

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209073

基于紧耦合 GNSS/INS 的高速列车精准定位研究^{*}

石庆升¹ 刘帅帅² 尚庆松²

(1.河南工业大学机电工程学院 郑州 450000; 2.河南工业大学电气工程学院 郑州 450000)

摘要: 为了改善高速列车在行驶过程中定位不精准的现状,本研究采用全球卫星导航系统和惯性导航系统,构建了GNSS/INS紧耦合精准定位系统。提出等价权原理将UKF算法中的噪声协方差进行等价替换,使其能够在信息融合过程中对滤波增益进行调节,降低观测粗差带来的影响,提高UKF算法的鲁棒性。本研究在改进UKF算法的基础上,用地图匹配算法对滤波器处理后的定位数据进行再处理,进行仿真对比。结果表明,改进UKF算法和标准UKF算法仿真得到的位置速度误差曲线,其AVE和RMSE值均降低20%以上;又经过地图匹配算法处理后的定位精度更高,表明本研究能够提高高速列车的定位精准性、稳定性。

关键词: GNSS/INS紧耦合;抗差估计理论;改进UKF算法;地图匹配算法

中图分类号: U284;TN96 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Precise positioning of high speed train based on tightly coupled GNSS/INS

Shi Qingsheng¹ Liu Shuaishuai² Shang Qingsong²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to improve the status quo of inaccurate positioning of high-speed trains during running, this study adopts global navigation satellite system and inertial navigation system to construct GNSS/INS tightly coupled precise positioning system. The equivalent weight principle is proposed to replace the noise covariance in the UKF, so that the Filter gain can be adjusted in the process of information fusion, the influence of observation coarse error can be reduced, and the robustness of UKF algorithm can be improved. Based on the improved UKF algorithm, this study uses map matching algorithm to reprocess the location data after filter processing, and carries on the simulation comparison. The results show that AVE and RMSE values of the position velocity error curves simulated by the improved UKF algorithm and the standard UKF algorithm are reduced by more than 20%. And the positioning accuracy is higher after the map matching algorithm processing, indicating that this study can improve the positioning accuracy and stability of high-speed trains.

Keywords: GNSS/INS tightly coupling; robust estimation theory; improved UKF algorithm; map matching algorithm

0 引言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)具有无线电全天性、全球性的特性^[1-2],具有精度高、成本小等优点,很大程度能够满足当前高速列车对高精度定位要求,并且能够减少对轨旁设备的依赖,但是GNSS信号很容易受到环境的影响。(inertial navigation system, INS)是基于陀螺仪和加速度计测量传感器组成^[3]的,它通过微积分计算得到列车的位置、姿态、速度等定位信息,具有隐蔽性强、短时定位精度高的优点,但是随着长时间的积

分误差积累,INS的定位误差会逐渐增大。因此本文结合GNSS和INS的优点,建立GNSS/INS的组合方式。

多传感器组合与信息融合算法是目前导航定位的核心内容。近年来国内外开展了大量的高速列车组合定位的研究,大多以卡尔曼滤波作为普通组合定位数据的融合方法。针对目前导航定位的缺陷,提出了基于GNSS/DR/LTE-R的列车组合定位方法,文献[4]提出了基于联邦交互式多模型的信息融合算法。于耕等^[5]研究了BDS/INS组合方式,主要针对粒子滤波算法(particle filter, PF)的粒子退化问题,提出了基于蚁群算法改进粒子滤波重采样过程的算法,

收稿日期:2022-02-24

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61403124)、2019年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS095)资助

并且进行建模仿真。文献[6-7]分别应用 GNSS/INS 和 SINS/GNSS/轮轴速度传感器的组合定位方法,对扩展卡尔曼算法进行研究进而降低误差。王霞^[8]提出北斗卫星与地图匹配算法结合,通过不依赖卫星信号达到定位的效果。梁腾飞^[9]提出了混合的地图匹配算法与 BDS/ODO 结合的定位方法,结合扩展卡尔曼滤波算法(extended Kalman filter algorithm,EKF)进行滤波处理。通过上述研究发现,目前列车组合定位只是进行最简单的组合方式,其中过度依赖卫星问题。在算法处理数据时,例如:EKF 算法在非线性增强时,误差增大问题;PF 算法出现粒子样本匮乏问题;无迹卡尔曼滤波算法(unscented kalman filter algorithm,UKF)对强非线性非高斯问题也有一定的局限性等^[10-12]。在进行地图匹配算法时,没有考虑到定位数据的精度问题。

