

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.049

面向安全距离约束滤波的车辆 GNSS 车载定位优化

陈荣荣¹, 张媛¹, 辛宝娟¹, 吴哲¹, 李峰²

(1. 西安交通工程学院 机械与电气工程学院, 陕西 西安 710300;

2. 西安交通大学 机械学院, 陕西 西安 710049)

摘要:北斗卫星导航系统(BDS)在车辆定位领域具有重要的作用,直接影响到国家安全和人民生活。为了提高车载定位信息处理能力,设计一种面向安全距离约束滤波的车辆全球导航卫星系统车载定位方法。在安全距离约束的基础上,根据距离参数完成 BDS 定位,实现对车辆实际距离的推测。研究表明:设定安全间距限制后的滤波器能够提高目标位置控制准确性,散列过滤器方法具有更好的稳健性,有助于更好地适应汽车动态变化状态。相比较卡尔曼滤波和散列滤波器方法,TC-HF 算法可以得到最小范围的距离结果,获得的距离偏差仅为 4.16 m,推断设置安全间距限制后可以大幅提高系统的定位精度。

关键词:车载定位;安全距离约束;滤波;北斗卫星导航系统;定位精度

中图分类号:TH86 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0254-04

Vehicle GNSS On-board Positioning Optimization for Safe Distance Constrained Filtering

CHEN Rongrong¹, ZHANG Yuan¹, XIN Baojuan¹, WU Zhe¹, LI Feng²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong Engineering University, Xi'an 710300, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The Beidou Navigation Satellite System (BDS) plays an important role in the field of vehicle positioning, directly affecting national security and people's lives. A vehicle positioning method for vehicle Global Navigation Satellite System (GNSS) based on safe distance constraint filtering is designed for the improvement of vehicle positioning information processing ability. On the basis of the safety distance constraint, the BDS positioning is completed according to the distance parameters to infer the actual distance of the vehicle. The results show that the filter with safety spacing limit can improve the accuracy of target position control, and the hash filter method has better robustness, which is helpful to better adapt to the dynamic state of the vehicle. Compared with Kalman filter and hashing filter methods, TC-HF algorithm can obtain the minimum range of distance results, and the obtained distance deviation is only 4.16 m. It is inferred that the positioning accuracy of the system can be greatly improved after setting the safe distance limit.

Keywords: vehicle positioning; safety distance constraint; filtering; Beidou navigation satellite system; positioning accuracy

0 引言

为了更好地提高人货运输的安全性和有效性^[1-2],欧美等发达国家引入了 GPS 等定位技术来实现车辆位置、速度等参数的实时检测与数据传输,由此实现理想的安全保护,目前已取得较大研究进展^[3-4]。但是,由于该方法的处理环节较繁琐,故选择鲁棒性方法更适合对复杂运行工况开展分析^[5-6]。

以上研究工作已引起国内外众多学者的关注。例如,刘兆年等^[7]建立了一种贝叶斯估计方

法,通过最大似然方法来判断可能的汽车位置,同时利用卡尔曼滤波器实现 GPS 与测速仪的融合,从而获得高精度的定位效果。刘丹等^[8]则以鲁棒无迹卡尔曼滤波器(UK)为基础,构建了一种全球导航卫星系统(GNSS)来实现车辆位置的精确识别,以此提高定位的效率,并确保了 GNSS 紧密结合车辆的位置与计算结果准确性,从而提高了滤波器处理过程的鲁棒性。王甫红等^[9]提出基于智能手机内置传感器数据的微机械惯性测量单元车载导航算法,使用载波相位时间差分计算的航向角作为观测值并更新,所提方法受 GNSS 观测条

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(20JK0751);西安交通工程学院校级中青年基金项目(2023KY-06)

第一作者简介:陈荣荣(1988—),女,陕西西安人,助教,硕士,研究方向为机械设计制造及其自动化,c18164960226@126.com。

件影响较小,提升了智能手机车载定位的可靠性。李正帅等^[10]提出神经网络修正的速度约束辅助车载定位算法,通过径向基函数预测系统纵向位置误差,通过限定记忆指数加权实时估计量测噪声的自适应滤波,相比于卡尔曼滤波算法,其有效提高了 GNS 车载定位精度。王秋滢等^[11]提出了基于后向传播神经网络的微陀螺误差定位算法,达到对陀螺定位误差抑制的效果。

卡尔曼滤波系统是将 GNSS 与 INS 结合后构建得到的一种新型卫星定位算法,其主要目标是利用最小线性变化率进行理论研究。为保证车载导航系统的安全性和可靠性,本研究提出一种根据安全距离进行控制的 GNSS 汽车定位算法,最后对该方法进行了仿真验证。

