

特殊隧道环境中的车辆定位关键技术研究

马二顺, 童威

(广东省公路建设有限公司深中通道管理中心, 广东 广州 510699)

摘要: 精准定位性能是保障汽车安全驾驶的重要条件。尽管现有全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 在露天场景中表现出色, 但在如隧道等 GNSS 拒止环境下实现高精度定位仍是一个挑战。特别是在钢壳沉管隧道这种全金属环境中, 卫星信号极其不稳定, 甚至完全无法接收。针对这一挑战, 提出了一种隧道内路侧单元使能的协同定位架构 (CAE-RSU, co-localization architecture for enabling roadside unit), 旨在解决卫星信号无法穿透的问题, 从而实现无缝、连续且高精度的定位服务。具体来说, 利用隧道内设置的路侧单元 (RSU, roadside unit), 建立车联网 (V2X, vehicle-to-everything) 无线通信定位系统, 并采用无迹卡尔曼滤波算法以进一步提升定位的可靠性和精度。仿真结果表明, 即使在高速运动和高噪声环境下, 所提定位算法仍能实现优越的定位效果。

关键词: 自动驾驶; 车辆定位; 卫星拒止环境; 钢壳沉管隧道

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00451

Research on key technologies of vehicle positioning in special tunnel environment

MA Ershun, TONG Wei

Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Shenzhen-Zhongshan Channel Management Center, Guangzhou 510699, China

Abstract: Accurate positioning performance is an important requirement for safe driving of automobiles. While existing global navigation satellite system (GNSS) performs well in open-air scenarios, achieving high-precision positioning in GNSS resistant environments such as tunnels remains a challenge. Especially in the all-metal environment of the steel shell immersed tube tunnel, the satellite signal is extremely unstable, or even completely unable to receive. To address this challenge, a co-localization architecture for enabling roadside unit (CAE-RSU) in tunnels was proposed, which aimed to solve the problem of impenetrability of satellite signals. Seamless, continuous and highly accurate positioning services were enabled. Specifically, the RSUs set up in the tunnel were used to establish the vehicle-to-everything (V2X) positioning system, and the traceless Kalman filter algorithm was used to further improve the reliability and accuracy of positioning. Simulation results show that the proposed positioning algorithm can achieve superior localization performance even under high-speed motion and high-noise environments.

Key words: autonomous driving, vehicle localization, satellite denied environment, steel shell immersed tube tunnel

0 引言

随着交通网络的迅猛扩展, 精准的车辆定位对

于提升交通系统的智能化水平变得尤为重要。全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 作为主流的定位技术, 已广泛应用于各种

收稿日期: 2024-12-01; 修回日期: 2025-01-01

通信作者: 马二顺, 9116069@qq.com

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (No. 2022B0101070001)

Foundation Item: Key Area Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2022B0101070001)

引导和安全系统中，包括高级驾驶辅助系统（ADAS, advanced driving assistance system）和智能交通系统（ITS, intelligent transportation system）^[1]。GNSS技术包括各种室外定位系统，如全球定位系统（GPS, global positioning system）、格洛纳斯、伽利略和北斗^[2]，其服务在地球上无处不在。然而，当需要对建筑物、隧道等封闭环境内的移动设备进行定位时，卫星的信号强度非常微弱，甚至无法测量。沉管隧道是跨海或过河的推荐结构，其实践历史始于20世纪初美国和加拿大之间的一条横跨底特律河的双轨铁路隧道。沉管法由于其优越性和技术成熟性，广泛应用于水域隧道建设，如港珠澳大桥、大连湾沉管隧道、红谷隧道、海河隧道、韩国釜山巨济沉管隧道和厄勒海峡沉管等^[3]。在接下来30年左右的时间里，出现了钢壳沉管技术^[4]。钢壳沉管隧道利用钢材制造外壳，并在内部灌注混凝土，其特点是在造船台或平台线上进行施工。由于钢壳具有良好的防水性，不需要额外的防水措施，同时具备较强的地质适应性和能够制造异形尺寸的钢结构，受到水下工程领域广泛欢迎^[5]。然而，当车辆穿越钢壳隧道时，钢壳隧道的厚度和材质对无线电波的反射和吸收，使得信号能量减弱，会导致通信质量下降甚至通信中断。再加上多径效应和阴影效应对信号传播的影响，给隧道内通信带来巨大挑战，更难满足当前5G高速率、低时延的通信需求。

随着自动驾驶的发展，车辆定位系统已经成为必不可少的要素。目前，车辆的实时定位系统高度依赖于GNSS。然而，在GNSS拒止环境中，由于信号强度低，效率也随之降低。隧道是GNSS拒止环境的典型示例。由于GNSS在隧道内通常长时间不可用，基于GNSS的定位技术往往导致定位信息不准确，不适合隧道环境。车辆具有很高的移动性，需要及时更新可靠的位置信息。不准确的位置信息会严重影响自动驾驶的安全性，并且隧道的封闭性和细长性使其运营管理相对复杂，隧道内外空间的连续定位对于实现隧道安全运营和管理具有重要意义。现有的室内定位技术、原理和算法都有各自的优点和局限性，不适合隧道定位。此外，金属对电磁波的反射能力更高，导致信号多径效应更加显著，从而信号处理的复杂性增加。为了提高定位精度，需要先进的算法来分辨和校正多径干扰，而