针对 GNSS/INS 松耦合定位系统过渡依赖卫星信号

的问题,本文提出了基于紧耦合 GNSS/INS 的组合定位方式;高速列车组合定位数据融合过程中的非线性与鲁棒性问题,采用抗差估计理论的等价权原理对 UKF 算法进行改进,将改进 UKF 算法应用于紧耦合 GNSS/INS 高速列车组合定位中,利用处理后的定位数据结合地图匹配算法,通过仿真测试提高高速列车定位的精度。

1 高速列车精准定位方法

1.1 GNSS/INS 组合定位系统

列车定位系统平台如图 1 所示,其中,主要组成部分包括 GNSS 接收机和 INS 系统。组合定位系统列车运行过程中定位系统对定位信息进行采集、处理和整定,结合应答器进行地标校验并且及时在车载定位计算机中显示。在这个精准定位系统中还有多普勒雷达、轮轴速度传感器等辅助定位传感器^[13-14]。

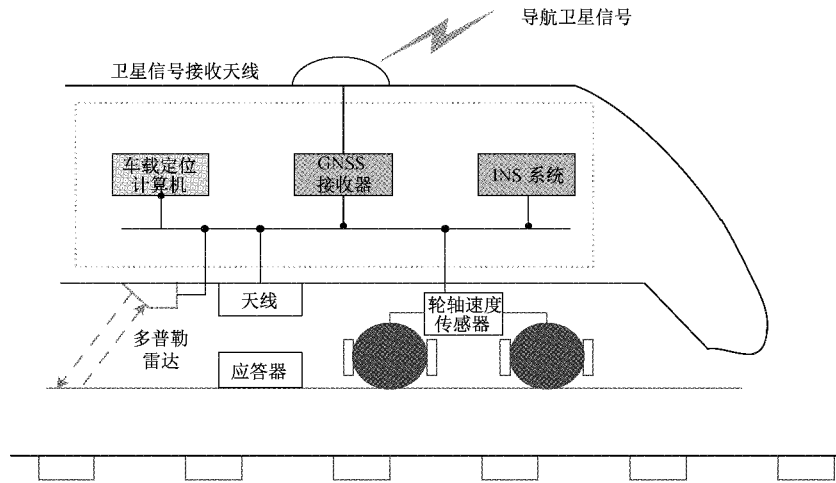


图 1 列车组合定位平台结构

本文采用 GNSS/INS 为主要定位方式,将应答器和电子地图匹配作为辅助定位^[15-16],提高定位精度,集中式融合结构流程如图 2 所示。

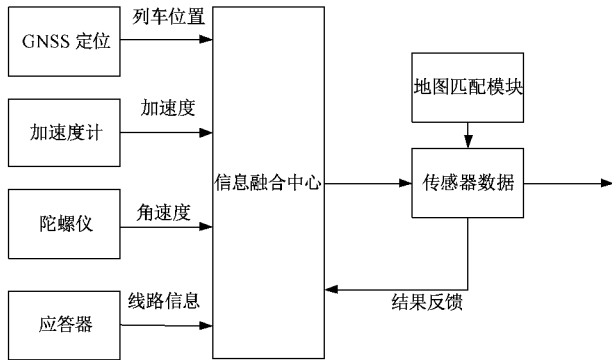


图 2 数据融合系统流程

1.2 基于紧耦合的 GNSS/INS 组合定位系统

在紧耦合 GNSS/INS 组合定位系统^[17-18]中,通过 GNSS 系统测量的伪距、伪距率与 INS 系统计算出的伪距、伪距率

做差,将差值作为在滤波器中观测值。滤波器将融合后的定位信息输出,同时反馈给 INS 系统做偏差校正。

紧耦合的 GNSS/INS 组合定位系统能够避免松耦合过度依赖卫星的问题,当 GNSS 信号遮挡或者减弱时,紧耦合的组合定位系统继续更新 GNSS 信号,并且在精度上以及鲁棒性都比松耦合的组合方式好,如图 3 所示为紧耦合的 GNSS/INS 组合定位结构。

