LTE-V2X射频指纹提取：一种基于信道估计的方法

Tianshu Chen*、Hong Shen*、Aiqun Hu*†、Weihang He‡、Jie Xu‡、Hongxing Hu§
*国家移动通信研究实验室，东南大学，中国南京
†紫金山实验室网络与通信安全实验室，中国南京
‡网络空间安全学院，东南大学，中国南京§中国汽车创新公司，中国南京 电子邮箱：{iamtianshu、shhseu、aqhu、220205165、 220205095}@seu.edu.cn, huhongxing@t3caic.com

arXiv:2301.01446v1 [eess.SP] 4 Jan 2023

摘要——**近年来，车联网（V2X）技术受到学术界和工业界的广泛关注。然而，无线通信系统的开放性使其更容易遭受身份冒充和信息篡改。如何在车联网系统中运用强大的射频指纹（RFF）识别技术，已成为一项至关重要且颇具挑战性的任务。本文提出了一种适用于长期演进车联网（LTE-V2X）系统的新型RFF提取方法。为了解决在无线信道和接收机噪声存在时提取发射机RFF的难题，我们首先估计无线信道，以分离出RFF。然后，基于信道估计消除无线信道的影响，获得初始射频指纹特征。最后，我们对RFF进行去噪，以提升初始RFF的质量。仿真和实验结果均表明，所提出的射频指纹提取方案具有较高的识别准确率。此外，该方案在不同车速下也表现出良好的鲁棒性。**

索引词—**车联网（V2X）、射频指纹（RFF）、设备识别、信道估计、射频指纹去噪**

I. 引言

车联网（V2X）已成为智能交通和自动驾驶的一项前景广阔的技术。尤其是蜂窝车联网（C-V2X），凭借其卓越性能，已被广泛认可为一项关键的车联网通信标准 [1], [2]。

由于 V2X 依赖无线传输，信息容易遭到窃听、伪造或篡改，这给 V2X 车联网通信网络中的车辆、行人和道路基础设施安全带来了巨大挑战[3]。为应对无线通信面临的安全威胁，通常采用两种广泛使用的认证策略：基于密钥的密码认证和基于物理层安全的非密码学认证[4]。密码认证技术需要分发和管理大量通信密钥，这会占用计算资源，并带来额外开销和延迟。此外，随着计算机计算能力的迅速发展，尤其是量子计算机的出现，传统密码技术更容易受到暴力破解攻击 [5]。相比之下，与传统的基于密码学的认证方法相比，基于物理层安全的认证复杂度和网络开销更低、延迟更小，并且无需第三方设施即可实现无感知认证。一个典型示例是基于射频指纹（RFF）的认证，该方法充分利用任意两个设备之间的硬件差异。由于每个设备的硬件特征都是独一无二且难以克隆的，基于射频指纹的认证能够更好地抵御身份攻击和欺骗攻击 [6]。

文献中已有多种射频指纹提取和识别方法。早期研究主要关注瞬态信号的特征，例如瞬时幅度、频率和相位响应 [7]。对于前导信号等稳态信号，研究人员考虑提取射频指纹特征，包括 I/Q偏移[8],功率谱密度 [9], 差分星座轨迹图 [10]。此外，研究人员还探讨了一些不依赖数据、信道或调制模式的通用射频指纹提取方法。具体而言，Shen 等人 [11]构建了信道无关频谱图，并利用数据增强来提取射频指纹，识别 LoRa设备，在不同信道条件下均取得了良好性能。Yang 等人 [12] 则使用随机数据片段，提取最小均方（LMS）自适应滤波器的抽头系数，作为与数据无关的射频指纹。Sun 等人 [13] 通过倒谱域分析验证了射频指纹分布的局部性和不均匀性，由此获得了与调制模式无关的射频指纹。

上述工作主要研究低移动性和窄带系统中的射频指纹提取。然而，对于车联网系统，由于车辆具有较高的移动性，信道通常变化很快。此外，V2X信号通常

© 2022 IEEE。允许个人使用本材料。对于任何其他用途，无论是当前还是未来的媒体形式，均须获得 IEEE 的许可，包括为广告或宣传目的重印/再版本材料、创作新的汇编作品、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护部分。

