

以通信为中心的通感一体化信号设计：研究现状与展望

唐爱民^① 刘凡^{*②} 袁伟杰^③ 杨杰^② 王书涵^① 兰岚^④
余显祥^⑤ 冯志勇^⑥ 金石^②

^①(上海交通大学 上海 200240)

^②(东南大学 南京 211189)

^③(南方科技大学 深圳 518055)

^④(西安电子科技大学 西安 710071)

^⑤(电子科技大学 成都 611731)

^⑥(北京邮电大学 北京 100876)

摘要：近年来，通信感知一体化技术受到学术界和工业界的广泛关注，被视为6G网络的关键技术之一。考虑到通信基础设施的广泛部署，将感知功能集成到通信系统中以构建通信感知一体化网络成为研究的重点。为此，以通信为中心的通感一体化信号设计成为首要解决的关键技术问题。以通信为中心的信号设计有两种主要技术路线：(1)基于导频进行感知的信号设计；(2)基于数据进行感知的信号设计。该文对以上两种信号设计的技术路线进行了深入而系统的阐述，其中对基于导频进行感知的信号设计的现有文献进行了全面综述，并对基于数据进行感知的信号设计进行了梳理，最后对通感一体化信号设计的未来研究方向进行了展望。

关键词：通信感知一体化；信号设计；导频设计；基于导频感知；基于数据感知

中图分类号：TN92

文献标识码：A

文章编号：2095-283X(2025)04-1019-27

DOI: 10.12000/JR25073

CSTR: 32380.14.JR25073

引用格式：唐爱民, 刘凡, 袁伟杰, 等. 以通信为中心的通感一体化信号设计：研究现状与展望[J]. 雷达学报(中英文), 2025, 14(4): 1019–1045. doi: 10.12000/JR25073.

Reference format: TANG Aimin, LIU Fan, YUAN Weijie, et al. Signal design for communication centric ISAC: state of art and future aspects[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(4): 1019–1045. doi: 10.12000/JR25073.

Signal Design for Communication Centric ISAC: State of Art and Future Aspects

TANG Aimin^① LIU Fan^{*②} YUAN Weijie^③ YANG Jie^② WANG Shuhan^①
LAN Lan^④ YU Xianxiang^⑤ FENG Zhiyong^⑥ JIN Shi^②

^①(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

^②(Southeast University, Nanjing 211189, China)

^③(Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

^④(Xidian University, Xi'an 710071, China)

^⑤(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

^⑥(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

收稿日期：2025-04-22；改回日期：2025-07-21；网络出版：2025-07-25

*通信作者：刘凡 fan.liu@seu.edu.cn *Corresponding Author: LIU Fan, fan.liu@seu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(62331023)，广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515011218)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62331023), The Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515011218)

责任编辑：唐波 Corresponding Editor: TANG Bo

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract: Integrated Sensing And Communications (ISAC), a key technology for 6G networks, has attracted extensive attention from both academia and industry. Leveraging the widespread deployment of communication infrastructures, the integration of sensing functions into communication systems to achieve ISAC networks has emerged as a research focus. To this end, the signal design for communication-centric ISAC systems should be addressed first. Two main technical routes are considered for communication-centric signal design: (1) pilot-based sensing signal design and (2) data-based ISAC signal design. This paper provides an in-depth and systematic overview of signal design for the aforementioned technical routes. First, a comprehensive review of the existing literature on pilot-based signal design for sensing is presented. Then, the data-based ISAC signal design is analyzed. Finally, future research topics on the ISAC signal design are proposed.

Key words: Integrated Sensing And Communications (ISAC); Signal design; Pilot design; Pilot-based sensing; Data-based sensing