这往往会增加成本。因此，需要寻找创新的解决方案来应对特殊钢壳沉管环境下实现车辆定位这一挑战。考虑现在隧道内经常安装多条漏泄电缆，利用这些电缆作为介质将定位信号引入隧道内，通过隧道内GNSS接收器等一系列处理可以实现定位^[6]。在文献[7]中，北斗+多源融合定位技术被应用于深中通道海底沉管工程，实现了连续可靠的亚米级定位精度。北斗伪卫星定位在文献[8]中被应用在高速公路隧道中为车辆提供定位服务，实现了较高的定位精度并可做到车载终端和手机用户在隧道内定位信号不丢失。文献[9]提出了一种利用5G辅助GNSS定位技术来弥补其在室内、地下、隧道等空间受限场景下定位误差和时延较大的问题。上述文献说明了组合定位技术，也称为多源融合定位技术，通过结合不同的室外和室内定位方法、原理和算法来克服各自的缺点，可以实现更准确的室内定位^[10]。然而在具有挑战性的环境条件下，常用定位传感器会恶化，从而使稳健和长期的车辆定位复杂化。

因此，基于当前研究现状不难发现，针对隧道内车辆定位的有效解决方案尚不成熟。特别是在GNSS信号无法穿透的隧道环境中，如何实现高精度定位成为了一个亟待解决的关键问题。在此背景下，本文提出了一种隧道内路侧单元使能的协同定位架构（CAE-RSU, co-localization architecture for enabling roadside unit），该架构旨在实现钢壳沉管式隧道内无缝、连续的高精度定位。为了实现这一目标，构建了多个关键模块：（1）数据处理模块负责收集并处理来自隧道内路侧单元（RSU, roadside unit）的各类数据；（2）车辆粗定位模块则利用这些数据进行初步的位置估算；（3）环境参数修正模块则根据隧道内特有的环境因素对定位结果进行精细调整；（4）车辆轨迹滤波模块进一步平滑和优化车辆的运动轨迹，确保定位结果的准确性和稳定性。仿真实验结果表明：该算法可以实现优越的定位性能，并在不同的行驶速度、通信环境中展现出良好的鲁棒性。

1 现有研究

隧道环境下无GPS车辆定位方法是目前研究的热点。由于隧道的管状结构对信号的屏蔽，卫星信号难以直接进入，且隧道内部环境复杂，管道内壁

的钢壳混凝土结构会对信号产生连续多次反射，这对车辆定位方法提出了挑战，传统地面车辆定位方式不能直接适用于隧道场景。当前普遍的隧道定位方法有：伪卫星信号定位、非卫星信号定位以及多种定位技术融合的多源定位三大类^[11]。

1.1 伪卫星信号定位

全球导航卫星系统是所有卫星导航系统的统称，其中北斗卫星导航系统是由我国自主研发服务于全球用户的GNSS，由于其可靠性、稳定性以及在我国境内导航信号强、精确度高的特点，在国内车辆或人员等多种定位服务中被广泛应用。

对于狭长封闭的隧道场景，北斗卫星信号不能直接进入，需要采取合适的手段将信号引入。文献[12]提出在隧道内等间隔部署融合基站，接收由隧道外部运营管理站采集的卫星信号信息，并实时向各接收终端播发与北斗卫星完全一致的信号，从而实现卫星导航功能在隧道内部的覆盖。这种通过在地面上部署发射器，运用天线或者漏缆把模拟出的卫星、星历以及链路的多普勒补偿等信息播发给隧道内部的若干GNSS再生信号源和接收机，进而在用户终端用相应接收机接收模拟信号并解算的方式，称为伪卫星定位方法。伪卫星定位方法将卫星信号引入原本会被地形或环境屏蔽的复杂环境中，能够有效提升卫星导航信号的覆盖范围。

1.2 非卫星信号定位

1.2.1 LED定位方法

发光二极管(LED, light emitting diode)具有切换速率快、光电转化率高特点，将其调制到人眼无法感知的闪烁频率承载数据，可以同时实现照明与通信功能。相比于其他室内定位技术，LED定位方法具有大带宽、高可靠和高安全的优点。文献[13]着重分析了基于空间点指纹数据的室内定位方法，提出了一种基于可见光信号强度的加权算法，并运用粒子滤波解决了基于可见光的指纹库定位算法在环境发生变化时定位误差变大的问题。在运用LED进行室内定位的基础上，文献[14]基于LED不同频率建立了LED位置信息与光强度的匹配关系，从而推导出信号接收器的三维坐标，验证了LED定位技术在隧道内无人驾驶场景的可行性。

1.2.2 RFID定位方法

无线射频识别(RFID, radio frequency identification)定位方法是一种非接触式的自动识别技术，

主要是利用无线射频信号来实现对物体的识别和定位^[15]。RFID技术基于两个主要组件，即RFID读写器和RFID标签。其定位原理是在定位区域内部署若干个读写器，待定位目标携带着接收到的信号标签向读写器发送信号，读写器随后将接收到的信号传至主机，由主机进行位置解算，获取待定位目标的位置信息^[16]。该技术具有安装方便、成本低、穿透性强的优势，但其精度受限，由于受信号传输范围和多径效应的影响，RFID定位精度可能不如超宽带(UWB, ultra-wideband)等高精度技术。

