

文章编号: 2095-4980(2023)04-0437-15

汽车雷达关键技术分析与展望

郑 乐^{a,b}, 龙 腾^a, 龙佳敏^a, 文 铮^a, 胡雪瑶^{a,b}, 高 镇^{a,c}

(北京理工大学 a.信息与电子学院, 北京 100081; b.重庆创新中心, 重庆 401120; c.前沿交叉科学研究院, 北京, 100081)

摘 要: 汽车雷达基于电磁波信号感知路况, 具有全天时、全天候、低成本等优点, 是未来智能化交通和自动驾驶的重要传感器。其中, 高精度目标测距、测速, 高分辨力角度估计和多扩展目标跟踪是汽车雷达领域的研究重点。本文针对汽车雷达波形、天线设计、测角算法以及目标跟踪算法等关键模块和主要设计思路进行梳理, 结合雷达抗干扰、MIMO 编码、扩展目标状态估计等技术难点, 介绍并归纳了近几年代表性的文献, 旨在为以后的研究提供参考和依据。

关键词: 汽车雷达; 抗干扰; 多输入多输出; 目标跟踪

中图分类号: TN951; TN958.94

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023005

Analysis and prospect of key technologies of automotive radar

ZHENG Le^{a,b}, LONG Teng^a, LONG Jiamin^a, WEN Zheng^a, HU Xueyao^{a,b}, GAO Zhen^{a,c}

(a.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

b.Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120, China;

c.Advanced Research Institute Multidisciplinary Sciences, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Automotive radars sense the traffic environment using electromagnetic wave. It is of low cost and works under all weather conditions throughout the day, so is of great importance for intelligent traffic and autonomous driving. Nowadays, researchers in this field focus on high-accuracy sensing of range and velocity, high resolution angle estimation and high performance multiple extended target tracking. In this paper, the existing methods in waveform design, antenna design, angle estimation and target tracking algorithms for automotive radar are reviewed. The recent literatures on radar anti-jamming, MIMO coding and extended target state estimation are summarized, aiming to provide an introduction and directions for future research.

Keywords: automotive radar; anti-interference; Multiple Input Multiple Output(MIMO); target tracking

近年来, 随着自动驾驶技术的不断发展以及智能交通在全球的广泛应用, 汽车向安全化、智能化方向发展, 高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)应运而生。研究表明^[1], 运用高级驾驶辅助技术可减少 30% 左右的交通事故, 交通效率提升 10%。ADAS 依靠传感系统感知环境, 为驾驶员提供驾驶辅助^[2], 有效地提高了汽车驾驶安全性。环境感知过程中^[3], 雷达、摄像头、激光等各类传感器通过采集车辆周围环境信息并进行处理, 进而实现路况探测、提供警示及协助避让等功能。与其他传感器相比, 毫米波雷达在雾、烟、灰尘等环境中穿透力强, 受雨、雪等恶劣天气影响小, 具有全天候全天时、体积小、成本较低、分辨力高等优点, 在前向碰撞预警、自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)^[4]等功能上获得广泛应用。

汽车雷达的研究起源于 20 世纪 70 年代^[5-7], 由德、美、日等汽车产业发达的国家率先开展, 但受微波器件和处理能力限制, 该阶段研发的原型机体积大, 性能差, 因此未投入到实际应用。随着单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)技术发展, 自 20 世纪 90 年代起, 汽车雷达开始实现小型化、商业化应用。美国 VORAD 公司于 1996 年推出了第一款商用 24 GHz 雷达产品^[8], 梅赛德斯-奔驰公司 1999 年推出搭载首款商用 76 GHz 汽车雷达的 ACC 系统^[9]。进入 21 世纪以后, 安波福、博世、大陆等公司相继推出基于 77 GHz 频段的汽车雷达产品, 在原有产品基础上大幅提高了雷达的威力和精确度^[10]。随着 ADAS 逐步向高度自动化驾驶技术发展, 市场对传感器性能提出了更高的要求^[11]。汽车雷达需要在更复杂的环境中提取更高精确度、高维

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-22

度的目标量测, 应用于更多的辅助/自动驾驶功能。

汽车雷达的性能由雷达波形、天线设计和信号处理方法决定^[12-16]。例如, 汽车雷达的带宽、时长等因素影响多目标测速、测距性能; 天线阵列与测角方法影响目标角度分辨力与估计精确度; 多目标稳定跟踪依赖于关联与滤波方法。本文将系统性地梳理汽车雷达中的关键技术, 对其发展动态进行总结归纳。

1 汽车雷达波形设计与测距、测速

汽车雷达通常采用连续波体制, 与脉冲体制相比, 连续波雷达具有低功耗、易集成以及无距离盲区等优势, 更符合汽车环境探测需求^[17]。本节将介绍汽车雷达波形设计, 针对实际场景中经常遇到的速度模糊和电磁干扰现象, 分别讨论相关的波形设计与信号处理方法。

1.1 常见波形

汽车雷达发送调频等幅波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)调频序列, 即以脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI) T_p 周期性地发送 L 个Chirp脉冲。假设每个Chirp信号的调频时间为 T , 调频斜率为 K , 载频为 f_0 , 发射信号功率为 P_t , 则第 l 个脉冲的发射信号可以表示为:

$$s_t(t, l) = \sqrt{P_t} \exp(j2\pi f_0 t + j\pi K t^2) \quad (1)$$

式中 t 为一个调频周期内的时间($t \in [0, T]$), 通常定义为快时间^[17-18]。假设目标的初始距离为 R_0 , 速度为 v , 则第 l 个脉冲的回波信号可以表示为:

$$s(t, l) \approx \alpha \exp(j2\pi f_r t) \exp(j2\pi f_d (l-1)T_p) + w(t, l) \quad (2)$$

式中: $(l-1)T_p$ 表示跨越多个脉冲周期的时间, 定义为慢时间^[17-18]; $f_r = 2KR_0/c$ 为目标初始距离导致的频率偏移; $f_d = 2vf_0/c$ 为目标的多普勒频率; $w(t, l)$ 为接收机噪声; α 为复散射强度。考虑到信号发射功率、目标距离、雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)等因素的影响。图1给出了FMCW信号的距离多普勒处理(Range-Doppler Processing, RDP)流程, 分别对回波信号的快、慢时间做快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)可实现目标距离与速度的估计。

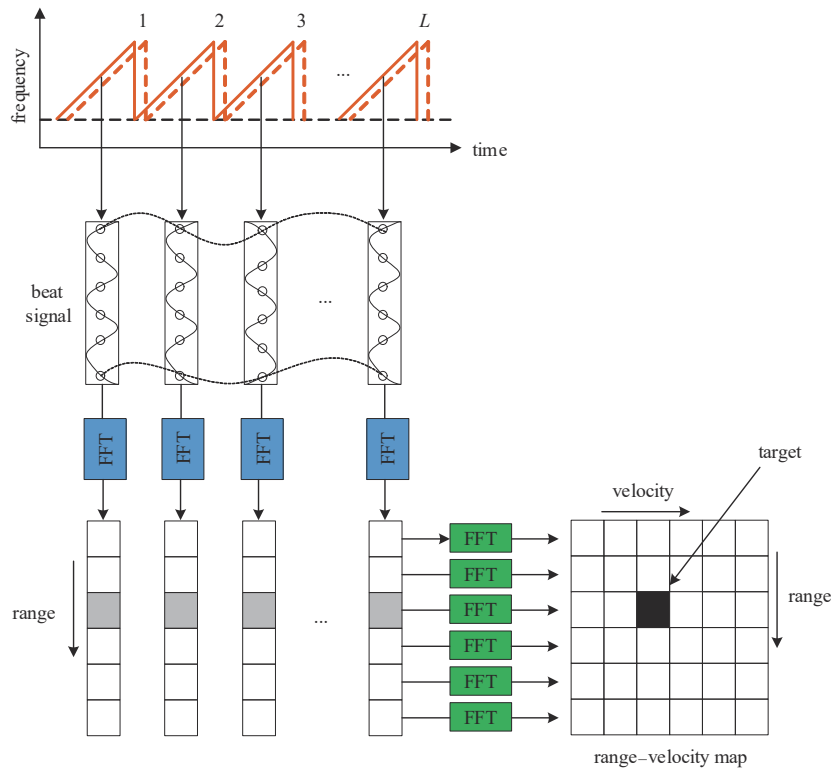


Fig.1 Range Doppler processing of FMCW chirp sequence
图1 FMCW 调频序列距离多普勒处理流程

除了FMCW波形, 相位调制连续波(Phase Modulated Continuous Wave, PMCW)^[19]波形也在汽车雷达领域获得广泛关注。PMCW在单个脉冲内采用相位编码信号, 基于相关操作对脉冲进行匹配滤波测距, 再通过脉冲间FFT的方式测速。PMCW波形设计灵活^[20], 在雷达硬件系统相同的情况下编码方案直接决定其探测性能。图2对比了Gold、几乎最佳自相关序列(Almost Perfect Autocorrelation Sequence, APAS)与零相关区间(Zero Correlation Zone, ZCZ)编码的模糊函数。3种编码均具有尖锐的主峰, 但具有不同的自相关特性, 导致距离维旁瓣、栅瓣特性不同^[20]。其中, Gold码在所有距离范围内自相关函数的旁瓣起伏较小。APAS码与ZCZ码的自相关函数在主瓣附近的距离区间接近于0, 在其余距离范围内可能会出现栅瓣或较高的旁瓣。为了保证PMCW波形在探测范围内虚警数量较少且不发生测距模糊, 实际中需考虑雷达探测范围选择对应的低旁瓣自相关函数的编码。

