地球坐标系^[12](earth-fixed coordinate system, ECEF)中的坐标值。

伪距单点定位中卫星 j 在 i 时刻的观测方程如下:

$$\rho_j = r_j + ct_r - ct_{sj} + ct_{ionj} + ct_{ioj} + ct_{mpj} \quad (1)$$

式中: $r_j = \sqrt{(x_{sj} - x)^2 + (y_{sj} - y)^2 + (z_{sj} - z)^2}$ 为接收机和卫星间的真实几何距离, (x_{sj}, y_{sj}, z_{sj}) 为卫星 j 在 ECEF 中的坐标, (x, y, z) 为接收机在 ECEF 中的坐标; ρ_j 为伪距观测值; c 为光速; $t_r, t_{mpj}, t_{ioj}, t_{ionj}, t_{sj}$ 分别为接收机钟差、多路径效应、对流层效应、电离层效应和卫星钟差。

式(1)中 x_{sj}, y_{sj}, z_{sj} 为已知量,可以通过 RENIX^[13] 文件中的星历参数解算求出卫星位置, x, y, z, t_r 为待求的未知量,要求解接收机的 4 个未知参数,则至少需要 4 颗卫星坐标来进行求解。 $t_{mpj}, t_{ioj}, t_{ionj}, t_{sj}$ 可以通过导航电文参数和模型校正等^[14-15] 措施来进行修正,然后将校正的结果作为已知量移到式(1)的左边,从而得到修正后的伪距观测方程:

$$\rho'_j = \sqrt{(x_{sj} - x)^2 + (y_{sj} - y)^2 + (z_{sj} - z)^2} + ct_r \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

2 WLS 和改进 Kalman 滤波

本文利用 WLS 对初始位置不敏感且收敛速度快和 Kalman 滤波结果平滑的特点,将 WLS 的定位结果作为 Kalman 滤波的初始值,然后再利用自适应移动窗口法得出最终的解算结果。

2.1 WLS 解算

最小二乘法是一种使误差的平方和达到最小的线性化优化方法,它通过循环迭代进行矩阵运算来求解状态增量,从而得到优化值。而 WLS^[16] 就是在最小二乘基础上添加一个加权矩阵,解决原模型中存在的异方差问题。WLS 在北斗伪距定位中的具体解算过程如下。

1) 通过 4 个未知量列出 $n(n \geq 4)$ 个非线性方程,其方程形式如式(2)所示,再通过观测文件求解 n 颗卫星的坐标值和初始化接收机坐标值 $(0, 0, 0)$ 。

2) 将式(2)按泰勒级数展开线性化,可得:

$$\rho_j^0 - \rho'_j = \frac{x_{sj} - x_0}{\rho_j^0} \Delta x + \frac{y_{sj} - y_0}{\rho_j^0} \Delta y + \frac{z_{sj} - z_0}{\rho_j^0} \Delta z \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: ρ_j^0 为卫星和接收机之间的近似距离,即 $\rho_j^0 = \sqrt{(x_{sj} - x_0)^2 + (y_{sj} - y_0)^2 + (z_{sj} - z_0)^2}$; (x_0, y_0, z_0) 为接收机在每一次求解时的近似位置坐标,其相应的变化增量为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。

式(3)简化为:

$$\Delta \rho_j = e_x^j \Delta x + e_y^j \Delta y + e_z^j \Delta z - ct_r \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

再将式(4)的方程组写成矩阵形式:

$$P = A \Delta X \quad (5)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} e_x^1 & e_y^1 & e_z^1 & 1 \\ e_x^2 & e_y^2 & e_z^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_x^n & e_y^n & e_z^n & 1 \end{bmatrix}, P =$$

$$[\Delta \rho_1 \quad \Delta \rho_2 \quad \dots \quad \Delta \rho_n]^T, \Delta X = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad -ct_r]^T。$$

