

基于主动感知辅助的车联网波束赋形



Beamforming Scheme in Vehicular Communications Assisted by Active Sensing

孟骁/MENG Xiao¹, 刘凡/LIU Fan¹, 夏树强/XIA Shuqiang^{2,3}

(1. 南方科技大学, 中国 深圳 518055;

2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;

3. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055)

(1. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

3. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202205004

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20221021.1719.002.html>

网络出版日期: 2022-10-22

收稿日期: 2022-08-15

摘要: 毫米波大规模多入多出系统具有提升车联网系统服务质量的潜力, 但现有的系统设计无法充分发挥该潜力。针对该问题, 通过分析毫米波频段通信信道与感知信道的相似特性, 论证了在车联网系统中使用感知功能对通信功能进行辅助的可行性。在此基础上, 以波束管理为核心, 阐述了具有更低导频开销的帧结构方案和使用感知功能辅助通信功能的信号处理一般流程。最后, 讨论并总结了基于感知辅助的车联网通信系统中的若干开放问题。

关键词: 通信感知一体化; 车辆基础设施互联系统; 大规模多入多出系统

Abstract: The millimeter-wave massive multiple-input multiple-output systems have the potential to improve the service quality of vehicle-to-infrastructure (V2I) networks, but existing system designs cannot fully exploit this potential. In response to this problem, the feasibility of using the sensing function to assist the communication function in the V2I networks is demonstrated by analyzing the similar characteristics of the communication channel and the sensing channel in the millimeter wave system. On this basis, a general design framework, the physical layer data-frame structure, and the signal processing pipeline are elaborated. Finally, several open problems in sensing-assisted V2I networks are summarized and discussed.

Keywords: integrated sensing and communication; V2I; multiple-input multiple-output system

1 通信感知一体化的背景

近年来, 作为热点技术, 雷达通信一体化 (JRC) 受到了学术界、工业界等的广泛关注。1963年, 美国的格伦·L·马丁公司提出的早期雷达通信一体化系统 (即利用导弹上的制导雷达发射的脉冲组携带通信信息^{[1])}, 可视为 JRC 的起源。20 世纪 90 年代以来, 学术界和工业界陆续提出多种 JRC 方案, 其主要目的是将通信功能整合至已有的雷达系统中, 从而使得雷达不再只是单一地完成感知任务, 还可以作为通信终端从而成为通信网络中的一部分。在 JRC 技术的支撑下, 雷达系统不仅可以完成对目标搜索、探测、跟踪的功能, 还可以实现远距离、大容量的双向数据通信^[2]。

随着 5G 通信技术的发展, JRC 这一经典课题再次焕发出全新的活力, 其主要内涵包括两方面: 其一, 随着无线接入设备数量的爆炸性增长, 频谱拥塞问题日益严重, 而常用的雷达系统独享了大量的频谱资源。因此若能使得雷达与无线通信系统共享频谱, 则拥塞问题可以得到极大缓解^[3]; 其二, 有相当一部分新兴应用需要同时以通信功能和感知功能作为基础, 例如智慧城市、智慧家庭等物联网应用, 以及车联网、自动驾驶等智能交通应用。雷达与通信的频谱共享及一体化, 已经成为学术界最热门的话题之一, 并进一步地被升华为通信感知一体化 (ISAC)。学术界和工业界广泛认为, ISAC 将成为 B5G/6G 无线通信系统最核心的特性^[4]。

2 ISAC 系统在车联网应用中的新机遇

以各种形式的自动驾驶为代表的新一代车辆应用对车联网

基金项目: 中国科协青年人才托举计划 (YESS20210055); 国家自然科学基金 (62101234); 国家自然科学基金联合基金 (U20B2039)

网尤其是车辆对基础设施通信（V2I）网络的功能和性能提出了新的要求。在通信方面，为满足下一代智能网联车辆的指标需求，V2I网络需要实现高速率、低时延传输（通常认为业务吞吐量达到吉比特每秒量级，通信时延小于10 ms）。在感知方面，V2I网络需要提供稳定可靠的厘米级精度定位功能，以实现对交通环境和车辆的高精度感知^[5-6]。