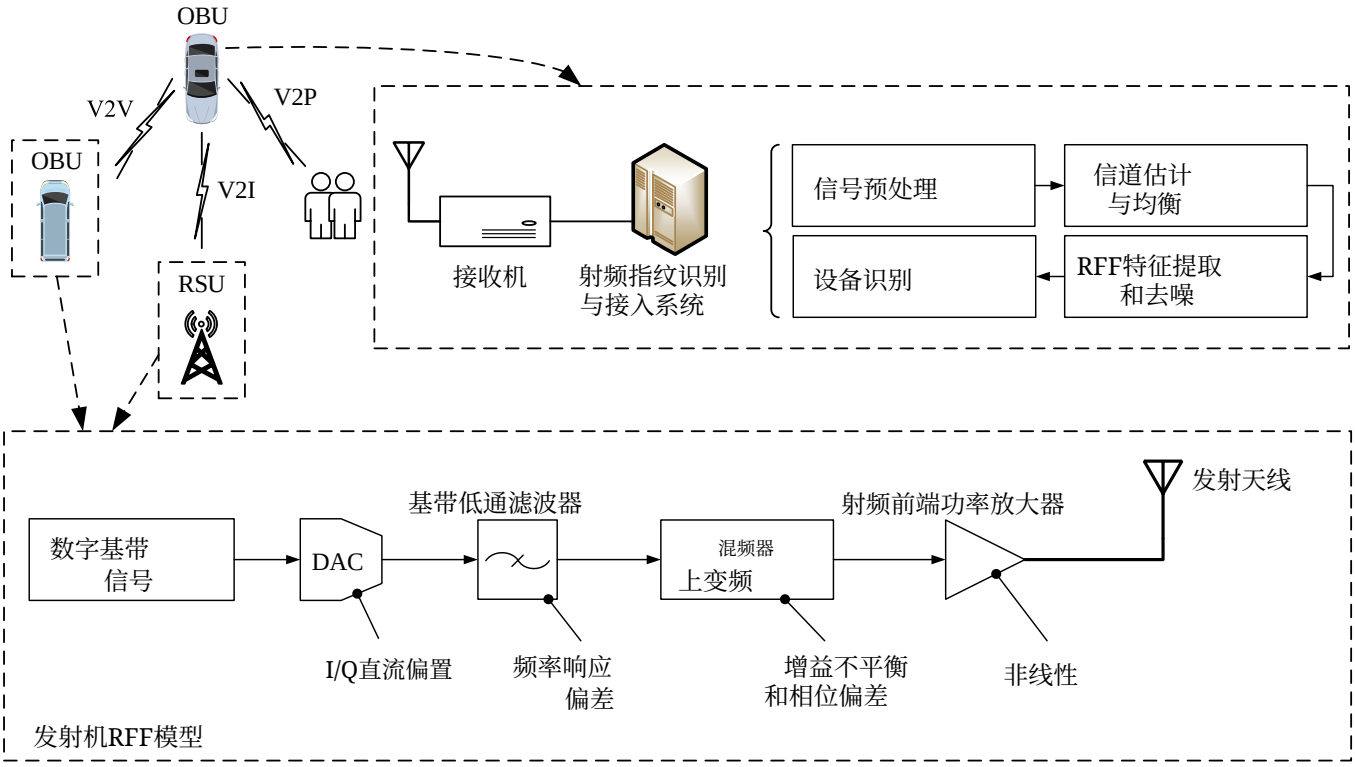


图 1. LTE-V2X 射频指纹提取与识别系统框架，以及发射机处的射频指纹模型。

具有较大的带宽，因此更容易受到多径环境的影响。因此，当前针对 ZigBee 和 LoRa 等窄带系统的射频指纹提取方法无法直接应用于车联网系统，因为这些方法没有考虑多径和时变信道的影响。

本文提出了一种基于信道估计的射频指纹提取方法，用于长期演进车联网（LTE-V2X）系统。据我们所知，现有研究尚未对此进行探讨。具体而言，我们首先采用一种改进的最小二乘（LS）信道估计方法，估计所经历的无线信道。然后，基于信道估计进行信道均衡，以获得信道相关射频指纹。通过进行时域降噪，进一步提升射频指纹的质量。值得注意的是，所提出的方法在实现复杂度较低的情况下消除了信道和噪声对射频指纹的影响，并且可扩展至各种宽带多载波无线通信系统。

