



基于反向散射通信的车辆精准定位技术

韩凯峰, 刘铁志

(中国信息通信研究院政策与经济研究所, 北京 100191)

摘要: 高精度车辆定位是自动驾驶、车联网中的关键技术环节, 其中一个研究热点和难点是如何在高密度城市、隧道、地下车库等无法获取 GPS 或蜂窝网基站定位信号的区域实现低成本、高可靠的车辆精准定位。对此, 创新性地提出了一种基于反向散射通信的车辆精准定位技术 (即 “BackCom 车辆定位技术”), 其仅须在车辆顶端安装一个包含 2 根天线的定位阅读器以及在道路边部署至少一个定位标签, 便可实现高精度车辆定位。经仿真验证, BackCom 车辆定位技术可以取得极高的定位精度。同时, BackCom 车辆定位技术极易扩展, 通过增加其定位阅读器中的天线数量, 可进一步提升其定位精度。BackCom 车辆定位技术具备低成本、低功耗、高精度、高可靠、部署方便等优点, 适用于各种行车环境, 具备极高的理论研究价值和商用价值。

关键词: 车辆定位技术; 反向散射通信; 车联网及自动驾驶; 物联网技术; 信号波形设计及处理

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020160

Backscatter communication assisted vehicular positioning technology with ultra-high accuracy

HAN Kaifeng, LIU Tiezhi

Institute of Policy and Economics Research, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

Abstract: The accurate vehicular positioning technology has been the fundamental function for safer auto-driving and vehicular-to-everything networks. One research trend focuses on enabling the low-cost, reliable, and accurate vehicular positioning in high-density cities, tunnels, and underground where the GPS or cellular positioning can't work due to the signaling blocking. To this end, a novel backscatter communication assisted vehicular positioning system was proposed where a backscatter-reader (with two antennas) was deployed on vehicle and at least one backscatter-tag is deployed along a roadside, based on which the location of vehicle could be estimated with ultra-high reliability and accuracy. Through simulation verification, BackCom vehicle positioning technology can achieve extremely high positioning accuracy. At the same time, BackCom's vehicle positioning technology is very easy to expand. By increasing the number of antennas in its positioning reader, it could further improve its positioning accuracy. BackCom vehicle positioning technology has the advantages of low cost, low power consumption, high accuracy, high reliability, and easy deployment. It is suitable for various driving environments and has extremely high theoretical research value and commercial value.

Key words: vehicular positioning technology, backscatter communication, vehicular-to-everything and autonomous driving, internet-of-things technology, waveform design and signal processing



1 引言

以自动驾驶、车联网为代表的车辆智能化技术正在成为智能交通系统中的重要使能技术^[1], 将为大众带来更加安全、便捷的出行新体验。其中, 高精度车辆定位作为自动驾驶及车联网技术体系中的关键部分, 一直是学术界研究的热点领域^[2]。

当前最广为人知的车辆定位技术是“锚点辅助类”车辆定位 (anchors-aided vehicular positioning) 技术。“锚点”是一种位置固定且已知的定位设备, 例如全球定位系统 (global positioning system, GPS) 中的卫星^[3]和无线蜂窝网定位中的基站^[4]均可被称作“锚点”。车辆在接收到发自多个“锚点”的定位信号后, 只要“锚点”和车辆之间没有被障碍物遮挡, 车辆就可以通过分析定位信号中的信息 (信号到达时间和到达角度等) 估算其自身位置。“锚点”的数量越多 (例如部署更多的卫星或更密集的基站), 车辆定位精度就越高, 但是建设成本也越大, 因此很难大规模部署“锚点”。除成本较高之外, 来自卫星和基站的定位信号也很难穿透高楼大厦或者穿入隧道、地下车库等较为封闭的区域中, 因此 GPS 以及无线蜂窝网定位技术在高密度城市和隧道中的定位效果极差甚至失效。虽然一些基于传感器的定位技术 (例如利用无线射频标签定位)^[5-7]或许可解决在隧道内的定位问题, 但是其稳定性和定位精度差 (例如车辆在高速状态下很难识别到标签或部署在道路中的标签极易被损毁等), 难以满足自动驾驶、车联网的需求。因此, 亟需设计一种低成本、低功耗、高精度、高可靠、简单易行的车辆定位技术。

为此, 本文创新性地提出了一种基于反向散射通信的车辆精确定位技术 (backscatter communication assisted vehicular positioning technology, 以下简称“BackCom 车辆定位技术”), 其仅

需在车辆顶端安装一个包含2根天线的反向散射定位阅读器以及在道路边部署至少一个反向散射定位标签, 便可实现高精度车辆定位。反向散射通信^[5]是一种低功耗、低成本、简单易行的物联网通信技术, 可轻松适配车辆, 其通信距离也可满足车辆定位需求^[8]。

2 系统模型

本节将详细介绍 BackCom 车辆定位技术的系统模型、信号模型以及提出车辆定位问题。为简化分析且不失一般性, 考虑二维场景下的车辆定位问题, 即系统及信号模型均在二维欧氏空间中建模。BackCom 车辆定位系统如图1所示。