然而，目前已部署的车联网系统远无法达到上述要求。例如，专用短程通信技术（DSRC）仅能提供最高27 Mbit/s的通信速率，且受限于载波监听多址（CSMA）的接入方式，通信质量在车辆密度提高时严重下降^[7]。再如，现已规模化部署的4G/5G蜂窝网络，由于其主要工作在sub-6 GHz频段，所能提供的通信和定位功能也相对受限。其中，长期演进（LTE）网络通信速率在100 Mbit/s量级，端到端时延在百毫秒量级^[8]；第3代合作伙伴计划（3GPP）在Rel-16版本引入的5G网络无线接入定位技术可以达到室内定位误差小于3 m、室外定位误差小于10 m的效果，均难以满足上述通信与感知需求。此外，全球导航卫星系统（GNSS）的引入，可以有效降低定位误差，但是其位置信息的刷新率受限^[9]。

随着毫米波大规模多入多出（MIMO）技术的实际应用，V2I网络的性能将有望得到显著提升。在毫米波频段具有更加充裕的可用带宽，这不仅可以提供更高的数据传输速率，同时还可以显著提升感知功能的距离分辨率。另外，随着收发天线数目的增加，系统可以使用更窄的“铅笔式”波束准确地指向车辆或其他任意感兴趣的通信用户/感知目标^[9]。这在有效补偿毫米波路径损耗的同时还能提供更高的角度估计精度。更重要的是，毫米波信道具有稀疏性，这使得我们在使用毫米波进行雷达定位时收到的杂波干扰更少，定位更为可靠。上述需求和条件都为ISAC系统在车联网中的应用提供了现实意义和理论基础。

3 基于感知辅助的预测波束赋形方案

3.1 帧结构设计

尽管毫米波大规模MIMO技术具有为V2I网络提供更大的网络容量、更短的通信延迟和更高的定位精度的潜力，但现有的系统设计尤其是波束管理方案和帧结构设计方案，却无法充分挖掘该潜力。传统的

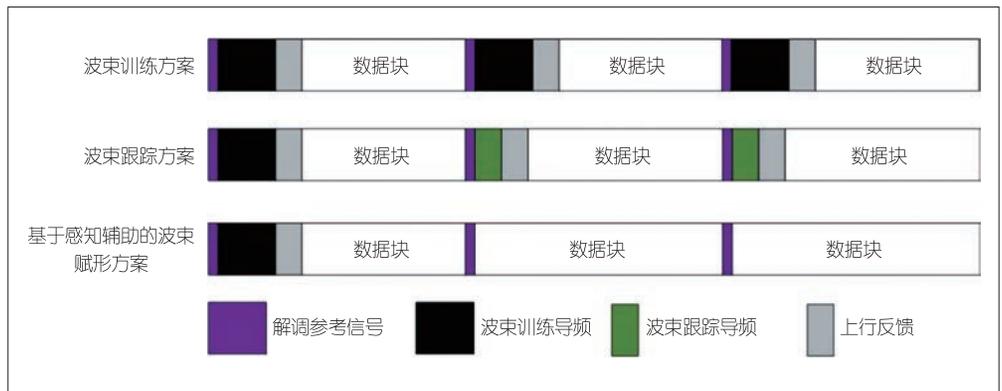
信道估计常利用上下行信道的互易特性，由路边单元（RSU）发送下行导频信号，经用户估计信道特性后通过上行链路反馈至RSU，该方案被称为波束训练方案，具体帧结构形式见图1^[10]。该方案在sub-6 GHz频段具有良好的性能，但却不完全适用于毫米波频段。该方案假定相邻两次信道估计之间的信道状况并无强关联性，因此需要发送较长的导频来完成信道估计。然而实际情况是，具有稀疏特性的毫米波信道主要由用户与RSU的相对位置决定。这使得两次信道实现之间具有较强的关联性，利用信道之间的关联特性可以有效地降低导频开销。因此，部分学者提出了如图1中波束跟踪方案的帧结构。通过利用两次信道探测之间的关联性，波束跟踪方案可以使用较短的导频完成信道估计^[11]。

