

文章编号:1007-5321(2021)02-0116-08

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-191

多径信号辅助的网联车辆无线协作定位

初星河, 路兆铭, 王鲁晗, 武穆清, 温向明

(1. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 先进信息网络北京实验室, 北京 100876)

摘要: 为解决全球定位系统(GPS)和北斗卫星导航系统(BDS)等传统定位方式在信号被遮挡的区域定位范围受限以及精度不足的问题,基于第5代移动通信系统和车联网技术提出了一种多径信号辅助的网联车辆无线协作定位方法. 首先将车联网中接收端与发射端之间多径信号成分携带的定位信息提取成多径定位线段,并基于最小二乘法估计出接收端与发射端之间的相对位置;然后基于置信传播算法,将相对位置信息以及部分覆盖的GPS/BDS信息进行协作融合,得出整个车联网中各个车辆的位置. 仿真结果表明,在不同的车辆密度和GPS/BDS可用概率下,新算法能提升网联车辆的定位精度,有效解决车辆GPS/BDS覆盖不充分的问题,为网联车辆提供高精度的定位.

关 键 词: 网联车辆; 多径信号; 信号定位; 置信传播; 协作定位

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

Multi-Path Assisted Cooperative Radio-Based Localization for Connected Vehicles

CHU Xing-he, LU Zhao-ming, WANG Lu-han, WU Mu-qing, WEN Xiang-ming

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Beijing Laboratory of Advanced Information Networks, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to solve the less-accuracy and insufficient-coverage problem of the traditional localization methods like global positioning system (GPS) and BeiDou navigation satellite system (BDS) in the areas where the signals are blocked, a multi-path assisted cooperative radio-based localization method is proposed for connected vehicles based on the fifth generation of mobile communications system and vehicle to everything. In detail, the localization information carried by multi-path components from the transmitter to the receiver in vehicle network is modeled into multi-path positioning segments, thus their relative position is calculated based on least squared algorithm. Then a belief propagation based algorithm is presented to calculate the position of each vehicle by fusing the relative positioning information and the partial covered GPS/BDS information. Simulations show that the algorithm can improve the localization accuracy over different vehicle densities and different GPS/BDS available probabilities, which further indicates that the algorithm can solve the GPS/BDS insufficient-coverage problem so as to provide high-accuracy localization for connected vehicles.

Key words: connected vehicle; multi-path; radio-localization; belief propagation; cooperative localization

收稿日期: 2020-10-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61801047)

作者简介: 初星河(1996—), 男, 博士生.

通信作者: 路兆铭(1986—), 男, 副教授, E-mail: lzy0372@bupt.edu.cn.

随着网联自动驾驶技术的兴起,定位技术在辅助感知、路径规划和车辆控制等方面扮演着非常重要的角色^[1-2]。现阶段获取车辆位置最常用的方式是基于卫星的定位服务,如全球定位系统(GPS, global positioning system)和北斗卫星导航系统(BDS, Beidou navigation satellite system)等。就GPS来说,主要包括差分GPS(D-GPS, differential GPS)和实时动态GPS(RTK-GPS, real-time kinematic GPS)等在GPS定位系统的基础上利用基准站校正GPS信号伪距、载波相位等误差的定位方式。GPS/BDS等基于卫星的定位方式能够直接提供车辆的绝对位置,但是当GPS/BDS信号被建筑物或其他障碍物遮挡时,就会发生定位信息缺失的情况,尤其是在城市隧道等GPS/BDS信号受到严重挑战的环境中,将会产生超过10 m的定位误差,这是当前GPS/BDS定位技术的最大隐患^[3]。

针对上述问题,在解决无GPS/BDS时的定位问题上,第5代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)以及基于5G的车联网技术(V2X, vehicle to everything)的普及^[4-7]为终端的定位和追踪提供了新的契机。无线定位主要基于对距离和角度的估计,如到达角(AoA, angle of arrival)、离开角(AoD, angle of departure)和到达时间(ToA, time of arrival)等。相比于长期演进技术(LTE, long term evolution),5G引入了更大的带宽,大大缩短了时间单元的长度^[8],提高了5G对时间估计的分辨率,从而提高了定位的精度^[9]。同时,毫米波多输入多输出系统(mmWave MIMO, millimeter-wave multiple input and multiple output)的引入也将带来更高的角度分辨率,在提高定位精度的同时,也为ToA, AoA以及AoD等参数的联合估计提供了可能^[10-11]。然而,传统的无线定位方法常常将多径信号当成噪声或者干扰来消除其对直射径定位的影响^[12-14],不能充分地利用多径信号携带的信息,使精度受到影响。因此,基于多径信号的反射特性,将多径信号携带的定位信息映射成多径定位线段,并利用最小二乘法(LS, least square)算法估计出接收端相对于发射端的位置,提高无线定位的准确度。

在计算整个网络中车辆的位置问题上,无论是节点与节点之间(车辆节点之间和车辆节点与基站节点之间)的相对位置信息,还是部分节点能够获取到的GPS/BDS定位信息,都存在一定的误差。因此,如何利用上述定位信息计算出整个网络中各节