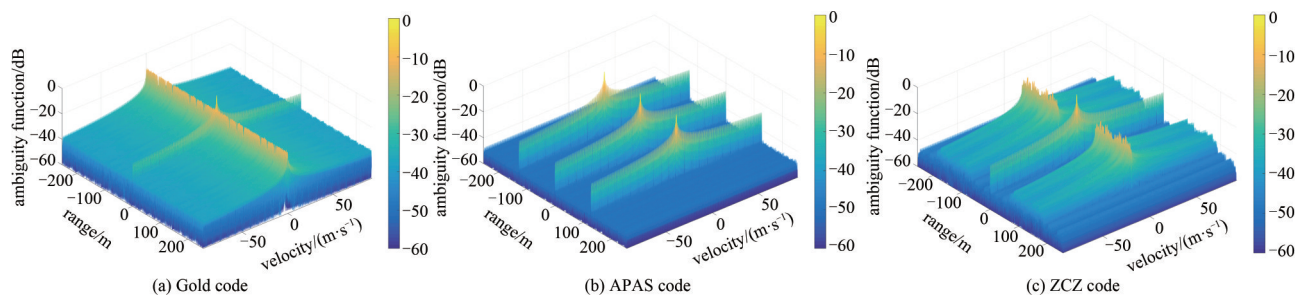


Fig.2 Ambiguity function of different code families^[20]

图2 不同码组的模糊函数图^[20]

PMCW的信号形式与通信波形类似, 有望作为载体应用于通信感知一体化^[21], 即通过一套波形和硬件平台同时实现雷达感知和平台信息的传递。该类方法受芯片采样率和处理速度等因素的限制目前尚未开展大规模商业应用, 但已经在工业和学术界引起了广泛的关注。以南方科技大学F Liu和英国伦敦大学学院C Masouros为代表的专家学者在通信感知融合领域开展了大量的研究, 通过升级移动通信基站的波形和硬件, 在路端实现探测功能并基于车联网辅助自动驾驶的环境感知^[22-24]。相关成果涉及通感一体化信息论^[25]、波形设计与信号处理^[26-27]、网络架构^[28]等多个方面, 可以弥补车端雷达覆盖不足的问题, 提高自动驾驶的安全性。

1.2 速度解模糊

当目标速度较大时, 多普勒频率会在频谱中折叠, 速度测量将发生模糊。实际中, 可通过帧间交错、帧内交错波形设计等方法来解决该模糊问题。帧间交错波形通过交错发射多组不同PRI的调频序列, 通过中国余数定理进行子序列频率匹配来提取目标的多普勒频率^[29]。帧内交错波形在一帧信号中交替发射2种不同参数的Chirp, 利用目标在2个Chirp序列的相位差进行速度解模糊, 代表波形有M Kronauge和H Rohling^[30]提出的多载频调频序列波形。帧间交错波形与帧内交错波形均将回波信号分为多个子序列进行处理, 存在波形利用率较低的问题。为充分利用所有发射波形, 文献[31]和[32]提出了一种基于脉冲间隔捷变波形的多普勒解模糊方法, 通过随机抖动调频序列脉冲间隔时间实现慢时间随机采样, 并在多普勒维通过稀疏恢复处理得到无模糊的频谱范围。

除了基于波形设计的方法以外, 研究人员也在探索基于信号处理的方法来解决速度模糊。K Li等^[33]提出了一种基于目标跟踪的速度解模糊方法, 将目标多帧距离变化与模糊速度进行关联来求解目标真实速度。然而该方法依赖于多帧航迹的滤波结果, 当航迹刚刚起始或精确度较差时容易发生错误。此外, Radon傅里叶变换(Radon-Fourier Transform, RFT)^[34]、多普勒距离处理(Doppler-Range Processing, DRP)^[35]以及高阶相位补偿^[36]等信号处理方法被相继提出, 通过对比处理后的速度聚焦点能量来实现速度解模糊。如图3, 相较于RDP与Keystone变换(Keystone Transform, KT)的目标距离、速度估计结果, 通过RFT与DRP处理后的测速范围更大且目标回波具有更好的聚焦性, 可有效完成速度解模糊^[35]。然而, 该类方法依赖于对信号的精确补偿, 计算量较大, 实际应用时需要考虑实时性的问题。

1.3 雷达抗干扰

多部雷达之间的干扰会影响传感器的灵敏度, 难以保证驾驶安全, 因此研究人员通过波形设计与信号处理等手段抑制干扰的影响。基于波形设计的雷达抗干扰方法旨在通过降低波形的相关性, 使得在接收机端可以区分不同雷达的信号。2017年, A Bourdoux与K Parashar等人对FMCW与PMCW等雷达间相互干扰进行研究^[37], 并提出波形参数随机化有助于降低雷达间干扰的发生概率。基于该思路, X Yang等^[38]提出一种基于多波形组合的抗干扰波形设计方法, 通过随机切换点频连续波与三角波从而有效规避雷达间干扰。考虑到汽车雷达多目标

探测需求, 研究者们提出了序列间隔随机^[39]、载频随机^[40-41]、调频斜率随机^[42]等基于调频序列的随机波形, 该类波形具备多目标探测能力的同时可通过波形随机捷变实现雷达抗干扰。图 4 为随机载频和传统调频序列在受干扰情况下的距离多普勒(Range-Doppler, RD)谱, 结果表明随机多载频^[40]具有更好的干扰抑制效果。

基于信号处理的干扰抑制方法对接收信号进行滤波, 从而在不同域(如空间、时间、频率等)分离目标回波和来自其他雷达的干扰。基于空域滤波的干扰抑制方法主要通过数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)在干扰方向上形成零陷, 实现空域抗干扰^[43]。基于时域与频域的干扰抑制方法的关键在于干扰的检测与分离。文献[44]中基于信号时频域的图像进行干扰检测并对干扰样本置零实现干扰抑制, 文献[45]提出了一种自适应检测阈值调节的干扰检测方法, 文献[46]运用加权包络归一化(Weighted Envelope Normalization, WEN)分离干扰样本。此外, 还有基于经验模态分解的迭代修正方法^[47], 基于小波变换的目标信号重构方法^[48], 基于低秩 Hankel 矩阵分解的目标信号重构方法^[49], 该类方法基于接收信号中干扰的时域稀疏性抑制其对信号处理的影响。

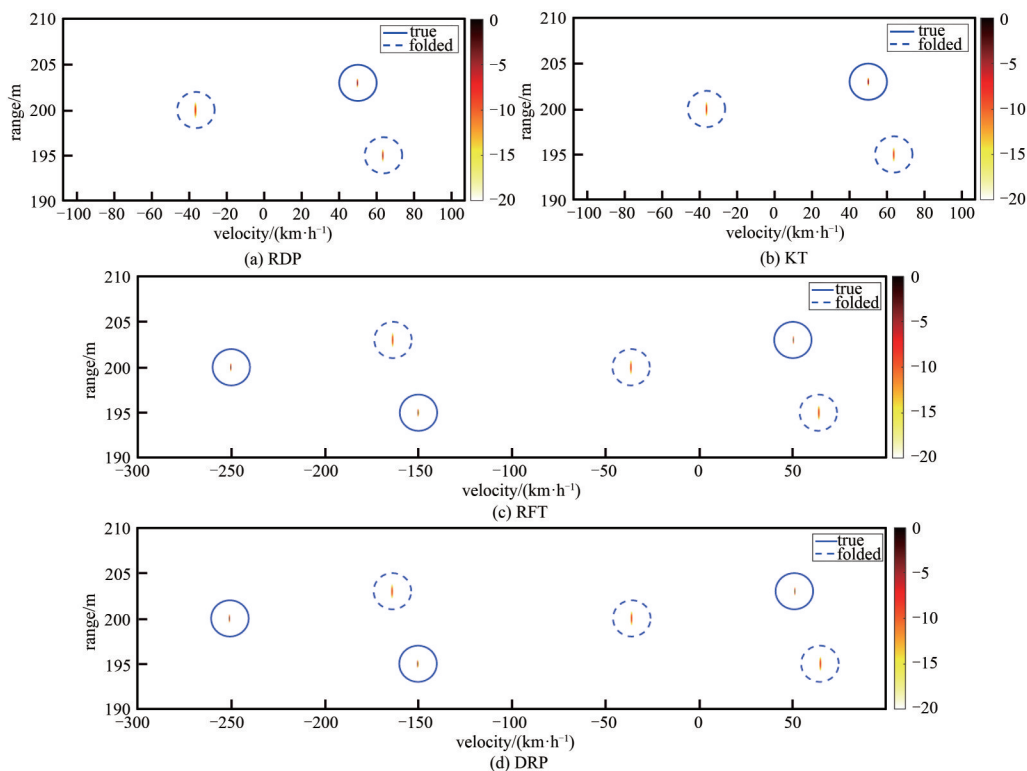


Fig.3 Multi-target range velocity spectrum

图 3 多目标距离速度谱^[35]