此外，由于车辆本身外壳多为金属体，且一般不做特殊的电磁隐身处理，因此具有较大的雷达散射截面积（RCS）。这使得RSU发送的通信信号在传递信息的同时还可以产生较强的雷达回波，从而为ISAC设计提供了必要条件。具体而言，现有的使用感知辅助的预测波束赋形方案都具有相似的设计思路^[12-17]，即充分利用车辆需要沿道路运动的交通规则和车辆位置及速度不会发生突变的物理规律，利用通信信号的回波进行雷达信号处理以估计和预测车辆状态（信道状态），并设计波束以匹配预测的信道。该方案可以使用完整的通信信号进行匹配滤波，具有较高的匹配滤波增益；同时，由于信道探测流程均在RSU侧进行，因此无须用户端进行上行反馈，节省了反馈开销。

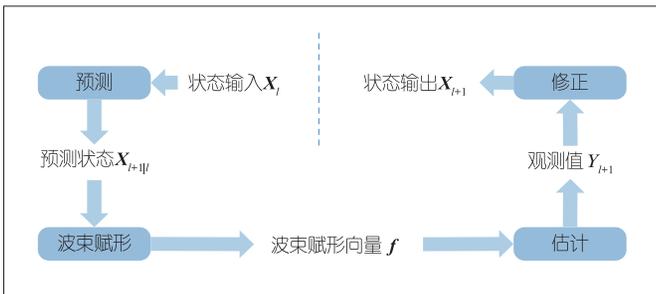
3.2 信号处理的一般流程

与系统的帧结构设计相匹配，系统的信号处理流程如图2所示。整个流程可以概括为4个步骤：预测、波束赋形、估计和修正。

信号的“预测”步骤依据状态转移函数进行。在ISAC



▲图1 基于感知辅助的通信系统帧结构设计



▲图2 基于感知辅助的通信系统一般信号处理流程

的V2I系统中，车辆的状态信息可以用其位置向量 \mathbf{x} 、速度向量 \mathbf{v} 、加速度向量 \mathbf{a} 和反射因子 β 表示。若将第 l 个时间窗口的状态信息用集合 \mathbf{X}_l 表示，则系统的状态转移方程可以表示为：

$$\mathbf{X}_{l+1} = h(\mathbf{X}_l) + \mathbf{z}, \quad (1)$$

其中， h 为状态转移函数， \mathbf{z} 为由于离散时间量化和系统不确定性带来的系统噪声。在状态转移函数中，运动模型部分可以表示为 $\mathbf{x}_{l+1} = \mathbf{x}_l + \mathbf{v}_l \Delta T$ ， $\mathbf{v}_{l+1} = \mathbf{v}_l + \mathbf{a}_l \Delta T$ ， $\mathbf{a}_{l+1} = \mathbf{a}_l$ 。对于道路模型为直线的情况，位置、速度和加速度可以在一般的三维笛卡尔坐标系中进行描述^[12]；对于道路模型为曲线的情况，状态信息可以在以道路中心的坐标轴的曲线坐标系中描述^[17]。若假设短时间内RSC为一个定值，则相邻两个时间单元的反射因子的状态转移模型可以描述为一个随着RSU与车辆间距离变化的函数，长时间尺度上的RCS变化可以认为是系统噪声。由于系统的真实状态始终是不可知的，因此需要使用上一时刻估计得到的系统状态进行预测并得到 $\mathbf{X}_{l+1|l}$ 。

在“波束赋形”步骤中，需要先将预测得到的位置状态信息映射至以RSU为中心的极坐标系，即：

$$(\theta, \phi) = g(\mathbf{X}_{l+1|l}), \quad (2)$$

其中， g 为坐标系之间的映射函数，由状态方程所在的坐标系设定决定， θ 和 ϕ 分别为车辆相对RSU的方位角和俯仰角。在获得这两个角度后，可以依据通信和感知的任务对发射波束进行设计。例如，如果需要获得最好的通信性能，则可以将波束赋形矢量 \mathbf{f} 设计为导向矢量 $\mathbf{w}(\theta, \phi)$ 的共轭转置的形式；如果想要使得波束完整覆盖车身以获得对扩展目标更好的感知性能^[12]，则可以将其设计成导向矢量加权展宽的形式^[15]；如果想要在完成通感目标的同时提供物理层安全性能，则可以设计人为噪声或在窃听方向设置零陷点等^[18]。

在“估计”步骤中，系统通过接收并处理信号在车辆处的散射完成感知功能。具体来说，对于任意一个目标车辆，

其回波信号可以表示为公式 (3)：

$$\mathbf{r}(t) = \beta \mathbf{b}(\theta, \phi) \mathbf{a}^T(\theta, \phi) \mathbf{f} \mathbf{s}(t - \tau) e^{-j2\pi\mu t} + \mathbf{n}(t), \quad (3)$$