点的位置,是提高定位准确度的关键。为解决以上问题,实现节点之间的协作定位,采用了置信传播^[15-17]的方法。该方法基于马尔可夫场,通过迭代的方法,将车辆与车辆、车辆与基站之间的相对位置信息以及部分覆盖的GPS/BDS位置信息通过置信度的方式在节点之间传播,从而计算出整个网络中各车辆节点位置的边缘概率分布,将部分覆盖的GPS/BDS位置信息与5G定位信息融合,实现整个网络的协作定位,为网络中的每个车辆提供稳定的高精度定位服务。

综上,为解决部分网联车辆GPS/BDS信号被遮挡时的高精度定位问题,首先基于LS算法计算发射端与接收端之间的相对位置;然后利用置信传播算法为车辆定位。创新之处在于:①充分利用了5G无线传输过程中的多径信号成分,通过将其转化为多径定位线段,从中提取更多的定位信息,以更准确地确定节点之间的相对位置;②将从5G信号中获取的相对位置信息与不完全覆盖的GPS/BDS定位信息进行置信融合,从而确定整个网络中各个节点位置的概率分布函数,实现高精度协作定位。仿真结果表明,该方法能在GPS/BDS覆盖不足时有效提高网联车辆的定位精度。

1 系统模型

1.1 节点及收发模型

在车联网中,任意时隙(t)、车辆和基站都被建模成节点,节点的集合为 $\Omega_t, \Omega_t = \{1, 2, \dots, N_t\}$,其中,节点1为基站,节点 $2, \dots, N_t$ 表示车辆节点,如图1所示。

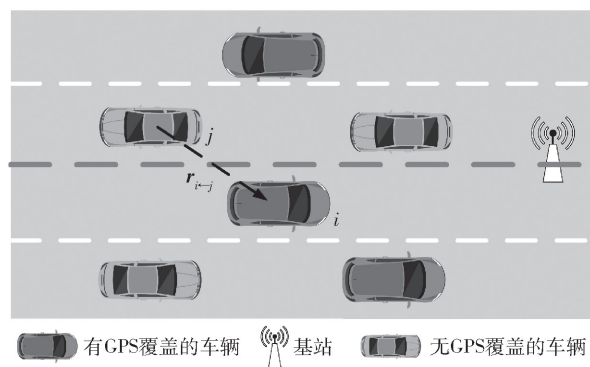


图1 车辆节点图

定位信息来自于:①5G信号相对位置测量;②部分覆盖的GPS/BDS定位信息。对于5G信号相对位置的测量, N_t 个节点会作为发射端广播各自

的定位参考信号,也会作为接收端接收来自其他节点的定位参考信号. 对于接收到的来自其他节点的定位参考信号,各个节点可以从中估计出相应的多径信号参数,包括 ToA, AoA 和 AoD; 对于部分覆盖的 GPS/BDS 定位信息,由于 GPS/BDS 的原理类似,其定位信息都会因遮挡而缺失,故以 GPS 定位为例,引入 GPS 可用概率 ξ 对这种缺失的情况进行建模.

1.2 观测模型

1.2.1 信号观测模型

在每个时隙 t , 网络中的节点可以发送定位参考信号 (PRS, positioning reference signal) 并接收来自其他节点的定位参考信号,周期性地发送定位参考信号,且在车辆接入基站小区时基于 V2X 开始与其他节点进行通信.

定位参考信号由 N_B 个波束组成,发送信息为

$$\hat{\mathbf{s}}(t) = [\hat{s}_1(t), \hat{s}_2(t), \dots, \hat{s}_{N_B}(t)]^T$$

预编码器为

$$\mathbf{F}(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_{N_B}(t)]$$

则预编码后生成的发送信号^[18]为

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{F}(t)\hat{\mathbf{s}}(t) \quad (1)$$

由于 5G 信号在无线信道中具有较强的路损和较强的方向性^[19],故假设信道中的非直射径成分由单次反射产生. 因此,接收端在每个时隙的接收信号可表示为^[20]

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{p=0}^{P_t} h_p(t) \boldsymbol{\alpha}_r[\theta_p(t)] \times \boldsymbol{\alpha}_t[\varphi_p(t)] \mathbf{s}[t_k - \tau_p(t)] + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{r}(t)$ 为 t 时刻的接收信号; $h_p(t)$ 为多径 p 在 t 时刻的信道系数; $\boldsymbol{\alpha}_r$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_t$ 分别为接收端和发射端的阵列响应矩阵; 多径 p 的到达时间、到达角度和离开角分别用 $\tau_p(t)$, $\theta_p(t)$ 和 $\varphi_p(t)$ 表示; P_t 为 t 时刻的多径数目; $\mathbf{n}(t)$ 为信道噪声.