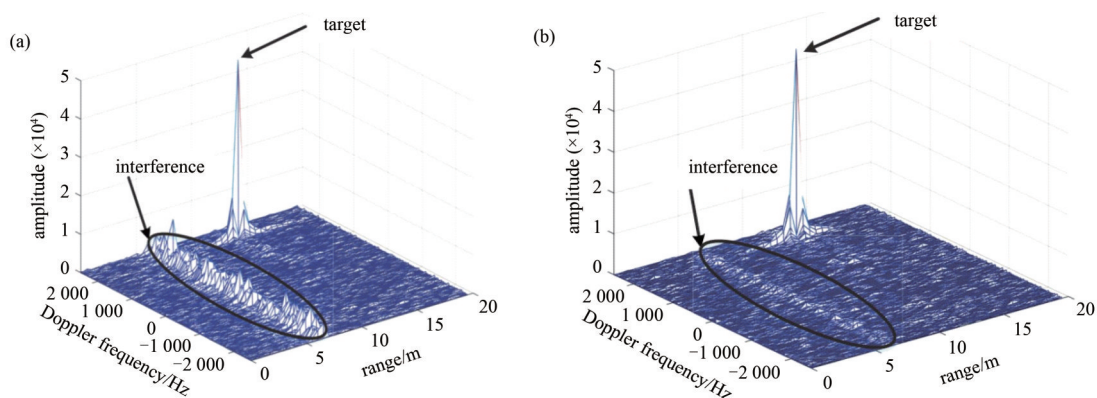


Fig.4 (a) RD map of Chirp sequence with interference; (b) RD map of random multi-carrier frequency waveform with interference^[40]

图 4 (a) 干扰情况下调频序列 RD 谱; (b) 干扰情况下随机多载频波形 RD 谱^[40]

2 汽车雷达天线技术与测角算法

受体积和成本的约束,汽车雷达的发射和接收天线阵列尺寸较小,导致角度分辨能力受限。MIMO技术通过联合设计收/发端的波形和阵列,能够形成虚拟阵列扩大天线有效孔径,从而提高雷达的角度分辨力。本节将重点综述汽车雷达天线设计中的MIMO技术和测角方法,并归纳其中的关键问题。

2.1 MIMO 技术原理

MIMO雷达系统包含 M_t 个发射天线与 M_r 个接收天线,通过在每个发射天线发射相互独立的正交波形,并在每个接收天线回波中使用匹配滤波器组对其进行分离可形成 $M_t M_r$ 个虚拟阵元。通常 $M_t M_r > M_t + M_r$ 且虚拟阵列孔径远大于雷达的物理孔径,因此基于虚拟阵列测角可实现更高的测角精确度与分辨力^[50]。图5对应TI公司设计的12发16收的MIMO成像雷达阵列^[51],该阵列可合成为具有192个阵元的虚拟阵列,能够大大提高天线阵列的孔径和角度分辨力。

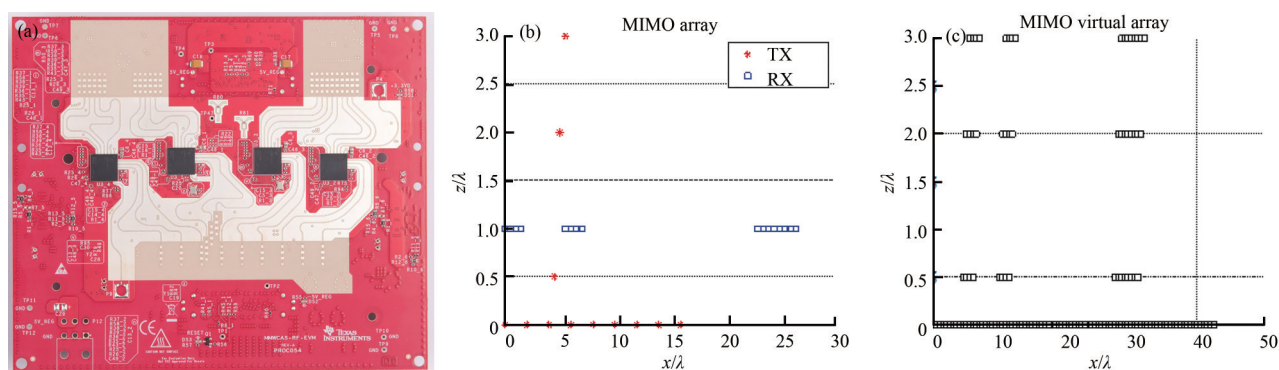


Fig.5 (a) TI's AWR2243 Cascade Chip; (b) MIMO array; (c) MIMO virtual array
图5 (a) TI公司AWR2243级联芯片^[51]; (b) MIMO阵列; (c) MIMO虚拟阵列

汽车雷达系统中收发天线个数有限,为了进一步提高测角分辨力,汽车雷达通常采用稀疏阵列来增大天线的孔径并降低阵元之间的电磁耦合。然而,稀疏阵列部分位置处的阵元缺失会抬高天线方向图的旁瓣,进而导致测角模糊、精确度下降等问题。S Lee等^[52]提出通过插值与外推方法填补虚拟阵列中的缺失阵元以有效降低稀疏阵列高旁瓣。从阵列优化角度,研究者们提出通过遗传算法^[53-54]与最小粒子群优化^[55]等方法优化稀疏阵列位置,降低天线方向图的峰值旁瓣水平。

2.2 MIMO 波形编码

在MIMO雷达中,需要保证发射波形的正交性,从而在接收端可以分离不同的发射天线的回波^[56]。本小节将重点讨论常用的3种MIMO正交编码波形,即时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)编码、码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)编码和多普勒频分多址(Doppler Division Multiple Access, DDMA)编码。

2.2.1 TDMA 编码

TDMA编码通过不同天线分时交替发射信号,可在时域上实现发射波形分离,具有正交性好、信号处理简单的优点。然而对于某一发射通道来说,时分波形的脉冲重复频率与脉冲数量较低,会导致测速模糊与积累增益下降等问题。此外,发射天线之间的延迟调度使得通道间的运动目标回波出现与多普勒相关的相位差,需在角度测量前进行补偿,否则将出现测角性能恶化^[57-58]。针对上述问题,A B Baral等^[59]提出了一种TDMA速度角度联合估计方法。该方法利用相位差与速度模糊倍数的关系,针对多种速度模糊倍数进行相位补偿与测角,并由测角结果判决速度模糊倍数。文献[60]与[40]选择采用随机切换发射天线,打乱目标速度与通道间相位差的线性关系,通过稀疏信号处理等方法实现目标速度与角度的估计。

2.2.2 CDMA 编码

基于CDMA编码实现发射波形正交的基本思路是在慢时间维对不同天线的发射信号进行相位编码调制,在接收端通过解码的方法实现发射回波分离^[61]。基于匹配滤波的信号解码是通过相关操作来实现,解码后信号中不可避免地存在来自其他天线的残余信号分量。如图6(a)所示,完成解码与二维FFT处理后,来自其他天线的残余信号分量整体抬高了目标所在位置的多普勒旁瓣,易导致弱目标漏检与测角性能变差等问题。

为了降低CDMA编码中多普勒旁瓣的影响,S Cao等^[62]提出采用最小峰值干扰残差为准则设计CDMA码序列,使残余信号分量以伪噪声形式在多普勒频谱中均匀分布^[63]。O Bialer等^[64]使用目标模糊函数主瓣范围内最小

化残余干扰旁瓣的准则建立代价函数求解码编码序列的幅度与相位,其生成的编码序列在密集目标场景中较好的目标检测性能。在信号处理方面,W V Rossum 等^[65]提出采用稀疏信号处理实现低旁瓣的频谱估计,但计算量较大。通用汽车公司的 G Solodky 等^[66]提出基于 CLEAN 的多普勒旁瓣抑制方法,该方法基于目标参数估计结果对残余信号分量进行恢复与消除从而降低多普勒频谱旁瓣。

2.2.3 DDMA 编码

DDMA 编码又称为多普勒频分复用,即在慢时间对各个发射天线分别调制不同频率,使其在多普勒频谱上分离^[67]。如图 6(b)所示,二维 FFT 处理后不同发射天线的回波在多普勒频谱上聚焦于不同的位置,可直接实现分离。传统 DDMA 编码采用等间隔多普勒调制频率,导致不模糊测速区间减小。该问题可以通过阵列信号处理或非均匀 DDMA 编码方法解决。基于阵列信号处理的 DDMA 速度解模糊方法需要遍历所有可能的目标多普勒频率形成虚拟阵列构型测角,利用测角结果辨识正确的目标多普勒频率。林肯实验室的 D J Rabideu^[67-68]提出一种“dithered DDMA”编码方法,在发射天线调制不同的初相,扰乱错误虚拟阵列的相位从而辨识正确的多普勒频率。非均匀 DDMA 编码方法通过对发射天线设置非均匀多普勒频偏,从而直接由多普勒频谱聚焦点的位置实现解码与速度解模糊^[69]。