1.3 紧耦合的 GNSS/INS 列车定位模型

1) 状态方程

紧耦合的组合定位方式需要列车的速度、位置、姿态的数据,结合误差模型得到状态向量方程:

$$X(t) = [\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \phi_E, \phi_N, \phi_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z] \quad (1)$$

其中, E、N、U 代表东北天, $[\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U]$ 为东北天速度误差, $[\phi_E, \phi_N, \phi_U]$ 为姿态误差, $[\delta L, \delta \lambda, \delta h]$ 为东北天位置误差, $[\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z]$ 为陀螺仪漂移的差错值, $[\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z]$ 为加速度计偏移。

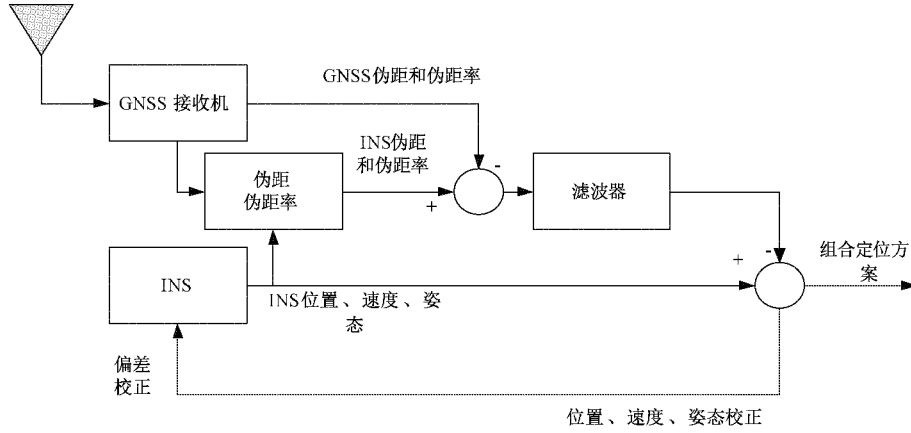


图 3 紧耦合的 GNSS/INS 组合定位结构

将 GNSS 和 INS 的状态方程进行组合,如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_I(t) \\ \dot{X}_G(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_I(t) & 0 \\ 0 & F_G(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_I(t) \\ X_G(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_I(t) & 0 \\ 0 & G_G(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_I(t) \\ W_G(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

紧耦合 GNSS/INS 集成的系统状态方程如下:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (3)$$

其中, F 为系统的转移矩阵, W 为噪声矩阵。

2) 观测方程

INS 载体到 GNSS 的伪距为 ρ_{Ij} , 载体上 GNSS 接收机相对于 S_j 的伪距为 ρ_{Gj} , 通过泰勒级数和偏导数计算如下所示:

$$\rho_{Ij} = r_j + e_{j1}\delta x + e_{j2}\delta y + e_{j3}\delta z \quad (4)$$

$$\rho_{Gj} = r_j + \delta t_u + v_{pj} \quad (5)$$

结合式(4)和(5), 求出伪距差观测方程为:

$$\delta\rho_j = \rho_{Ij} - \rho_{Gj} = e_{j1}\delta x + e_{j2}\delta y + e_{j3}\delta z - \delta t_u - v_{pj} \quad (6)$$

INS 与 GNSS 的伪距率为 $\dot{\rho}_{Ij}$, GNSS 接收机的伪距率为 $\dot{\rho}_{Gj}$, 表达式如下所示:

$$\dot{\rho}_{Ij} = e_{j1}(\dot{x}_I - \dot{x}_{sj}) + e_{j2}(\dot{y}_I - \dot{y}_{sj}) + e_{j3}(\dot{z}_I - \dot{z}_{sj}) + e_{j1}\delta\dot{x} + e_{j2}\delta\dot{y} + e_{j3}\delta\dot{z} \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_{Gj} = e_{j1}(\dot{x}_I - \dot{x}_{sj}) + e_{j2}(\dot{y}_I - \dot{y}_{sj}) + e_{j3}(\dot{z}_I - \dot{z}_{sj}) + \delta\dot{t}_u + v_{pj} \quad (8)$$