1 引言

下一代无线网络(B5G/6G)是许多新兴应用的关键推动者，包括车联网、智能家居、智能制造、环境监测、人机交互等。其中，许多应用既需要高质量的无线连接，又需要高精度的感知能力。因此，在下一代通信网络中引入感知能力，是未来B5G/6G网络的重要技术演进方向^[1]。事实上，无线射频信号同时具备无线通信和无线感知的能力，两者的技术发展在过去数十年中已呈现出显著的交叉融合趋势。例如，作为典型的无线感知应用，相控阵雷达启发了多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)通信系统的发明^[2]，而MIMO通信技术又推动了MIMO雷达的发展^[3]。20世纪90年代至21世纪初，雷达与通信的融合研究逐渐兴起，特别是军方与学术界对多功能射频前端的设计开展了一系列研究^[4,5]。21世纪10年代，正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术被引入雷达感知^[6]，同时毫米波和大规模MIMO技术成为5G网络的核心。无线感知与通信系统均朝着更高频段、更大天线阵列和微型化方向发展，使得两者在硬件架构、信号处理方法和信道特性上越来越相似，为两者的深度融合提供了基础。在此背景下，通信感知一体化(Integrated Sensing And Communications, ISAC)技术应运而生。其核心理念在于通过共享软硬件资源和频谱资源，将通信功能和感知功能集成到同一个系统中，从而大幅提升资源利用效率。因此，通感一体化技术被视为下一代蜂窝通信网络的关键技术^[7,8]。此外，感知与通信结果的共享与融合使得两者可以实现协同优化，通过感知辅助通信或通信辅助感知进一步提升二者的性能。

目前，ISAC已经被国际电信联盟定义为6G网络的6大关键场景之一^[9]，3GPP也已经开始了ISAC的相关标准化进程^[10]。学术界和工业界已经针对

ISAC从信息论、信号设计、信道建模、波束赋形、干扰管理、系统实现等多方面开展了相关研究工作。ISAC的信息论相关研究为ISAC提供了理论基础和性能度量工具，其给出的性能边界能够指导和优化ISAC的算法和设计^[11,12]。ISAC的信道建模相关研究为系统设计、性能评估和优化提供了基础支撑，通过捕捉通信信道与感知信道的共享特性和差异特性，能够更真实地反映ISAC系统的运行环境，从而进行合理的性能评估与验证^[13,14]。ISAC的波束赋形通过增强信号方向性来增强信号能量并抑制干扰，可显著提升通信和感知的性能^[15-17]。ISAC的干扰管理在提升系统性能、增强系统可靠性方面起到了重要的作用^[18]。文献[18]全面分析了全双工ISAC系统面临的链路级和网络级干扰的挑战，并从无线电架构设计、波束赋形、模式选择和资源分配等角度设计干扰管理方案。除了理论和设计方面的研究，业界也展开了不同场景应用的系统实现^[19]。除上述研究外，通感一体化的波形或信号设计直接影响两者的硬件共享和频谱共享，因此是通感一体化在系统设计上首先需要考虑的问题。

一般来说，ISAC的信号设计具有3种不同的技术路线。(1)以感知为中心的设计：将通信要传输的信息嵌入传统雷达波形中^[20,21]。以线性调频波形为例，可以通过波形的幅度、相位、频率甚至调频速率来表示通信符号^[5,21]。此外，对于MIMO雷达系统，还可以通过波束旁瓣控制或索引调制等技术在空间域嵌入通信信息^[22,23]。然而，由于这类方法通常依赖慢时编码以避免破坏雷达波形的结构，其能够实现的通信速率往往较低，受限于脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)^[24]。文献[25]对以感知为中心的信号设计进行了综述。(2)以通信为中心的设计：利用现有通信系统和通信信号格式实现感知功能。早在码分多址(Code-Division Multiple Access, CDMA)为主流通信信号的时期，

Oppermann序列已被应用于同时支持通信和雷达功能^[26]。此外, 5G/Wi-Fi采用的OFDM通信波形, 也可以用于实现感知功能^[6,27]。(3)感知与通信联合设计: 同时考虑通信和感知两者的需求来联合设计ISAC波形, 而非仅依赖于传统雷达或通信信号^[28,29]。在此框架下, 可以采用多目标优化的方法来实现ISAC信号的设计, 其中特定的感知与通信性能指标成为目标函数或约束条件。例如, 在满足MIMO雷达波束图约束的条件下最小化用户间干扰^[30,31], 或在满足信干噪比(Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio, SINR)或传输速率要求的条件下最小化感知的克拉美罗界^[32,33]。文献[34]对共用波形的性能边界进行了深入探讨。尽管联合设计具有一定的灵活性, 但其复杂度也更高, 部分设计方案仍然选择了以通信波形或者雷达波形作为基础波形来进行相关优化。在上述3种设计路线中, 以通信为中心的设计不仅受到了学术界的广泛关注, 还受到了工业界的重点青睐。由于通信基站的泛在性, 以通信为中心的ISAC能够在尽量不改变通信硬件基本架构的情况下, 以最低的成本实现感知网络。因此, 本文将焦距于以通信为中心的ISAC信号设计。