1 北斗辅助车辆定位

汽车在实际行驶过程中受外界各种因素的综合作用,使得汽车运动参数具有显著的随机变化特性^[12]。汽车在行驶状态下并不是以恒定速度或均匀加速方式行驶,所以在汽车定位时需兼顾稳定与安全两个方面。北斗卫星导航系统(BDS)已逐渐成为了国家道路运输的有力支撑,对城市道路运输体系的快速发展也起到重要作用。尤其是随着我国北斗三代卫星定位系统的建成和北斗地面通信网络的加速构建,它已经为世界范围内的用户提供更精准的导航服务。BDS 系统可以高效实现设备的故障诊断和维修,而精确的定位数据则是保证车载设备的安全性和可靠性的重要前提^[13]。

卡尔曼滤波器具有较强的多工况适应能力,能有效处理含有不确定因素的有界噪声信号。对于平均值等于 0 的随机噪声,可以利用卡尔曼滤波器对其进行建模,而在函数传递方面也应符合最小规范条件。因此采用散列过滤器处理的结果优于卡尔曼散列筛选器^[14]。该方法不仅能有效降低信号中的一些非高斯成分,并且还能进行目标的高效定位和跟踪。

2 模型建立及系统设计

2.1 车辆安全距离约束模型

根据车载测距信息对定位参数进行限制的情况,将测距结果与位置信息进行融合,由此实现多源信息的联合定位,提高定位准确性。彭文正等^[15]从车辆位置检测的安全性与稳定度等方面

出发,考虑车辆运行环境的影响,研究了基于安全间距的 H_∞ 滤波方法,利用安全间距信息来限制北斗卫星位置的处理结果,以此检验该方法的可行性,为实现基于卫星导航技术的车载导航系统实际应用提供了重要的参考价值^[16]。

通过对实际间距的定位计算完成载体的约束控制。当 k 成立时,构建如下状态方程:

$$y_k = bx_k + m \quad (1)$$

式中: y_k 和 x_k 依次是距离位置的北向和东向坐标; b 和 m 是方程恒定系数。由于汽车在运动过程中受到轨迹限制,此时分别以 A_y 和 A_x 来描述位于汽车北面与东面的速度,建立以下限制条件:

$$A_y - bA_x = 0 \quad (2)$$

2.2 安全距离约束的滤波

以卡尔曼滤波器进行处理时,首先要求出系统噪声协方差,而在现实工况下控制过程较复杂,难以得到精确的估计结果^[17]。此时可以使用具有高鲁棒性的过滤算法对以上模型进行分析。

1) 建立系统模型

设置系统运行状态及其测定公式^[18]:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Fx_k + w_k \\ y_k = Hx_k + v_k \end{cases} \quad (3)$$

式中: w 和 v 分别是在汽车运行状态下所形成噪声和测试获得的噪声信号,都是保持相互独立的白噪声。 F 和 H 分别是位于北、东两个方向的控制矩阵。

2) 初始化散列过滤器

对其进行初始化后,确定状态 $\hat{x}_0$ 和协方差矩阵 P_0 如下:

$$\hat{x}_0 = 0, \quad P_0 = E(x_0 x_0^T) \quad (4)$$

3) 以下是对各时刻状态进行估计的步骤

建立参数矩阵 G_k , 以此表示加权噪声偏移值。当 G_k 增大时,表示过程噪声形成了更大的偏移分量,由此获得更小均方误差。在 $G_k = 0$ 时,过程噪声保持 0,形成了明显卡尔曼滤波。

构建如下估算方程:

$$\begin{cases} V_{k+1} = D_{k+1}^T D_{k+1} \\ \Sigma_k = (H P_k - P_k G_k^T G_k + I)^{-1} P_k \\ P_{k+1} = F(I - V_{k+1}) \Sigma F(I - V_{k+1}) \\ K_k = F(I - V_{k+1}) \Sigma H \\ \hat{x}_{k+1} = F \hat{x}_k + K(y_k - H \hat{x}_k) \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_{k+1} 是在 $k+1$ 时的中间变量; D_{k+1} 是在 $k+1$ 时的状态矩阵; P_k 是在 k 时的协方差矩阵; G_k 是

在 k 时的参数矩阵; K_k 是在 k 时的空间矩阵; I 是对角矩阵; K 是等差矩阵。

测试散列过滤器条件:

$$(I - G_k P_k G_k^T) \geq 0 \quad (6)$$

如果以上判定条件均满足,则执行式(4)计算协方差矩阵并对后续时刻进行估计。如果以上判定条件不成立,则可以推断散列过滤器发生失效,这时需设置更小 G_k 再进行运算。