结合式(7)和(8), 求出伪距率观测方程为:

$$\delta\dot{\rho}_j = \dot{\rho}_{Ij} - \dot{\rho}_{Gj} = e_{j1}\delta\dot{x} + e_{j2}\delta\dot{y} + e_{j3}\delta\dot{z} - \delta\dot{t}_u - v_{pj} \quad (9)$$

结合以上伪距差和伪距率, 紧耦合组合定位系统的观测方程为:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} H_p(t) \\ H_b(t) \end{bmatrix}_{15 \times 6} X(t) + \begin{bmatrix} V_p(t) \\ V_b(t) \end{bmatrix} = H(t)X(t) + V(t) \quad (10)$$

2 基于等价权原理改进的 UKF 算法

在进行传感器的观测值融合计算时, 利用自适应函数

对传感器各个值进行调节。设观测向量为 L , 列车的状态估计值为 \hat{X} , 在第 k 周期第 n 个传感器的状态估计值为 \hat{X}_n , 则误差方程为:

$$V_n = A_n \hat{X}_n - L_n \quad (11)$$

式中: V_n 为 n 维的残差向量, A_n 为观测矩阵, 则利用最小二乘法函数对状态量的估计解为:

$$\hat{X}_n = (A_n^T B_n A_n)^{-1} A_n^T B_n L_n \quad (12)$$

式中: B_n 为先验权矩阵, 由式(11)可知, 为了抵制异常值对 L_n 的影响, 引出极值解, 如下:

$$\sum_{i=1}^N B_i \rho [\alpha_i \hat{X}_n - (L_n)_i] = \min \quad (13)$$

式中: ρ 为求权因子; α_i 为常数。

由式(13)的极值解, 计算出抗差估计解为:

$$\hat{X}_n = (A_n^T \bar{B}_n A_n)^{-1} A_n^T \bar{B}_n L_n \quad (14)$$

式中: B_n 为权函数, 采用三段法, 通过迭代法对数据进行处理, 实现抗差估计权的最优估计, 三段法如下:

$$B_n = \begin{cases} (B_n)_i, & |(\bar{V}_n)_i| \leq k_0 \\ (B_n)_i \frac{k_0}{|(\bar{V}_n)_i|} \left(\frac{k_1 - |(\bar{V}_n)_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 \leq |(\bar{V}_n)_i| \leq k_1 \\ 0, & |(\bar{V}_n)_i| > k_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $(\bar{V}_n)_i$ 为观测标准化残差, $k_0 = 1.5, k_1 \in [2.5, 8.0]$, 这里 $k_1 = 4$ 。

UKF 滤波算法采用 UT 变换对称采样获取一定数量 Simma 点, 采样的结果取决于上个时刻的估计值。根据抗差估计理论的等价权函数, 构造基于三段法的抗差 UKF 滤波算法, 替换迭代方程的原始权值, 更新序列的协方差矩阵 P_{φ_k} 通过观测方程传播值 $\chi_{i,(k,k-1)}$, 输出预测值 $\tilde{z}_{k,k-1}$ 计算可得, 表达式为:

$$\begin{cases} \chi_{i,(k,k-1)} = h_k(\xi_{i,(k,k-1)}) \\ \tilde{z}_{k,k-1} = \sum_{i=0}^L W_i^n h_{k-1}(\xi_{i,(k,k-1)}) \\ P_{\tilde{z}_k} = \sum_{i=0}^L W_i^n (\tilde{z}_{i,(k,k-1)} - \tilde{z}_{k,k-1})(\tilde{z}_{i,(k,k-1)} - \tilde{z}_{k,k-1})^T + \bar{\mathbf{R}}_k \end{cases} \quad (16)$$

式中： \mathbf{R}_k 为滤波改进前 R_k 的等价噪声协方差矩阵。
用等价权原理迭代求出等价权值，然后对滤波观测更新，如下：

$$\mathbf{P}_{\tilde{x}_k \tilde{z}_k} = \sum_{i=0}^L W_i^n (\chi_{i,(k,k-1)} - \tilde{x}_{k,k-1})(\chi_{i,(k,k-1)} - \tilde{x}_{k,k-1})^T + \mathbf{R}_k \quad (17)$$

$$\bar{\mathbf{K}}_k = \mathbf{P}_{\tilde{x}_k \tilde{z}_k} (\mathbf{P}_{\tilde{z}_k})^{-1} \quad (18)$$