本文组织如下：第 II 节介绍系统模型和信号预处理。第 III 节详细介绍基于无线信道估计的所提射频指纹提取方法。第 IV 节通过仿真和实验评估所提射频指纹提取方法的性能。第 V 节总结本文。

II. 系统模型与信号预处理

A. 系统模型

图 1 展示了所研究的 LTE-V2X 射频指纹提取与识别系统的框架，以及发射机处的射频指纹模型。具体而言，一个车联网终端（例如车载单元（OBU）或路侧单元（RSU））首先向其他设备发送数据，发送信号中包含发射机的射频指纹。随后，接收机对接收信号进行预处理，包括将射频信号转换为基带信号并执行时间-频率同步。接着，基于同步后的信号提取射频指纹特征，同时需要减轻无线信道和噪声对射频指纹的影响。最后，利用提取出的射频指纹特征进行设备识别。

需要注意的是，本文所考虑的射频指纹是指发射机电路的所有特征。如图1所示，这些特征包括数模转换器（DAC）的 I/Q 直流偏置、滤波器的频率响应偏差、混频器的增益不平衡和载波相位正交偏差，以及功率放大器的非线性 [14]。

B. LTE-V2X 物理侧链路广播信道

我们采用 LTE-V2X 系统中的物理侧链广播信道（PSBCH）进行射频指纹提取。根据 [15]，PSBCH 每 160 毫秒传输一次，占用中央 6

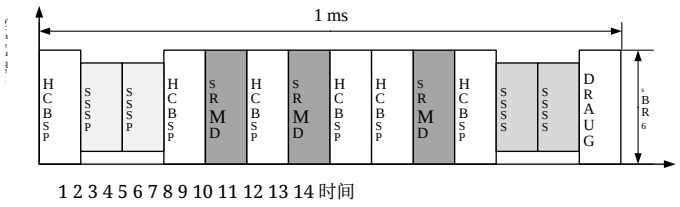


图 2. LTE-V2X 物理侧链路广播信道格式。

个资源块（RB），即 72 个子载波和 14 个单载波频分多址（SC-FDMA）符号。

物理侧链路广播信道的详细格式如图 2 所示，其中主侧行链路同步信号（PSSS）、辅侧行链路同步信号（SSSS）和解调参考信号（DMRS）均取决于当前使用的侧行链路同步信号标识（SLSS ID）。由于可以估计 SLSS ID [15], ，我们可以在接收机处轻松获得理想的 PSSS、SSSS 和 DMRS，用于提取发射机射频指纹。

C. 信号预处理

为确保所提取射频指纹的稳定性，在接收信号从射频频段下变频至基带后，信号预处理过程包括时间同步以及载波频偏（CFO）估计与补偿。

时间同步通过利用两个相同的训练符号（例如 LTE-V2X 物理侧链路广播信道中的两个重复 PSSS 或 SSSS 符号），并计算接收信号 r（n）与训练信号 x（n）之间的互相关来实现，表示为

$$P(d)=\sum_{n=0}^{N-1}|r(n+d)x^*(n)|^2+\sum_{n=0}^{N-1}|r(n+d+N+N_{CP})x^*(n)|^2, \tag{1}$$

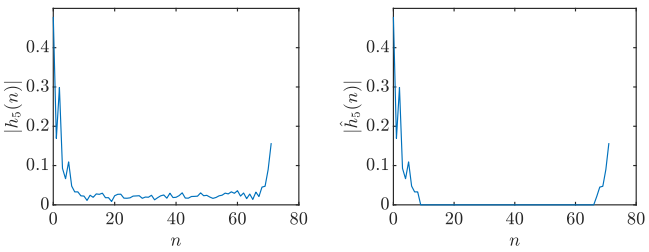
其中，$N=2048$ 适用于 LTE-V2X 系统，N_{CP} 表示循环前缀（CP）的长度。当 $P(d)$ 超过给定阈值 P_{TH} 并达到最大值时，即可得到训练符号 [16],的估计起始位置，其表达式为

$$\hat{d}=\arg\max_{d\in\{d|P(d)>P_{TH}\}}P(d). \tag{2}$$

随后，通过对相邻的两个相同 PSSS 符号以及两个相同 SSSS 符号进行自相关来估计载波频偏，其表达式为 [17],

$$\hat{\varepsilon}=\frac{1}{2\pi(N+N_{CP})}\text{angle}\left\{\sum_{n=0}^{N-1}[r(n+\hat{d})r^*(n+\hat{d}+N+N_{CP})]+\sum_{n=0}^{N-1}[r(n+\Delta n+\hat{d})r^*(n+\Delta n+\hat{d}+N+N_{CP})]\right\}, \tag{3}$$