3) 构造权系数矩阵 B 。由文献[17]可知,不同的卫星仰角对大气传播延迟和多路径效应的影响不同,故而采用仰角加权技术,其构造如下:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{(\Delta \rho_1 - \Delta \rho)^2} & & & \\ & \frac{1}{(\Delta \rho_2 - \Delta \rho)^2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{(\Delta \rho_n - \Delta \rho)^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$



式中: $\Delta\rho = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta\rho_j}{n}$ 。

4) 利用加权最小二乘法的公式计算出线性方程组的解:

$$\Delta\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (7)$$

5) 更新接收机坐标和接收机钟差。

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ -ct_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ -ct_r \end{bmatrix} + \Delta\mathbf{X} \quad (8)$$

更新位置信息后判断位置是否收敛,若是,则接着返回步骤 1) 进行计算下一个历元的接收机位置解算。

直到历元解算完毕后,将其得到的收敛的接收机坐标和钟差作为 Kalman 滤波的初值来进行时间更新和量测更新。

2.2 KF 解算

KF 算法是一种滤波精度优于 WLS 的线性算法,它的本质是一种最优化自回归数据处理方法^[18]。在利用 KF 进一步解算接收机位置坐标之前,先建立系统的状态方程和量测方程^[19]。

在实际应用中接收机不可能静止不动,因而动力学模型可以选用常速状态模型,即将接收机的三维坐标、速度、钟差和钟差偏移作为状态变量。设第 k 个历元状态变量为: $\mathbf{X}_k = [x_k \ y_k \ z_k \ x'_k \ y'_k \ z'_k \ ct_r \ ct'_r]^T$, 得状态方程:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \quad (9)$$

式中: 状态噪声 $\mathbf{W}_k$ 是服从高斯分布且协方差为 $\mathbf{Q}$ 的白噪声, 状态转移矩阵为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

将伪距和多普勒频率测量值作为观测变量, 即 $\mathbf{Y}_k = [\rho'_j \ e_j]^T$, 得量测方程:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H} \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (10)$$

式中: $\mathbf{V}_k$ 是协方差为 $\mathbf{R}$ 的观测白噪声; ρ'_j 为伪距; ζ_j 为多普勒频率值。由文献 [9] 可知, 观测矩阵为: $\mathbf{H} =$

$$\begin{bmatrix} \zeta_x^j & \zeta_y^j & \zeta_z^j & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \zeta_x^j & \zeta_y^j & \zeta_z^j & 0 & -1 \end{bmatrix}。$$

由上可得 Kalman 滤波的系统方程式 (9) 和 (10), 而

后北斗伪距单点定位的具体解算步骤如下。

1) 初始化状态变量 $\mathbf{X}_0$ 和协方差初值 $\mathbf{P}_0$, 其中状态变量初始值由 WLS 得到。

2) 对系统方程进行状态一步预测和协方差一步预测:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} = \Phi \hat{\mathbf{X}}_{k|k} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \Phi \mathbf{P}_{k|k} \Phi^T + \mathbf{Q} \quad (12)$$

3) 计算增益矩阵, 从而进行状态更新和协方差更新。

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{k+1} = \mathbf{Y}_{k+1} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \boldsymbol{\xi}_{k+1} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}] \mathbf{P}_{k+1|k} \quad (16)$$

4) 判断历元是否解算完毕, 若没有, 则返回步骤 2) 继续解算。

2.3 自适应移动开窗法 KF 解算

2.2 节标准的 KF 解算是在状态和观测噪声已知的前提下进行的, 忽略了实际定位中受周围环境影响而造成噪声统计特性未定的情况。为解决此问题, 采用了基于移动窗口协方差估计^[20]的自适应 Kalman 滤波方法, 利用前几个历元的预测残差来估计噪声的协方差阵, 同时引入收敛因子来防止因残差信息不准确而造成的滤波发散现象。故其协方差的改进如下。

设观测新息向量为:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} - \mathbf{Y}_k \quad (17)$$