通过相关运算可得到达时间 ToA 的估计,通过基于特征空间的算法可得 AoA 和 AoD 的估计^[21]. 假设 5G 基站与车辆之间、车辆与车辆之间的定位参数估计具有相同的误差分布,用 $\mathbf{Z}_{i-j}(t)$ 表示 t 时刻节点 j 发送给节点 i 的无线信号测量值 (为方便表示,下文省去时间变量),有

$$\mathbf{Z}_{i-j} = \{\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_p, \dots, \mathbf{z}_{P_t}\} \\ \mathbf{z}_p = \{\hat{d}_p, \hat{\theta}_p, \hat{\varphi}_p\} \quad (3)$$

其中: \mathbf{z}_p 为对于第 p 条多径的测量值, \hat{d}_p , $\hat{\theta}_p$, $\hat{\varphi}_p$ 分别

表示对第 p 条多径到达距离、到达角和离开角的观测值. 对于车辆定位考虑 3D 模型,有

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_p = (\hat{\theta}_p^\alpha, \hat{\theta}_p^\beta) \quad (4)$$

其中 $\hat{\theta}_p^\alpha, \hat{\theta}_p^\beta$ 分别为到达角的方位角和仰角. 同理,有

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_p = (\hat{\varphi}_p^\alpha, \hat{\varphi}_p^\beta) \quad (5)$$

假设各条路径之间的测量相互独立,每条路径中 ToA, AoA 以及 AoD 的测量相互独立且其误差服从高斯分布^[18],则

$$\hat{d} = d + n_d, \quad \hat{\vartheta} = \vartheta + n_\vartheta \quad (6)$$

其中: 角度测量值 $\vartheta = \{\theta_p^\alpha, \theta_p^\beta, \varphi_p^\alpha, \varphi_p^\beta\}$, d 为距离测量值,则有

$$n_d \sim \text{CN}(0, \sigma_d^2), \quad n_\vartheta \sim \text{CN}(0, \sigma_\vartheta^2) \quad (7)$$

1.2.2 GPS 观测模型

在每个时隙 t , 由于建筑物的遮挡等因素,基站覆盖下的车辆会由于地理环境的不同,存在一定程度上 GPS 定位信息缺失的情况. 为了对这种 GPS 缺失的情况进行建模,假设每个节点的 GPS 可用概率为 ξ [每个节点的 GPS 有 $(1 - \xi)$ 的概率不可用], 以探究算法在不同 GPS 可用概率下的表现. GPS 信息的观测模型^[22]可简单表示为

$$f_i(\mathbf{y}_i^{\text{gps}}(\xi) | \mathbf{x}_i) = \begin{cases} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{\text{gps}}, & \text{rand}(0, 1) \leq \xi \\ 1, & \text{rand}(0, 1) > \xi \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{y}_i^{\text{gps}}(\xi)$ 为对节点 i 的 GPS 估计, $\text{rand}(0, 1)$ 为随机生成的 $(0, 1)$ 之间的随机数. 当 $\text{rand}(0, 1) \leq \xi$ 时, GPS 可用, \mathbf{x}_i 为节点 i 的真实位置, \mathbf{n}_{gps} 为 GPS 的定位误差; 当 $\text{rand}(0, 1) > \xi$ 时, GPS 不可用, 此时 $f_i(\mathbf{y}_i^{\text{gps}}(\xi) | \mathbf{x}_i) = 1$, 不携带任何信息.

$$\mathbf{n}_{\text{gps}} = \mathbf{e}_{\text{rand}} n_{\text{gps}}, \quad n_{\text{gps}} \sim \text{CN}(0, \sigma_{\text{gps}}^2) \quad (9)$$

其中: n_{gps} 为 GPS 定位的距离误差; n_{gps} 服从均值为 0, 方差为 σ_{gps}^2 的高斯分布; \mathbf{e}_{rand} 为随机三维单位向量. 假设 GPS 的定位误差不具有方向性, 其方位角和仰角分别服从 $(0, 2\pi)$ 和 $(-\pi/2, \pi/2)$ 之间的均匀分布.

2 多径信号辅助相对定位

2.1 多径信号的信息量

接收端接收到来自发送端的信号中, 每条多径都会对接收端与发送端之间的相对位置测量提供一定的信息, 因此, 引入多径定位线段来建模多径信号携带的定位信息, 以计算节点之间的相对位置.

如图 2 所示, 在时隙 t , 对于从节点 j 发送给节

点 i 的信号 $\mathbf{Z}_{i \leftarrow j}(t)$ 中的某一条多径 z_p 来说,有

$$\hat{\mathbf{P}}_a = \hat{d}_p \text{vec}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_p), \quad \hat{\mathbf{P}}_d = \hat{d}_p \text{vec}(\hat{\boldsymbol{\phi}}_p) \quad (10)$$

其中 $\text{vec}(\boldsymbol{\theta})$ 为 $\boldsymbol{\theta}$ 方向的单位向量,有

$$\text{vec}(\boldsymbol{\theta}) = (\cos \hat{\theta}^\alpha \sin \hat{\theta}^\beta, \sin \hat{\theta}^\alpha \sin \hat{\theta}^\beta, \cos \hat{\theta}^\beta)$$