以通信为中心的通感一体化信号设计通常采用现有通信系统的波形作为基础波形, 例如现代通信系统广泛采用的OFDM波形。然而, 其在具体的信号设计方案上, 仍存在广阔的探索空间。目前主流的信号设计主要遵循两条技术路线: 基于导频的感知方案和基于随机数据的感知方案。在基于导频的感知方案中, 一部分已知的确定性导频被设计用来实现无线感知功能, 这些导频信号和数据信号在时频资源上相互独立。这种设计方法的优势在于系统实现简单, 对现有通信系统具有良好的兼容性, 并且能支持未来标准和协议的平滑演进。然而, 由于导频需要占用独立的时频资源, 因此无线感知功能会直接占用通信的资源。为了保证通信速率, 导频所能占用的资源势必受限, 从而导致无线感知能力受到约束。基于随机数据的感知方案则不单独设计

专用导频用于无线感知, 而是利用所有的数据通信信号来实现无线感知功能。这种方案能最大限度地实现通信和感知的信号或频谱复用, 有效地增强无线感知能力。然而, 由于通信数据是实时发送的随机信号, 其随机性会对无线感知能力产生显著影响。因此, 如何降低通信数据随机性对无线感知性能的影响是基于数据进行感知的信号设计的关键挑战。本文针对上述两种以通信为中心的信号设计技术路线展开相关研究的综述。

本文的行文组织逻辑如下: 首先, 第2节对通信感知一体化的系统模型和信号进行阐述, 包括了单站感知与双站感知系统模型、基于导频感知和基于数据感知的优点和挑战分析、基于通信波形的时域模型构建以及基于OFDM波形的频域模型构建; 其次, 由于基于导频进行感知的信号设计研究已有较多的相关文献, 第3节从导频信号设计的多个方面进行分类阐述, 包括基于现有通信导频的感知研究、面向感知需求的导频信号结构设计、远距离感知的导频设计、OFDM波形的低峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)导频设计以及导频信号的优化研究。再次, 针对基于数据进行感知的信号设计研究, 第4节首先分析了数据的随机性对感知自相关函数旁瓣的影响, 然后重点介绍如何克服数据随机性对感知造成的影响, 目前这方面的研究还较少, 本文主要从调制基设计、星座设计、脉冲设计等3方面进行了梳理, 为将来这方面的研究提供技术路线和研究思路。最后, 第5节对以通信为中心的信号设计的一些挑战以及对应的未来研究方向进行了展望。

2 系统模型与信号模型

2.1 单站感知与双站感知

无线感知具有两种基本感知系统模型, 即单站感知(Monostatic Sensing)与双站感知(Bistatic Sensing)。两者的核心区别在于感知接收机与发射机的位置部署不同。如图1所示, 在单站感知模式

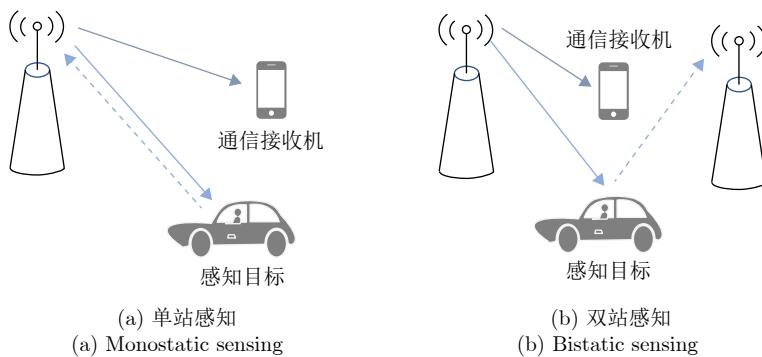


图 1 通感一体化系统模型

Fig. 1 System model for ISAC

下,发射机与接收机位于同一物理位置,因此收发功能可集成到同一个无线收发机中,具有设备集成度高、系统结构紧凑的优势;而在双站感知模式下,发射机与接收机则是分离部署到相对较远的位置。两种系统模型具有各自不同的优势和挑战。