根据以上结果,本研究将散列过滤器检测结果和北斗系统位置数据相结合,利用该算法对汽车进行位置检测多定位。

2.3 车辆定位系统

利用车载系统总线(MVB)分析方法实现多个模块之间的相互关联。组成定位装置的各个部分为 CTCS-3 控制单元、测速测距单元、CTCS-2 控制单元、距离接收单元、转发器信息接收单元、人机接口单元、安全无线传输装置、网关输入/输出单元等^[19]。图 1 是本次建立的车辆导航系统示意图,实线代表物理实体之间的连线,虚线属于无线电信号的连线。

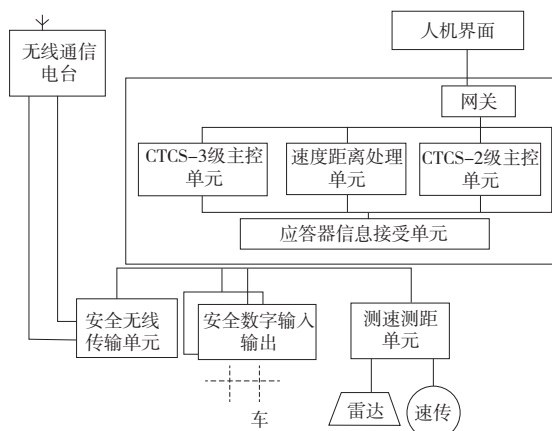


图 1 车辆定位系统具体组成结构

在本文建立的汽车定位系统中,由客户模块提供记录数据,在真实处理过程中,车辆安全计算机包含的数据对结果具有最大影响。车辆安防计算机能够按照一定时序控制要求对运行状况和出现故障的信号状态进行自动记录。这种类型的故障标记通过英文短句的形式来描述。当转发器发送模块运行阶段出现不正常情况时,将会导致转发器发送组件接口失效的结果。

3 测试验证与分析

本研究利用 Matlab 平台构建综合环境,同时利用 trainlm 作为学习对象,设计基于安全间距限

制条件的过滤算法。采用蒙特卡罗法对汽车位置识别进行仿真测试^[20],并对所提出的基于安全间距限制的滤波器性能进行了评估,将所得结果与多种算法开展对比。根据具体测量结果,本文提出了一种以多条直线进行表示的距离算法。

为了检验本文方法的可靠性,本实验选择某城市线上一条约 30 min 时长的实测数据,之后再对该方法进行验证。在上述时段内,列车行驶状态和卫星数据接收情况都正常。将一对天线置于车头处,设置间隔 3 m,再以 120 Hz 的频率完成采样过程。总共进行 100 次蒙特卡罗仿真处理,得到各种方法对应的各方向平均偏差如图 2 和图 3 所示。

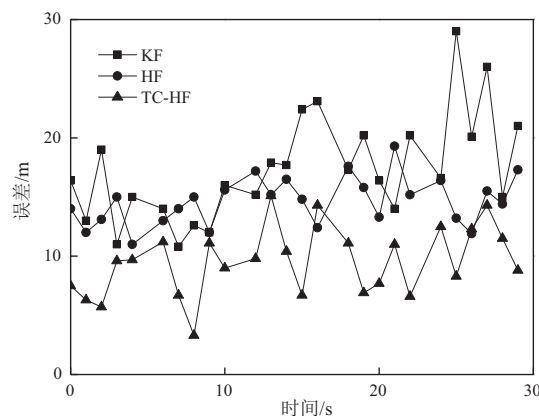


图 2 东向平均距离误差

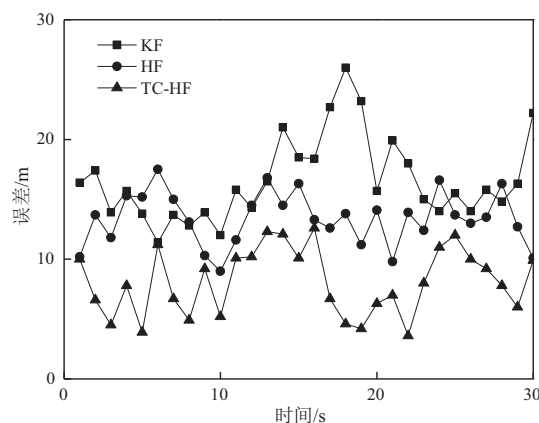


图 3 北向平均距离误差

分析图 2 和图 3 可以看出,散列过滤器方法具有比卡尔曼滤波器方法更高定位准确性和更优稳定性。对图 2 进行分析可以发现,散列滤波器(HF)和基于安全间距限制的散列滤波器(TC-HF)表现为更缓和的特点,而基于卡尔曼滤波(KF)的方法获得了更显著的特征,有可能会造成不准确的结果。通过对比实验结果表明,设定安