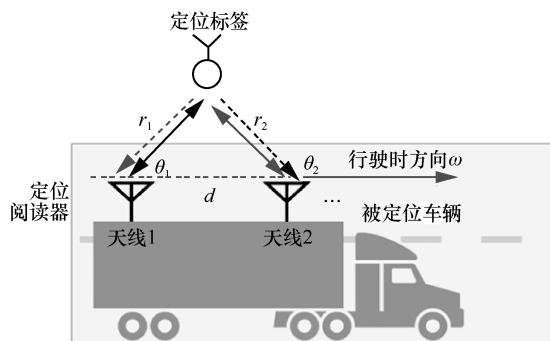


图1 BackCom 车辆定位系统

2.1 BackCom 车辆定位系统概述

BackCom 车辆定位系统如图1所示, 包括两个主要组成部分: 安装在车顶的反向散射定位阅读器 (以下简称为“定位阅读器”) 和部署在道路边的反向散射定位标签 (以下简称为“定位标签”)。其中, 定位阅读器中包含两根天线, 天线间距离为 d 。定位标签中已嵌入了与其地理绝对位置 (absolute position) 相关联的二进制序列信息。定位阅读器可通过基于通断键控 (on-off keying, OOK) 调制/解调的反向散射通信来获取定位标签的二进制序列, 从而解码出其绝对位置信息。反向散射通信技术是非常成熟的物联网通信技术, 具体技术细节详见参考文献[5, 9]。

除获取定位标签的绝对位置信息外, 定位阅

读者还需估算出其天线与定位标签间的距离和角度,以计算它们的相对位置(relative position),并据此估算出车辆的绝对位置(即定位阅读器天线的绝对位置)。具体来说,定位阅读器中的两根天线可同时发送联合调相调频(joint phase-and-frequency modulation, JPFM)波形信号至定位标签,对于距离估算(即估算图1中的 r_1 和 r_2),可先利用 JPFM 波形信号的相位域进行信号分离,随后利用 JPFM 波形信号的频率域进行距离测定,对于角度估算(即估算图1中的 θ_1 和 θ_2),已知天线间距离 d 以及车辆行驶方向 ω ,结合已测得的 r_1 和 r_2 信息,根据正弦定理便可计算出 θ_1 和 θ_2 ,称之为三角形定位法。

2.2 信号模型

信号模型包括3部分:定位阅读器生成的发射信号、定位标签生成的反向散射信号以及定位阅读器生成的差拍信号(beat signal)。BackCom 车辆定位系统以及信号传输过程如图2所示。

2.2.1 发射信号

定位阅读器中的天线可生成发射信号,即 JPFM 波形信号。每一个 JPFM 波形信号包括 L 个帧(frame),每一帧是时长为 T 的扫频段(sweep)。在第 l ($l \in \{1, 2, \dots, L\}$)个帧中,位于定位阅读器中的第 n 根天线可生成如式(1)所示的 JPFM 波形信号:

$$x_n(t, l) = \exp(j(F(t) + P_n(l))), \quad (1)$$

$$0 \leq t < T, n \in \{1, 2\}$$

其中, $F(t)$ 和 $P_n(l)$ 分别表示频率调制函数和相位调制函数,每根天线使用相同的频率调制函数和不同的相位调制函数来生成 JPFM 波形信号。定位阅读器可通过分析 $F(t)$ (即信号频域)来估算出信号传输距离,通过分析 $P_n(l)$ (即信号相位域)来精确分离不同天线所产生的信号。 $F(t)$ 和 $P_n(l)$ 的具体函数表达式将在第3节中阐述。

2.2.2 反向散射信号

定位标签在接收到发射信号并对其进行 OOK 调制后,生成反向散射信号,最终发回至定位阅读器,用以传递定位标签的位置信息,这个过程便是反向散射通信。定位阅读器的第 n 根天线接收到的反向散射信号的数学表达式为:

$$y_n(t, l) = \sum_{m=1}^2 A_{m,n} b x_m(t - \tau_{m,n}, l) + w_n, n \in \{1, 2\} \quad (2)$$

其中, $A_{m,n}$ 表示发射自第 m 根、接收自第 n 根天线的反向散射信号的衰减系数, $b \in \{0, 1\}$ 表示定位标签 OOK 调制的二进制比特信息, $\tau_{m,n}$ 表示反向散射信号的传输时间, w_n 表示加性高斯白噪声,服从 $CN(0, \sigma_{\text{noise}}^2)$ 分布。

在 OOK 调制中,定位标签通过调节其负载阻抗匹配(即图2定位标签电路中的 Z_1 和 Z_2)来选择“反射”或“不反射”信号 $x_n(t, l)$,以此来传输二进制信息。定位阅读器通过识别“有、无”接收到反向散射信号来解调二进制信息,即接收到信号解调为“1”,没有接收到信号解调为“0”。图3为包含 L 个帧、2 bit 信息的 JPFM

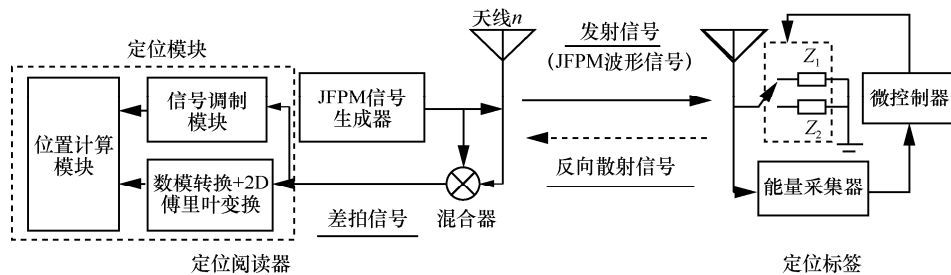


图2 BackCom 车辆定位系统及信号传输过程



波形信号周期。

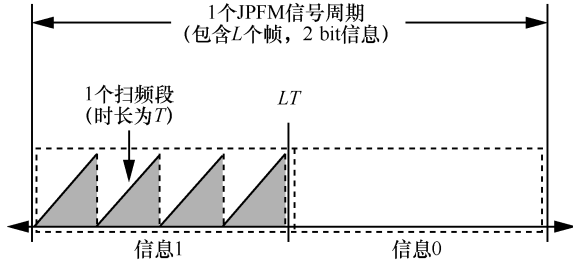


图3 包含 L 个帧、2 bit 信息的 JPFM 波形信号周期

令 r_n 和 θ_n 表示定位标签与第 n 根天线间的距离和角度（如图1所示），信号传输时间 $\tau_{m,n}$ 可表示为：

$$\tau_{m,n} = \frac{r_m + r_n}{c} + \frac{v(\cos \theta_n + \cos \theta_m)(t + (l-1)T)}{c} \quad (3)$$