其中，angle$\{\cdot\}$ 返回输入复数的相位角，Δn 表示采样点的数量



（a）初始时域信道估计 $h_5(n)$

（b）加窗后的时域信道估计 $\hat{h}_5(n)$

图3. 解调参考信号符号的初始时域信道估计与加窗时域信道估计。

在第一个 PSSS 和第一个 SSSS 之间。因此，我们通过以下方式获得经过载波频偏补偿的信号

$$y(n)=\tilde{r}(n)e^{-j2\pi n\hat{\varepsilon}}, \tag{4}$$

其中，$\tilde{r}(n)$表示时间同步后的信号。

III. 提出的射频指纹提取方法

本节提出一种新颖的基于物理侧链路广播信道的LTE-V2X系统射频指纹提取方法，主要包括信道估计、信道均衡和射频指纹去噪。

A. 信道估计

我们采用改进的最小二乘算法 [18] 进行信道估计。该算法的主要思想是，首先通过最小二乘算法获得初始频域信道估计，再通过逆离散傅里叶变换（IDFT）将其变换到时域。随后，我们进行时域加窗，以排除噪声和射频指纹。最后，通过离散傅里叶变换（DFT）将所得信号变换到频域。物理侧链路广播信道子帧的信道估计详细步骤如下所述。

将预处理并移除循环前缀后的接收物理侧链路广播信道中第 i 个时域单载波频分多址符号记为 $y_i(n)$，该符号携带射频指纹信息和信道信息。然后，对应于 PSSS、SSSS 和解调参考信号符号的时域接收信号经过离散傅里叶变换（DFT）转换到频域，表示为

$$Y_i(k)=\text{DFT}_N\{y_i(n)\},0\le k\le N-1, \tag{5}$$

其中，DFT$_N\{\cdot\}$表示 N 点 DFT，$i=2$、3、5、7、10、12、13。将与 PSSS、SSSS 和解调参考信号所占有效带宽对应的频域接收信号记为 $Y_i(k)$。然后，计算包含射频指纹和噪声的第 i 个符号的初始频域信道估计 $H_i(k)$，计算公式如下

$$\hat{H}_i(k)=\frac{\widehat{Y_i}(k)}{\widehat{X_i}(k)},k\in\mathbb{N}_i, \tag{6}$$

其中， $X_i(k)$ 表示 PSSS、SSSS 或解调参考信号，$\mathbb{N}_i$ 定义如下

$$\mathbb{N}_i = \begin{cases} [5,66], i = 2,3,12,13 \\ [0,71], i = 5,7,10 \end{cases}. \tag{7}$$

随后，基于 $\hat{H}_i(k)$，我们通过以下方式获得初始时域信道估计

$$\hat{h}_i(n) = \text{IDFT}_{N_i}\{\hat{H}_i(k)\}, n \in \mathbb{N}_i, \tag{8}$$

其中，$\text{IDFT}_{N_i}\{\cdot\}$ 表示 N_i点逆离散傅里叶变换，且 N_i 定义如下

$$N_i = \begin{cases} 62, i = 2,3,12,13 \\ 72, i = 5,7,10 \end{cases}. \tag{9}$$

由于信道冲激响应集中在少数时域采样点上，而噪声和射频指纹分布于整个时域，因此我们可以对 $h_i(n)$应用适当的窗函数，以通过以下方式获得改进的时域信道估计

$$\breve{h}_i(n) = \hat{h}_i(n) w_i(n), n \in \mathbb{N}_i, \tag{10}$$

其中， $w_i(n)$表示窗函数。图3展示了加窗操作，其中使用了矩形窗。由于加窗操作去除了大部分噪声和射频指纹，因此得到的信道估计更加准确。

获得$\breve{h}_i(n)$后，我们进一步得到相应的频域信道估计，如下所示

$$\breve{H}_i(k) = \text{DFT}_{N_i}\{\breve{h}_i(n)\}, k \in \mathbb{N}_i, \tag{11}$$