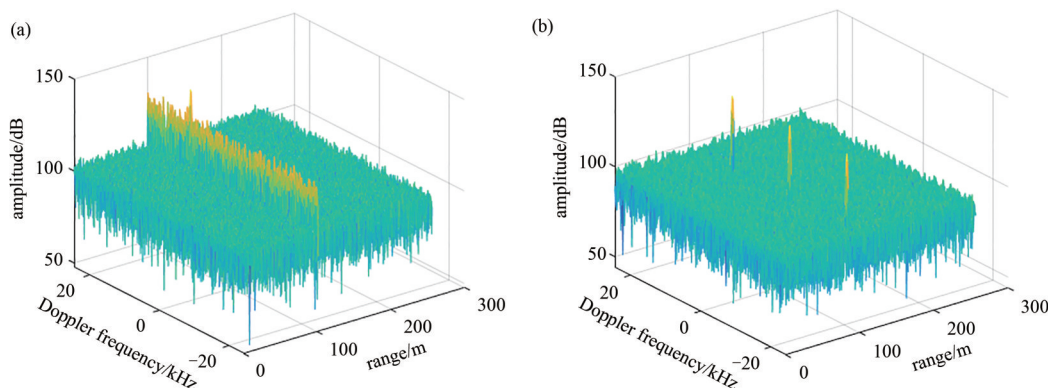


Fig.6 (a) RD map of CDMA; (b) RD map of DDMA
图6 (a) CDMA 距离多普勒频谱; (b) DDMA 距离多普勒频谱

高级别的自动驾驶对雷达天线孔径提出了更高的要求,因此需要更复杂的编码方案以支持更多的射频通道和更大规模的天线阵列。研究人员针对复合编码方案开展研究,以获取更好的性能。文献[40]中同时考虑了汽车雷达测速与测角的需求,将多载频编码引入到 TDMA 正交波形中,实现不模糊测速与测角。T Kishigami 等^[70]将 DDMA 与 CDMA 结合,提出了一种多普勒频移正交编码(Doppler Offset Orthogonal Codes, DO-Ocs)波形,减少了 CDMA 编码设计复杂度。文献[71]考虑到 DDMA 编码在某些条件下可在空间中合成指向波束,提出了一种基于发射波束赋形(Transmit Beamspace, TB)的 DDMA 编码波形,该波形在保证各发射天线多普勒域正交特性的同时可实现无模糊测速。

2.3 测角方法

雷达测角即基于阵列信号估计目标角度过程。传统汽车雷达测角算法是基于 FFT 处理得到空间谱,搜索谱峰值确定目标角度。该方法具有技术成熟度高,嵌入式实现简单且运算复杂度低等优点,但测角精确度与分辨力较低,其性能边界取决于阵列瑞利限。随着阵列信号处理技术的发展,又相继出现了 Capon、多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)、基于旋转不变技术的信号参数估计(Estimation of Signal Parameters via Rotation Invariance Techniques, ESPRIT)以及压缩感知(Compressed Sensing, CS)等测角算法。

Capon 方法通过最小化非观测角度的响应且保持观测角度上信号功率不变实现高分辨与良好的噪声抑制性能^[72]。Q Huang 等^[73]基于多脉冲回波构造快拍,将 Capon 方法应用于生命体征检测雷达中完成超分辨测角。但在汽车雷达中,多脉冲回波完成慢时间 FFT 处理后快拍数量较少, Capon 算法难以获得较好的测角性能。MUSIC 与 ESPRIT 都是基于子空间的超分辨测角方法。其中, MUSIC 算法通过对接收信号的协方差矩阵执行特征分解操作,将特征向量划分为信号子空间和噪声子空间,然后利用噪声子空间和信号子空间的正交性形成伪谱,在伪谱中完成角度估计。由于谱峰搜索耗时较长,有学者提出了较低计算量的 root-MUSIC^[74]算法。ESPRIT 算法将阵列划分为 2 个重叠子阵,根据 2 个子阵之间的旋转不变性推导出对应的信号子空间的旋转不变性,利用旋转不变性与目标角度的对应关系完成测角^[75]。然而, MUSIC 与 ESPRIT 都是基于协方差矩阵的测角方法,同样需要足够

多的快拍数据才能准确估计协方差矩阵保证测角性能。此外，此类方法易受信号相干性影响，在回波中存在相干信号时测角性能恶化^[76]。

假设落在同一距离多普勒单元下的目标数量较少，即阵列回波具有稀疏特性的前提下，CS可以通过稀疏信号处理方法进行角度估计^[77]。该类方法将角度空间网格化处理后构造过完备字典矩阵 A ，从而将测角问题转化为从阵列回波数据 y 中提取角度网格点上的目标幅度 s 。在 ℓ_0 范数约束下，问题可表示为：

$$\min \|s\|_0, \text{ s.t. } \|y - As\|_2^2 \leq \sigma \quad (3)$$

式中 σ 为预定义的阈值参数。通过正交匹配追踪方法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[78-79]等贪婪算法求解上述问题，可在汽车雷达单快拍数据中实现超分辨率角度估计。文献[76]中特别提到了可将自适应迭代方法(Iterative Adaptive Approach, IAA)用于汽车雷达角度估计，该算法是以阵列接收信号协方差矩阵为加权矩阵的最小二乘算法，以迭代的方式更新角度估计值。图7对比了不同方法在稀疏阵列单快拍数据下的测角性能，CS和IAA方法均能取得较好的效果。针对测角过程中的网格偏离(Off-grid)和阵列多通道之间的幅相误差，P Chen等提出通过优化的原子范数方法实现目标的鲁棒角度估计，显著提升了测角性能^[80]。

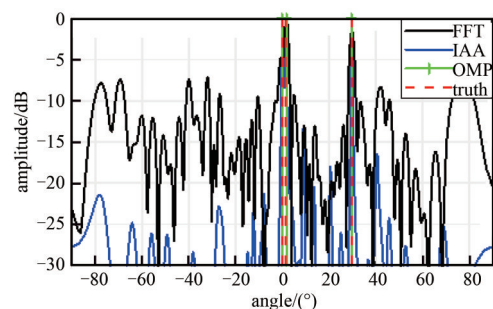


Fig.7 Angle estimation simulation for sparse array with single snapshot

图7 单快拍稀疏阵列测角仿真

3 汽车雷达目标跟踪

汽车雷达目标跟踪是指基于带噪声的汽车雷达量测(如目标的径向距离、方位角度、径向速度等)，对运动目标的状态(如位置、速度等)进行估计的过程。一个高效的汽车雷达跟踪系统需要克服交通环境中的多目标、错检、虚警等问题，准确地估计多目标运动状态。

图8为汽车雷达跟踪流程，包括点迹聚类、数据关联和跟踪滤波(包含状态预测和状态更新)。输入雷达量测点迹，点迹聚类部分将单帧获得的所有量测划分成多个团簇，每个团簇单独分配一个特征点迹。数据关联部分接收聚类获得的特征点迹与跟踪滤波器中目标航迹的状态预测，建立特征点迹与航迹之间的对应关系。跟踪滤波阶段基于关联结果对目标航迹进行状态更新并利用运动模型对下一时刻的目标状态进行状态预测。

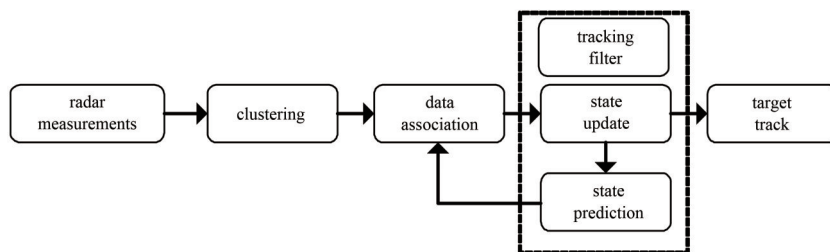


Fig.8 Automotive radar target tracking process

图8 汽车雷达目标跟踪流程

3.1 点迹聚类

汽车雷达在单帧内能够获得同一目标的多个量测点迹，如果跟踪滤波器对每一个量测点都进行处理，会大大增加运算量，影响系统的实时性。因此，需要对每一帧的量测点聚类成若干个团簇，使得每个团簇内的数据尽可能地相似并保有相同的特征^[81]，之后计算每个团簇对应特征点迹的量测状态并用于后续处理。1996年，M Ester提出了基于密度的聚类算法(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)^[82]，DBSCAN算法可在噪声数据中发现任意形状的聚类，且无需事先指定目标个数，是汽车雷达目标跟踪中最常用的聚类算法。在此基础上，K Dominik^[83]针对车载环境目标量测点迹在直角坐标平面存在“近密远疏”的特点，提出了基于极坐标系网格的DBSCAN聚类方法。在极坐标系下，将车载场景划分成极坐标网格，通过计算径向网格与横向网格的比例来表征空间采样密度并利用该密度来设置聚类半径与聚类点数。实验表明，该算法对杂波和非等距采样量测点具有优于DBSCAN的聚类效果。J Schlichenmaier^[84]通过引入速度项分析(Velocity Profile Analysis, VPA)，构建了目标量测点迹的径向速度与方位角度间的关系。在较小的方位角度范围内，利用随机抽样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)算法在方位角度-径向速度平面寻找直线，获得属于同一目标的量测点。图9的实