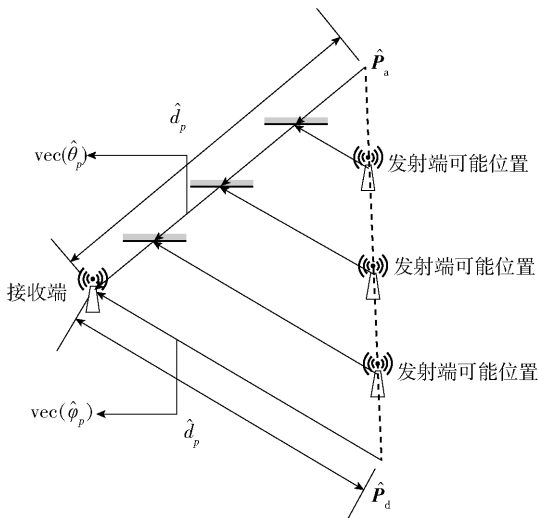


图2 多径定位线段

$\hat{\mathbf{P}}_a$ 为到达角观测锚点,表示信号从发送端沿到达角方向延伸 \hat{d}_p 距离所到达的点. $\hat{\mathbf{P}}_d$ 为离开角观测锚点,表示信号从发送端沿离开角方向延伸 \hat{d}_p 距离所到达的点. 由几何证明可知,发射端的位置位于 $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 连线的线段上. 特别地,当多径信号是直射径时, $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 重合.

因此,对于第 P 路多径信号来说,在接收端与发射端相对位置的估计上,其提供的信息为:发射端位于 $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 相连的线段上,定义 $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 相连的线段为多径定位线段 $s_p, s_p = \overline{\mathbf{P}_a \mathbf{P}_d}$.

在每个时隙 t , 对于观测集合 $\mathbf{Z}_{i \leftarrow j} = \{z_1, \dots, z_p, \dots, z_N\}$ 来说,有多径定位线段集合 $\mathbf{S}_{i \leftarrow j} = \{s_1, \dots, s_p, \dots, s_N\}$ 与之对应, s_p 表示第 p 条多径定位线段.

2.2 相对位置估计

2.2.1 直射信号分离

在实际情况中,由于基于信号的距离和角度估计存在误差,对于直射径来说, $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 不会发生重叠,而二者的位置偏移是由于距离和角度估计不准确造成的误差,并没有为相对位置的估计提供信息,因此需要将直射信号分离.

$$I_{\text{los}} = \begin{cases} 1, & \|\hat{\mathbf{P}}_a - \hat{\mathbf{P}}_d\| \leq \kappa \\ 0, & \|\hat{\mathbf{P}}_a - \hat{\mathbf{P}}_d\| > \kappa \end{cases} \quad (11)$$

其中: κ 为误差临界常数,用于区分 $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 的误差偏移和非直射偏移.

2.2.2 提取定位信息

1) 对于直射径来说, $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 在理论上重合,因此,在时隙 t , 节点 j 到节点 i 的直射径提供的定位信息为一个点,有

$$\mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}} = \mathbf{r}^{\text{los}} = (\hat{\mathbf{P}}_a + \hat{\mathbf{P}}_d)/2 \quad (12)$$

2) 对于每一条非直射径来说,其提供的定位信息为多径定位线段 s_p , $\hat{\mathbf{P}}_a$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d$ 分别是 s_p 的 2 个端点. 因此,在时隙 t , 节点 j 到节点 i 的非直射径提供的定位信息为

$$\mathbf{S}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} = \{s_1, \dots, s_p, \dots, s_{N_{\text{nlos}}}\} \quad (13)$$

2.2.3 相对位置计算

节点 j 到节点 i 的相对位置矢量 $\mathbf{r}_{i \leftarrow j}$ (见图1) 为

$$\mathbf{r}_{i \leftarrow j} = \arg \min_{\mathbf{r}_{i \leftarrow j}} \sum_p \xi_p^2(\mathbf{r}_{i \leftarrow j}) + \|\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}}\|^2 \quad (14)$$

其中: $\xi_p(\mathbf{r}_{i \leftarrow j})$ 为 $\mathbf{r}_{i \leftarrow j}$ 到线段 s_p 所在直线的距离,若节点 j 到节点 i 不存在直射径, $\|\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}}\| = 0$.

用 $\mathbf{e}_p = (e_p^x, e_p^y, e_p^z)^T$ 表示线段 s_p 所在直线的方向向量, $\hat{\mathbf{P}}_a^p$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_d^p$ 分别为由非直射径 p 求得的到达角观测锚点和离开角观测锚点,则 $\xi_p(\mathbf{r}_{i \leftarrow j})$ 为

$$\xi_p(\mathbf{r}_{i \leftarrow j}) = \|\mathbf{e}_p(\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \hat{\mathbf{P}}_a^p)\| = \|\boldsymbol{\varepsilon}_p(\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \hat{\mathbf{P}}_a^p)\| \quad (15)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}_p = \begin{pmatrix} 0 & -e_p^z & e_p^y \\ e_p^z & 0 & -e_p^x \\ -e_p^y & e_p^x & 0 \end{pmatrix}$ 为 \mathbf{e}_p 的叉积矩阵. 因此,式(14)中的非直射径成分为

$$\sum_p \xi_p^2(\mathbf{r}_{i \leftarrow j}) = (\mathbf{E}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} \mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{b}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}})^T (\mathbf{E}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} \mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{b}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}}) \quad (16)$$