式中： $\mathbf{P}_{\tilde{x}_k \tilde{z}_k}$ 预测状态向量协方差矩阵； K_k 为卡尔曼滤波增益。

状态变量更新值：

$$\hat{x}_k = x_{k,k-1} + K_k(\tilde{z}_k - \tilde{z}_{k,k-1}) \quad (19)$$

误差协方差矩阵更新值：

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} - K_k \mathbf{P}_{\tilde{x}_k \tilde{z}_k} (K_k)^T \quad (20)$$

根据分析可知，改进 UKF 算法只需在标准 UKF 算法的基础上，对噪声协方差矩阵进行替换，实时调节 UKF 的滤波增益 \bar{K}_k ，达到实时调整系统状态估计值的有效性。

3 地图匹配算法

为了更进一步提高导航定位的精度，在改进 UKF 算法处理融合信息的基础上，提出地图匹配算法。根据路况的不同，选择合适的地图匹配算法，在直线路段的情况下，采用直线直接匹配法；在曲线路段的情况下，采用曲线拟合匹配算法。

1) 直线直接匹配法

当高速列车在直线上行驶时，方向角几乎不变化，采用直线直接匹配法，如图 4 所示。

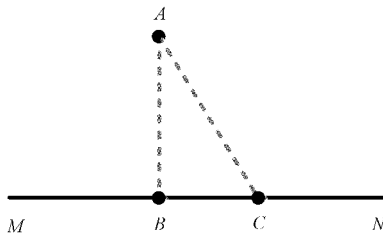


图 4 直线直接匹配法

设 M 点坐标为 (x_m, y_m) ， N 点坐标为 (x_n, y_n) ，则 MN 的方程为：

$$y - y_m = \frac{y_n - y_m}{x_n - x_m}(x - x_m) \quad (21)$$

设 A 点坐标为 (x_a, y_a) ， B 点坐标为 (x_b, y_b) ，则 AB 方程为：

$$y - y_a = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}(x - x_a) \quad (22)$$

联立式(21)和(22)，就能计算 B 的坐标，将 B 点作为匹配点，误差为：

$$\Delta = l_{AC} - l_{AB} \quad (23)$$

式中： l_{AC} 为 AC 的长度， l_{AB} 为 AB 的长度。

2) 曲线拟合匹配算法

设曲线拟合的方程式为：

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (24)$$

将弯道上的信息用最小二乘法的原理进行拟合，得出近似曲线。如图 5 所示，曲线上列车的真实位置点 $C(x_c, y_c)$ ，采集的定位点为 E ，由 E 点的方向角可知此处的方程斜率为 K ，投影斜率为 $-\frac{1}{K}$ ，故其方程为：

$$y - y_c = -\frac{1}{K}(x - x_c) \quad (25)$$

联立式(23)和(24)可得到相交点，以为匹配点 D ，误差方程为：

$$\Delta = l_{CE} - l_{CD} \quad (26)$$

式中： l_{CE} 为 CE 的长度， l_{CD} 为 CD 的长度。

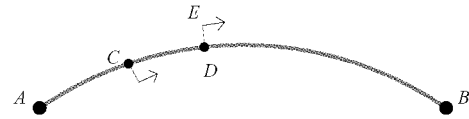


图 5 曲线拟合匹配算法

4 仿真与验证

4.1 算法仿真

为验证本文提出改进 UKF 应用于紧耦合 GNSS/INS 组合定位系统中的性能，采用 MATLAB 建立列车运动模型。初始位置为纬度 125.871 991 666 667，经度 46.125 486 666 666 7，列车速度为 300 km/h，全程仿真 5 000 s，模拟哈—齐路线的其中一部分，采用实验室列控系统的样本参数如表 1 所示。

表 1 样本参数设置

陀螺仪随机常值漂移	$[10^{-2} \ 10^{-2} \ 10^{-2}]$
陀螺一阶马尔可夫漂移	$[10^{-6} \ 10^{-6} \ 10^{-6}]$
加速度计一阶马尔可夫漂移	$[10^{-4} \ 10^{-4} \ 10^{-4}]$
陀螺一阶马尔可夫漂移相关时间/s	300
加速度计一阶马尔可夫漂移相关时间/s	700