验表明, DBSCAN 算法无法区分来自 2 个目标的点迹观测, VPA 算法改善了距离接近车辆目标间的聚类效果。

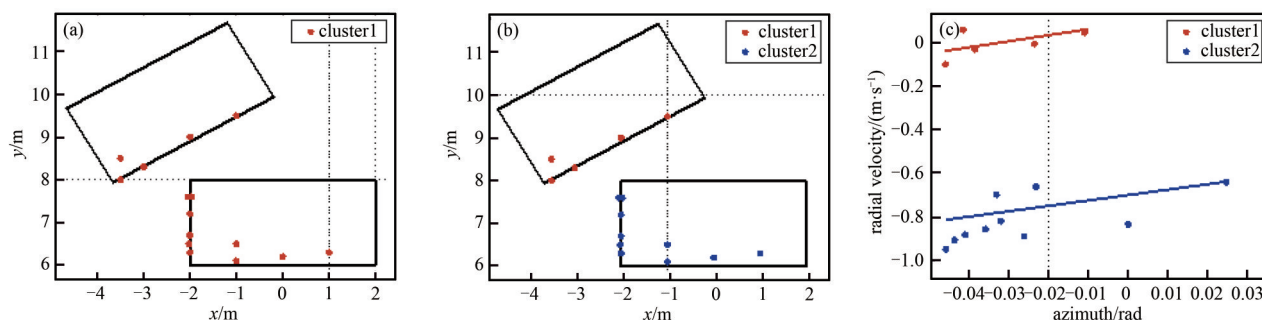


Fig.9 (a) DBSCAN clustering results ; (b) VPA clustering results; (c) VPA schematic
图9 (a) DBSCAN 聚类结果; (b) VPA 聚类结果; (c) VPA 示意图

3.2 数据关联

数据关联算法使用聚类处理得到的特征点迹, 将其与目标航迹的状态预测进行关联, 建立特征点迹与其目标源之间的对应关系。1970 年, R Singer 提出了最邻近(Nearest Neighbor, NN)数据关联算法^[85], 该算法是目前汽车雷达中最简单且较常用的关联算法。NN 算法基于特征点迹和状态预测之间的最小欧氏距离进行关联。该算法的优点是运算量小, 易于硬件实现, 但是只适用于稀疏目标和低杂波环境。基于上述问题, R Singer 改进了最近邻数据关联算法, 提出了全局最近邻(Global Nearest Neighbor, GNN)^[86]数据关联算法。GNN 算法对现存的所有航迹分配此次雷达获得的所有特征点迹, 计算这些航迹的总风险函数, 并选择总风险函数达到最小值时, 各航迹关联的特征点迹进行关联^[87]。

除了 NN 和 GNN 算法, 1972 年, Y Bar-Shalom 等提出了概率数据关联(Probabilistic Data Association, PDA)方法, 该方法在杂波密度较高的环境中, 具有比最近邻算法更好的关联效果。1974 年, Y Bar-Shalom 基于 PDA 算法提出了联合概率数据关联(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)算法^[88]。当有特征点迹落入不同目标相关波门的重叠区域时, 综合考虑各个特征点迹的来源情况, 从而以运算量为代价获得更高的关联精确度。多假设跟踪(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)^[89]是一种较为精确的数据关联算法, 它考虑了特征点迹与航迹之间所有可能的关联, 并计算了它们随着时间的推移的似然函数, 并使用获得的特征点迹来解决当前关联中的不确定性。除此之外, 基于随机有限集(Random Finite Set, RFS)^[90]的概率假设密度(Probability Hypothesis Density, PHD)滤波多目标跟踪理论跳出了原有基于数据关联多目标跟踪的框架。与 MHT 不同, PHD 滤波算法使用多目标后验密度的一阶矩来估计目标的数量和单个目标状态, 避免了枚举特征点迹和航迹之间所有可能的关联。

3.3 跟踪滤波

跟踪滤波主要包含状态更新和状态预测。在进行数据关联处理后, 状态更新部分使用经典的卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)算法^[91]。当目标的运动、量测模型为线性, 且系统噪声为高斯时, 卡尔曼滤波被证明为最优滤波器^[87]。汽车雷达在极坐标系观测, 目标的距离、方位和径向速度需要通过非线性变化转化至滤波采用的直角坐标系, 因此直接使用 KF 处理难以获得较高的精确度。实际中, 以扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)为代表的非线性函数逼近方法被人们提出, 通过利用非线性函数的泰勒级数展开式进行线性化截断, 将非线性问题转化为线性问题, 一定程度上缓解模型非线性的影响并提高滤波精确度^[92]。除了 EKF 算法外, 不敏卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)^[93]、平方根不敏卡尔曼滤波器(Square Root Unscented Kalman Filter, SRUKF)^[94]和平方根容积卡尔曼滤波器(Square Root Cubature Kalman Filter, SRCKF)^[95]通过更复杂的数学变换提高滤波精确度, 但是计算量较大。

在进行状态更新处理后, 需要利用目标运动模型进行下一时刻的状态预测。目标运动模型描述了目标运动状态随着时间变化的过程。常速度(Constant Velocity, CV)模型是车载环境下目标跟踪算法中最为基础的运动模型, 其将目标运动状态先验定义为匀速直线运动。除了 CV 模型外, 还有人将目标运动状态先验定义为匀变速直线运动的常加速度(Constant Acceleration, CA)模型或者协同转弯运动的常转弯速率(Constant Turn, CT)模型。值得注意的是, 车载环境下目标通常不只具有一种运动状态, 其在一段时间内可能表现为多种运动模式的混合或切换状态。当使用单个运动模型对目标进行跟踪时, 一旦目标发生机动, 就会产生较大的跟踪误差。为了解决这一问题, H A P Blom 于 1984 年提出了交互式多模型(Interacting Multiple Model)算法^[96]。当目标的运动状态发生改变时, 不同模型之间通过马尔科夫状态转移矩阵进行相互转换, 当目标状态与某一模型匹配时, 该模型就会

被赋予更高的权重，每个模型对应的滤波器负责完成状态估计以及模型概率更新的功能。

随着传感器分辨率的提高，汽车雷达能够获取属于单个目标的大量检测点。除了对目标运动状态的估计，研究人员越来越关注利用大量检测点估计目标的扩展状态(长度、宽度、朝向角、偏航率等)，为使用者提供目标更多的有价值的信息。在扩展目标跟踪方法中，随机矩阵方法是一个较为有效的框架。2008年，J W Koch开创性地引入随机矩阵来估计目标的扩展状态，建立了一套完整的贝叶斯理论框架，同时估计目标的运动状态和扩展状态。J W Koch假设目标先验运动状态、扩展状态和量测似然函数概率密度分别服从高斯(Gaussian)分布、逆威沙特分布和高斯威沙特(Gaussian Wishart)分布，他利用指数函数族中高斯-高斯、威沙特-逆威沙特分布的共轭性，得到更新后的运动状态和扩展状态联合后验概率密度服从高斯逆威沙特分布，形成一套共轭闭合的贝叶斯迭代估计机制^[97]。在此基础上，西安交通大学L Zhang与J Lan等^[98]提出了一种新的偏斜正态分布的量测模型，将变分贝叶斯方法应用于扩展目标跟踪，可迭代估计扩展目标运动状态与扩展状态，该算法具有计算量少的优点，且能应对由于目标机动引起的目标尺寸测量分布的突然改变。S Yang等提出了基于乘性噪声模型的扩展卡尔曼滤波器(Multiplicative Error Model-Extended Kalman Filter, MEM-EKF)算法，通过朝向角度和长短半轴来描述一个椭圆扩展目标，并引入乘性噪声，构建了一种新的参数化量测模型^[99]。图10对比了不同算法的扩展目标跟踪性能，可以看到MEM-EKF算法能够更准确地估计目标的运动和扩展状态。

4 总结与展望

自1970年以来，汽车雷达经过了50多年的发展，由最初的原型机逐渐应用于ACC系统与辅助驾驶系统中，如今汽车雷达正向更高等级的自动驾驶领域迈进。在此期间，多项关键技术的发展令汽车雷达可以应对更为复杂的探测环境，实现更优的目标量测与跟踪性能。本文针对汽车雷达中的波形体制、天线设计和目标跟踪三项关键技术的理论和方法进行总结归纳。未来，随着自动驾驶对传感器需求的进一步提升，对汽车雷达角度分辨力、测高、抗干扰等方面又提出更高的要求，其发展方向包括：