1.2.3 ZigBee定位方法

ZigBee定位方法是一种新型的低成本、低功耗的短距离无线通信技术，具有低廉的价格和强大的组网通信能力。该技术通过各节点间的协调通信分析信号强度计算实际损耗，最后根据损耗大小分析节点的位置^[17]。孙振乾等^[18]针对传统基于ZigBee的指纹定位方法提出了一种K-均值聚类(K-means clustering)算法来提升定位效率，实现了对隧道内部人员快速、准确的定位。

1.2.4 Wi-Fi定位方法

近年来，Wi-Fi技术取得了快速发展，且覆盖范围能够涵盖室内外不同场景，相比于RFID和ZigBee的区域定位方法，能够有更远的传输距离且受非视距的影响较小，设备成本低，整体有良好的定位精度，能够满足隧道内人员与车辆的定位需求。基于Wi-Fi实现室内定位，一般使用接收信号强度指示(RSSI, received signal strength indicator)作为信号的特征值，分为测距与非测距两类算法。其中位置指纹算法是一种典型的无须测距的RSSI定位算法。Wang等^[19]同样利用聚类算法提出了一种改进的指纹定位算法。针对不同隧道环境，设计了对应的接入点布局方案。对基于测试点信号的动态指纹数据库，采用K-邻近(KNN, K-nearest neighbors)算法和模糊C均值聚类(FCM, fuzzy C-means clustering)算法加以改进，有效地提升了不同隧道场景内Wi-Fi定位算法的准确度。

1.2.5 UWB定位方法

UWB技术采用纳米或亚纳米级脉冲进行无线通信，具有信号穿透能力强、抗干扰能力强、定位精度高、功耗低和信号稳定性好等优点，适合实现室内高速无线通信。通常UWB室内定位采用基于三边测量的方法，但对于狭窄的长直隧道场景定位

效果会显著下降。Wang等^[20]针对矿井巷道等准一维环境，提出了一种两点定位算法，并对双边测距算法进行了优化。实验结果表明，该算法的定位误差被降低到厘米级，所提出的定位系统稳定性强、可扩展性高、易于部署、成本低，可以拓展运用到其他准一维空间。

1.2.6 利用车辆运动信息进行轨道约束

高速列车在隧道内接收到的卫星信号较弱，仅依靠由微机电系统（MEMS, micro-electromechanical system）器件构成的惯性导航系统（INS, inertial navigation system）误差较大。在不增加额外传感器的情况下，可以利用微惯性测量单元在列车上安装角的运动约束来抑制INS误差。该方法主要运用于高速列车等有固定形式路线的隧道内车辆运动场景，相比只考虑INS的定位方法定位精度明显提高。

1.3 多源定位

目前，机器学习和多传感器融合等技术在车辆定位与导航领域的应用已引起研究者的广泛关注^[21]。文献[15]提出了一种用于隧道车辆定位的混合多传感器融合策略，引入电子罗盘、轮速传感器等低成本车载传感器与初步定位算法融合，克服了初步定位算法精度低、定位频率低、缺乏速度或姿态信息等缺点。文献[22-23]提出了一种基于多传感器信息融合的车道级定位方法。采用机器视觉方法，利用单目和双目摄像机拍摄车道线及其俯视图来计算车辆与车道线的距离和车道的宽度，从而实现车辆的横向定位。文献[24]同样探讨了低成本

GPS、MEMS传感器和数字罗盘的融合应用，采用最近更新的基于最小二乘支持向量机的带外源输入的非线性自回归算法对INS的位置误差进行预测和补偿，从而在GPS拒止环境中显著提高定位精度。

2 钢壳沉管内定位方法设计

为了应对车辆在钢壳沉管等GNSS信号受限的隧道环境中定位性能下降的问题，提出了一种CAE-RSU架构。CAE-RSU框架架构如图1所示，具体来说，该架构可以分为数据处理、初步定位、动态参数校正和平滑滤波4个关键部分。各部分协同处理来自车辆自身和驾驶环境的数据，能够有效提升车辆定位的实时性、准确性和鲁棒性，整体的处理流程在图1(c)中给出。

考虑一个图1(a)所示的车辆网络，不同车辆之间通过车载单元（OBU, onboard unit）与RSU实现相互间信息传输，RSU是位置固定但发射功率未知的通信设施。车辆搭载的OBU会将自身信息周期性地发送给周围其他车辆、路侧单元等网络中的节点，从而实时更新周围环境中关于当前节点车辆的位置、速度等信息。

2.1 数据处理

假设车辆以周期 T 向RSU采集数据，用矩阵 $Q_{i,j}$ 表示采集到的数据集， $Q_{i,j}$ 中包含了第 j 辆车的唯一MAC地址 MAC_j 、接收数据的时间戳 t 、第 i 个RSU的位置信息 RSU_i 以及第 i 个RSU在时间 t 采集到的来自所有车辆的功率值 $P_{i,t}$