其中， c 为信号传输速度（即光速），式（3）中第二项表示车速 v 所导致的多普勒频移（Doppler shift）。

2.2.3 差拍信号

如图2所示，定位阅读器将发射信号 $x_n(t, l)$ 和接收到的反向散射信号 $y_n(t, l)$ 在混合器（mixer）中进行相乘处理，产生差拍信号，用以后续信号处理及车辆定位。差拍信号 $s_n(t, l)$ 表示为：

$$s_n(t, l) = y_n^*(t, l) x_n(t, l) \quad (4)$$

其中， $y_n^*(t, l)$ 表示 $y_n(t, l)$ 的共轭转置。

2.3 车辆定位问题

基于上述信号模型，车辆定位问题（即估算定位阅读器天线的位置）定义如下：令 p_t 为定位标签的绝对位置（二维坐标），令 p_n 为需估算的第 n 根天线的绝对位置，可表示如下：

$$p_n = p_t - r_n \begin{bmatrix} \cos(\theta_n + \omega) \\ \sin(\theta_n + \omega) \end{bmatrix}, \quad n \in \{1, 2\} \quad (5)$$

其中， ω 为车辆行驶方向（假设为已知量）。由式（5）可知，车辆定位问题本质上是利用差拍信号 $s_n(t, l)$ 对距离和角度量 $\{r_n, \theta_n\}_{n=1}^2$ 进行估算。

3 低车速下的 BackCom 车辆定位技术

为了确保 BackCom 车辆定位技术在任何行车环境中都具备可靠、出色的性能，本文分别在低车速和高车速环境下设计了不同的 JPFM 波形信号、信号处理及位置估算方法。

本节先考虑车辆在低速状态（例如停车、堵车）下的 BackCom 定位技术的设计。假设行车速度很小，即 $v \approx 0$ ，因此由车速带来的多普勒频移可忽略不计。

3.1 低车速下的 JPFM 信号设计

首先设计低车速下的 JPFM 波形信号。为了确保定位阅读器端可以精确分离并处理接收信号，对发射信号 $x_n(t, l)$ 的频率和相位调制函数进行如图4所示的设计。

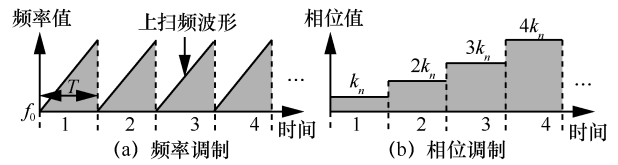


图4 低车速下的 JPFM 信号设计

频率函数 $F(t)$ 设计为周期上扫频（up sweep）波形，其数学表达式为：

$$F(t) = 2\pi f_0 t + \pi \alpha t^2 \quad (6)$$

其中， f_0 为扫频起始频率， $\alpha = B/T$ 表示频升斜率， B 为扫频段带宽， T 为每个扫频段周期（即帧长），可以观察到，信号频率值在每个扫频段中呈线性上升波形。

将相位函数 $P_n(l)$ 设计为阶梯式上升波形（如图4（b）所示），其数学表达式为：

$$P_n(l) = 2\pi k_n l, \quad n \in \{1, 2\} \quad (7)$$

观察式（7）可知，相位值在每个扫频段（即每个帧长中， $0 \leq t < T$ ）内保持恒定，但随着帧序号（frame index）线性增加。其中， k_n 表示第 n 根天线的相位调制速率，令该值小于1以避免相位信号混叠。因此，每根天线的发射信号可利用 k_n 值

分离,即可在信号相位域上进行信号区分。

将式(6)和式(7)的频率和相位调制函数代入式(4)中,可得到差拍信号。以天线1为例,其生成的差拍信号(忽略高阶项后)可近似为:

$$s_1(t, l) \approx b \left[\beta_{1,1} \exp \left(j \left(2\pi \alpha \frac{2r_1}{c} \right) t \right) + \left[\beta_{2,1} \exp \left(j \left(2\pi \alpha \frac{r_1+r_2}{c} \right) t \right) \exp \left(j \left(2\pi (k_1 - k_2) \right) l \right) \right] \right] + \tilde{w} \quad (8)$$

其中, $\beta_{1,1} = A_{1,1} \exp \left(j \left(\frac{4\pi f_0 r_1}{c} \right) \right)$ 和 $\beta_{2,1} = A_{2,1} \exp \left(j \left(\frac{4\pi f_0 (r_1+r_2)}{c} \right) \right)$ 为常数,分别表示发射自天线1和天线2的定位信号能量, $\tilde{w}$ 为通过混合器之后的噪声。

假设定位标签所调制的二进制信息 b (即定位标签的绝对位置信息)可以顺利从差拍信号 $s_1(t, l)$ 中解调并移除(即通过 BackCom 完成信息传输)^[11], 随后的工作便是从 $s_1(t, l)$ 中估算出距离信息 $\{r_1, r_2\}$ 以及角度信息 $\{\theta_1, \theta_2\}$, 并通过式(5)计算车载天线位置以实现车辆定位。

通过观察式(8)中的差拍信号 $s_1(t, l)$ 可知, 所需估算的距离信息 $\{r_1, r_2\}$ 可通过对频率域(即式(8)中变量 t 的相关项)做一维傅里叶变换(1D Fourier transform)测得。但当 $r_1 = r_2$ 时, 即两根天线到定位标签的距离相同时, 两组接收信号将在频域上重叠导致无法分离, 因此仅通过频域这一个维度无法精确区分发自不同天线的定位信号。为了解决这一问题, 可通过对 $s_1(t, l)$ 的相位域(即式(8)中变量 l 的相关项)做一维傅里叶变换, 并根据两组接收信号的不同相位调制速率 k_n 对其进行分离。因此, 应当对差拍信号 $s_1(t, l)$ 做二维傅里叶变换, 利用两组定位信号在频域和相位域这两个维度的信息, 对其进行分离并对 $\{r_1, r_2\}$ 进行检测。