在单站感知模式下,感知接收机和发射机可集成到同一套收发机中。通感一体化发射机发送通信信号给通信接收机进行数据通信功能,同时一体化接收机基于该信号捕获来自环境和目标的散射回波,通过对接收信号的处理与分析实现目标探测与定位等感知功能。单站感知模型可以实现良好的同步和系统软硬件复用。例如在OFDM雷达感知中,无线感知可以复用通信物理层进行信号采样,然后通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)将时域采样转换为频域符号,最终利用频域符号进行信号处理即可实现雷达感知。同时,由于发射信号是已知的,可以直接进行匹配滤波或去除数据的随机性后进行雷达检测和估计。然而,在单站感知中,由于发射机和接收机位于同一地点,因此发射天线和接收天线之间存在很强的自干扰。要从强干扰中提取雷达感知信号,如何消除自干扰或实现全双工收发机是单站感知的关键技术挑战^[18,35]。自干扰消除方式一般可以分为3类,即天线消除、模拟消除以及数字消除。天线消除和模拟消除用于抑制部分自干扰,主要是以避免模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)饱和,而数字域自干扰消除需要对自干扰的线性和非线性成分进行估计和消除,具有较高的复杂度。在全双工ISAC中,自干扰的消除还需要兼顾通信全双工和感知全双工对自干扰消除的不同需求,这对通感一体化全双工收发机架构的设计提出了更高的要求^[18]。

在双站感知模式下,发射机与感知接收机作为两个独立设备部署,并保持一定的空间距离。通感一体化发射机发送通信信号给通信接收机进行数据通信功能,同时另外一个通感一体化感知接收机基于该信号捕获来自环境和目标的散射回波,通过对接收信号的处理与分析实现目标探测与定位等感知功能。双站感知具有如下优点。首先,相比于单站感知,双站感知不存在自干扰的挑战,对于硬件设备的要求相对更低,传统的半双工收发机即可用于实现双站感知。其次,双站感知在位置部署上更具有灵活性,如移动的用户也可以用于构建双站感知,从而有效地增加感知的视野。然而,双站感知也存在一些技术挑战。首先,由于发射机与接收机采用独立设备部署,两者之间的频率不同步会引发相位误差,采样时钟的失配则会导致采样时间偏移

(Sampling Time Offset, STO)的存在,这些问题会显著降低目标估计的精度^[19]。其次,在双站感知中,感知接收机需要获取发射信号的详细信息以消除发射信号随机性对感知性能的影响。因此,双站感知更适合基于公共导频信号进行感知,若想利用所有的随机数据进行感知处理,则一般需要额外的回传链路对发射信号进行数据共享。最后,双站感知需要收发双方的位置和相对速度等信息进行感知目标参数的解算,如一方是移动用户,如何获取其准确的位置和相对速度等信息是双站感知必须要解决的挑战。

基于上述两种基本模型,在多节点参与的通感一体化网络中,还可以形成多节点协作感知。如基于双站感知基本模型,可以是一个节点发射感知数据,多个节点同时接收感知数据对目标进行感知的多节点协作感知。也可以是发射节点自身进行单站感知,同时其他节点基于该节点发射的数据进行双站感知,最终多个节点的感知接收数据或感知结果进行融合,形成多节点协作的混合感知。

2.2 基于导频的感知和基于数据的感知

导频是通信系统中插入的已知信号,通常用于信道估计、同步和干扰测量。在OFDM系统等现代通信系统中,导频符号被嵌入到时频资源网格的特定位置,接收端通过分析导频信号估计信道状态信息(Channel State Information, CSI),实现信号解调、均衡和资源调度^[36]。在ISAC系统中,导频不仅可用于支持通信功能,还可用于目标检测、距离测量和速度估计等感知任务^[7]。使用导频进行感知具有多方面的显著优势。首先,已有导频信号作为通信系统的固有组成部分,利用其感知能够实现资源复用,无需额外频谱,从而显著提升资源利用率;同时也可根据感知的需求额外设计导频用于无线感知,可有效地兼容系统架构和标准协议,便于实际部署。其次,由于导频信号是预先定义的已知信号,感知接收机可通过匹配滤波进行简单的相干积累即可高效提取目标回波信息,降低处理复杂度。再次,导频信号作为确定性信号或伪随机信号,可以对导频序列和结构进行优化设计,使之具有良好的相关特性和频谱特性,以便支持高精度的目标参数估计(如距离、速度和角度)。然而,使用导频进行感知也面临一系列挑战。首先,导频信号通常密度较低,相干累计的处理增益较少,可能导致感知信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)不足,影响目标检测和参数估计的精度;其次,在多用户或多小区场景下,导频信号易受到其他用户的干