考虑到相邻符号所经历的信道近似相同，尤其是在车速不太高时，我们可以进一步对相邻的 $\breve{H}_i(k)$ 求均值以抑制噪声，从而提高信道估计的准确率。例如，如果一个子帧内的信道变化可以忽略不计，则最终的频域信道估计可计算为

$$\tilde{H}(k) = \begin{cases} \dfrac{\breve{H}_{PSSS}(k) + \breve{H}_{DMRS}(k) + \breve{H}_{SSSS}(k)}{7}, 5 \le k \le 66 \\ \dfrac{\breve{H}_{DMRS}(k)}{3}, 0 \le k \le 71 \end{cases}, \tag{12}$$

其中

$$\breve{H}_{PSSS}(k) = \breve{H}_2(k) + \breve{H}_3(k), \tag{13}$$

$$\breve{H}_{DMRS}(k) = \breve{H}_5(k) + \breve{H}_7(k) + \breve{H}_{10}(k), \tag{14}$$

$$\breve{H}_{SSSS}(k) = \breve{H}_{12}(k) + \breve{H}_{13}(k). \tag{15}$$

B. 信道均衡

获取信道估计 $\tilde{H}(k)$ 后，我们可以通过执行信道均衡来去除信道信息，并获得初始射频指纹特征 $R_i(k)$，方法是

$$R_i(k) = \frac{\widehat{Y}_i(k)}{\tilde{H}(k)}, k \in \mathbb{N}_i. \tag{16}$$

请注意，上述信道均衡不会导致射频指纹信息丢失，因为在信道估计阶段，大多数射频指纹已通过加窗操作去除。

C. 射频指纹去噪

根据（16），初始射频指纹特征仍受到 $Y_i(k)$ 中噪声的影响。为减轻噪声对所提取射频指纹的影响，我们进一步对对应于同一数据序列的初始射频指纹求均值。具体而言，PSSS、解调参考信号和 SSSS 的去噪射频指纹表示为

$$R_{PSSS}(k) = \frac{R_2(k) + R_3(k)}{2}, 5 \le k \le 66, \tag{17}$$

$$R_{DMRS}(k) = \begin{cases} \dfrac{R_5(k) + R_7(k) + R_{10}(k)}{3}, N_{ID}^{SL} \bmod 2 = 0 \\ \dfrac{R_5(k) + R_{10}(k)}{2}, \quad N_{ID}^{SL} \bmod 2 = 1 \end{cases}, \quad 0 \le k \le 71, \tag{18}$$

$$R_{SSSS}(k) = \frac{R_{12}(k) + R_{13}(k)}{2}, 5 \le k \le 66. \tag{19}$$

请注意，当侧行链路同步信号标识 N_{ID}^{SL} 为奇数时，第 7 个符号上的解调参考信号序列与第 5 个和第 10 个符号上的序列不同。因此，对于这种情况，我们仅计算具有相同数据序列的 $R_5(k)$ 和 $R_{10}(k)$ 的均值。最后，得到最终的射频指纹特征$\mathbf{R}(k)$，表示为

$$\mathbf{R}(k) = \begin{cases} R_{DMRS}(k), \quad 0 \le k \le 4, 67 \le k \le 71 \\ [R_{PSSS}(k), R_{DMRS}(k), R_{SSSS}(k)], 5 \le k \le 66 \end{cases}. \tag{20}$$

IV. 仿真与实验结果

在实验中，我们分别采用具有不同射频指纹参数的10个仿真LTE-V2X终端和6个实际LTE-V2X模块生成物理侧链路广播信道子帧，并基于所提出的射频指纹提取方案评估不同设备的分类性能。

A. 仿真验证

在仿真中，我们为10个终端设置了不同的射频指纹参数，包括I/Q直流偏置、基带低通滤波器系数、增益不平衡、正交相位偏差和射频前端功率放大器系数，具体见表I，以确保调制域误差矢量幅度（EVM）在17.5%以内[19]。

接下来，携带10个终端生成的射频指纹的物理侧链路广播信道信号通过仿真的扩展典型城市（ETU）多径信道[20]，，其中车速范围为0至120 km/h。此外，信噪比范围为0至30 dB。

随后，我们使用随机森林算法对 10 个终端进行分类实验。每个终端接收的 700 个物理侧链路广播信道子帧构成训练集，其中信噪比为 30 dB，车速为 30 km/h。测试集由每个终端的另外 300 个子帧组成。