从而第 k 个历元的观测协方差阵 $\mathbf{R}$ 的估计为:

$$\mathbf{P}_{V_k} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T \quad (18)$$

$$\mathbf{R} = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \mathbf{V}_{k-j} \mathbf{V}_{k-j}^T - \mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T \quad (19)$$

式中: $\mathbf{P}_{V_k}$ 为新息向量的协方差阵; m 为窗口长度即前 m 个历元的观测新息信息。

设状态残差向量为:

$$\Delta \mathbf{X}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \quad (20)$$

故而得第 k 个历元的状态协方差阵 $\mathbf{Q}$:

$$\mathbf{P}_{\Delta \mathbf{X}_k} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \Delta \mathbf{X}_{k-j} \Delta \mathbf{X}_{k-j}^T \quad (21)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}_{\Delta \mathbf{X}_k} + \mathbf{P}_{k|k} - \Phi \mathbf{P}_{k|k} \Phi^T \quad (22)$$

式中: $\mathbf{P}_{\Delta \mathbf{X}_k}$ 为残差向量的协方差阵; n 为窗口长度, 即前 n 个历元状态残差信息。

为了防止系统中出现异常扰动而造成滤波发散, 引入自适应因子 δ_k :

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \text{其他} \\ \frac{\text{tr}(\mathbf{P}_{V_k} - \mathbf{R}_0)}{\text{tr}(\bar{\mathbf{P}}_{V_k} - \mathbf{R}_0)}, & \text{tr}(\bar{\mathbf{P}}_{V_k}) > \text{tr}(\mathbf{P}_{V_k}) \end{cases} \quad (23)$$

式中： $\bar{P}_{V_k} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \bar{V}_{k-i} \bar{V}_{k-i}^T$ 为预测残差协方差阵， N 为 k 历元前所有的预测残差向量的个数，当模型没有异常时，自适应因子取 1。

将式(23)代入到式(18)中，即可得自适应因子调节后的新息协方差阵：

$$P_{V_k} = R_0 + \frac{1}{\partial_k} H P_{k|k-1} H^T$$

(24)

将式(19)、(22)代入式(12)、(13)中，再结合式(24)即可得自适应移动窗口 Kalman 滤波。因而基于移动窗口协方差估计的自适应 Kalman 滤波解算过程描述如下：1)通过卫星的 RINEX 文件确定卫星的位置坐标和消除电离层等其他误差，列出伪距方程组；2)利用加权最小二乘法对接收机初始位置进行解算，直至其收敛为止，否则返回步骤 2)继续解算；3)将加权最小二乘法解算的位置和钟差信息，作为 Kalman 的状态初始值，然后初始化协方差阵；4)建立 Kalman 滤波系统方程组，对状态向量和观测向量协方差阵进行自适应移动加窗估计，然后进行预测和更新过程；5)判断历元是否解算完毕，否则返回步骤 4)继续解算。其算法流程如图 1 所示。

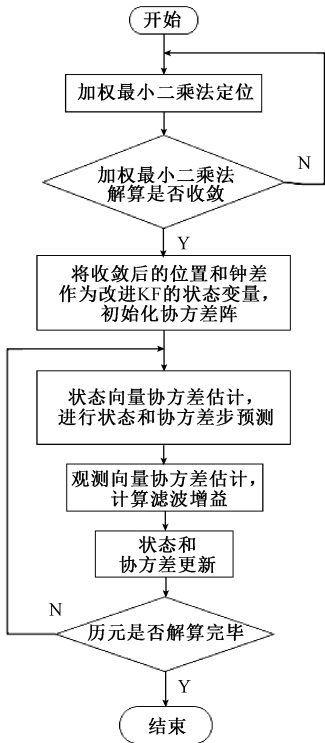


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

3 实验仿真与分析

为验证伪距单点定位的效果，本文采用 MATLAB 软

件对来自于北斗司南网的 RINEX 文件数据进行解算。在观测文件为 2 880 个历元数据的情况下，分别采用 WLS、KF、WLS+KF 以及 WLS 结合改进的自适应 Kalman (WLS+AKF) 4 种方法对 X、Y、Z 3 个方向进行解算，然后再将定位结果进行对比分析。表 1 中为实验初始数据。