扰，导致感知性能降低；此外，导频信号在时频资源网格中通常是稀疏分布的，可能降低感知最大不模糊距离和最大不模糊速度。因此，在利用导频实现感知时，需要通过优化设计和高性能算法来解决上述挑战，以实现通信与感知功能的高效集成。

在ISAC系统中，除了利用导频信号进行感知，还可以基于通信数据信号同时实现通信和感知功能。该方法通过充分利用通信信号的整个带宽和时域特性，显著提升了时延-多普勒分辨率，增强目标检测和估计的性能。虽然利用通信数据信号进行感知相比仅依赖导频的方案能够带来显著的性能提升，但由于这些数据信号并非天然为感知应用而设计，还需要解决一系列关键挑战。首先，与确定性或伪随机序列导频不同的是，数据信号是携带有用信息的随机信号。这些信号是根据特定码本随机生成的，其结构由信息源的分布决定。ISAC信息论的最新研究强调了感知与通信需求之间的核心区别，即通信系统依赖随机信号来高效传输信息，而雷达感知系统则要求具有良好模糊特性的确定性信号。因此，ISAC信号中的随机性有助于提高通信速率，但会降低感知性能，进而导致通信和感知之间的“确定-随机折衷”^[11,12]。这一折衷关系，特别是在ISAC信号输入分布方面^[37]，对刻画感知与通信的帕累托性能边界构成了重大挑战。其次，除了ISAC信息论所揭示的基础理论性质之外，在真实通信信号条件下进一步评估和优化可实现的感知性能具有重要的实际意义。通信信号主要用于数据传输，其信号格式与传统雷达信号存在本质区别。从最基本的层面来看，经过信道编码后发送的实际通信信号可以分解为以下关键组成部分^[36]。

(1) 星座符号：由比特序列映射而成，并承载信息。

(2) 正交调制基：利用一组标准正交基构造离散时间信号来传输这些符号。

(3) 脉冲整形滤波器：将离散时域样本转换为连续时间信号。

这些组成部分都会显著影响最终基于数据的感知性能。为了有效指导面向未来6G网络以通信为中心的ISAC信号设计，深入理解这些核心要素对感知性能的影响至关重要。为此，本文后续将对相关内容展开深入讨论。

2.3 基于通信波形的时域信号模型

考虑单天线点对点ISAC系统模型，该系统由一个ISAC发射机(Transmitter, Tx)、一个通信接收机(Receiver, Rx)和一个感知接收机组成。ISAC

Tx发射携带通信数据的信号至通信Rx，同时感知Rx接收由目标反射的回波信号并估计目标的多普勒时延参数。当考虑多天线系统或MIMO信道时，还需要对信号进行预编码或者波束赋形配置，本文主要关注通感一体化信号的设计，预编码或波束赋形的设计不考虑在信号模型中。基于上述系统模型与配置，可构建ISAC的时域发射信号模型为

$$\tilde{x}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n p(t - nT) \quad (1)$$

其中， T 表示一个离散时域样点对应的脉冲成形滤波器持续时间， $p(t)$ 是脉冲成形滤波器的脉冲响应， $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示 N 个离散时域采样点，

$$\mathbf{x} = \mathbf{U}\mathbf{s} = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \mathbf{u}_n \quad (2)$$

其中， $\mathbf{s} = [s_0, s_1, \dots, s_{N-1}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示从星座图 \mathcal{S} 随机选取的 N 个数据符号， $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}] \in \mathbb{U}(N)$ 是 N 维的酉矩阵，用于表示时域正交调制基。针对该表达式的假设具体阐述如下。

(1) 星座图：本文中采用一种具有旋转不变性的星座图，在数学上是零均值、零伪方差且单位功率，分别定义为

$$\mathbb{E}(s) = 0, \mathbb{E}(s^2) = 0, \mathbb{E}(|s|^2) = 1, \forall s \in \mathcal{S} \quad (3)$$

大多数常用的星座图如PSK, QAM和APSK均满足上述条件。然而，BPSK和8-QAM是两种例外情况，它们在现代蜂窝无线网络中已较少使用。此外，星座图并非必须均匀分布，若采用概率星座成型(Probabilistic Constellation Shaping, PCS)技术，每个星座点可以以不同的概率进行传输。