表 I 10 个仿真 LTE-V2X 终端的射频指纹参数

终端索引	直流偏置	滤波器系数	增益不平衡	相位偏差	功率放大器系数
1	D_I=0, D_Q=0	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0.1	0.1	[1 0 0]
2	D_I=0.01, D_Q=0	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0.01	0.01	[1 0 0]
3	D_I=0, D_Q=-0.01	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0	0	[1 0 0]
4	D_I=-0.005, D_Q=0.005	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0.01	0.01	[1 0 0]
5	D_I=0.005, D_Q=-0.005	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0	0	[1 0 0]
6	D_I=0, D_Q=0	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0.05	0	[0.9+0.15j 0.1 0.1-0.15j]
7	D_I=0, D_Q=0	h_I=[1 0], h_Q=[1 0]	0	0.05	[1.15 -0.2 0]
8	D_I=0, D_Q=0	h_I=[0.825 0], h_Q=[1.175 0]	0	0	[1 0 0]
9	D_I=0, D_Q=0	h_I=[1 0.175], h_Q=[1-0.175]	0	0	[1 0 0]
10	D_I=0.005, D_Q=0	h_I=[0.95 0], h_Q=[1 0.05]	0.05	0.05	[0.95-0.05j 0 0]

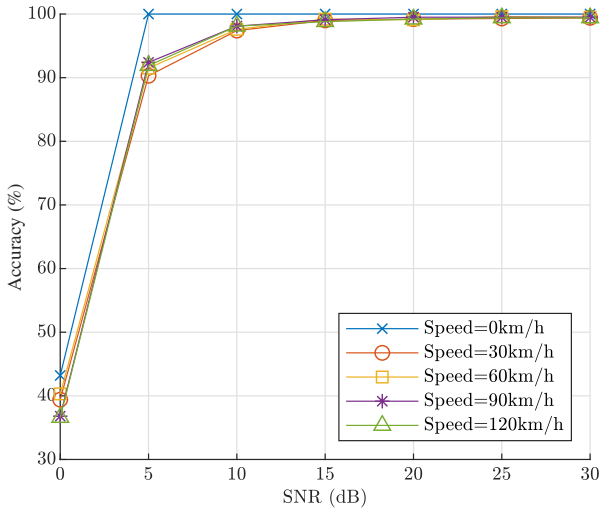


图4. 在不同信噪比和不同车辆速度下，基于所提出的RFF提取方法对10个仿真LTE-V2X终端的识别准确率。

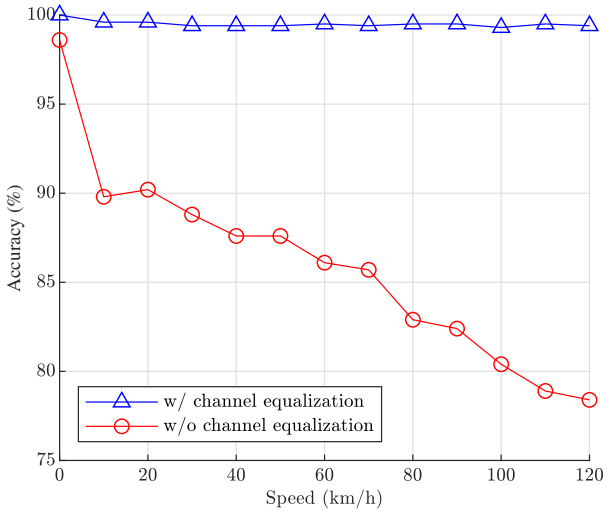
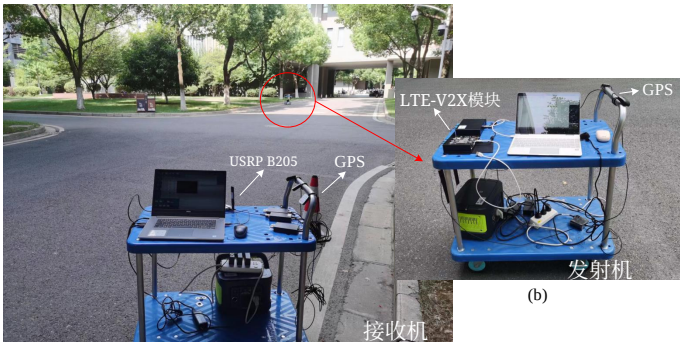