其中 $\mathbf{E}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}}$ 和 $\mathbf{b}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}}$ 定义为

$$\mathbf{E}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} = [\boldsymbol{\varepsilon}_1^T, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_p^T, \dots]^T$$

$$\mathbf{b}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} = [(\boldsymbol{\varepsilon}_1^T \hat{\mathbf{P}}_a^1)^T, \dots, (\boldsymbol{\varepsilon}_p^T \hat{\mathbf{P}}_a^p)^T, \dots]^T \quad (17)$$

式(14)中的直射径成分为

$$\|\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}}\|^2 = (\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}})^T (\mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}}) \quad (18)$$

因此,节点 j 到 i 的相对位置矢量 $\mathbf{r}_{i \leftarrow j}$ 为

$$\mathbf{r}_{i \leftarrow j} = \arg \min_{\mathbf{r}_{i \leftarrow j}} \{ (\mathbf{E}_{i \leftarrow j} \mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{b}_{i \leftarrow j})^T (\mathbf{E}_{i \leftarrow j} \mathbf{r}_{i \leftarrow j} - \mathbf{b}_{i \leftarrow j}) \} \quad (19)$$

当直射径与非直射径都存在时,有

$$\mathbf{E}_{i \leftarrow j} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} \\ \mathbf{I}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_{i \leftarrow j} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{i \leftarrow j}^{\text{nlos}} \\ \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

当仅存在非直射径时,有

$$\mathbf{E}_{i \leftarrow j} = \mathbf{E}_{i \leftarrow j}^{\text{nlol}}, \mathbf{b}_{i \leftarrow j} = \mathbf{b}_{i \leftarrow j}^{\text{nlol}} \quad (21)$$

当仅存在直射径时,有

$$\mathbf{E}_{i \leftarrow j} = \mathbf{I}_3, \mathbf{b}_{i \leftarrow j} = \mathbf{v}_{i \leftarrow j}^{\text{los}} \quad (22)$$

最终可求得相对位置的矢量为

$$\mathbf{r}_{i \leftarrow j} = (\mathbf{E}_{i \leftarrow j}^T \mathbf{E}_{i \leftarrow j})^{-1} \mathbf{E}_{i \leftarrow j}^T \mathbf{b}_{i \leftarrow j} \quad (23)$$

因此,对于网络中的节点 i 来说,设能为其提供相对位置测量的节点集合为

$$\Gamma(i) = \{j | \mathbf{r}_{i \leftarrow j} \neq \phi\} \quad (24)$$

则可以计算出其相对位置的测量矢量集为

$$\mathbf{R}_i = \{\mathbf{r}_{i \leftarrow j} | j \in \Gamma(i)\} \quad (25)$$

由式(14)~式(25)可知,多径数目越多,其对于节点之间相对位置矢量 $\mathbf{r}_{i \leftarrow j}$ 的约束就越大,因此,相对位置矢量 $\mathbf{r}_{i \leftarrow j}$ 的估计结果就越准确。

3 基于置信传播的协作定位

3.1 置信传播算法

置信传播算法可以融合节点的相对位置测量结果 $\{\mathbf{R}_i\}$ 和部分存在的 GPS 观测值 $\{\mathbf{y}_i^{\text{GPS}}(\xi)\}$, 得到网络中各个车辆节点的位置。具体地,置信传播算法^[15-16]以迭代的方式,通过节点与节点之间的消息传递,将节点的概率分布状态传递给相邻的节点,更新当前整个马尔可夫随机场的标记状态,从而计算出各个节点相对于随机场所有观测的条件概率密度 $p(x_s | y)$, 是一种基于马尔可夫随机场的具有收敛性的近似计算^[23]。

在置信传播算法的第 n 次迭代中,每一个节点 u 都可以计算出传递给其相邻节点 v 的消息,记作 $m_{uv}^n(x_v)$, 有

$$m_{uv}^n(x_v) = \alpha \int \psi_{uv}(x_u, x_v) \mu_u(x_u, y_u) \times \prod_{k \in \Gamma(u) \setminus v} m_{ku}^{n-1}(x_u) dx_u \quad (26)$$

其中: λ 为归一化常数, $v \in \Gamma(u)$, $\psi_{uv}(x_u, x_v)$ 为相邻节点之间的势能量, $\mu_v(x_v, y_v)$ 为节点状态值与观测值之间的似然函数,第 n 次迭代的估计结果^[16]为

$$\hat{p}^n(x_v | y) = \eta \mu(x_v, y_v) \prod_{u \in \Gamma(v)} m_{uv}^n(x_v) \quad (27)$$

其中 β 为归一化常数。

3.2 置信传播算法在协作定位中的实施

车联网中的定位结构如图3所示,节点与节点之间的势能量用其相对位置矢量表示为

$$\psi_{uv}(x_u, x_v) = \mathbf{r}_{v \leftarrow u} \quad (28)$$

节点状态值与观测值之间的似然函数由其 GPS

的条件观测概率表示为

$$\mu_v(x_v, y_v) = f_v(\mathbf{y}_v^{\text{GPS}}(\xi) | \mathbf{x}_i) \quad (29)$$