1) 雷达抗干扰技术

2021年11月，工信部印发的《汽车雷达无线电管理暂行规定》中明确了汽车雷达使用频率为76~79 GHz频段^[100]。随着汽车雷达加装率大幅增加，在该频段内雷达间的干扰愈发严重，抗干扰将成为未来汽车雷达需要攻克的难点与重点。除了基于波形设计与信号处理的雷达抗干扰方法外，文献[101]重点说明了通过雷达通信协作避免雷达间干扰的方案，并认为雷达与通信协调将是未来汽车雷达抗干扰的机遇与挑战。该类方法主要指通过车间通信或协调中心^[102]，调整干扰区域内各雷达的运行参数(如发射时间、频带等)，以避免同区域内雷达信号收发产生冲突，降低电磁干扰概率。未来，基于智能汽车的通信感知一体化研究将成为车间抗干扰重要研究内容与发展方向。

2) 大规模MIMO天线技术

高安全级别自动驾驶对汽车雷达的角度(方位、俯仰)分辨力提出了更高的要求，因此需要增加MIMO天线通道数量形成二维大孔径阵面，从而实现高性能角度估计。天线通道数量的增加给阵列设计、正交波形以及测角算法的研究带来了极大的挑战。例如，阵列设计需同时综合考虑方位角与俯仰角的视角(Field of View, FOV)与波束宽度，设计约束紧，维度高；波形设计方面，随着发射天线个数的增加，通道分离难度大大提高，有待于探索基于多维联合编码的波形设计，提高通道之间的正交性；测角算法方面，也需要解决由测角范围网格化处理所带来的离网^[103-104]、多径情况下MIMO模型失效^[105-106]、超分辨测角计算量大^[107]等问题。

3) 深度学习在汽车雷达跟踪、识别的应用

随着雷达分辨能力的提高，能够获取更丰富的环境信息，传统雷达信号处理方法基于简化的物理模型提取多目标的运动状态和特征信息，难以有效利用高分辨信息来应对各类复杂交通场景。随着深度学习技术的发展及其在图像、语音等领域的应用，越来越多的研究机构开始探索其在汽车雷达目标检测^[108-109]、目标跟踪^[110-111]与分类识别^[112]等方面的应用。然而，深度学习相关模型的训练过程需要大量有标签样本，但现有数据集仅适用于特定场景，因此需要进一步构建大样本、多样化的标注样本数据库；此外，现有训练模型结构主要是针对视

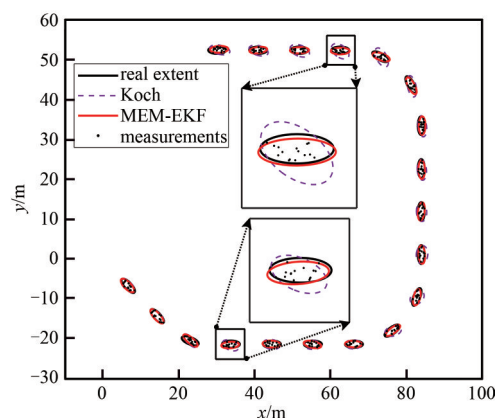


Fig.10 Extended target tracking performance comparison

图10 扩展目标跟踪性能对比

觉、激光等传感器提出的,无法直接迁移至雷达数据,需针对训练模型进行相应的改进。

4) 汽车雷达芯片

随着汽车雷达天线个数增加,汽车雷达芯片需向更多通道、更高集成度、更高性能与更低功耗发展。在芯片集成度方面,全耗尽型绝缘体上硅(Fully Depleted Silicon On Insulator, FD-SOI)^[113]技术可将射频、收发器、基带、处理器和电源管理组件高效地集成于单一芯片,并在信道隔离、噪声系数和发射功率方面具有卓越的性能;在芯片封装上^[114],亟需研究新的封装技术与介质材料以进一步降低芯片到发射天线间的路径损耗;在电路架构上,除了需提高模拟基带电路性能降低接收机噪声系数外,亟需研究多功能混频-DAC 发射调制器^[115]以支持 MIMO 阵列的多维联合编码信号。

5) 面向第六代(6G)无线通信的车载雷达通信一体化技术

通信感知一体化被认为是 6G 网络的主要特点之一。在通信感知一体化网络中,车辆将成为一种新型信息节点,帮助基站实现高精度定位、成像和数据传输等多功能的集成。目前,相关研究工作中已出现一些先进的通信感知一体化硬件架构与信号处理框架^[116],可以在不改变传统车联网通信架构的前提下,为车联网提供额外的雷达感知功能,大大提升原先网络的集成化、智能化程度。另一方面,考虑到车辆内可用的空间资源与能量资源均大大受限,如何设计高集成度和低功耗的天线阵列用于车载雷达通信一体化,是一项亟待解决的难题。一些基于光学性质的透镜天线阵列^[117]将是车载雷达通信一体化阵列的颇具前景的选择,其在汽车雷达中的应用有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 雷洪钧. 节能与新能源汽车技术路线图[J]. 时代汽车, 2017(1):12-15,18. (LEI Hongjun. Energy-saving and new energy vehicle technology roadmap[J]. Auto Time, 2017(1):12-15,18.)
- [2] 李国强,戴一凡,李升波,等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017,8(1):1-14. (LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. Development status and trend of intelligent networked vehicle technology[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017,8(1):1-14.)
- [3] 柏麟. 智能网联汽车 ADAS 及 V2X 技术推广动态浅析[C]// 第十二届中国智能交通年会. 江苏,常熟:[s.n.], 2017:547-555. (BAI Lin. Study of the progress of ADAS and V2X technologies in the autonomous and connected vehicle industry[C]// The 12th China Intelligent Transportation Annual Conference. Changshu, Jiangsu, China:[s.n.], 2017:547-555.)
- [4] VAHIDI A, ESKANDARIAN A. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003,4(3):143-153.
- [5] MERLO A L. Automotive radar for the prevention of collisions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 1964(1):1-6.
- [6] KIYOTO M, KONDOH T, BAN K, et al. Radar sensor for automobiles[C]// 1974 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Philadelphia, PA, USA:IEEE, 1974(17):74-75.
- [7] HAROKOPUS W P. Application of radar to automobile control and sensing[C]// 1971 IEEE GMTT International Microwave Symposium Digest. Washington, DC, USA:IEEE, 1971:168-169.
- [8] WOLL J D. Monopulse Doppler radar for vehicle applications[C]// Proceedings of the Intelligent Vehicles' 95 Symposium. Detroit, MI, USA:IEEE, 1995:42-47.
- [9] GRESHAM I, JAIN N, BUDKA T, et al. A compact manufacturable 76~77 GHz radar module for commercial ACC applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001,49(1):44-58.
- [10] WALDSCHMIDT C, HASCH J, MENZEL W. Automotive radar—from first efforts to future systems[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021,1(1):135-148.
- [11] ENGELS F, HEIDENREICH P, WINTERMANTEL M, et al. Automotive radar signal processing: research directions and practical challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021,15(4):865-878.
- [12] ENGELS F, HEIDENREICH P, ZOUBIR A M, et al. Advances in automotive radar: a framework on computationally efficient high-resolution frequency estimation[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2017,34(2):36-46.
- [13] PATOLE S M, TORLAK M, WANG D, et al. Automotive radars: a review of signal processing techniques[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2017,34(2):22-35.
- [14] BILIK I, LONGMAN O, VILLEVAL S, et al. The rise of radar for autonomous vehicles: signal processing solutions and future research directions[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019,36(5):20-31.