表 1 实验初始值设置
Table 1 Experimental initial value setting

参数	初始值
历元次数	2 880
采用周期 T/ms	30
矩阵 R	单位阵
矩阵 Q	单位阵
窗口 $m/\text{次}$	5
窗口 $n/\text{次}$	50

利用表 1 的初始数据分别用 4 种方法对接收机位置解算，可以得到接收机 X、Y、Z 3 个方向的误差和空间定位的散点图，然后分析不同算法解算下对定位精度的影响。

首先利用加权最小二乘法对接收机位置进行解算，解算结果如图 2 所示，X、Y、Z 方向的定位平均误差分别为 -8.93、13.01 和 9.92 m，由于受系统误差影响，3 个方向均产生了系统偏差，从而导致定位误差较大。

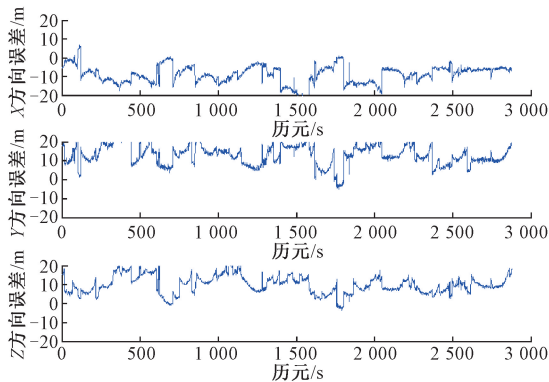


图 2 WLS 解算结果
Fig. 2 WLS solution results

图 3 所示为直接利用接收机初始位置为 (0,0,0) 的 Kalman 滤波进行解算，由于 Kalman 滤波对初始位置敏感，所以在解算到 400 个历元处才开始收敛。图 3 中 X、Y、Z 3 个方向在 400 历元后定位平均误差为 2.52、2.46 和 2.55 m，比较图 2 很明显可以看出，该算法定位精度提高了许多，但是收敛过程仍较慢，需要进一步改进，提高收敛速度和减小定位误差。

针对图 2 和 3 出现的加权最小二乘法定位精度不高和 Kalman 滤波对接收机初始位置较为敏感的缺点，采用了将这两种算法结合起来的方法。先使用加权最小二乘

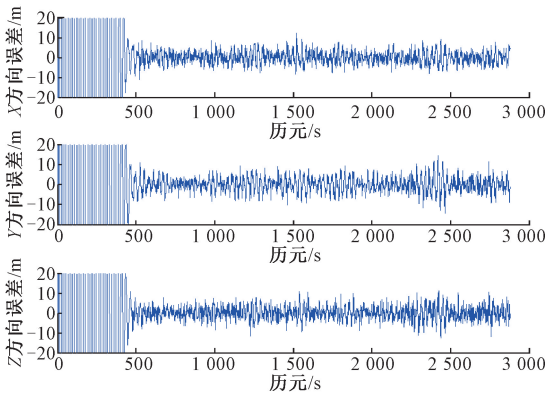


图 3 KF 解算结果
Fig. 3 KF solution results

法确定接收机的初始位置,本文的初始位置是取第 20 个历元的坐标值作为接收机位置的初始值,然后再利用 Kalman 滤波对其进行定位解算,解算结果如图 4 所示。该方法由于初始值设置得当,收敛过程很短,并且 3 个方向的平均误差分别为 2.48、2.40 和 2.47 m,精度相对于图 2 和收敛速度相对于图 3 均有了明显提高,且没有系统偏差,收敛历元在 20 次以内。