节点1和节点5有GPS信号覆盖, $\mu_v(x_v, y_v) = f_v(\mathbf{y}_v^{\text{GPS}} | \mathbf{x}_v)$, 如图3所示。

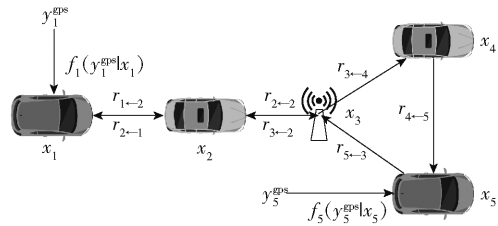


图3 网联定位中的置信传播概率图

节点2、3、4没有GPS信号覆盖, $\mu_v(x_v, y_v) = \delta(x_v)$ 。

基于置信传播的网联车辆协作信号定位算法置信传播部分如算法1所示,其中, ζ 为迭代限制常数,仿真验证中, $\zeta = 0.01$ 。

3.3 复杂度分析

由文献[24],置信传播算法单次迭代的复杂度为 $O(d^2)$, 其中 d 为状态数。故置信传播算法的复杂度为 $O(nM^2)$, 其中 n 为迭代次数 ($n_{\max} = 10$), M 为节点数目。

算法1 基于置信传播的协作定位

初始化: $m_{v \leftarrow u}^0(x_v) = \delta(x_v), u, v \in \{1, 2, \dots, N\}$

输入: 各个节点的GPS观测信息 $f_i(\mathbf{y}_i^{\text{GPS}}(\xi) | \mathbf{x}_i), i \in \Omega_i$, 各个节点之间的相对位置矢量 $\mathbf{R}_i, i \in \Omega_i$

输出: 各个节点的条件概率密度 $\hat{p}^n(x_i | y), i \in \Omega_i$

1 for 迭代次数 $k = 1, 2, \dots, N_{\text{iter}}$

2 for 节点 $i \in \Omega_i$

3 for 节点 $j \in \Gamma(i)$

4 计算节点 j 传递给节点 i 的信息

$$m_{i \leftarrow j}^k(x_i) = \lambda \int \mathbf{r}_{i \leftarrow j} f_j(\mathbf{y}_j^{\text{GPS}}(\xi) | \mathbf{x}_j) \times$$

$$\prod_{k \in \Gamma(j) \setminus i} m_{jk}^{k-1}(x_j) dx_j$$

5 end

6 计算节点 i 的条件概率密度

$$\hat{p}^k(x_i | y) = \eta f_i(\mathbf{y}_i^{\text{GPS}}(\xi) | \mathbf{x}_i)$$

$$\prod_{j \in \Gamma(i)} m_{i \leftarrow j}^k(x_j)$$

$$\hat{x}_i^k = \int \mathbf{x}_i \hat{p}^k(x_i | y) dx_i$$

7 end

8 if $\forall i \in \Omega_i, \|\hat{x}_i^k - \hat{x}_i^{k-1}\| \leq \zeta$

9 break
10 end

4 仿真结果

为了探究算法的可靠性,对多径信号辅助的网联车辆协作定位算法进行了仿真验证. 图 4 所示为车辆节点数为 20, GPS 的可用概率 $\xi = 0.5$ 时,仿真场景中车辆、反射体(包括建筑物和其他车辆)和基站的布局. 其中,灰色矩形表示道路旁的建筑物,20 辆车和 1 个基站分布在长度为 100 m ($x \in [0, 100]$),宽度为 40 m 的道路上. 图 4 中实线($y = 0$)下方的矩形表示沿 $+x$ 方向行驶的车辆,实线上方的矩形表示沿 $-x$ 方向行驶的车辆,黑色矩形表示有 GPS 信号的车辆,白色矩形表示没有 GPS 信号的车辆,灰色方框表示基站,其中基站高度为 15 m,车辆高度为 1 m. 车辆的初始速度均为 10 m/s. 为了体现车辆移动速度差对定位结果的影响,仿真中每辆车的运动状态为匀加速运动,加速度服从 $[0, 2 \text{ m/s}^2]$ 的均匀分布.

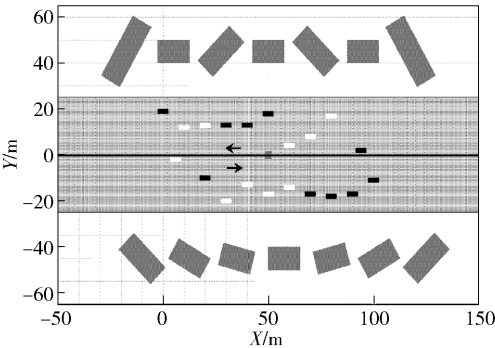


图 4 车辆节点布局

仿真中, GPS 定位误差服从高斯分布,其标准差 $\sigma_{\text{gps}} = 3 \text{ m}$,信号距离测量误差的标准差 $\sigma_d = 2 \text{ m}$,信号角度测量的标准差 $\sigma_\theta = 1 \text{ deg}$ (对于方位角和仰角). 仿真数据来自于对车辆连续 200 个时隙的定位结果,时隙间隔为 0.2 s.