- [15] HAHOBYAN G, YANG B. High-performance automotive radar: a review of signal processing algorithms and modulation schemes [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(5): 32–44.
- [16] SAPONARA S, GRECO M S, GINI F. Radar-on-chip/in-package in autonomous driving vehicles and intelligent transport systems: opportunities and challenges [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(5): 71–84.
- [17] ROHLING H, MEINECKE M M. Waveform design principles for automotive radar systems [C]// 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings. Beijing, China: IEEE, 2001: 1–4.
- [18] ROHLING H, MOLLER C. Radar waveform for automotive radar systems and applications [C]// 2008 IEEE Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2008: 1–4.
- [19] GUERMANDI D, SHI Q, DEWILDE A, et al. A 79 GHz 2×2 MIMO PMCW radar SoC in 28 nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(10): 2613–2626.
- [20] OVERDEVEST J, JANSEN F, UYSAL F, et al. Doppler influence on waveform orthogonality in 79 GHz MIMO phase-coded automotive radar [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 69(1): 16–25.
- [21] ALLAND S, STARK W, ALI M, et al. Interference in automotive radar systems: characteristics, mitigation techniques, and current and future research [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(5): 45–59.
- [22] LIU F, ZHENG L, CUI Y, et al. Seventy years of radar and communications: the road from separation to integration [J/OL]. arXiv:2210.00446, 2022.
- [23] LIU F, YUAN W, 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.
- [24] DU Z, LIU F, YUAN W, et al. Integrated sensing and communications for V2I networks: dynamic predictive beamforming for extended vehicle targets [J/OL]. arXiv:2111.10152v2, 2022. doi:10.1109/TWC.2022.3219890.
- [25] XIONG Y, LIU F, CUI Y, et al. On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels [J]. arXiv:2204.06938, 2022.
- [26] LIU F, LIU Y F, LI A, et al. Cramer-Rao Bound optimization for joint radar-communication beamforming [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022(70): 240–253.
- [27] LIU F, ZHOU L, MASOUIROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: optimal waveform design [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(16): 4264–4279.
- [28] DONG F, LIU F, CUI Y, et al. Sensing as a service in 6G perceptive networks: a unified framework for ISAC resource allocation [J/OL]. arXiv:2202.09969v3, 2022. doi:10.1109/TWC.2022.3219463.
- [29] SHAPIR I, BILIK I, BARKAN G. Doppler ambiguity resolving in TDMA automotive MIMO radar via digital multiple PRF [C]// 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18). Oklahoma City, OK, USA: IEEE, 2018: 0175–0180.
- [30] KRONAUGE M, ROHLING H. New chirp sequence radar waveform [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(4): 2870–2877.
- [31] 王元恺. 调频序列汽车雷达信号处理方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018. (WANG Yuankai. Research on signal processing method for chirp sequence automotive radar [D]. Nanjing, Jiangsu, China: Nanjing University of Science and Technology, 2018.)
- [32] VAN R W, ANITORI L. Simultaneous resolution of range-Doppler ambiguities using agile pulse intervals with sparse signal processing [C]// 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Florence, Italy: IEEE, 2020: 1–6.
- [33] LI K, HABTEMARIAM B, THARMARASA R, et al. Multitarget tracking with Doppler ambiguity [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(4): 2640–2656.
- [34] LONGMAN O, BILIK I. Spectral Radon-Fourier transform for automotive radar applications [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(2): 1046–1056.
- [35] XU L, LIEN J, LI J. Doppler-range processing for enhanced high-speed moving target detection using LFM CW automotive radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 58(1): 568–580.
- [36] DIKSHTEIN M, LONGMAN O, VILLEVAL S, et al. Automotive radar maximum unambiguous velocity extension via high-order phase components [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 58(1): 743–751.
- [37] BOURDOUX A, PARASHAR K, BAUDUIN M. Phenomenology of mutual interference of FMCW and PMCW automotive radars [C]// 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). Seattle, WA, USA: IEEE, 2017: 1709–1714.
- [38] YANG X, ZHANG K, WANG T, et al. Anti-interference waveform design for automotive radar [C]// 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China: IEEE, 2017: 14–17.

- [39] KITSUKAWA Y, MITSUMOTO M, MIZUTANI H, et al. An interference suppression method by transmission chirp waveform with random repetition interval in fast-chirp FMCW radar[C]// 2019 16th European Radar Conference(EuRAD). Paris, France:IEEE, 2019:165–168.
- [40] HU X, LI Y, LU M, et al. A multi-carrier-frequency random-transmission chirp sequence for TDM MIMO automotive radar[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3672–3685.
- [41] MOON T, PARK J, KIM S. BlueFMCW: random frequency hopping radar for mitigation of interference and spoofing[J]. Journal on Advances in Signal Processing, 2022(1):1–17.
- [42] 安洪亮, 夏伟杰. 随机斜率LFMCW抗汽车防撞雷达中的交叉干扰[J]. 电子测量技术, 2012, 35(10):59–61. (AN Hongliang, XIA Weijie. Countermeasures to crossed jamming using LFMCW with random slope in the automotive anti-collision radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(10):59–61.)
- [43] RAMEEZ M, DAHL M, PETTERSSON M I. Adaptive digital beamforming for interference suppression in automotive FMCW radars[C]// 2018 IEEE Radar Conference. Oklahoma City, OK, USA:IEEE, 2018:0252–0256.
- [44] BARJENBRUCH M, KELLNER D, DIETMAYER K, et al. A method for interference cancellation in automotive radar[C]// 2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility(ICMIM). Heidelberg, Germany:IEEE, 2015:1–4.
- [45] UMEHIRA M, WATANABE Y, WANG X, et al. Inter-radar interference in automotive FMCW radars and its mitigation challenges[C]// 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology(RFIT). Hiroshima, Japan: IEEE, 2020: 220–222.
- [46] 陆蔚. 线性调频连续毫米波雷达的抗干扰技术研究[D]. 广州:广东工业大学, 2020. (LU Wei. Research on interference suppression technology based on FMCW millimeter wave radar[D]. Guangzhou, Guangdong, China: Guangdong University of Technology, 2020.)
- [47] WU J, YANG S, LU W, et al. Iterative modified threshold method based on EMD for interference suppression in FMCW radars[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(8):1219–1228.
- [48] LEE S, LEE J Y, KIM S C. Mutual interference suppression using wavelet denoising in automotive FMCW radar systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 22(2):887–897.
- [49] WANG J, DING M, YAROVY A. Interference mitigation for FMCW radar with sparse and low-rank Hankel matrix decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2022(70):822–834.
- [50] BLISS D W, FORSYTHE K W. Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) radar and imaging:degrees of freedom and resolution[C]// The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA:IEEE, 2003(1):54–59.
- [51] INSTRUMENTS T. Imaging radar using cascaded mmWave sensor reference design[EB/OL]. [2023-01-05]. <http://www.ti.com/lit/ug/tiduen5a/tiduen5a.pdf>.
- [52] LEE S, KIM S C. Logarithmic-domain array interpolation for improved direction of arrival estimation in automotive radars[J]. Sensors, 2019, 19(10):2410.
- [53] BINGNAN P E I, PEI T, ZHANG H. Orthogonal waveform design of MIMO radar based on niche genetic algorithm[C]// 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing(ICSPCC). Macau, China:IEEE, 2020:1–6.
- [54] LIANG C, WANG Y, YANG Z, et al. Cooperative automotive radars with multi-aperture multiplexing MIMO sparse array design[J]. Electronics, 2022, 11(8):1198.
- [55] JIN N, RAHMAT-SAMII Y. Advances in particle swarm optimization for antenna designs:real-number, binary, single-objective and multiobjective implementations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3):556–567.
- [56] SUN H, BRIGUI F, LESTURGIE M. Analysis and comparison of MIMO radar waveforms[C]// 2014 International Radar Conference. Lille, France:IEEE, 2014:1–6.
- [57] SCHMID C M, FEGER R, PFEFFER C, et al. Motion compensation and efficient array design for TDMA FMCW MIMO radar systems[C]// 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Prague, Czech Republic:IEEE, 2012:1746–1750.
- [58] BECHTER J, ROOS F, WALDSCHMIDT C. Compensation of motion-induced phase errors in TDM MIMO radars[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(12):1164–1166.
- [59] BARAL A B, TORLAK M. Joint Doppler frequency and direction of arrival estimation for TDM MIMO automotive radars[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(4):980–995.
- [60] BELFIORI F, VAN R W, HOOGEBOOM P. Random transmission scheme approach for a FMCW TDMA coherent MIMO radar[C]// 2012 IEEE Radar Conference. Atlanta, GA, USA:IEEE, 2012:0178–0183.