3.2 BackCom 车辆定位的具体步骤

BackCom 车辆定位技术分为以下5个步骤。

步骤1 通过 BackCom 获取定位标签信息

定位阅读器的天线1接收到来自定位标签的反向散射信号 $y_1(t, l)$, 随后在混合器中与其发射信号 $x_1(t, l)$ 相乘, 生成差拍信号 $s_1(t, l)$ (见式(8))。最后通过 OOK 解调器(例如包络检波器)对 $s_1(t, l)$ 的二进制信息 b 进行解调并分离, 获得定位标签的绝对位置信息 p_l 。

步骤2 对差拍信号数字化处理

利用数模转换器(analog to digital converter)对移除 b 后的 $s_1(t, l)$ 以采样率 f_{samp} 进行数字化(即离散化)处理, 数学表示为:

$$s_1(q, l) = \sum_{n=1}^2 \beta_{n,1} \exp \left(j \left(\hat{F}_{n,1} \cdot q \right) \right) \exp \left(j \left(\hat{P}_{n,1} \cdot l \right) \right) \quad (9)$$

其中, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$, $q \in \{1, 2, \dots, Q\}$, $Q = T f_{\text{samp}}$ 为一个扫频段内的采样点个数。 $\hat{F}_{n,1} = 2\pi \alpha \frac{r_1+r_2}{c f_{\text{samp}}}$ 和 $\hat{P}_{n,1} = 2\pi(k_1 - k_n)$ 分别为差拍信号在频域和相位域的值。

步骤3 对数字化的差拍信号做二维傅里叶变换

令 FT_{2D} 为二维傅里叶变换函数, 将式(9)中的数字化差拍信号在频域和相位域做二维傅里叶变换, 可得到矩阵 $S_1(F, P)$, 表示为:

$$S_1(F, P) = FT_{2D} \left[\{s_1(q, l)\}, F, P \right] = \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^2 \beta_{n,1} \exp \left(j \left(\left(\hat{F}_{n,1} - \frac{2\pi F}{Q} \right) q \right) \right) \exp \left(j \left(\left(\hat{P}_{n,1} - \frac{2\pi P}{Q} \right) l \right) \right) \quad (10)$$

其中, $1 \leq F \leq Q$, $1 \leq P \leq L$ 。由于每个扫频段周期(即每个帧时长 $T \leq 30 \mu\text{s}$)^[10]远远小于定位标签做反向散射的周期(即 OOK 调制的周期)^[11], 因此, 当定位标签处于反射状态(即 $b=1$)时, 定位阅读器端天线可以接收到足够多的 JPFM 波形信号(即足够多的帧 L)来做二维傅里叶变换。

步骤4 估算距离和角度信息

首先估算距离信息。在矩阵 $S_1(F, P)$ 中可检



测到两个峰值点 (peak point), 对应2组定位信号 (即发射自天线1和天线2的信号)。每个峰值点的横、纵坐标对应定位信号的频域及相位域的值, 数学表达式为:

$$\left\{ \left(F_{\text{peak}}^{(n)}, P_{\text{peak}}^{(n)} \right) \right\}_{n=1}^2 = \left\{ \left(\frac{\hat{F}_{n,1} Q}{2\pi}, \frac{\hat{P}_{n,1} L}{2\pi} \right) \right\}_{n=1}^2 \quad (11)$$

观察式 (11) 可知, 即使两个峰值点有相同的频域值 (即 $F_{\text{peak}}^{(1)} = F_{\text{peak}}^{(2)}$), 根据 JPFM 波形设计 (式 (7)), 它们的相位域值也不同 (即 $P_{\text{peak}}^{(1)} \neq P_{\text{peak}}^{(2)}$), 因此这两个峰值点可以被精确区分。

利用检测到的频域值 $\{F_{\text{peak}}^{(1)}, F_{\text{peak}}^{(2)}\}$, 可估算出距离信息 $\{r_1, r_2\}$:

$$\left\{ r_1 = \frac{c \cdot F_{\text{peak}}^{(1)}}{2\alpha T}, r_2 = \frac{c \cdot F_{\text{peak}}^{(2)}}{\alpha T} - r_1 \right\} \quad (12)$$

随后估算角度信息。根据已估算出的 $\{r_1, r_2\}$, 利用三角形正弦定理 (law-of-sines), 角度信息 $\{\theta_1, \theta_2\}$ 可通过求解方程 (13) 获得:

$$\frac{d}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{r_2}{\sin \theta_1} = \frac{r_1}{\sin(\pi - \theta_2)} \quad (13)$$

其中, d 为两根天线间的距离。

步骤5 估算车辆位置

利用已估算出的 $\{r_1, r_2\}$ 和 $\{\theta_1, \theta_2\}$ 以及在步骤 1 中获知的 p_i , 将其代入式 (5), 可估算出天线 1 和天线 2 的绝对位置 $\{p_1, p_2\}$, 完成车辆定位。

通过上述的 5 个步骤可知, 对距离信息 $\{r_1, r_2\}$ 的估算精度将对车辆定位准确度有较大的影响。下面对距离信息估算的准确度做简要分析。

通过计算定位信号的 Cramer-Rao 下界 (Cramer-Rao lower bound) [12], 可以得出理论上的最佳距离估算精度 (即估算 r_n 的最小误差标准差 σ_{r_n}) 为:

$$\sigma_{r_n} \geq \frac{c}{2\pi B \beta_{n,1}} \sqrt{\frac{f_{\text{samp}}}{2} \sigma_{\text{noise}}^2}, n \in \{1, 2\} \quad (14)$$