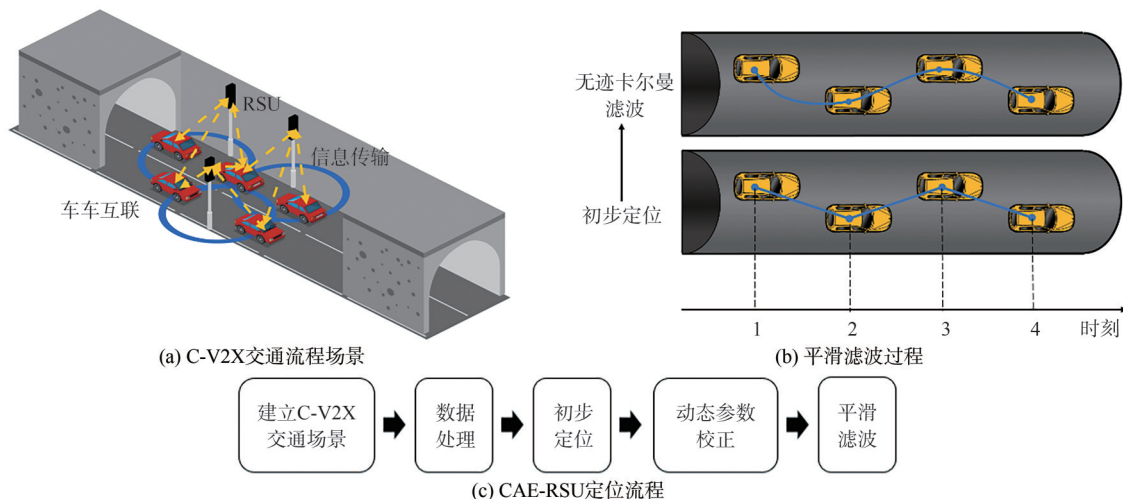


图1 CAE-RSU框架架构

$$\mathbf{Q}_{i,j} = \begin{bmatrix} \text{MAC}_{j,t}, t, \text{RSU}_1, P_{1,t} \\ \dots \\ \text{MAC}_{j,t}, t, \text{RSU}_i, P_{i,t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，第一行的数据代表第 j 辆车在时间 t 向第 i 个 RSU 采集到的数据集。相似的，通过车辆的 MAC 地址与时间戳，可以匹配所有 RSU 在检测周期 T 内从每辆车采集到的数据。

2.2 初步定位

初步定位首先要解决传统最大似然估计 (MLE, maximum likelihood estimation) 在处理基于 V2X 信号的车辆定位问题时目标函数非凸和高度非线性的问题。针对交通场景中信号传播特性，采用对数路径损耗模型建立信号传播模型^[25]，能够简化信道计算并为车辆定位提供较高的准确度，记第 j 辆车接收到的由第 i 个 RSU 发送的信号功率为 $P_{i,j}$ ，则根据对数路径损耗模型有以下表达式

$$P_{i,j} = P_0 + 10\gamma \lg \frac{\|\theta_j - \phi_i\|}{d_0} + m_{i,j} \quad (2)$$

其中， P_0 表示参考距离 d_0 处的接收信号功率， θ_j 和 ϕ_i 分别表示第 j 辆车和第 i 个 RSU 的坐标， $\|\theta_j - \phi_i\|$ 表示第 j 辆车与第 i 个 RSU 之间的欧氏距离， $m_{i,j}$ 表示多径环境下的对数正态阴影效应， γ 代表路径损耗指数。

显然，模型对第 j 辆车的位置是非线性依赖的。基于传统 MLE 估计可以推导出车辆坐标的非凸表达式

$$\hat{\theta}_j = \arg \min_{\theta_j} \sum_{i=1}^N \left(-(P_{i,j} - P_0) + 10\gamma \lg \frac{\|\theta_j - \phi_i\|}{d_0} \right)^2 \quad (3)$$

需要消除表达式中的对数，从而将该问题转化为一种不带对数的等价形式。引入辅助变量 $\mathbf{A} = \theta_j \theta_j^T$ 和 $\mathbf{b} = [b_{1,j}, \dots, b_{N,j}]^T$ ，令 $\beta_{i,j} = d_0^2 10^{\frac{P_{i,j} - P_0}{5\gamma}}$ ，应用半正定松弛技术将等式约束 $\mathbf{A} = \theta_j \theta_j^T$ 松弛为不等式约束 $\mathbf{A} \geq \theta_j \theta_j^T$ ，则上述非凸估计问题改写为等价的可以有效求解的凸估计问题

$$\begin{aligned} (\hat{\theta}_j, \hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{b}}) &= \arg \min_{\theta_j, \mathbf{A}, \mathbf{b}} f(\mathbf{b}) \\ \text{s.t. } \text{tr}(\mathbf{A}) - 2\phi_i^T \theta_j + k_i &\leq \beta_{i,j}^2 b_{i,j} \\ \text{tr}(\mathbf{A}) - 2\phi_i^T \theta_j + k_i &\geq \beta_{i,j}^2 b_{i,j}^{-1} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \theta_j \\ \theta_j^T & 1 \end{bmatrix} &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 动态参数校正

在考虑基于隧道场景建立的车联网信号传播模

型时，车与车之间、车与路侧单元间的无线信号会受到隧道内壁的反射、障碍物的衍射、多径效应等多种因素的影响，从而导致模型中的环境参数发生动态的变化。单个 RSU 无法准确感知这种变化，因此利用网络中的 RSU 协同通信、互相交换环境信息以及及时更新多种信道参数。