全间距限制后的滤波器能够提高目标位置控制准确性,且 HF 方法具有更好的稳健性,有助于更好地适应汽车动态变化状态。

本文利用 3 种不同的滤波方法进行处理后分别获得不同的航迹均值偏差,之后对各参量开展统计学分析,获得表 1 所示的蒙特卡罗模拟结果。

表 1 蒙特卡罗仿真统计 单位:m

算法	最小距离	最大距离	平均距离
KF	4.33	31.27	16.05
HF	6.18	10.19	7.46
TC-HF	2.63	7.89	4.16

从表 1 中可以发现,根据最小与最大间距可确定间隔幅值。相对于 KF、HF 方法,TC-HF 达到了最小间隔幅值,位置控制精度也更高。在无任何限制的情况下,利用卡尔曼滤波方法进行求解获得的最大偏差为 16.05 m。在设置限制条件的情况下,由 HF 计算出的最大偏差为 7.46 m,以 TC-HF 算法获得的距离偏差仅为 4.16 m,由此推断设置安全间距限制条件后,可以大幅提高系统的定位精度。由上述分析结果可以看出,当设定安全间距限制之后,采用 TC-HF 算法可以显著提高系统定位精度。

4 结语

本文开展面向安全距离约束滤波的车辆 GNSS 车载定位优化分析,并得到如下结果:

1) 设定安全间距限制后的滤波器能够提高目标位置控制准确性,散列过滤器方法具有更好的稳健性,有助于更好适应汽车动态变化状态;

2) 相比较卡尔曼滤波和散列滤波器方法,TC-HF 算法可以得到最小范围的距离结果,获得的距离偏差仅为 4.16 m,推断设置安全间距限制后可以大幅提高系统的定位精度。

参考文献:

- [1] 王仁庆. 地铁列车长大下坡制动时制动电阻超温故障的分析及处理[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(2): 71-73, 86.
- [2] 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 等. GPS/BDS 实时 SSR 产品质量评估及其 PPP 性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 714-726.
- [3] 周子健, 朱攀峰, 李宗洋, 等. 基于北斗高精度位置服务的站场作业安全防护系统研究[J]. 中国铁路, 2025(3): 37-45.
- [4] 赵琳, 孙治国, 杨福鑫, 等. 北斗双频精密单点定位模

糊度固定及性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(2): 283-291.

- [5] 魏文辉, 袁伟, 张逸凡. 智能汽车 SINS/GNSS 动态组合导航观测模型系统误差自适应估计方法[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7): 280-290.
- [6] 阮国奇, 何伦保. GPS/BDS 组合导航系统的精密单点定位模型[J]. 导航定位学报, 2024, 12(1): 124-129.
- [7] 刘兆年, 齐志华, 柴铭, 等. 基于 GNSS 的站内列车自主定位方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(9): 85-93.
- [8] 刘丹, 姜维, 蔡伯根, 等. 基于简化鲁棒 UKF 的 GNSS/INS 紧组合列车定位方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(7): 62-71.
- [9] 王甫红, 栾梦杰, 程雨欣, 等. 城市环境下智能手机车载 GNSS/MEMS IMU 紧组合定位算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1106-1116.
- [10] 李正帅, 缪玲娟, 周志强, 等. 神经网络修正的速度约束辅助车载 SINS 定位算法[J]. 宇航学报, 2022, 43(9): 1236-1245.
- [11] 王秋滢, 刘凯悦, 尹娟. 车载 GNSS 失锁下基于 BPNN 的微陀螺误差估计及定位方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(5): 1139-1145.
- [12] 王雅迪, 刘江, 蔡伯根, 等. 列车北斗定位压制干扰测试场景生成方法研究[J]. 中国铁路, 2025(3): 9-16, 36.
- [13] 罗森, 党建武, 郝占军, 等. 基于卷积神经网络的列车位置指纹定位算法研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(1): 42-50.
- [14] 盖杰, 余以正, 孙健, 等. 高速列车外风挡结构周围流场和气动载荷的仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(2): 89-93.
- [15] 彭文正, 敖银辉, 黄晓涛, 等. 多传感器信息融合的自动驾驶车辆定位与速度估计[J]. 传感技术学报, 2020, 33(8): 1140-1148.
- [16] 邓陈喜, 姜维, 王剑, 等. 基于北斗 3 号 PPP-B2b 信号的实时精密单点定位方法研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(2): 63-73.
- [17] 杜彦君, 贾小林, 姚顽强, 等. 卫星差分码偏差对北斗三号双频精密单点定位的影响[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(1): 42-50.
- [18] 赵毅, 聂晓根, 方少东, 等. 基于高斯投影的惯导/GPS 机器人组合定位研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 173-176.
- [19] 郭戈, 刘佳庚, 孙晓峥. 融合 5G/GNSS 的车辆高精度鲁棒安全定位: 进展与展望[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 289-303.
- [20] 金宝根, 吕庆梅. 基于卷积神经网络的红外弱小车辆目标检测方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(5): 241-245.

收稿日期: 2024-01-29