定位误差采用平均绝对误差来衡量,仿真中分别对 LOS + GPS, LOS + NLOS + GPS 以及所提算法进行了结果分析. 其中, LOS + GPS 与 LOS + NLOS + GPS 为对比算法, LOS + GPS 是指在仅使用一定覆盖率的 GPS 定位信息和 5G 信号传播过程中从直射径提取的定位信息时,使用 LS 算法计算的车辆定位平均绝对误差; LOS + NLOS + GPS 是指使用一定覆盖率的 GPS 定位信息和 5G 信号传播过程中从直射径与反射径中提取的定位信息,而没有使

用协作算法时,使用 LS 算法计算车辆定位的平均绝对误差.

图 5 所示为车辆节点密度和定位误差的关系,示出了 GPS 信号可用概率 $\xi = 0.85$ 的情况下,车辆数为 6 ~ 30 时的误差分布情况. 定义每 100 m 的车辆数目为车辆节点密度,因此,车辆节点密度 $\rho_v = 6, 8, 12, 16, 20, 30 \text{ vehicle/100 m}$.

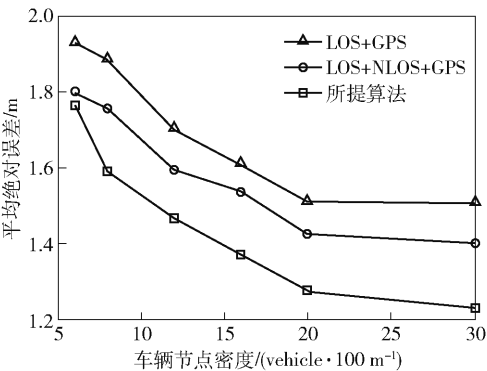


图 5 $\xi = 0.85$ 时定位误差与车辆密度关系

图 6 所示为定位误差和 GPS 可用概率的关系. 出于车辆节点密度的一般性考虑,图 6 示出了车辆密度为 $\rho_v = 12 \text{ vehicle/100 m}$ 时的误差分布.

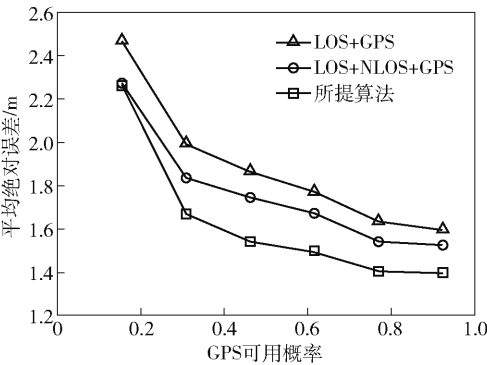


图 6 $\rho_v = 12$ 时定位误差与 GPS 可用概率的关系

从图 6 中 LOS + GPS 与 LOS + NLOS + GPS 的结果对比可知,利用多径信号携带的定位信息能够减小定位误差,说明基于多径定位线段的多径信号相对位置测量算法能够有效地从发射端与接收端之间的多径信号中提取更多的定位信息,提升定位的精度;从 LOS + NLOS + GPS 与所提算法的对比可知,多节点协作的定位能够进一步提升定位精度,说明基于置信传播的多节点协作定位算法能够有效地对多车的定位信息进行融合,提升定位的准确性. 特别地,当车辆处于隧道或连续高楼遮挡环境中,可能会出现大量车辆 GPS 信号缺失的情况,如在 GPS 可

用概率 $\xi = 0.1$ 的情况下,由于 LOS + NLOS + GPS 的情况蕴含了多径信号携带的定位信息,所以其性能优于 LOS + GPS,然而在 LOS + NLOS + GPS 与所提算法的对比中,由于具有 GPS 定位信息的车辆极少,基于置信传播的协作算法无法将足够的含有绝对位置信息的 GPS 定位信息通过 5G 信号的相对位置测量传递给网络中的所有车辆,此时所提算法只是略优于 LOS + NLOS + GPS. 在这种情况下,该算法依然能够很好地提取 5G 多径信号携带的定位信息,以提高定位精度. 但由于网络中的 GPS 信息很有限,不能很好地体现传递 GPS 定位信息的能力.

从图 5 和图 6 可以看出,随着车辆密度和 GPS 可用概率的增大,定位的误差逐步减小. 这是因为车辆数目的增多与 GPS 可用概率的提高为协作定位算法输入了更多的定位信息,使得定位精度得以提升. 同时,也进一步说明了多径信号辅助的网联车辆系统定位算法能够不断地从多径信号中提取定位信息,并有效地融合整个网络中的定位信息,为每一个车辆提供更高精度的定位信息,从而在提升车辆定位精度的同时,解决了网络中部分车辆 GPS 信号受阻而无法完成定位的问题.