观察式 (14) 可发现, 增大定位信号带宽 B

以及提高信号发射功率 $\beta_{n,1}$ 可以有效减小误差标准差 σ_{r_n} , 从而提高距离估算的准确度。

3.3 JPFM 信号设计问题

为了保证 BackCom 车辆定位技术的可靠性和准确性, 设计 JPFM 信号应遵循如下两点设计准则。

(1) 最远可估算距离与测距分辨率

定位阅读器的最远可估算距离 r_{max} 与数字化过程的采样率 f_{samp} 、扫频段周期 T (即帧时长) 有关, 数学表示为 $r_{\text{max}} = \min \left\{ \frac{f_{\text{samp}} c}{2\alpha}, \frac{cT}{2} \right\}$ 。测距分

分辨率 r_{res} (ranging resolution) 受限于定位信号带宽 B (即扫频段带宽), 表示为 $r_{\text{res}} = \frac{c}{2B}$ 。因此, 车辆可根据自身定位需求, 选择合适的 T 、 f_{samp} 、 B 来设计 JPFM 信号, 以保证所需的定位效果。

(2) 相位调制函数的最优设计

对相位调制函数 $P_n(l)$ 设计 (等价于对相位调制速率 k_n 设计) 的准确与否将直接影响定位信号的分离与处理效果。对于不同天线的相位值, 既要避免重叠, 又要保证它们的相位差值大于相位分辨率 $\frac{2\pi}{L}$ (phase resolution) [10], 即满足以下条件:

$$\frac{2\pi}{L} < |\hat{P}_{1,1} - \hat{P}_{2,1}| \leq \pi \quad (15)$$

其中, $\hat{P}_{1,1}$ 和 $\hat{P}_{2,1}$ 的表达式在式 (9) 中已给出。根据式 (15), 最优的相位调制函数可设计为:

$$P_n^*(l) = \pi n l, n \in \{1, 2\} \quad (16)$$

3.4 定位阅读器端的信号干扰消除

在真实行车情况中, 定位阅读器在接收到反向散射信号 $s_n(t, l)$ 的同时, 也会接收到反射自定位标签周围的散射干扰信号 (scattering interference signal), 散射干扰信号的产生过程如图 5 所示。此类散射干扰信号将会影响定位阅读器的信号处理性能及定位准确度。对此, 提出如下方法消除干扰信号。

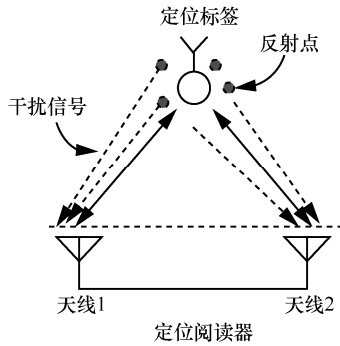


图5 散射干扰信号的产生过程

该方法的核心思路是利用空白帧组（即定位标签发射“0”比特信息的帧组）中的干扰信号抵消非空白帧组（即定位标签发射“1”比特信息的帧组）中的干扰信号。信号干扰消除方法如图6所示，信息是2组帧组（即1组非空白帧和1组空白帧），其中第一组帧组（即非空白帧组）包含反向散射信号 $s^{(1)}$ 和干扰信号 $I^{(1)}$ ，第二组帧组（即空白帧组）仅包含干扰信号 $I^{(2)}$ 。由于2组帧组的时长很短（小于5 ms），可假设干扰信号 $I^{(1)} = I^{(2)}$ 。因此，在定位阅读器端可以利用非空白帧组接收到的信号减去空白帧组接收到的信号，以消除干扰信号 $I^{(1)}$ ，并保留反向散射信号 $s^{(1)}$ 用于后续位置估算。

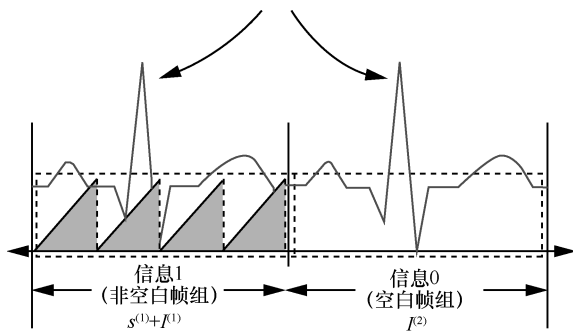


图6 信号干扰消除方法（以2 bit 信息为例）

4 高车速下的 BackCom 车辆定位技术

本节将设计适用于高车速（ $v \gg 0$ ）的 BackCom 车辆定位技术。随着车速的提升，多普勒频移对定位信号的影响增大，使用第3节设计

的 JPFM 波形信号（如图4所示）将降低定位精度。因此，应重新设计适用于高车速的 JPFM 波形信号，以便在信号处理时消除多普勒频移的影响。

高车速下的 JPFM 波形信号如图7所示。在频率调制中，奇数序列帧（即 $l_{\text{odd}} \in \{1, 3, \dots\}$ ）采用上扫频波形，偶数序列帧（即 $l_{\text{even}} \in \{2, 4, \dots\}$ ）采用下扫频波形；在相位调制中，奇数序列帧的相位调制速率为线性增加的正数，偶数序列帧的相位调制速率为线性减小的负数。该设计的核心思想是，利用奇数序列帧信号（频率及相位域）中的多普勒频移与偶数序列帧信号中的多普勒频移进行相互抵消，以消除多普勒效应。