生成列车运行轨迹，如图 6 所示。

以模拟列车在齐哈线路运行的仿真数据为基础，在 2 200~3 500 s 时段传感器观测值含有随机粗差的情况下，对改进 UKF 算法和标准 UKF 算法进行仿真，并且对仿真结果进行分析对比。图 7(a)为改进 UKF 算法位置误差图；图 7(b)为标准 UKF 的位置误差图；图 7(c)是标准 UKF 速度误差对图；图 7(d)是改进 UKF 速度误差对图。

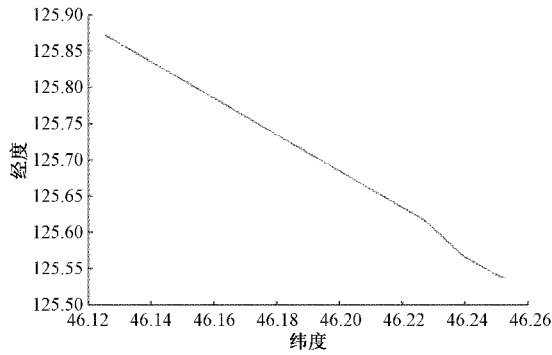
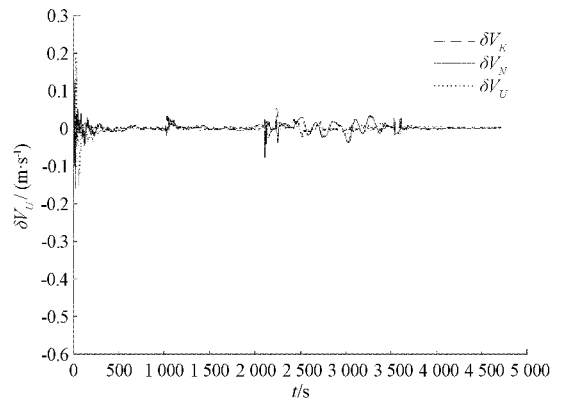
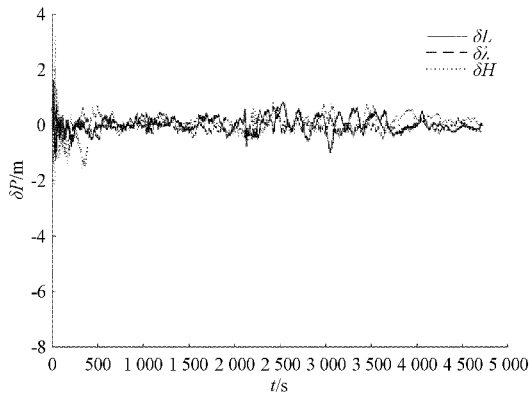


