

车载毫米波雷达系统优化方案及未来发展

朱陈伟 李明明 王会会

安徽江淮汽车集团股份有限公司技术中心、汽车智能网联技术安徽省重点实验室

摘要: 毫米波雷达是实现自动驾驶及ADAS功能常用的感知层硬件,已大量应用于辅助驾驶系统中。本文从毫米波雷达理论出发展开介绍,简单剖析其测量原理及影响因素,并对毫米波雷达的未来发展进行预测,分析其在角分辨率上的提升策略,旨在推动毫米波雷达技术的发展,为高阶智驾的到来贡献关键力量。

关键词: 毫米波雷达;测量原理;角分辨率

0 前言

车载环境感知传感器是汽车零部件的重要组成部分,其性能优劣直接决定了感知系统的好坏。相机(摄像头)和激光雷达的应用均有各自的优势,然而在恶劣天气以及复杂光照下,相机和激光雷达的感知可靠性会下降,存在无法满足全天候应用的短板。此外,激光雷达的较高成本,也阻碍了其规模化的前装量产应用。

毫米波雷达是目前唯一可以实现全天候感知的传感器,具备良好的测距、测速能力和低廉的成本,因此无论在0~2级驾驶辅助系统还是3~5级的自动驾驶系统中,毫米波雷达均为感知系统的标配,并随着智能化水平的提高安装数量也将增加。

本文将对毫米波雷达的工作原理及测量原理进行简单介绍,并对毫米波雷达未来改进方向进行预测,旨在促进毫米波雷达技术与应用的发展,为高阶智驾的到来贡献关键力量。

1 毫米波雷达的工作原理

毫米波雷达是一种在毫米波频段内运作的雷达,频率范围30~300 GHz(对应的波长介于1~10 mm之间),可实现远距离探测(200 m以上),对速度感知灵敏,测速准确度高,广泛地应用在自动驾驶、智慧高速建设等多个场景中。

车辆配备的毫米波雷达通过发射毫米波并接收其

反射信号,能够迅速且精确地捕捉到车辆周围的环境信息,包括与邻近物体的相对距离、速度、方位角以及它们的运动趋势等。系统随后对探测到的物体进行跟踪和分类识别,并将这些信息与车辆的动态数据相结合进行综合分析。最终,这些数据会被送至车辆的中央处理单元(ECU),进行智能分析处理。基于这些分析结果,系统会通过声音、光线或触觉反馈等多种方式,向驾驶人发出警告或提供信息,或者自动对车辆进行必要的操作,以确保驾驶的安全性和舒适性,降低事故发生风险。车载毫米波雷达的工作原理如图1所示。

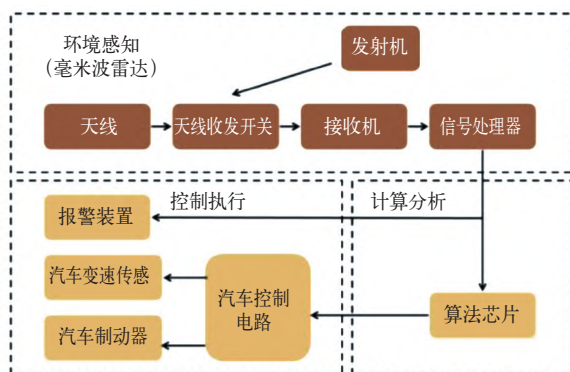


图1 车载毫米波雷达的工作原理

2 毫米波雷达的系统优化方案

2.1 雷达指标分析

毫米波雷达具备诸多优势的同时,过小的体积也带来了角分辨率难以提升的挑战,过低的角分辨率将

无法区分前方间隔较小的车辆或者行人，在实际的车辆或者高速检测的应用场景中可能造成致命的影响。

毫米波雷达有距离、速度、方位角和俯仰角四大维度，分析每个维度中各指标的主要影响因素如图2所示，可以为提升雷达精度提供优化思路。如：提高雷达垂直分辨率的方法，可以增大天线间距或增加俯仰角方向上虚拟通道个数。

2.2 系统优化方向

毫米波雷达系统优化是一个综合性的过程，它不仅仅局限于单一维度的技术改进，而是需要综合考虑硬件设计、算法优化以及系统架构的革新。为了应对日益复杂的应用场景和不断提高的性能要求，三种前沿的优化方案应运而生：多芯片级联方案、级联+虚拟孔径方案以及单芯片集成方案。这些方案各自具有独特的优势，旨在从不同角度推动毫米波雷达系统的性能飞跃。