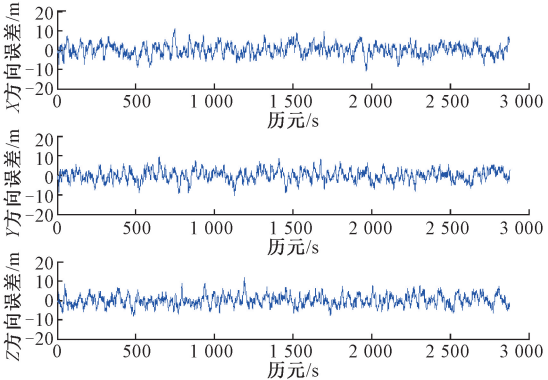


图 4 WLS+KF 解算结果
Fig. 4 WLS+KF solution results

为了解决实际定位中受周围环境和系统误差的影响导致误差模型发生变化或模型不准确的情况,因此引入自适应移动窗口来解决模型不准确的问题。该方法通过前 5 个历元的观测新息信息和前 50 个历元的状态残差信息来估计后面的观测和状态协方差值,从而实时更新误差统计量,其解算结果如图 5 所示。图 5 中 X、Y、Z 3 个方向的平均误差为 1.20、1.10 和 1.27 m,明显可以看出滤波结果更平滑,并且由于前 50 个历元误差统计量未估计,故而开始时误差存在一定偏差。图 5 的解算结果相较于图 4 定位精度提高了约 50%,相较于图 3 收敛过程也明显缩短,故而实现了更加精确的定位。

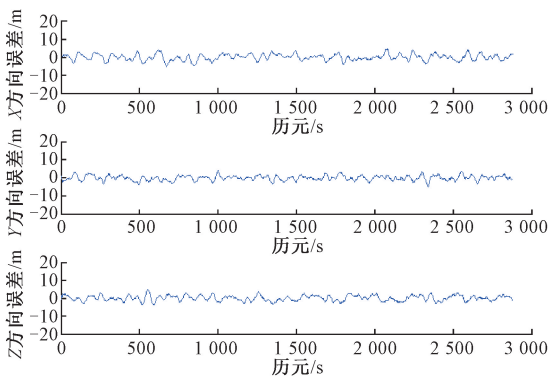


图 5 WLS+AKF 解算结果
Fig. 5 WLS+AKF solution results

表 2 实验方案对比				
Table 2 Comparison of experimental schemes				
实验方案	X 平均 误差/m	Y 平均误 差/m	Z 平均误 差/m	收敛历 元/次
WLS	-8.93	13.01	9.92	20
KF(>400 历元)	2.52	2.46	2.55	~400
WLS+KF	2.48	2.40	2.47	20
WLS+AKF	1.20	1.10	1.27	20

表 2 为 4 种方案的结果对比,从表 2 可以看出,本文提出方法的平均误差较前 3 种方法有了明显的减小,定位精度较 WLS+KF 方法提高了 50%,收敛速度也由 KF 方法的 400 历元减少到了 20 历元。总体而言,WLS+AKF 方法的定位效果最好。现在将解算坐标值放在空间坐标系中观察,比较总体定位误差。

如图 6 所示,WLS 算法定位精度最低,KF 算法有一个收敛过程,WLS+AKF 算法图定位精度最高,从而可以证明加权最小二乘法和自适应移动加窗法结合可以明显提高定位精度。