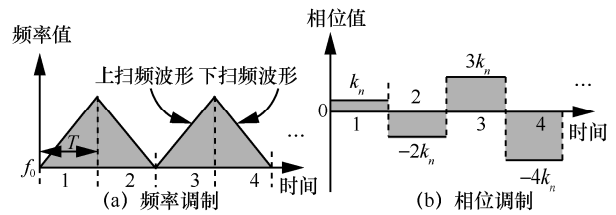


图7 高车速下的 JPFM 波形信号设计

具体来看，基于图7所示的 JPFM 信号设计，定位阅读器中由奇数序列帧处理所得的差拍信号 $s_1(t, l_{\text{odd}})$ 表示为：

$$s_1(t, l_{\text{odd}}) \approx b \left[\tilde{\beta}_{1,1} \exp \left(j \left(4\pi \alpha \frac{r_1}{c} + 4\pi f_0 \frac{v \cos \theta_1}{c} \right) t \right) \cdot \exp \left(j \left(4\pi f_0 \frac{v \cos \theta_1}{c} T \right) l_{\text{odd}} \right) + \tilde{\beta}_{2,1} \cdot \exp \left(j \left(2\pi \alpha \frac{r_1 + r_2}{c} + 2\pi f_0 \frac{v (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c} \right) t \right) \cdot \exp \left(j \left(2\pi (k_1 - k_2) + 2\pi f_0 \frac{v (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c} T \right) l_{\text{odd}} \right) \right] + \tilde{w} \quad (17)$$

由偶数序列处理所得的帧差拍信号 $s_1(t, l_{\text{even}})$ 表示为：



$$s_1(t, l_{\text{even}}) \approx b \left[\tilde{\beta}_{1,1} \exp \left(j \left(-4\pi\alpha \frac{r_1}{c} + 4\pi f_0 \frac{v \cos \theta_1}{c} \right) t \right) \cdot \exp \left(j \left(4\pi f_0 \frac{v \cos \theta_1}{c} T \right) l_{\text{even}} \right) + \tilde{\beta}_{2,1} \cdot \exp \left(j \left(-2\pi\alpha \frac{r_1+r_2}{c} + 2\pi f_0 \frac{v(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c} \right) t \right) \cdot \exp \left(j \left(-2\pi(k_1 - k_2) + 2\pi f_0 \frac{v(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}{c} T \right) l_{\text{even}} \right) \right] + \tilde{w} \quad (18)$$

假设在相邻的两个奇、偶数帧时段 ($< 60 \mu\text{s}$) 内车速和车辆位置不变。观察式 (17) 和式 (18), 可令 $s_1(t, l_{\text{odd}})$ 中频域值与 $s_1(t, l_{\text{even}})$ 中频域值相减, 以消除频域上的多普勒频移; 同理, 令 $s_1(t, l_{\text{odd}})$ 中相位域值与 $s_1(t, l_{\text{even}})$ 中相位域值相减, 以消除相位域上的多普勒频移, 最终达到消除多普勒频移影响的目的。

根据以上思路, 以天线1为例, 首先分别对 $s_1(t, l_{\text{odd}})$ 和 $s_1(t, l_{\text{even}})$ 进行数字化和二维傅里叶变换处理, 之后通过峰值检测获取两组信号的频域及相位域数值, 随后用 $s_1(t, l_{\text{odd}})$ 的频域峰值减去 $s_1(t, l_{\text{even}})$ 的频域峰值, 用 $s_1(t, l_{\text{odd}})$ 的相位域峰值减去 $s_1(t, l_{\text{even}})$ 的相位域峰值, 之后进行距离及角度估算 (步骤与第3.1节中的一致) 并最终实现车辆定位。

为确保高车速下的 BackCom 车辆定位技术性能, JPFM 波形信号设计除了需要遵照第3.3节中的准则之外, 还需遵循下述准则。

车辆的高速移动将带来定位误差 (由于车辆在极短时间内也会有微量移动, 导致定位有偏差), 并且 JPFM 波形信号周期越长 (即定位所需时间越长), 定位误差越大。因此, 若要求定位误差不超过 δ (例如 $\delta < 0.1 \text{ m}$), 每周期 JPFM 波形信号所包含的最大帧数 L_{max} 可通过求解以下方程获得:

$$r \left| \cos \theta_n - \frac{\sin \theta_n}{\tan \left(\theta_n + \frac{vT \sin \theta_n}{r} \cdot L_{\text{max}} \right)} \right| = \delta \quad (19)$$

5 技术拓展: 多天线 BackCom 车辆定位技术

为了进一步提升 BackCom 车辆定位技术的定位精度, 可在定位阅读器端部署包含 $N(N > 2)$ 根天线的多天线系统, 多天线 BackCom 定位技术如图8所示。该多天线系统将带来多路访问信道增益 (multiple access channel gain) 以及广播信道增益 (broadcasting channel gain)。

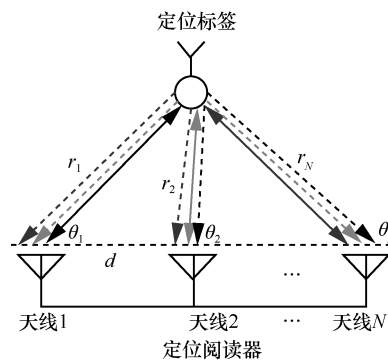


图8 多天线 BackCom 定位技术

多路访问信道增益是指, 在包含 N 根天线的多天线系统中, 对估算任意一个角度信息 θ_n , 可根据式 (13) 以及三角定位法构造出 $\frac{N!}{2(N-2)}$ 个三角形对 θ_n 进行估计。因此, 与此前仅靠一个三角形进行角度估算相比, 多天线系统可以提高角度估算精度, 最终提升定位准确度。