2.2.1 多芯片级联方案

多芯片级联方案通过将多个雷达芯片以2级联/4级联/8级联等方式组合在一起，实现信号处理的并行化和增强，增加收发天线数量，以提升雷达的探测范围和精度。这种方案能够充分利用现有芯片技术的优势，通过增加芯片数量来扩展系统的处理能力，优点是较为成熟，开发难度低，上市时间短，但弊端在于

成本高、功耗高且体积大，并且会面临PCB板面翘曲、中频同步等问题。目前采用多芯片级联方案的厂商有大陆、采埃孚和华为等。

2.2.2 级联+虚拟孔径方案

虚拟孔径成像技术通过每根接收天线在不同时间产生不同的相位，从而在效果上模拟出更多的接收天线，形成较大的“虚拟孔径”。根据发射模式不同可以分为时分复用TDM-MIMO、频分复用FDM-MIMO、相位调制连续波PMCW-MIMO以及二相编码调制BPM-MIMO雷达体制。其核心区别是通道分离的实现方式不同。这几种发射模式根据收发体制又可以分为两类：一种是在发射端，发射阵元分开发射信号，即一次只有一个发射天线在发射电磁波；另一种是发射端的发射阵元同时发射信号，这种发射模式通常需要每个发射阵元间的信号相互正交，方便后面通道的分离。

级联+虚拟孔径方案进一步融合了多芯片级联与虚拟孔径技术的优势。通过多芯片级联的基础上引入虚拟孔径技术，该方案能够在不增加物理天线数量的前提下，通过算法优化实现天线阵列的有效扩展，从而提升雷达的分辨率和抗干扰能力。与传统雷达依赖堆叠天线数相比，这种方案不仅提高了雷达系统的性能，还降低了硬件成本和复杂度，尺寸也偏小，缺陷在于需要先通过算法的方式实现通道数量的增加，