假设 RSU 所处的位置为锚节点 ϕ_l ， $d_{i,l}$ 表示第 l ($l = 1, \dots, L$) 个锚节点与第 i ($i = 1, \dots, N$) 个 RSU 之间的欧氏距离， $P_{i,l}$ 表示第 l 个锚节点接收到的第 i 个 RSU 发送的信号功率。使用一个或多个 RSU 测量的接收信号功率来校正路径损耗指数 γ ，并将它的位置信息报告给其他 RSU，则可以得到

$$\hat{\gamma}_{i,l} = \frac{P_{i,l} - P_0}{10 \lg \hat{d}_{i,l}} \quad (i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L) \quad (5)$$

其中， $\hat{d}_{i,l}$ 表示 $d_{i,l}$ 的最大似然估计量。当多径环境下的对数正态阴影效应对路径损耗影响较小时，可以忽略其对 $\hat{d}_{i,l}$ 的影响，从而近似表示 $\hat{d}_{i,l} = d_0 10^{\frac{P_{i,l} - P_0}{10\gamma_{i,l}}}$ 。最后取来自 L 个锚节点的平均值作为估计量

$$\hat{\gamma}_i = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{\gamma}_{i,l} \quad (6)$$

可以通过第 i 个 RSU 与每个锚节点之间的距离来更正单个 RSU 对路径损耗的测量结果，且最终的路径损耗指数来源于多个 RSU 测量结果的平均值，进一步消除了随机误差。因此，这种动态环境参数修正方法相比使用固定值可以减少信号波动对定位估计精度的影响。

2.4 平滑滤波

平滑滤波主要作用是利用车辆运动特征和无迹卡尔曼滤波 (UKF, unscented kalman filter) 机制^[26]来提升定位精度，如图 1(b) 所示。首先定义车辆的运动学模型，假设车辆行驶过程中没有加速或制动行为，给出下列车辆理想状态空间

$$\vec{\theta} = [x \quad v_x \quad y \quad v_y]^T \quad (7)$$

其中， x 代表横向坐标， y 代表纵向坐标， v_x 和 v_y 分别代表横向速度和纵向速度。定义 Δt 为测量频率， $\Delta f(\mathbf{t})$ 为状态转移矩阵，则车辆的状态转移方程如下

$$\vec{\theta}(\mathbf{t} + \Delta \mathbf{t}) = \Delta f(\mathbf{t}) + \vec{\theta}(\mathbf{t}) \quad (8)$$

另外，由于噪声会对车辆轨迹预测产生影响且车辆的状态模型是非线性的，该问题被转化为：

$$\vec{\theta}(t + \Delta t) = f(\vec{\theta}(t), t) + M(t) \quad (9)$$

$$\vec{z}(t) = h(\vec{\theta}(t), t) + R(t) \quad (10)$$

其中, M 为系统噪声, \vec{z} 为观测参数, h 为观测函数, R 为观测噪声。

采用无迹卡尔曼滤波方法缓解非线性系统中存在的状态变化和噪声干扰等不确定因素, 进一步实现对初步定位结果的平滑处理。具体来讲, UKF会不断重复预测和更新两个阶段。在预测阶段, 生成 $2L + 1$ 个 Sigma 点 $\xi_{i,k-1}$ 来近似非线性变换后的概率分布, k 表示采样时刻, L 是状态向量的维度, λ 是缩放比例参数, chol 函数表示进行 Cholesky 分解后得到上三角矩阵, P_{k-1} 表示 $k-1$ 时刻状态估计值的协方差矩阵

$$\xi_{0,k-1} = \theta_{k-1} \quad (11)$$

$$\xi_{i,k-1} = \theta_{k-1} + \sqrt{L + \lambda} \cdot \text{chol}((L + \lambda)P_{k-1})^T \quad (12)$$

$$\xi_{i+L,k-1} = \theta_{k-1} - \sqrt{L + \lambda} \cdot \text{chol}((L + \lambda)P_{k-1})^T \quad (13)$$

下面分别代入车辆状态方程和观测方程对每个 Sigma 点进行状态转移和观测值的预测。在更新阶段, 用卡尔曼增益 K_k 来更新状态估计值并且用观测预测的协方差矩阵 $P_{zz,k|k-1}$ 反映更新后状态估计的不确定性。状态估计的更新计算式为

$$\theta_k = \theta_{k|k-1} + K_k(z_k - z_{k|k-1}) \quad (14)$$

而更新后状态估计的协方差矩阵可通过式 (15) 计算

$$P_k = P_{k|k-1} - K_k P_{zz,k|k-1} K_k^T \quad (15)$$

UKF 方法利用不断更新的观测信息以及系统的非线性状态转移模型持续调整状态估计, 因此可以在初步定位的基础上, 得到滤波后更为精确的车辆位置坐标。

3 仿真与分析

本文使用 MATLAB R2021a 进行数值仿真。为了确保更好的角度多样性测量和较低的横向精度稀释, RSU 部署在道路两侧, 并且具有相同的部署参数。假设所有 RSU 具有相同的安装高度/方向, 并且车辆速度在隧道中保持恒定。OBU 高度为地面上 1 m, 低于 RSU 的部署高度。虽然 RSU 可以处理两个方向的数据, 但为了方便起见, 本文只考虑一个方向的仿真结果。设定参考距离为 1 m, 车辆速度为 25 km/h (在仿真实验中会测试其他速度值, 如 25~100 km/h), 可接收到的 RSU 数量为 3。为了