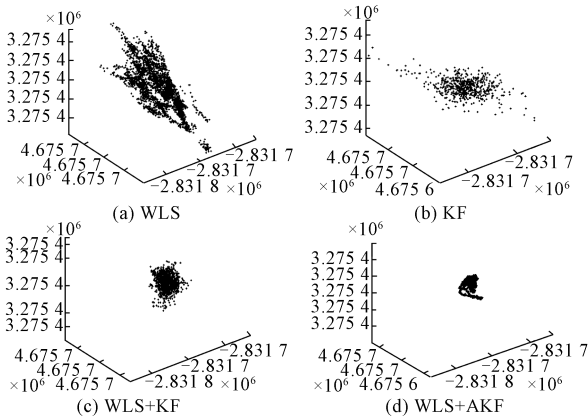


图 6 空间定位
Fig. 6 Space positioning



4 结 论

本文主要对北斗伪距单点定位算法进行了研究,提出了将加权最小二乘法和基于移动窗口协方差估计的自适应卡尔曼滤波相结合的算法。该算法将加权最小二乘法的定位结果作为卡尔曼滤波的初始值,再利用改进的卡尔曼进行定位解算,解决了单独使用加权最小二乘法定位误差大和使用卡尔曼滤波收敛过程慢的问题,并且通过 MATLAB 处理数据的实验结果也表明该算法的收敛速度与定位精度均有了明显的提高,不过值得注意的是窗口数值的选择决定了定位结果的优劣。最后,从空间定位结果可以看出该算法在民用导航和定位中具有很强的适用性。

参考文献

- [1] 强明辉,李志龙.北斗卫星导航系统定位精度分析[J].舰船电子工程,2019,39(2):38-40,46.
QIANG M H, LI ZH L. Analysis of positioning accuracy of Beidou satellite navigation system[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39 (2): 38-40,46.
- [2] 杨元喜.北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J].测绘学报,2010,39(1):1-6.
YANG Y X. Progress, contribution and challenge of Beidou satellite navigation system [J]. Journal of Surveying and Mapping,2010,39 (1):1-6.
- [3] 杨国玉.EKF 滤波组合模型建立及在北斗伪距定位中的应用[D].成都:成都理工大学,2018.
YANG G Y. Establishment of EKF filter combination model and its application in Beidou pseudo-range positioning [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [4] 钟义,李世宝,赵金忠,等.北斗单点伪距定位精度分析[J].西部资源,2013(1):160-161.
ZHONG Y, LI SH B, ZHAO J ZH, et al. Analysis of Beidou single-point pseudo-range positioning accuracy [J]. West China Resources, 2013 (1): 160-161.
- [5] 余梦洋,秘金钟,方书山,等.BDS 卡尔曼滤波网格伪距差分[J].科技创新与应用,2018(26):156-157.
YU M Y, MI J ZH, FANG SH SH, et al. BDS Kalman filter grid pseudo-distance difference [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2018 (26): 156-157.
- [6] 孙不群,徐爱功,祝会忠,等.北斗系统标准单点定位算法研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(3):169-172.
SUN B Q, XU A G, ZHU H ZH, et al. Research on the standard single-point positioning algorithm of Beidou system [J]. Surveying and Spatial Information, 2019, 42 (3): 169-172.
- [7] 张辉,焦诚,白龙.北斗卫星导航系统建设和应用现状[J].电子技术与软件工程,2015(11):25-28.
ZHANG H, JIAO CH, BAI L. Status of construction and application of Beidou satellite navigation system [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2015 (11): 25-28.
- [8] 杨坤.GPS 动态单点定位精度分析[J].信息与电脑(理论版),2012(3):117-118.
YANG K. Analysis of GPS dynamic single point positioning accuracy [J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2012 (3): 117-118.
- [9] 唐卫明,张先春,惠孟堂,等.基于卡尔曼滤波波的北斗伪距单点定位算法研究[J].测绘通报,2016(10):6-8,38.
TANG W M, ZHANG X CH, HUI M T, et al. Research on Beidou pseudo-range single-point positioning algorithm based on Kalman filter [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(10): 6-8, 38.
- [10] 陈鹏,钱徽,朱森良.基于加权最小二乘的卡尔曼滤波算法[J].计算机科学,2009,36(11):230-231,257.
CHEN P, QIAN H, ZHU M L. Kalman filtering algorithm based on weighted least squares [J]. Computer Science, 2009, 36 (11): 230-231, 257.
- [11] 李燕,鲁昌华,张国强,等.自适应 UKF 在北斗伪距定位中的研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(2):125-131.
LI Y, LU CH H, ZHANG G Q, et al. Research on adaptive UKF in Beidou pseudo range positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(2): 125-131.
- [12] 刘可可,陈亮,马丽亚.常用坐标系之间的转换方法研究[J].中国设备工程,2018(7):168-170.
LIU K K, CHEN L, MA L Y. Research on conversion methods of common coordinate systems [J]. China Equipment Engineering, 2018 (7): 168-170.
- [13] 冯胜涛,刘志广,占伟,等.RINEX 观测数据文件格式及其应用[J].华北地震科学,2014,32(1):38-46.
FENG SH T, LIU ZH G, ZHAN W, et al. RINEX observation data file format and its application [J]. North China Earthquake Sciences, 2014, 32 (1): 38-46.
- [14] 胡辉,陈艳.GPS 接收机的定位误差分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2010,38(6):68-71.
HU H, CHEN Y. Analysis of positioning error of GPS receiver [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2010,38(6): 68-71.