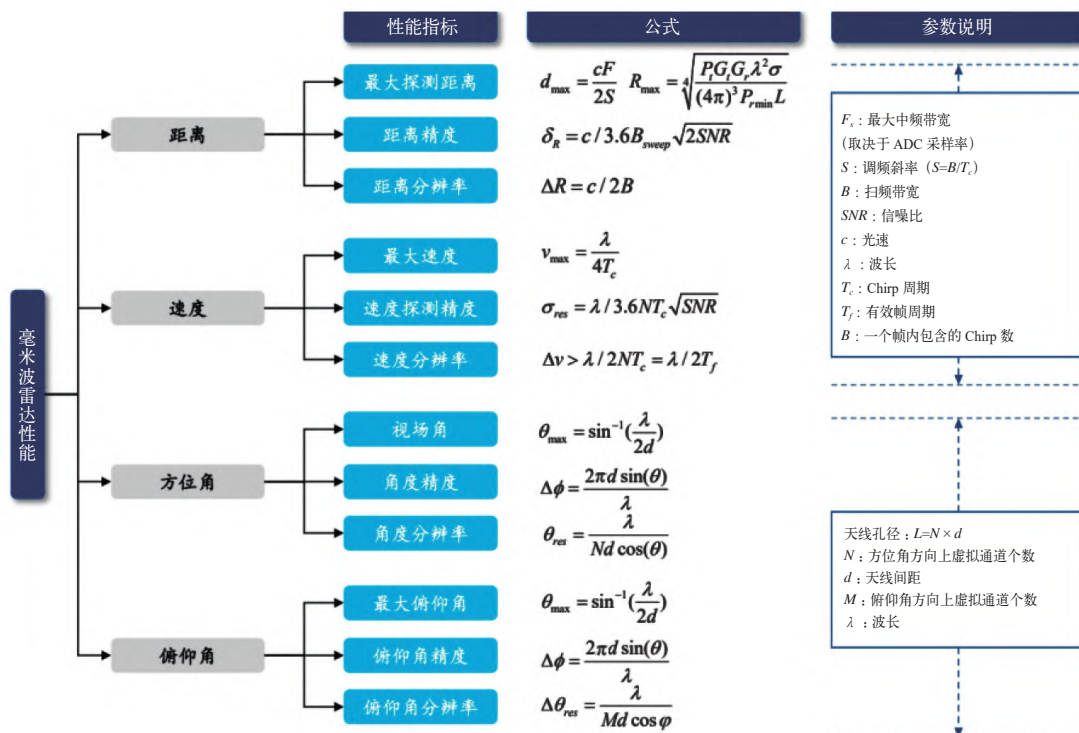


图2 各指标的主要影响因素

实时性较差,故这种方案也难以成为高阶自动驾驶的选择。目前采用此方案的厂商有傲酷和几何伙伴。

2.2.3 单芯片集成方案

单芯片集成方案则是毫米波雷达系统优化的另一大趋势。通过将雷达系统的所有关键组件(包括收发器、信号处理单元和天线阵列)集成到单个芯片上,这种方案能够显著减小硬件尺寸、降低功耗,具有更加灵活的调制方式与架构,而且可将毫米波雷达的体积缩小,同时用少量的通道实现最好的射频性能。但弊端在于对处理器要求高,单芯片实现的数据量更多,对MCU性能提出了更高要求。天线布局、干扰和信噪比等问题需要大量验证。目前采用此方案的厂商有大陆、博世等。

3 毫米波雷达的未来发展

毫米波雷达是实现自动驾驶及ADAS功能常用的感知层硬件,作为前向雷达已大量应用于辅助驾驶系统中。而随着毫米波雷达的成本不断降低,性能不断提升,毫米波雷达搭载位置正从前向+四角向后向、侧向等位置延展,以实现盲区检测、自动泊车以及后碰撞预警等更高阶、更丰富的辅助驾驶功能。

但从主机厂角度来看,首先,毫米波雷达的应用必须始终紧密围绕用户需求,从汽车安全性和舒适性角度出发。如用户期望自适应巡航控制能够更加精准地保持与前车的距离,避免不必要的制动和加速,这就要求毫米波雷达在探测精度和响应速度上不断改进。用户期望汽车外观好看、内部空间大、传感器成本低,这就要求毫米波雷达向着小型化、集成化更高的方向发展。其次,雷达厂商需提供针对特定车型的定制化开发。对于高端车型用户,可能更注重雷达在复杂路况下的性能表现,如恶劣天气和拥堵城市道路,这时可以投入更多资源进行算法优化,提高毫米波雷达在这些场景下的可靠性。而对于经济型车型用户,成本控制是关键。这时可以通过优化设计和生产流程,降低毫米波雷达的成本,同时保证其基本性能满足用户需求。

4 结语

本文首先剖析了毫米波雷达在自动驾驶技术体系中的不可或缺性,强调了其在提升车辆环境感知能力、保障行车安全及推动自动驾驶技术成熟落地方面的重要作用,然后简单阐述毫米波雷达的测量原理,最后

分析了提升毫米波雷达性能的多种可行方案,这些方案对雷达硬件设计优化进行阐述,旨在克服现有技术的局限性,提升雷达的探测精度、响应速度及环境适应性。

通过全面而细致的方案对比、雷达发展前景分析,可以认识到毫米波雷达在不断提高探测精度的同时,也需要进行成本控制、小型化设计和定制化等全方位的优化。这将推动毫米波雷达技术向更加高效、智能和用户友好的方向发展,最终应用在自动驾驶、智能交通系统以及高阶驾驶辅助系统(ADAS)等众多领域中,为用户带来更加安全、便捷和舒适的驾驶体验。

参考文献

- [1] 李森. 车载毫米波雷达感知与融合算法研究[D]. 上海: 同济大学, 2022. DOI:10.27372/d.cnki.gtjsu.2022.000131.
- [2] 段建民, 田晓生, 夏天, 等. 基于模型预测控制的智能汽车目标路径跟踪方法研究[J]. 汽车技术, 2017(8): 6-11.
- [3] 王艺帆. 自动驾驶汽车感知系统关键技术综述[J]. 汽车电器, 2016(12): 12-16.
- [4] XIANG G, MUHAMMAD S, XIAOXIAO C, et al. Towards Converged Millimeter-Wave/Terahertz Wireless Communication and Radar Sensing[J]. ZTE Communications, 2020, 18(01): 73-82.
- [5] 张龙, 刘斯扬, 孙伟锋, 等. 绝缘体上硅功率半导体单芯片集成技术[J]. 电子学报, 2023, 51(02): 514-526.
- [6] 翟霄. TI毫米波MIMO雷达的高分辨率测角算法研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2023. DOI:10.27437/d.cnki.gytdu.2023.000361.
- [7] XIAO G, ZHANG H, LUO Y, et al. Data-driven optimal tracking control for a class of affine non-linear continuous-time systems with completely unknown dynamics[J]. Iet Control Theory & Applications, 2016, 10(6): 700-710.
- [8] MA T, CHEN Z, WU J, et al. A 77 GHz FMCW MIMO radar system based on 65nm CMOS cascaded 2T3R transceiver[J]. Science China(Information Sciences), 2021, 64 (01): 239-241.