模拟隧道情况将衰减因子设置为 5, RSU 部署间距为 30 m。此外, 在评估定位性能时, 进行了 100 次仿真运行, 并使用平均定位误差 (ALE, average location error)、均方根误差 (RMSE, root mean square error)、平均绝对误差 (MAE, mean absolute error) 和平均绝对百分比误差 (MAPE, mean absolute percentage error) 作为评估指标。

为了证明本文所提 CAE-RSU 算法的优越性, 与其他 2 种车辆定位算法进行分析比较, 并简称为算法 1 和算法 2。其中算法 1 为 Page 等^[25]提出的将扩展卡尔曼滤波器 (EKF, extended Kalman filter) 集成到基于最小二乘法 (LS, least squares) 的框架中, 形成了 LES-KF 算法。这种算法旨在同时解决在基于 V2X 信号的车辆定位中遇到的一些挑战, 如非凸目标函数和时空约束等问题。然而, 该算法没有考虑交通场景的异质性挑战, 因为卡尔曼滤波器 (KF, Kalman filter) 和 EKF 只适合线性问题, 而交通场景中的一些问题是非线性的, 需要非线性问题解决技术。算法 2 为 Wang 等提出的一种新的基于接收信号强度 (RSS, received signal strength) 的协同定位算法, 该算法采用相对误差估计和半定规划 (SDP, semi-definite program) 相结合的方法, 与现有的定位方法相比 SDP 估计器具有明显的性能改进。

首先, 对算法的定位精度进行分析, 设置车辆速度为 25 km/h, 分别使用 ALE、RMSE、MAE、MAPE 作为定位精度评估指标, 不同算法定位主要误差情况如图 2 所示, 不同算法定位主要性能比较见表 1。由图 2 可以看出, 在相同条件下, 算法 2 的定位性能优于算法 1, 而本文提出的 CAE-RSU 算法性能优于另外两种定位算法。其中算法 1 的平均定位误差高达 3.5 m, 算法 2 的平均定位误差达到

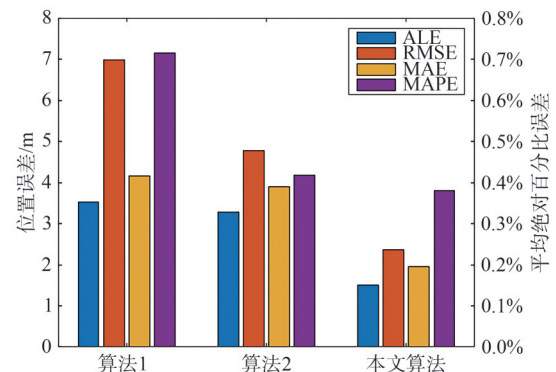


图2 不同算法定位主要误差情况

表1 不同算法定位主要性能比较

对比项	ALE/m	RMSE/m	MAE /m	MAPE
算法1	3.518 413 854	6.975 731 374	4.149 711 329	0.714 194 202%
算法2	3.287 230 633	4.782 795 380	3.896 667 837	0.417 460 257%
本文算法	1.509 611 197	2.356 671 753	1.947 810 778	0.379 800 037%

了3.2 m，而本文算法的平均定位误差仅有1.5 m，相对于算法2定位精度提升了50%。可见本文算法能够明显改善定位误差，提升定位精度。此外，从MAPE上看，算法1的MAPE高达0.7%，相对于算法2和本文算法明显偏大，定位值与实际值偏差较大，准确性较低。因此，与基于LS的定位算法相比，基于SDP的定位算法（算法2和CAE-RSU）在减少定位误差方面效果更好，整体性能方面SDP模型的定位算法定位精度更高。而本文所提算法的MAPE与算法2相比降低了10%，拥有更好的定位性能。

接下来，评估车辆速度对定位性能的影响，不同车速下的定位平均误差如图3所示。分别对25 km/h、50 km/h、75 km/h、100 km/h 4种不同速度的定位平均误差进行仿真，不同速度代表各种驾驶条件，如拥堵、正常、高速驾驶。仿真结果表明，对于所有方法，定位误差都会随着车速度的增加而逐渐增加，但误差增加的速率不同。算法1随着速度的增加，误差增长较快，表明对高速条件的适应性较差。本文算法的定位误差随着速度增加而增加，但与其他两种算法相比保持最小，而算法2具有相对较小的误差和较慢的误差增长速率，这是由于SDP框架在有效克服噪声和速度变化引起的信号分组丢失方面的优势。尽管如此，在这几种算法中，本文所提算法不论在低速还是高速条件下定位性能均优于其他两种算法，表现出对速度增加的鲁棒性，具有最小的定位误差。