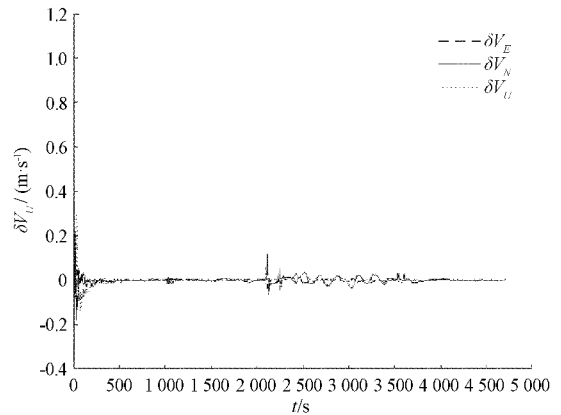
图 6 列车运行轨迹仿真图



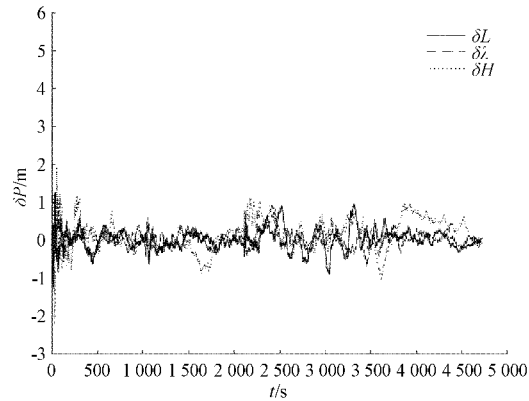
(c) 标准UKF速度误差对比图



(a) 改进UKF位置误差图



(d) 改进UKF速度误差对比图



(b) 标准UKF位置误差图

图 7 改进 UKF 和 UKF 的位置速度误差图

由图 7 可知,在 2 200~3 500 s 时段传感器观测值含有随机粗差的情况下,改进 UKF 算法的稳定性明显优于标准 UKF 算法。并且可以看出,两种方法的位置误差范围均控制在 $[-2 \text{ m}, 2 \text{ m}]$ 内,大部分在 $[-1 \text{ m}, 1 \text{ m}]$ 范围内,位置误差范围均控制在 $[-0.1 \text{ m/s}, 0.1 \text{ m/s}]$ 内,改进 UKF 算法滤波精度略优于标准 UKF 算法。通过计算 AVE 和 RMSE 进行深度分析,如表 2 和 3 所示。

由表 2 和 3 计算东向/北向/天向位置误差、速度误差的 AVE 和 RMSE 值。在 AVE 中,东北天 3 个方向位置、

表 2 标准 UKF 的误差结果

误差值	东向位置/ m	北向位置/ m	地尚位置/ m	东向速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	北向速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	地尚速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
AVE	0.553 2	0.495 7	0.645 0	0.301 2	0.256 5	0.285 3
RMSE	0.432 1	0.372 6	0.516 6	0.241 1	0.214 7	0.224 1

表 3 改进 UKF 的误差结果

误差值	东向位置/ m	北向位置/ m	地尚位置/ m	东向速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	北向速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	地尚速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
AVE	0.431 1	0.365 5	0.536 0	0.232 3	0.195 6	0.201 3
RMSE	0.343 7	0.285 2	0.432 6	0.195 1	0.152 2	0.178 3

速度误差分别减少了 21.9%、26.2%、16.9%、22.9%、23.7%、29.4%；在 RMSE 中，东北天 3 个方向位置、速度误差分别减少了 20.4%、23.4%、16.3%、19.1%、29.1%、20.4%，表明了改进的 UKF 可以有效的抑制粗差带来的干扰，从而提高精准定位系统的定位精度。

4.2 地图匹配算法仿真

通过改进 UKF 算法处理后的数据，采用直接匹配算法和曲线拟合匹配算法组合成的算法进行匹配，具体步骤流程如下。

- 1) 将优化后的定位数据，提取经度、纬度信息。
- 2) 在数据库中索引待匹配的标记点。
- 3) 将定位点与待匹配的标记点进行匹配，如果匹配度值最大，将待匹配点作为具体位置。

如图 8 所示，拟合铁路线是由高精度模块获取精准点作为参考，在经过直接匹配算法和曲线拟合匹配算法匹配以后，截取一部分地图匹配算法的匹配结果，与改进 UKF 算法处理后的定位数据做对比。

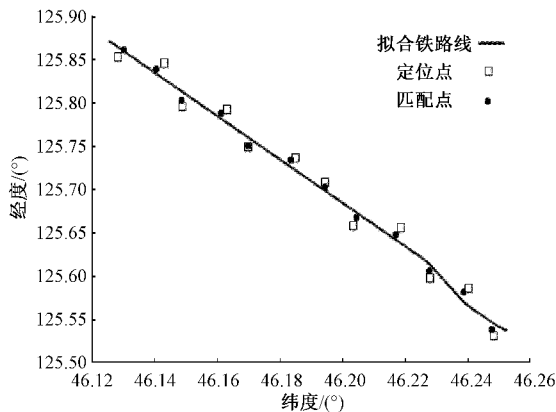


图 8 地图匹配算法

结果可以看出，没有经过地图匹配算法处理的定位数据，由于地理、信号环境因素影响定位精度，导致定位误差有波动，偏离轨道很远；使用地图匹配算法，可以使误差保持在一个很好的范围内，不会偏离轨道太远，使匹配误差减小。

5 结 论

本文采用高速列车紧耦合 GNSS/INS 精准定位系统，以提高高速列车定位精度为目的，设计了滤波算法与地图匹配算法相结合的方法进行高速列车定位。通过对标准 UKF 算法仿真分析，得出标准 UKF 算法在高速列车紧耦合 GNSS/INS 精准定位系统中受到观测粗差的影响，提出利用抗差估计理论中的等价权原理对 UKF 算法改进，对标准 UKF 算法中的噪声协方差进行等价替换，可以有效抑制传感器观测值含有的随机粗差。通过仿真分析，得出改进 UKF 算法能够显著降低位置、速度误差曲线的 AVE 和 RMSE 值，同时提高滤波的稳定性、精准性。通过滤波