- [61] JJMD Wit, ROSSUM W, JONG A. Orthogonal waveforms for FMCW MIMO radar[C]// Proceedings of the 2011 IEEE Radar Conference. Kansas City, MO, USA: IEEE, 2011.
- [62] CAO S, MADSEN N. Slow-time waveform design for MIMO GMTI radar using CAZAC sequences[C]// 2018 IEEE Radar Conference. Oklahoma City, OK, USA: IEEE, 2018:1456–1460.
- [63] ZHENG L, ZHANG Y, ZHANG X. Two-step code generator for phase coded frequency modulated continuous wave Multi Input Multi Output radar: USA, US11366212B2[P]. 2021–8–12.
- [64] BIALER O, JONAS A, TIRER T. Code optimization for fast chirp FMCW automotive MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8):7582–7593.
- [65] ROSSUM W V, ANITORI L. Doppler ambiguity resolution using random slow-time code division multiple access MIMO radar with sparse signal processing[C]// 2018 IEEE Radar Conference. Oklahoma City, OK, USA: IEEE, 2018:0441–0446.
- [66] SOLODKY G, LONGMAN O, ELJARAT I, et al. CLEAN receiver for CDMA MIMO radar[C]// 2021 29th European Signal Processing Conference. Dublin, Ireland: IEEE, 2021:1760–1764.
- [67] RABIDEAU D J. Doppler-offset waveforms for MIMO radar[C]// 2011 IEEE Radar Conference. Kansas City, MO, USA: IEEE, 2011:965–970.
- [68] RABIDEAU D J. MIMO radar waveforms and cancellation ratio[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2):1167–1178.
- [69] JANSEN F G. Automotive radar Doppler division MIMO with velocity ambiguity resolving capabilities[C]// 2019 16th European Radar Conference. Paris, France: IEEE, 2019:245–248.
- [70] KISHIGAMI T, IWASA K, YUI T, et al. Fast chirp MIMO radar system using Doppler offset orthogonal codes[C]// 2020 17th European Radar Conference. Utrecht, Netherlands: IEEE, 2021:390–393.
- [71] XU F, VOROBYOV S A, YANG F. Transmit beamspace DDMA based automotive MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(2):1669–1684.
- [72] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8):1408–1418.
- [73] HUANG Q, LU D, HU J, et al. Simultaneous location and parameter estimation of human vital sign with MIMO-FMCW radar[C]// 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing. Chongqing, China: IEEE, 2019:1–4.
- [74] RAO B D, HARI K V S. Performance analysis of root-MUSIC[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(12):1939–1949.
- [75] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT—a subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1986, 34(5):1340–1342.
- [76] SUN S, PETROPULU A P, POOR H V. MIMO radar for advanced driver-assistance systems and autonomous driving: advantages and challenges[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4):98–117.
- [77] ROSSI M, HAIMOVICH A M, ELDAR Y C. Spatial compressive sensing for MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 62(2):419–430.
- [78] CAI T T, WANG L. Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(7):4680–4688.
- [79] ZHANG Y, ZHENG L, LI Z Z, et al. Radar system with modified orthogonal linear antenna subarrays: European, EP3988961A1[P]. 2021–9–13.
- [80] CHEN P, CAO Z, CHEN Z. A new atomic norm for DOA estimation with gain-phase errors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020(68):4293–4306.
- [81] LI M, STOLZ M, FENG Z, et al. An adaptive 3D grid-based clustering algorithm for automotive high resolution radar sensor[C]// 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Madrid, Spain: IEEE, 2018:1–7.
- [82] ESTER M, KRIEGER H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]// The 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Portland, Oregon, USA: [s. n.], 1996: 226–231.
- [83] KELLNER D, KLAPPSTEIN J, DIETMAYER K. Grid-based DBSCAN for clustering extended objects in radar data[C]// 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Madrid, Spain: IEEE, 2012:365–370.
- [84] SCHLICHENMAIER J, ROOS F, HÜGLER P, et al. Clustering of closely adjacent extended objects in radar images using velocity profile analysis[C]// 2019 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility. Detroit, MI, USA: IEEE, 2019:1–4.

- [85] SINGER R,SEA R. New results in optimizing surveillance system tracking and data correlation performance in dense multitarget environments[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1973,18(6):571–582.
- [86] SINGER R,SEA R,HOUSEWRIGHT K. Derivation and evaluation of improved tracking filter for use in dense multitarget environments[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974,20(4):423–432.
- [87] 何友,修建娟,关欣. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2013. (HE You,XIU Jianjuan,GUAN Xin. Radar data processing with applications[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [88] BAR-SHALOM Y. Extension of the probabilistic data association filter in multi-target tracking[J]. Proceedings of The 5th Symposium on Nonlinear Estimation, 1974,13(22):16–21.
- [89] BLACKMAN S S. Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2004,19(1):5–18.
- [90] NUSS D,REUTER S,THOM M,et al. A random finite set approach for dynamic occupancy grid maps with real-time application[J]. The International Journal of Robotics Research, 2018,37(8):841–866.
- [91] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960,82(1):35–45.
- [92] KALMAN R E. New results in linear filtering and prediction theory[J]. Journal of Basic Engineering, 1961,83(1):95–108.
- [93] JULIER S J,UHLMANN J K,DURRANT-WHYTE H F. A new approach for filtering nonlinear systems[C]// Proceedings of 1995 American Control Conference-ACC'95. Seattle,WA,USA:IEEE, 1995(3):1628–1632.
- [94] VAN D M R,WAN E A. The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation[C]// Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics,Speech,and Signal Processing. Salt Lake City,UT,USA:IEEE, 2001(6):3461–3464.
- [95] ARASARATNAM I,HAYKIN S. Cubature Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009,54(6):1254–1269.
- [96] BLOM H A P,BAR-SHALOM Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988,33(8):780–783.
- [97] KOCH J W. Bayesian approach to extended object and cluster tracking using random matrices[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008,44(3):1042–1059.
- [98] ZHANG L,LAN J. Extended object tracking using random matrix with skewness[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020(68):5107–5121.
- [99] YANG S,BAUM M. Tracking the orientation and axes lengths of an elliptical extended object[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019,67(18):4720–4729.
- [100] 京讯. 工信部印发《汽车雷达无线电管理暂行规定》,明确汽车雷达使用频率(76~79 GHz频段)[J]. 商用汽车, 2021(12):6–7. (JING Xun. The Ministry of Industry and Information Technology issued the interim provisions on radio management in automotive radar, clarifying the frequency of automotive radar(76~79 GHz band)[J]. Commercial Car, 2021(12):6–7.)
- [101] AYDOGDU C,KESKIN M F,CARVAJAL G K,et al. Radar interference mitigation for automated driving:exploring proactive strategies[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020,37(4):72–84.
- [102] AYDOGDU C,KESKIN M F,WYMEERSCH H. Automotive radar interference mitigation via multi-hop cooperative radar communications[C]// 2020 17th European Radar Conference. Utrecht,Netherlands:IEEE, 2021:270–273.
- [103] ZHOU C,GU Y,SHI Z,et al. Off-grid direction-of-arrival estimation using coprime array interpolation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018,25(11):1710–1714.
- [104] LIANG L,BAI Z,HE W. DOA estimation by off-grid compressive sampling matching pursuit with impulsive noise[C]// 2021 China Automation Congress. Beijing,China:IEEE, 2021:2802–2805.
- [105] BAO Q,KO C C,ZHI W. DOA estimation under unknown mutual coupling and multipath[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005,41(2):565–573.
- [106] ENGELS F,WINTERMANTEL M,HEIDENREICH P. Automotive MIMO radar angle estimation in the presence of multipath [C]// 2017 European Radar Conference. Nuremberg,Germany:IEEE, 2017:82–85.
- [107] LI B,WANG S,ZHANG J,et al. Ultra-fast accurate AoA estimation via automotive massive-MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021,71(2):1172–1186.
- [108] DONG X,WANG P,ZHANG P,et al. Probabilistic oriented object detection in automotive radar[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Seattle,WA,USA:IEEE, 2020:102–103.
- [109] CHENG Y,SU J,CHEN H,et al. A new automotive radar 4D point clouds detector by using deep learning[C]// IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Toronto,ON,Canada:IEEE, 2021:8398–8402.
- [110] TILLY J F,HAAG S,SCHUMANN O,et al. Detection and tracking on automotive radar data with deep learning[C]// 2020 IEEE 23rd International Conference on Information Fusion. Rustenburg,South Africa:IEEE, 2020:1–7.

- [111] DUBEY A,SANTRA A,FUCHS J,et al. A Bayesian framework for integrated deep metric learning and tracking of vulnerable road users using automotive radars[J]. IEEE Access, 2021(9):68758–68777.
- [112] COZMA A E,MORGAN L,STOLZ M,et al. DeepHybrid:deep learning on automotive radar spectra and reflections for object classification[C]// 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference. Indianapolis,IN,USA:IEEE, 2021: 2682–2687.
- [113] ONG S N,CHAN L,CHEW K,et al. 22 nm FD-SOI technology with back-biasing capability offers excellent performance for enabling efficient, ultra-low power analog and RF/millimeter-wave designs[C]// 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Boston,MA,USA:IEEE, 2019:323–326.
- [114] DORIS K,JANSEN F,LONT M,et al. mmWave automotive radar:from evolution to revolution[C]// Proceedings of the 2021 IEEE International Electron Devices Meeting. Boston,MA,USA:IEEE, 2021:2571–2574.
- [115] NEOFYTOU M,ATHANASIADIS P,GANZERLI M,et al. A novel 2-Dimensional correction method for mmWave cartesian I/Q modulators[C]// 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. San Francisco,CA,USA:IEEE, 2021:1–5.
- [116] GAO Z,WAN Z,ZHENG D,et al. Integrated sensing and communication with mmWave massive MIMO:a compressed sampling perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022,22(3):1745–1762.
- [117] WAN Z,GAO Z,SHIM B,et al. Compressive sensing based channel estimation for millimeter-wave full-dimensional MIMO with lens-array[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020,69(2):2337–2342.

作者简介：

郑 乐(1987–)，男，博士，教授，主要研究方向为雷达信号与信息处理、通信感知一体化。email: lezheng8451@163.com.

龙 腾(1968–)，男，博士，中国工程院院士，北京理工大学校长，主要研究方向为雷达系统、阵列信号处理、合成孔径雷达。

龙佳敏(1996–)，女，在读博士研究生，主要研究方向为汽车雷达信号处理。

文 铮(1997–)，男，在读博士研究生，主要研究方向为汽车雷达数据处理。

胡雪瑶(1990–)，男，博士，副研究员，主要研究方向为雷达信号处理、毫米波雷达系统设计。

高 镇(1989–)，男，博士，长聘副教授，主要研究方向为通信感知一体化。