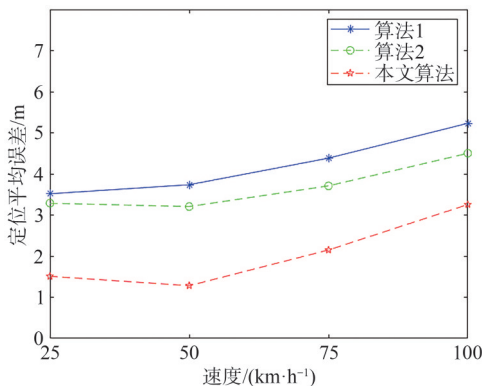


图3 不同车速下的定位平均误差

最后，对本文所提算法在不同环境下的定位性能进行评估。为了研究本文所提算法在不同道路环境下的定位性能，分析了两种不同类型的道路环境：（1）开放环境（衰减因子为2），（2）隧道环境（衰减因子为5）。同时将车辆速度设定为25 km/h和100 km/h，以便于分析不同速度、不同环境下的定位性能情况，车速为25 km/h时不同环境下的定位平均误差比较如图4所示，车速为100 km/h时不同环境下的定位平均误差比较如图5所示，不同环境定位平均误差见表2。对仿真结果进行分析发现，当车辆在低速行驶时，算法1和算法2在开放环境中定位误差（3.535 798 141 m、3.370 580 367 m）均在大于在隧道环境中的定位误差（3.518 413 854 m、3.287 230 633 m），而本文所提算法正好相反。在高速度情况下，城市开放环境下的定位精度均低于隧道环境中的定位精度，这是因为在城市环境中车

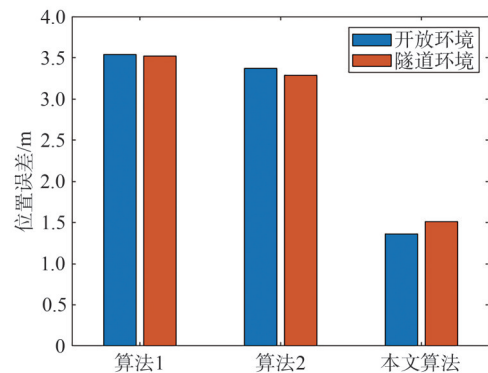


图4 车速为25 km/h时不同环境下的定位平均误差比较

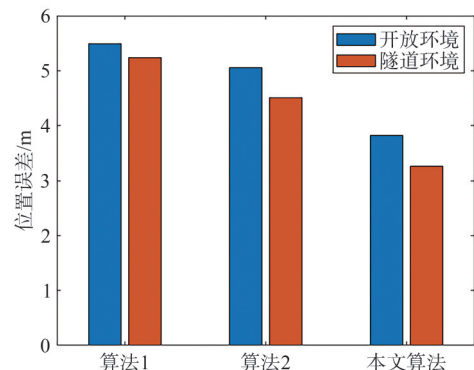


图5 车速为100 km/h时不同环境下的定位平均误差比较

表2 不同环境定位平均误差

对比项	速度为25 km/h		速度为100 km/h	
	开放环境误差/m	隧道环境误差/m	开放环境误差/m	隧道环境误差/m
算法1	3.535 798 141	3.518 413 854	5.494 296 052	5.233 115 222
算法2	3.370 580 367	3.287 230 633	5.059 810 989	4.501 132 398
本文算法	1.355 428 026	1.509 611 197	3.820 493 421	3.255 158 535

辆周围环境较为复杂，城市高楼、障碍物等会直接影响道路上的信号，导致定位精度降低。并且，与低速行驶的车辆定位误差相比，在较高的速度条件下，所有算法定位误差均增加。与基于LS的方法（算法1）相比，基于SDP的方法（算法2和本文算法）在以上4种情况中（速度分别为25 km/h和100 km/h的两种不同环境）的定位误差更小，定位更加精确。本文算法在不同条件下的性能优于其他定位算法，在4种情况中ALE均小于4 m。这些结果表明，本文方法不仅在隧道内具有良好的定位性能，而且在复杂的城市环境中的定位性能也十分优秀，可以在不同的交通道路环境中提供车道级的定位精度。

4 结束语

在本文研究中，针对钢壳沉管隧道中GNSS信号受限环境，提出了一种隧道内基于RSU的协同定位算法，以实现自动驾驶汽车的车道级定位精度。仿真结果表明，该算法可以实现优越的定位性能，并在不同的行驶速度、通信环境中展现出良好的鲁棒性。因此，该算法可以作为无人驾驶汽车在隧道内缺乏GNSS信号时实现全球定位精度的有效替代方案。此外，该算法同样适用于其他GNSS拒止环境的车辆定位场景，如城市中的立交桥下、高层建筑旁的街道等。值得一提的是，所提算法无须在车辆上额外安装传感器，这有助于降低自动驾驶汽车的运营和设计成本。