- [15] 翟显,刘瑞华,王剑,等. 北斗卫星导航系统误差分析与评估[J]. 现代导航,2018,9(1):10-15,17.
ZHAI X, LIU R H, WANG J, et al. Error analysis and evaluation of Beidou satellite navigation system [J]. Modern Navigation, 2018,9(1): 10-15, 17.
- [16] 李朝海,汪子峰,李会勇,等. 采用距离无偏估计的加权最小二乘定位算法[J]. 信号处理,2016,32(12):1463-1467.
LI CH H, WANG Z F, LI H Y, et al. Weighted least squares positioning algorithm using distance unbiased estimation [J]. Signal Processing, 2016, 32 (12): 1463-1467.
- [17] 刘冰野. 基于非线性滤波技术的 GPS 伪距定位算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
LIU B Y. Research on GPS pseudo-range positioning algorithm based on nonlinear filtering technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [18] 张月超,陈义,胡川. Kalman 滤波在 GNSS 伪距单点定位中的应用[J]. 全球定位系统,2013,38(6):31-35,57.
ZHANG Y CH, CHEN Y, HU CH. Application of Kalman filter in GNSS pseudo-range single-point positioning [J]. Global Positioning System, 2013, 38 (06): 31-35, 57.
- [19] 燕必希,朱立夫,董明利,等. 卡尔曼滤波单目相机运动目标定位研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):220-229.
YAN B X, ZHU L F, DONG M L, et al. Research on moving target location of Kalman filtered monocular camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39 (8): 220-229.
- [20] 宋会杰,董绍武,屈俐俐,等. 基于 Sage 窗的自适应 Kalman 滤波用于钟差预报研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(7):1809-1816.
SONG H J, DONG SH W, QU L L, et al. Sage window-

based adaptive Kalman filter for clock error prediction research [J]. Journal of Instrumentation, 2017,38 (7): 1809-1816.

作者简介



刘春,1988 年于哈尔滨理工大学获得学士学位,1996 年于浙江大学获得硕士学位,现为合肥工业大学副教授,主要研究方向为检测技术与自动化装置、电工理论与新技术。

E-mail: hfliuchun@126.com

Liu Chun received B. Sc. degree in engineering from Harbin University of Science and Technology in 1988 and M. Sc. degree from Zhejiang University in 1996. She is currently an associate professor at Hefei University of Technology. Her main research interests include testing technology and automation equipment, electrical theory and new technology.



卫吉祥,2014 年于辽宁石油化工大学获得学士学位,现为合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: 1169370670@qq.com

Wei Jixiang received her B. Sc. degree from Liaoning Shihua University in 2014. She is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interests include testing technology and automation equipment.



李维华(通信作者),1993 年于合肥工业大学硕士学位,现为合肥工业大学副教授,研究方向为新能源发电及其应用技术。

E-mail: Liwh2000@163.com

Li Weihua (Corresponding author) received M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1993. Now he is an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interests include new energy generation and its application technology.