图5. 10个仿真LTE-V2X终端在有信道均衡和无信道均衡情况下的识别准确率对比（信噪比 = 30 dB）。

图 4 展示了 10 个终端在不同信噪比和不同车速下的识别准确率。可以发现，车速对射频指纹识别准确率的影响很小。当信噪比超过 10 dB 时，无论车速如何，准确率始终高于 97%；而当信噪比低于 10 dB 时，准确率会显著下降，这主要是因为我们仅使用一个物理侧链路广播信道子帧进行射频指纹提取。这表明，所提出的射频指纹提取方法在中高信噪比下具有出色的分类性能。

图5比较了采用和未采用信道均衡的方法的RFF识别性能，其中信噪比为30 dB。当速度从0 km/h增加到120 km/h时，基于信道均衡的方法的准确率没有明显下降，始终保持在99%以上；而未采用信道均衡时，识别准确率迅速下降，尤其是在高速情况下。这表明，我们提出的基于信道估计的方法能够有效减轻无线信道对射频指纹提取的影响。



(a) (b)

图6. 实验设置：（a）接收设备（USRP B205）；（b）发送设备（LTE-V2X模块）。

B. 实验验证

在实验中，我们使用 6 个 LTE-V2X模块发送物理侧链路广播信道子帧，并使用 USRP B205 接收信号。实验设置如图 6 所示。首先，我们在静止状态和低速移动状态下，为每个模块采集 400 个物理侧链路广播信道子帧作为训练集

表 II 不同速度下 6 个 LTE-V2X模块的射频指纹识别准确率

设备 \ 速度	0 千米/小时	10 千米/小时	20 千米/小时	30 千米/小时
准确率				
模块1	92%	93%	90%	91%
模块 2	69%	71%	69%	68%
模块 3	92%	90%	93%	93%
模块 4	100%	100%	100%	97%
模块 5	100%	100%	100%	100%
模块 6	100%	100%	100%	100%
平均值	92.2%	92.3%	92%	91.5%

随后，从每个模块额外采集 100 个子帧作为测试集，速度范围为 10 至 30 km/h。6 个 LTE-V2X模块的分类准确率如表 II 所示。可以看出，平均准确率超过 90%。此外，速度提升后，准确率并未显著下降。需要注意的是，模块 1 至 4 属于同一类型，其射频指纹特征非常相似。因此，相应的分类准确率较低。

V. 结论

本文提出了一种适用于 LTE-V2X 系统的新型 RFF 提取方法。针对物理侧链路广播信道（PSBCH）的 PSSS、SSSS 和解调参考信号，我们通过执行信道估计、信道均衡和射频指纹去噪，成功提取了区分度很高的射频指纹特征。仿真和实验结果均验证了该方法在复杂的时变信道和多径信道条件下表现稳健。该方法还可应用于具有固定序列的任何宽带多载波通信系统。未来工作中，可在实际的高移动性信道环境下测试更多终端，以进一步验证该方法的有效性。

参考文献

[1] S. Gyawali、S. Xu、Y. Qian 和 R. Q. Hu，“基于蜂窝网络的 V2X 通信面临的挑战与解决方案”，*IEEE* 通信综述与教程，第 23 卷，第 1 期，第 222–255 页，2021 年第一季度。[2] W. Anwar、N. Franchi 和 G. Fettweis，“V2X 通信技术的物理层评估：5G NR-V2X、LTE-V2X、IEEE 802.11bd 和 IEEE 802.11p”，载于*IEEE* 第 *90* 届车辆技术会议（*VTC* 秋季会议）论文集，美国夏威夷州檀香山，2019 年 9 月，第 1–7 页。[3] C. Wang、Z. Li、X.-G. Xia、J. Shi、J. Si 和 Y. Zou，“在蜂窝车联网（C-V2X）中利用人工噪声增强物理层安全”，*IEEE* 车辆技术汇刊，第 69 卷，第 12 期，第 15 253–15 268 页，2020 年 12 月。[4] X. Luo、Y. Liu、H.-H. Chen 和 Q. Guo，“智能网联汽车网络中的物理层安全”，*IEEE* 网络，第 34 卷，第 5 期，第 232–239 页，2020 年 9/10 月。[5] M. Mosca，“量子计算机时代的网络安全：我们准备好了吗？”，*IEEE* 安全与隐私，第 16 卷，第 5 期，第 38–41 页，2018 年 9/10 月。[6] K. Zeng、K. Govindan 和 P. Mohapatra，“无线网络中的非密码学认证与识别 [新兴无线网络中的安全与隐私],”，*IEEE* 无线通信，第 17 卷，第 5 期，第 56–62 页，2010 年 10 月。