5 结束语

为解决车联网中部分车辆 GPS 信号被遮挡时的高精度定位问题,通过构建多径定位线段提取 5G 无线多径信号携带的定位信息,求得节点之间的相对位置,并基于置信传播算法融合部分覆盖的 GPS 定位信息,计算出车辆节点的位置. 在此基础上,未来将基于克拉美罗极限理论探究车联网中协作定位的理论极限精度,研究定位信息与网络整体定位精度极限的定量关系,从理论的角度证明算法的可行性,并为设计车联网中的协作融合定位算法提供理论依据和参考.

参考文献:

- [1] Sampo Kuutti, Saber Fallah, Konstantinos Katsaros, et al. A survey of the state-of-the-art localization techniques and their potentials for autonomous vehicle applications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 829-846.
- [2] 中国移动发布 5G + 高精定位系统推进 5G 自动驾驶行业发展[J]. 中国有线电视, 2020(11): 1314.
- [3] Groves P D, Jiang Z, Height A. C/N_0 weighting and consistency checking for GNSS NLOS and multipath mitigation in urban areas [J]. The Journal of Navigation, 2013, 66(5): 653-669.
- [4] Navarro-Ortiz J, Romero-Diaz P, Sendra S, et al. A survey on 5G usage scenarios and traffic models [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2020, 22(2): 905-929.
- [5] Chen S, Hu J, Shi Y, et al. Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G [J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(2): 70-76.
- [6] 王天军, 叶则南, 曾繁俊, 等. 5G 通讯技术在 V2X 中的应用 [J]. 汽车实用技术, 2020, 45(23): 20-22.
- [7] 董朔朔, 刘留, 樊圆圆, 等. 车联网信道特性综述 [J/OL]. 电波科学学报, 2020: 1-20 [2021-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1185.TN.20201215.1702.001.html>.
- [8] 3GPP. Technical specification: TS 38.211 V15.7.0—2019 [S/OL]. Valbonne: 3GPP Organization, 2019 [2021-03-14]. https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/38_series/38.211/38211-f70.zip.
- [9] Wymeersch H, Garcia N, Kim H, et al. 5G mm wave downlink vehicular positioning [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi: IEEE Press, 2018: 206-212.
- [10] Shahmansoori A, Garcia G E, Destino G, et al. 5G position and orientation estimation through millimeter wave MIMO [C] // 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). San Diego: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [11] Shahmansoori A, Garcia G E, Destino G, et al. Position and orientation estimation through millimeter-wave MIMO in 5G systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 17(3): 1822-1835.
- [12] Mingyang S, Xiaofeng T, Yongtai X, et al. A distributed multi-antenna based NLOS error elimination algorithm for mobile localization [C] // 2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. Shanghai: IEEE Press, 2008: 411-415.
- [13] Horiba M, Okamoto E, Shinohara T, et al. An accurate indoor-localization scheme with NLOS detection and elimination exploiting stochastic characteristics [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 98(9): 1758-1767.
- [14] Jiao L, Li F Y, Xu Z. LCRT: a TOA based mobile terminal localization algorithm in NLOS environment [C] //

- VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona: IEEE Press, 2009: 1-5.
- [15] Yedidia J S, Freeman W T, Weiss Y. Understanding belief propagation and its generalizations[J]. *Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium*, 2003, 8: 236-239.
- [16] Sudderth E B, Ihler A T, Isard M, et al. Nonparametric belief propagation[J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(10): 95-103.
- [17] 张丹丹, 王晓峰, 冯琬晶, 等. 一种求解 0-1 背包问题的置信传播算法[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2021, 53(1): 29-34.
- Zhang Dandan, Wang Xiaofeng, Feng Wanjing, et al. A belief propagation algorithm for solving 0-1 knapsack problem[J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 53(1): 29-34.
- [18] Mendrzik R, Meyer F, Bauch G, et al. Enabling situational awareness in millimeter wave massive MIMO systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(5): 1196-1211.
- [19] Deng H, Sayeed A. mm-wave MIMO channel modeling and user localization using sparse beamspace signatures[C]//2014 IEEE 15th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Toronto: IEEE Press, 2014: 130-134.
- [20] Heath R W, Gonzalez-Prelcic N, Rangan S, et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 10(3): 436-453.
- [21] Han K, Ko S W, Chae H, et al. Hidden vehicle sensing via asynchronous V2V transmission: a multi-path-geometry approach[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 169399-169416.
- [22] Ahmad K A B, Sahmoudi M, Macabiau C. Characterization of GNSS receiver position errors for user integrity monitoring in urban environments[C]//2014 European Navigation Conference (ENC-GNSS 2014). Rotterdam: European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2014: 1-15.
- [23] Murphy K, Weiss Y, Jordan M I. Loopy belief propagation for approximate inference: an empirical study[EB/OL]. 2013 (2013-01-23) [2021-03-14]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1301/1301.6725.pdf>.
- [24] Noorshams N, Wainwright M J. Stochastic belief propagation: a low-complexity alternative to the sum-product algorithm[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 59(4): 1981-2000.