其中， β 为前文所述的反射因子， $\mathbf{b}(\theta, \phi)$ 和 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 分别为接收天线和发射天线到目标的信道响应， \mathbf{f} 为对该目标的波束赋形向量， $\mathbf{s}(t - \tau)$ 为经过时延的通感一体发送信号， $e^{-j2\pi\mu t}$ 是由于车辆和路边单元径向相对速度引起的多普勒频移， $\mathbf{n}(t)$ 为接收端噪声和可能存在的杂波。通过对上述接收信号进行雷达信号处理即可估计出感兴趣的状态量。将回波信号中的待估计量如角度、时延、多普勒频率等的集合记为 \mathbf{Y}_{l+1} ，则可以依据信号的回波特性进行最大似然估计以完成雷达感知步骤。此外，也可以使用匹配滤波、经典角度估计算法、经典反射系数估计算法等对不同的系统参数进行级联估计，以降低估计的算法复杂度。值得一提的是，由于毫米波大规模MIMO系统的信道具有稀疏性，不同角度之间信道的相关性弱，这使得杂波数量和干扰功率大大降低，增加了参数估计的精度。由于系统具有较高的角度分辨率，因此可以在角度域对不同车辆进行分辨。

为了提升预测精度，充分利用车辆沿道路行进这一先验信息，我们还可以在“修正”步骤中利用估计信息对预测状态进行修正。常用的修正模型可以为卡尔曼滤波类算法^[12]或贝叶斯信息传递类算法^[13]。基于此类算法，可以依据雷达感知得到的估计量 $\hat{\mathbf{Y}}_{l+1}$ 对预测得到的 $\mathbf{X}_{l+1|l}$ 进行修正，以获得一个高精度的估计状态 $\hat{\mathbf{X}}_{l+1}$ ，从而对下一时间窗口的系统状态进行预测。值得一提的是，当天线数量、带宽增加时，角度分辨率和距离分辨率会随之提升，车辆有可能从点目标模型逐渐变为扩展目标模型。此时的修正模型相比于一般的点目标修正模型更为复杂。

通过上述4个步骤，即可完成第 $l + 1$ 个时间窗口的波束赋形和车辆位置感知。当车辆刚驶入该RSU的覆盖范围时，其初始状态可以由其他RSU进行交接得到，或由该RSU发送一般的全向波形并进行传统雷达感知得到。

4 未来研究展望

4.1 感知辅助的车联网技术在开放道路下的应用

现有的研究工作均假设车辆行驶于封闭的道路块，即在感兴趣的路面区域内没有交叉路口和车流交汇。然而在实际场景下，路口处的交通状况更为复杂，对通信与感知服务的质量要求更高。因此我们还需要针对这一场景进行更加深入的研究，以进一步扩展该技术的应用范围。

4.2 感知辅助通信技术与智能反射面(IRS)技术的结合

在车联网系统的实际环境中,不可避免地会出现因障碍物阻挡而导致的通信中断或质量下降。使用IRS技术可以对信号的电磁传播环境进行部分重构,有效地降低通信中断和感知失效的概率。

4.3 感知辅助的车联网技术在复杂杂波场景下的应用

毫米波大规模MIMO系统的信道具有稀疏特性,该特性使得感知分系统的性能得以保证。但是在一些特定场景下,例如,车辆被行道树遮挡或在特定角度下的地杂波较大时,杂波对感知系统的影响不能忽略。因此,我们仍然需要针对信道环境复杂的场景加以研究。

5 结束语

在频谱资源日益紧张、系统功耗日益增长的今天,通信和感知在未来的移动网络中并不总是竞争关系,还可以是互相补充、互相配合的协作关系。在充分挖掘感知与通信系统在硬件平台、信号处理、波形设计等方面的相似性和互补性的前提下,一体化地对无线系统进行设计,必然能够构建具有极致性能的新一代无线标准。