[7] A. M. Ali、E. Uzundurukan 和 A. Kara，“射频指纹识别中的瞬态信号检测改进”，载于第 *25* 届信号处理与通信应用会议（*SIU*）论文集，土耳其安塔利亚，2017 年 5 月，第 1–4 页。[8] Y. Shi 和 M. A. Jensen，“利用MIMO传输改进无线设备的辐射特征识别”，*IEEE* 信息取证与安全汇刊，第 6 卷，第 4 期，第 1346–1354 页，2011 年 12 月。[9] W. C. Suski II、M. A. Temple、M. J. Mendenhall 和 R. F. Mills，“利用频谱指纹提升无线网络安全”，载于*IEEE* 全球电信会议（*GLOBECOM*）论文集，美国路易斯安那州新奥尔良，2008 年 11 月，第 1–5 页。[10] L. Peng、A. Hu、J. Zhang、Y. Jiang、J. Yu 和 Y. Yan，“混合射频指纹提取与设备分类方案的设计”，*IEEE* 物联网期刊，第 6 卷，第 1 期，第 349–360 页，2019 年 2 月。[11] G. Shen、J. Zhang、A. Marshall 和 J. R. Cavallaro，“面向 LoRa 的可扩展且信道稳健的射频指纹识别”，*IEEE* 信息取证与安全汇刊，第 17 卷，第 774–787 页，2022 年 2 月。[12] Y. Yang、A. Hu、Y. Xing、J. Yu 和 Z. Zhang，“一种数据无关射频指纹提取方案”，*IEEE* 无线通信快报，第 10 卷，第 11 期，第 2524–2527 页，2021 年 11 月。[13] L. Sun、X. Wang、Z. Huang 和 B. Li，“基于特征非均匀性的射频指纹提取”，*IEEE* 物联网期刊，提前出版，2022 年 2 月 25 日，doi：10.1109/JIOT.2022.3154595。[14] W. Wang、Z. Sun、S. Piao、B. Zhu 和 K. Ren，“无线物理层识别：建模与验证”，*IEEE* 信息取证与安全汇刊，第 11 卷，第 9 期，第 2091–2106 页，2016 年 9 月。[15] ETSI 第三代合作伙伴计划，“LTE；演进型通用陆地无线接入（E-UTRA）；物理信道与调制（第 14 版）”，法国比亚里茨索菲亚·安提波利斯邮政特区，3GPP TS 36.211 版本 14.2.0，2016 年。[16] T. M. Schmidl 和 D. C. Cox，“适用于正交频分复用的稳健频率与定时同步”，*IEEE* 通信汇刊，第 45 卷，第 12 期，第 1613–1621 页，1997 年 12 月。[17] J. J. van de Beek 和 M. Sandell，“正交频分复用系统中时间与频率偏移的最大似然估计”，*IEEE* 信号处理汇刊，第 45 卷，第 7 期，第 1800–1805 页，1997 年 7 月。[18] J. J. van de Beek、O. Edfors、M. Sandell、S. Wilson 和 P. Borjesson，“关于正交频分复用系统中的信道估计”，载于 *IEEE* 第 *45* 届车辆技术会议论文集，第 2 卷，美国伊利诺伊州芝加哥，1995 年 7 月，第 815–819 页。[19] ETSI 第三代合作伙伴计划，“无线接入网技术规范组；演进型通用陆地无线接入（E-UTRA）；用户设备（UE）无线电发射与接收（第 9 版）”，法国比亚里茨索菲亚·安提波利斯邮政特区，3GPP TS 36.101 版本 9.4.0，2010 年。[20]ETSI 第三代合作伙伴计划，“无线接入网技术规范组；演进型通用陆地无线接入（E-UTRA）；基站（BS）无线电发射与接收（第 14 版）”，法国比亚里茨索菲亚·安提波利斯邮政特区，3GPP TS 36.104 版本 14.3.0，2017 年。