广播信道增益是指, 借助广播信道, 天线 n 可接收到 N 组反向散射信号用于对 r_n 的距离进行估算, 由此将提高距离估算精度, 并最终提高定位准度。

多天线系统中的 JPFM 波形信号设计需要遵循如下准则: 在保证每根天线的相位调制速率 k_n 互不相同的同时, 还需保证每根天线的相位值可被区分 (即任意两根天线的相位差要大于相位分辨率)。因此, 天线相位函数的设计应满足如式 (20) 不等式:

$$\frac{2\pi}{L} < \min_{n,i} |\hat{P}_{n,1} - \hat{P}_{i,1}| \leq \frac{2\pi}{N} \quad (20)$$

根据式(20),得到多天线系统中的最佳相位函数设计准则为:

$$P_n^*(l) = \frac{2\pi n}{N} l \quad (21)$$

此处需要确保 $L > N$, 即 JPFM 信号帧数要多于天线数目。

6 BackCom 车辆定位技术实用性分析

针对 BackCom 车辆定位技术的未来实用性,从工程实现以及商用前景两个角度做分析。从工程实现角度来看,BackCom 技术及设备可被工程实现,如参考文献[13,15]就物理实现出了多天线反向散射收发设备并对 BackCom 技术做了实试验证,证明了工程可实现性。此外,通过优化其信号调制方式,BackCom 技术可支持最远超过250 m 的通信距离^[11], 足以满足车辆定位对通信及测距距离的需求。因此,BackCom 车辆定位技术具备实际应用价值。从商用前景角度来看,首先,定位阅读器和定位标签价格便宜,可大规模部署应用。例如单天线定位阅读器价格通常在900元以下,定位标签价格仅为10元左右,与激光雷达(平均在50 000元以上)、毫米波雷达(平均在3 000元以上)等常用的车辆定位设备相比,具备极高的价格优势。其次,BackCom 技术具备低能耗(能耗通常在5 mW 以下)^[11]的优点,与激光雷达一般在20 W 以上的能耗相比,可以有效减轻汽车的耗能负担。最后,BackCom 车辆定位技术所带来的数据量以及计算量很小,便于实时处理,与激光雷达所产生的巨大的数据量以及极高的计算量相比,可以大幅减轻汽车进行数据计算处理时的负担,有助于提高定位灵敏度。综上,BackCom 车辆定位技术拥有成本低、能耗低、计算量低、灵敏度高、突出优点,具备较高的商用价值,有望被大规模部署使用。

7 仿真验证

本节对 JPFM 波形信号设计以及 BackCom 车

辆定位技术做了仿真实验,采用如下仿真参数(除非特别说明): $f_0 = 24 \text{ GHz}$, $B = 200 \text{ MHz}$, $f_{\text{samp}} = 5 \text{ MHz}$, $A_{m,n} = 0.1$, $T = 30 \mu\text{s}$, $L = 80$ 。

定位误差通过计算定位阅读器天线位置真实值与估算值间的二维欧氏距离差值获得。

首先考虑在定位阅读器部署两根天线(如第3、4节设计)。图9展示了对接收到的差拍信号进行数字化和二维傅里叶变换后的效果。假设两根天线到定位标签的距离同为20 m, 即 $r_1 = r_2 = 20 \text{ m}$, 可以看到,两组定位信号(即两个峰值)在频域上是相互重叠的,无法分离,但是在相位域上可以精确分离,由此证明了 JPFM 波形信号设计的可行性。

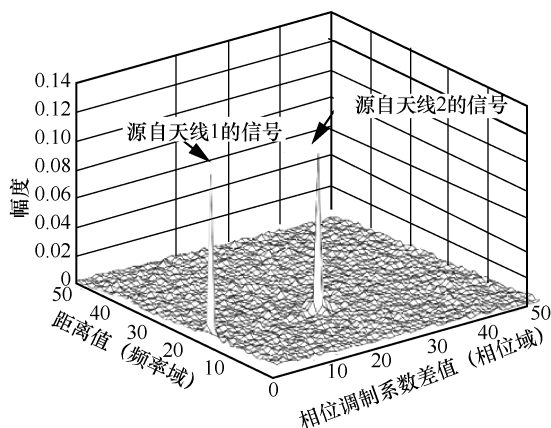


图9 对接收到的差拍信号进行数字化和二维傅里叶变换后的效果

定位阅读器中天线数目以及信号扫频带宽对定位精度的影响如图10所示,对两种信号频段带宽下的低车速以及高车速定位技术分别做了仿真验证。设定低车速和高车速分别为 $v=0$ 、 $v=20 \text{ m/s}$ 。可以观察到,受益于多天线所得的多路访问信道增益及广播信道增益,定位误差将随着天线数目 N 的增加而大幅降低,当部署8根天线时,高车速和低车速下的定位误差均 $< 0.15 \text{ m}$,符合3GPP 标准中对车辆定位精度要求^[14]。高车速下的定位误差略高于低车速下的定位误差,这是因为高车速下的 JPFM 波形信号设计以损失50%的相位分辨率为代价,换取了多普勒频移的消除,



因此会降低一定的定位精度。此外,当信号扫频段带宽 B 由200 MHz 增大至250 MHz 后,无论在高速还是在低速下,定位精度均有了大幅提升,符合第3.2节中的分析结果。

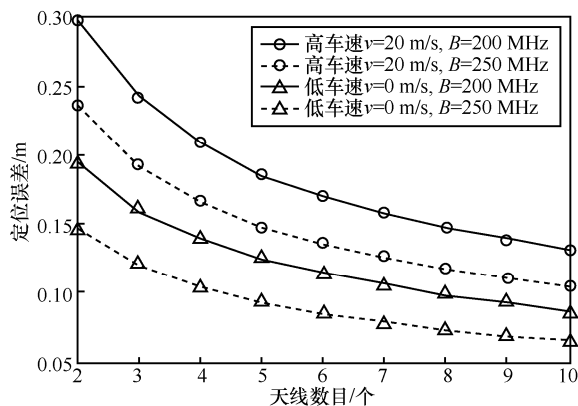


图 10 定位阅读器中天线数目以及信号扫频带宽对定位精度的影响

车辆速度对定位精度的影响如图11所示(假设定位阅读器部署两根天线)。可以看到,当车速较低($0 \leq v \leq 15 \text{ m/s}$)时,低车速下的 BackCom 定位技术有较好的定位效果。当车速较高($v > 15 \text{ m/s}$)时,高速下的 BackCom 定位技术将带来更高的定位精度,由此验证了 BackCom 定位技术无论在低速还是在高速下,均能取得很好的定位效果。