处理后的定位数据，结合地图匹配算法中的直接匹配算法和曲线拟合匹配算法。仿真得出，经过地图匹配算法后的匹配数据与精确点更近，实现了对定位精度又进一步提高，能够达到精准定位的效果。为了更好地满足高速列车精准定位的要求，下一步将组合定位系统与控仿真系统进行结合研究，并再进一步提高定位精度以及抗干扰性。

参考文献

- [1] 李卫东,张悦. 基于 BDS/INS 的列车组合定位算法研究[J]. 电子测量技术,2018,41(18):76-79.
- [2] 李伟,郝顺义,黄国荣,等. 改进自适应 ADMCC-HCKF 算法及在 SINS/CNS/GNSS 中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(8):79-85.
- [3] 王艳,高嵩,马天力,等. 基于变分贝叶斯理论的 GPS/INS 组合导航系统[J]. 国外电子测量技术,2019,38(11):5-10.
- [4] 李旭东. 基于 GNSS/DR/LTE-R 的高速列车组合定位方法的研究及仿真[D]. 成都:西南交通大学,2019.
- [5] 于耕,方鸿涛. 基于 BP 神经网络改进 UKF 的组合导航算法[J]. 电子技术应用,2019,45(4):29-33.
- [6] 顾诚,王帅,沈石秀,等. 基于 GNSS 和 INS 的磁浮列车组合测速定位理论研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(11):2756-2766.
- [7] 王可,刘立刚,周斌,等. 基于 SINS/GNSS/轮速的列车组合导航算法研究[J]. 系统仿真学报,2021,33(1):189-195.
- [8] 王霞. 基于北斗卫星的列车定位地图匹配算法研究[D]. 大连:大连交通大学,2019.
- [9] 梁腾飞. 基于 BDS 与地图匹配融合的列车定位技术研究与实现[D]. 大连:大连交通大学,2019.
- [10] 齐华,胡南,张伟,等. 消防员室内定位融合算法研究[J]. 电子测量技术,2019,42(20):68-71.
- [11] 李杰. 基于组合定位的下一代列车自主定位系统研究[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(11):93-95.
- [12] HONG X B, WU J, ZHANG Y Z, et al. Research on absolute positioning sensor based on eddy current reflection for high-speed maglev train[J]. Sensors(Basel, Switzerland),2020, DOI: 10.3390/s20185167,20(18).
- [13] 陈光武,刘昊,魏宗寿,等. 基于 RTK-GPS/INS 的列车组合定位方法研究[J]. 铁道学报,2020,42(10):67-75.
- [14] 段志强,刘洁瑜,李想,等. 应答器/SINS 信息融合的列车定位方法研究[J]. 铁道通信信号,2020,56(10):1-6.
- [15] 陶维杰,蔡伯根,刘江,等. 基于 UKF 的数字轨道地图的三维线路生成方法[J]. 交通运输工程学报,2020,20(5):227-236.
- [16] HASSAN A H, GEMMA L N, CLIVE R. Impact of train positioning inaccuracies on railway traffic management systems: Framework development and

- impacts on TMS functions [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, DOI: 10.1049/iet-its.2019.0503,14(6).
- [17] SOINSANTE S, STALLO C. Hybridized-GNSS approaches to train positioning: Challenges and open issues on uncertainty[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, DOI:10.3390/s20071885,20(7).
- [18] 杨海,李威,张禾,等. 复杂环境下基于 SINS/UWB 的容错组合定位技术研究[J]. 仪器仪表报,2017,38(9): 2177-2185.

作者简介

石庆升,工学博士,副教授,主要研究方向为智能制造、铁路信息与智能控制技术。

E-mail:11098715460@163.com

刘帅帅,硕士研究生,主要研究方向为铁路信息与智能控制技术。

E-mail:1532946136@qq.com

尚庆松,工学硕士,讲师,主要研究方向为铁路信息与智能控制技术。

E-mail:1098715460@qq.com