(2) 正交调制基：调制基矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbb{U}(N)$ 用于承载信息符号，在更广泛的语境中通常被称为“波形”，其中 $\mathbb{U}(N)$ 表示 N 维酉群，其正交性对于保证信号传输的可靠性至关重要。为便于理解，下面列举几种典型示例：

①单载波(Single-Carrier, SC)调制： $\mathbf{U} = \mathbf{I}_N$ ，在这种情况下，信号基仅由 N 个时域Kronecker-Delta函数构成，从而形成SC信号。

②OFDM调制： $\mathbf{U} = \mathbf{F}_N^H$ ，其中 $\mathbf{F}_N \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示 N 维的DFT矩阵，在此情况下，信号基由 N 个正交正弦函数构成，这些函数在频域上同样表现为Kronecker-Delta函数。

③CDMA调制： $\mathbf{U} = \mathbf{C}_N$ ，其中 $\mathbf{C}_N \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示 N 维Hadamard矩阵，该矩阵对应广泛应用于CDMA2000中的Walsh码^[38]。

④仿射频分复用(Affine Frequency Division

Multiplexing, AFDM)调制: $\mathbf{U} = \mathbf{A}_{c_1}^H \mathbf{F}_N^H \mathbf{A}_{c_2}^H$, 其中 $\mathbf{A}_c = \text{Diag}(1, e^{-j2\pi c_1^2}, \dots, e^{-j2\pi c_N^2})$, 这种配置使得 \mathbf{U} 成为一个具有可调参数 c_1 和 c_2 的逆离散傅里叶变换(Inverse Discrete Affine Fourier Transform, IDAFT)矩阵, 使得符号被映射在仿射傅里叶变换(Affine Fourier Transform, AFT)域中^[39]。

⑤正交时频空间(Orthogonal Time-Frequency Space, OTFS)调制: $\mathbf{U} = \mathbf{F}_{N_1}^H \otimes \mathbf{I}_{N_2}$, 在这种情况下, 符号被映射到时延-多普勒(Delay-Doppler, DD)域中, 其中 N_1 和 N_2 分别表示占用的时隙数和子载波数。需要注意的是正交时频空间本质上是一种二维调制方案^[40]。

为了在频域中实现高效的信号处理, 假设在信号 x 中添加了循环前缀(Cyclic Prefix, CP), 且该循环前缀的长度大于目标或通信路径的最大时延。

(3) 脉冲成形滤波器: 在现代无线通信系统中发挥着至关重要的作用, 它能够在限制信号带宽的同时消除符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)。采用带限的奈奎斯特标准脉冲, 其单边带宽为 B , 滚降系数为 α , 从而使得符号持续时间为 $T = (1 + \alpha)/(2B)$, 奈奎斯特脉冲确保无符号间串扰, 这一特性可以表示为

$$\tilde{p}(nT) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}, \quad \forall n \in \mathcal{Z} \quad (4)$$

其中, $\tilde{p}(\tau) = \int p(t) p^*(t - \tau) dt$ 为 $p(t)$ 的自相关函数。这一时域特性可以转变为等价的频域条件, 称为折叠谱准则, 可以表示为^[36]

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} g\left(f + \frac{m}{T}\right) = T \quad (5)$$

其中, $g(f)$ 为 $\tilde{p}(\tau)$ 的傅里叶变换, 也是脉冲 $p(t)$ 的功率谱。

不失一般性, 本文将感知信道建模为包含 I 个点目标的多径信道。其时域脉冲响应可表示为

$$h_s(t) = \sum_{i=1}^I \gamma_i e^{j2\pi f_{d,i} t} \delta(t - \tau_i) \quad (6)$$

其中, $\delta(t)$ 是 Dirac-Delta 函数, γ_i 第 i 个感知目标的复振幅, τ_i 表示时延, $f_{d,i}$ 表示多普勒频移。通过发送 ISAC 信号 $\tilde{x}(t)$, 在感知接收的信号可以表示为

$$\begin{aligned} y_s(t) &= h_s(t) * \tilde{x}(t) + z_s(t) \\ &= \sum_{i=1}^I \gamma_i e^{j2\pi f_{d,i} t} \sum_{n=0}^{N-1} x_n p(t - nT - \tau_i) + z_s(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $z_s(t)$ 表示方差为 σ_s^2 的零均值高斯白噪声。感知接收机利用 $\tilde{x}(t)$ 的先验信息, 从感知接收信号中提取感知目标的时延多普勒参数 $\{f_{d,i}, \tau_i\}$ 。最直接的方法是对回波信号 $y_s(t)$ 进行匹配滤波, 即

$$\tilde{y}_s(\tau, f_d) = \int y_s(t) \tilde{x}^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_d t} dt \quad (8)$$