参考文献

- [1] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system [J]. IEEE transactions on space electronics and telemetry, 1963, 9(2): 37–42. DOI: 10.1109/TSET.1963.4337601
- [2] ROBERTON M, BROWN E R. Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques [C]//Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2003: 611–614. DOI: 10.1109/MWSYM.2003.1211013
- [3] GRIFFITHS H, COHEN L, WATTS S, et al. Radar spectrum engineering and management: technical and regulatory issues [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 85–102. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2365517
- [4] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望 [J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467–484
- [5] WYMEERSCH H, SECO-GRANADOS G, DESTINO G, et al. 5G mmWave positioning for vehicular networks [J]. IEEE wireless communications, 2017, 24(6): 80–86. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600374
- [6] KUUTTI S, FALLAH S, KATSAROS K, 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. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2812300
- [7] KENNEY J B. Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1162–1182. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2132790
- [8] GYAWALI S, XU S J, QIAN Y, et al. Challenges and solutions for cellular based V2X communications [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, 23(1): 222–255. DOI: 10.1109/COMST.2020.3029723
- [9] NGUYEN V. Massive MIMO: fundamentals and system designs [M]. Sweden: Linköping University Electronic Press, 2015
- [10] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! [J]. IEEE access, 1: 335–349. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813
- [11] ZHU D L, CHOI J, CHENG Q, et al. High-resolution angle tracking for mobile wideband millimeter-wave systems with antenna array calibration [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(11): 7173–7189. DOI: 10.1109/TWC.2018.2865759

- [12] LIU F, YUAN W J, MASOUIROS C, et al. Radar-assisted predictive beamforming for vehicular links: communication served by sensing [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(11): 7704–7719. DOI: 10.1109/TWC.2020.3015735
- [13] YUAN W J, LIU F, MASOUIROS C, et al. Bayesian predictive beamforming for vehicular networks: a low-overhead joint radar-communication approach [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(3): 1442–1456. DOI: 10.1109/TWC.2020.3033776
- [14] LIU F, MASOUIROS C. A tutorial on joint radar and communication transmission for vehicular networks—part I: background and fundamentals [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(2): 322–326. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3025310
- [15] DU Z, LIU F, YUAN W J, et al. Integrated sensing and communications for V2I networks: dynamic predictive beamforming for extended vehicle targets [EB/OL]. (2021–11–19) [2022–09–10]. <https://arxiv.org/abs/2111.10152>
- [16] DU Z, LIU F, ZHANG Z H. Sensing-assisted beam tracking in V2I networks: extended target case [C]//Proceedings of ICASSP 2022 – 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE: 8727–8731. DOI: 10.1109/ICASSP43922.2022.9747255
- [17] MENG X, LIU F, MASOUIROS C, et al. Vehicular connectivity on complex trajectories: roadway-geometry aware ISAC beam-tracking [EB/OL]. (2022–05–24) [2022–09–12]. <https://arxiv.org/abs/2205.11749>
- [18] SU N, LIU F, WEI Z, et al. Secure dual-functional radar-communication transmission: exploiting interference for resilience against target eavesdropping [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(9): 7238–7252. DOI: 10.1109/TWC.2022.3156893

作者简介



孟骁, 南方科技大学访问学者; 研究方向为机载宽带数据链、通信感知一体化; 发表论文7篇。



刘凡, 南方科技大学助理教授、博士生导师, 中国科协青年托举人才, 欧盟“玛丽·居里”学者, 广东省引进青年拔尖人才, 深圳市海外高层次人才, 并担任《IEEE COMML》《IEEE OJSP》的编委、《IEEE JSAC》《IEEE WCM》《中国通信》客座编委, 以及中兴通讯技术杂志社青促会委员; 牵头成立了IEEE通信学会通信感知一体化新兴技术倡议委员会 (IEEE ComSoc ISAC-ETI), 并担任首届学术主席, 曾被列入2021年斯坦福大学全球2%顶尖科学家榜单, 获2021年IEEE信号处理学会青年作者最佳论文奖、2020年首届中国电子学会电子信息前沿青年学者出版工程奖、2019年中国电子学会优秀博士学位论文奖; 发表学术论文60余篇。



夏树强, 中兴通讯股份有限公司资深通信预研专家; 研究方向为载波聚合、低时延高可靠、通信感知一体化; 负责国家科技重大专项1项, 曾获深圳市专利奖、广东省专利优秀奖、中国专利奖优秀奖、中国专利奖金奖、国家科技发明奖二等奖等。