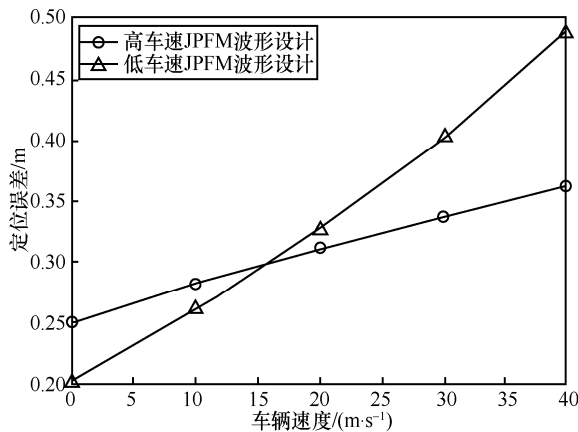


图 11 车辆速度对定位精度的影响

最后,单信号周期内帧数 L 对定位精度的影响如图12所示(假设定位阅读器部署两根天线)。

可以观察到,无论在低速还是在高速下,随着 L 的增大,定位误差都会先减小,其原因是 L 的增大会提高相位分辨率,进而提升定位精确度。但随着 L 进一步增大,高速下的定位精度开始下降, L 过大会使信号周期变长,导致由车速引起的定位误差变大。因此,应根据具体车速情况设计最优的帧数 L 来实现最佳的定位效果。

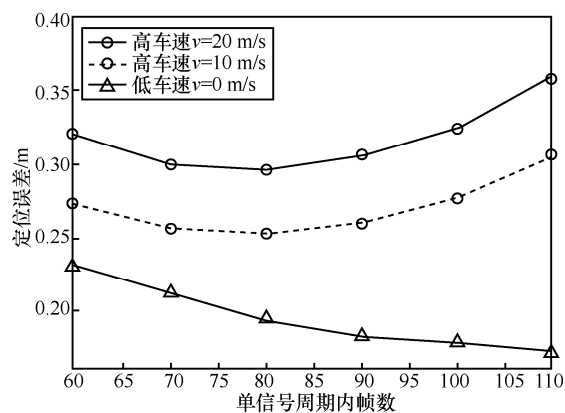


图 12 单信号周期内帧数 L 对定位精度的影响

8 结束语

本文创新性地提出了一种基于反向散射通信的车辆精准定位技术,该定位技术可用于在高密度城市、隧道、地下车库等无法获取 GPS 或基站定位信号的区域,实现高精度车辆定位。BackCom 车辆定位技术拥有成本低、能耗低、计算量低、灵敏度高突出优点,具备较高的商用价值,有望在未来车联网及自动驾驶场景中被大规模部署使用。

参考文献:

- [1] HUSSAIN R, ZEADALLY S. Autonomous cars: research results, issues, and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21(2): 1275-1313.
- [2] 陈山枝, 胡金玲, 时岩, 等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018, 34(4): 1-11.
CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. Technologies, standards and applications of LTE-V2X for vehicular networks[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(4): 1-11.
- [3] CUI Y, GE S. Autonomous vehicle positioning with GPS in

- urban canyon environments[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003(19): 15-25.
- [4] FISCHER S. Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE[R]. 2014.
- [5] ZHU G, KO S W, HUANG K. Inference from randomized transmissions by many backscatter sensors[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018(17): 3111-3127.
- [6] JING T, WEI X, CHENG W, et al. An efficient scheme for tag information update in RFID systems on roads[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016(65): 2435-2444.
- [7] QIN H, PENG Y, ZHANG W. Vehicles on RFID: error-cognitive vehicle localization in GPS-less environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017(66): 9943-9957.
- [8] HESSAR M, NAJAFI A, GOLLAKOTA S. Netscatter: enabling large-scale backscatter networks[Z]. 2018.
- [9] HAN K F, HUANG K. Wirelessly powered backscatter communication networks: modeling, coverage, and capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017(16): 2548-2561.
- [10] WINKLER V. Novel waveform generation principle for short-range FMCW-radars[C]//Proceedings of IEEE Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [11] HUYNH N, HOANG D. T, LU X. Lu, et al. Ambient backscatter communications: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018(20): 2889-2922.
- [12] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing[M]//Estimation Theory. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [13] FRISCHEN A, HASCH J, WALDSCHMIDT C. A cooperative MIMO radar network using highly integrated FMCW radar sensors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017(65): 1355-1366.
- [14] 3GPP. Technical specification group services and system aspects; enhancement of 3GPP support for V2X scenarios; stage 1 (release 15): TS22.186 V15.2.0 [S]. 2017.
- [15] APPEL S, BERGES D. MIMO FMCW reader concept for locating backscatter transponders[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016(64): 2955-2967.

[作者简介]



韩凯峰 (1993—), 男, 博士, 中国信息通信研究院政策与经济研究所战略研究部工程师, 主要研究方向为无线通信 (5G/6G)、边缘计算、车联网、人工智能等前沿技术及战略。



刘铁志 (1981—), 男, 博士, 中国信息通信研究院政策与经济研究所战略研究部主任、高级工程师, 主要研究方向为信息通信产业政策和国际经济。