参考文献：

- [1] PIAO J N, BEECROFT M, MCDONALD M. Vehicle positioning for improving road safety[J]. *Transport Reviews*, 2010, 30(6): 701-715.
- [2] LI X X, GE M R, DAI X L, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [3] 锁旭宏, 王明, 宁进进. 基于运安一体船的钢壳沉管浮运测控系统研发与应用[J]. *中国港湾建设*, 2024, 44(7): 11-16, 70.
- [4] SUO X H, WANG M, NING J J. Development and application of floating measurement and control system of steel shell immersed tube based on the integrated barge for transportation and installation[J]. *China Harbour Engineering*, 2024, 44(7): 11-16, 70.
- [5] ZHANG Z G, LIN W, JI H, et al. Layout and design techniques of cross section for the large immersed tunnel[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166: 37-44.
- [6] 陈春兴. 超大型钢壳沉管隧道成本控制策略[J]. *中华建设*, 2024(3): 41-43.
- [7] CHEN C X. Cost control strategy of super-large steel shell immersed tube tunnel[J]. *China Construction*, 2024(3): 41-43.
- [8] REN K H, WANG Z L, DONG L Q, et al. Design and validation of tunnel positioning scheme based on BeiDou pseudo-satellite system[C]//*Proceedings of the 2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 10-15.
- [9] 钱道庆, 杨毅. 北斗+多源融合定位技术在深中通道海底沉管工程中的应用[C]//*第十七届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集*. 北京: 计算机工程与应用, 2023: 7.
- [10] QIAN D Q, YANG Y. Application of BeiDou multi-source fusion positioning technology in the deep sea channel submarine tunnel project[C]//*Proceedings of the 17th National Conference on Signal and Intelligent Information Processing and Applications*. Beijing: *Computer Engineering and Applications*, 2023: 7.
- [11] 侯晓青, 付增辉. 北斗伪卫星定位技术在高速公路隧道中的应用[J]. *中国交通信息化*, 2024(4): 109-112.
- [12] HOU X Q, FU Z H. Application of BeiDou pseudolite positioning technology in expressway tunnel[J]. *China ITS Journal*, 2024(4): 109-112.
- [13] ABU-SHABAN Z, SECO-GRANADOS G, BENSON C R, et al. Performance analysis for autonomous vehicle 5G-assisted positioning in GNSS-challenged environments[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 996-1003.
- [14] BERKVEN R, BELLEKENS B, WEYN M. Signal strength indoor localization using a single DASH7 message[C]//*Proceedings of the 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.
- [15] 马二顺, 李金昆, 修春娣, 等. 隧道定位方法综述[C]//*第十五届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集*. 北京: 计算机工程与应用, 2022: 186-190.
- [16] MA E S, LI J K, XIU C D, et al. Overview of tunnel positioning methods[C]//*Proceedings of the 15th National Conference on Sig-*

- nal and Intelligent Information Processing and Applications. Beijing: Computer Engineering and Applications, 2022: 186-190.
- [12] 康艳. 隧道内定位北斗卫星导航技术的应用[J]. 数字通信世界, 2023(5): 8-10.
KANG Y. Application of BeiDou satellite navigation technology in tunnel positioning[J]. Digital Communication World, 2023(5): 8-10.
- [13] 李黎. 基于可见光通信的室内指纹定位技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
LI L. Research on indoor fingerprint positioning technology based on visible light communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [14] 杜艳忠, 石震. LED定位技术在隧道无人驾驶导航中的应用[J]. 测绘通报, 2016(S2): 100-101, 154.
DU Y Z, SHI Z. Application of LED positioning technology in tunnel unmanned navigation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(S2): 100-101, 154.
- [15] SONG X, LI X, TANG W C, et al. A hybrid positioning strategy for vehicles in a tunnel based on RFID and in-vehicle sensors[J]. Sensors, 2014, 14(12): 23095-23118.
- [16] MO L F, LI C Y. Passive UHF-RFID localization based on the similarity measurement of virtual reference tags[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8): 2926-2933.
- [17] YAN D M, KANG B, ZHONG H, et al. Research on positioning system based on ZigBee communication[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1027-1030.
- [18] 孙振乾, 唐康华, 吴美平, 等. 基于运动约束抑制惯导误差的高速列车隧道内定位方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(3): 624-632.
SUN Z Q, TANG K H, WU M P, et al. High-speed train positioning method based on motion constraints suppressing INS error in tunnel[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 624-632.
- [19] WANG T J, SUI T, LIU X Z, et al. Wi-Fi positioning algorithm in tunnel based on fuzzy C-means clustering and KNN algorithm[C]//Proceedings of the 2019 Chinese Automation Congress (CAC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 567-571.
- [20] WANG Q F, SHUAI J Q, GUO Y, et al. High-accuracy UWB positioning system for mine tunnels: optimization of positioning algorithm for quasi-one-dimensional environments[C]//Proceedings of the 2023 5th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 146-150.
- [21] ZHU K T, CHEN S T, SHI J M, et al. Localization of autonomous vehicles in tunnels based on roadside multi-sensor fusion[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(12): 7738-7750.
- [22] JIANG X D, LIU Z M, LIU B L, et al. Multi-sensor fusion for lateral vehicle localization in tunnels[J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6634.
- [23] HU Y, LI X, DONG X, et al. A reliable cooperative fusion positioning methodology for intelligent vehicle in non-line-of-sight environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1007111.
- [24] LI X, CHEN W, CHAN C, et al. Multi-sensor fusion methodology for enhanced land vehicle positioning[J]. Information Fusion, 2019, 46: 51-62.
- [25] PAGE M, WICKRAMARATHNE T L. Enhanced situational awareness with signals of opportunity: RSS-based localization and tracking[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 3833-3838.
- [26] 左云龙, 张晓锋, 朱天高, 等. 基于滤波平滑的迭代无迹卡尔曼滤波算法[J]. 海军工程大学学报, 2024, 36(5): 106-112.
ZUO Y L, ZHANG X F, ZHU T G, et al. Iterated unscented Kalman filter algorithm based on filter smoothing[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2024, 36(5): 106-112.

[作者简介]



马二顺(1975-), 男, 广东省公路建设有限公司深中通道管理中心高级工程师, 主要研究方向为高速公路交通工程建设管理。



童威(1997-), 男, 广东省公路建设有限公司深中通道管理中心助理工程师, 主要研究方向为高速公路交通工程营运。