来进行目标的检测以及速度和距离的估计, 也可以采用压缩感知等其他方法来降低采样率和提高分辨率^[41]。

2.4 基于OFDM波形的频域信号模型

现有通信系统包括 WiFi 和 4G/5G 系统都采用 OFDM 作为基础波形, 因此基于 OFDM 系统的通感一体化信号设计是面向 6G 通感一体化系统的研究重点。而基于 OFDM 波形的信号设计和信号处理主要在频域进行, 为此, 本节介绍基于 OFDM 波形的频域信号模型。

在一个相干处理间隔(Coherent Processing Interval, CPI)内, OFDM ISAC 信号包含 N_s 个 OFDM 符号且每个符号携带 N_c 个子载波, 包含参考信号(Reference Signal, RS)和数据的调制符号可以表示为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{N_s}]_{N_c \times N_s}$ 。先后经过离散傅里叶逆变换和加入 CP 后, 基带 OFDM ISAC 信号可以表示为

$$x(t) = \sum_{\mu=0}^{N_s-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} X(n, \mu) e^{j2\pi n \Delta_f t} \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_{\text{OFDM}}}{T_{\text{OFDM}}}\right) \quad (9)$$

其中, Δ_f 表示子载波间隔, T_{OFDM} 表示 OFDM 符号的持续时间, 其包括数据持续时间 T_d 以及循环前缀持续时间 T_c , $X(n, \mu)$ 表示在第 μ 个 OFDM 符号的第 n 个子载波的发送符号, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗函数。对于 RS 和 发送数据矩阵 \mathbf{X} 可以进一步表示, RS 和 传输数据的位置可以表示为 \mathbf{L}_r , $\mathbf{L}_d \in \{0, 1\}^{N_c \times N_s}$, $\mathbf{L}_r(\mathbf{L}_d)$ 中的第 (n, μ) 个元素为 1, 表示这个资源单元被分配给参考信号(传输数据)。假设资源得到充分利用, 则两者具有如下关系:

$$\mathbf{L}_r + \mathbf{L}_d = \mathbf{1}_{N_c \times N_s} \quad (10)$$

矩阵 $\mathbf{1}$ 中的所有元素均为 1。因此, 若使用 $\mathbf{X}_r, \mathbf{X}_d \in \mathbb{C}^{N_c \times N_s}$ 分别表示参考信号和数据的发送符号, 则有

$$\mathbf{X} = \mathbf{L}_r \odot \mathbf{X} + \mathbf{L}_d \odot \mathbf{X} = \mathbf{X}_r + \mathbf{X}_d \quad (11)$$

其中, \odot 表示 Hadamard 乘积。

在信号接收端, 时域采样点复用通信解调硬件获得感知接收信号的频域符号。更具体地说, 采样间隔设为 $T_s = T_d/N_c = 1/(N_c \Delta f)$, 对去除 CP 后的

采样点进行FFT运算即可获得频域符号。因此, 在目标回波时延不超过CP的情况下, FFT后第 μ 个OFDM符号的第 n 个子载波处感知接收符号可以表示为

$$Y_{\text{rad}}(n, \mu) = \sum_{i=0}^I \gamma_i X(n, \mu) e^{-\frac{j2\pi n \tau_i}{N_c T_s}} e^{j2\pi \mu T_o f_{a,i}} + N(n, \mu) \quad (12)$$

所有感知信号的频域符号可以表示为 $\mathbf{Y}_{\text{rad}} \in \mathbb{C}^{N_c \times N_s}$ 。

若基于导频进行感知, 则雷达接收机利用 \mathcal{L}_r 指示的预定参考信号位置来提取对应位置的感知符号信息, 即 $\mathbf{Y}_r = \mathcal{L}_r \odot \mathbf{Y}_{\text{rad}}$ 。OFDM系统基于导频的雷达感知的主要研究点是对 \mathcal{L}_r 结构的设计和优化。由于发射的参考信号符号 \mathbf{X}_r 是先验已知的, 所以可以通过简单的除法获得参考信号位置处的雷达信道 \mathbf{H}_{rad} 的信息, 并且将剩余的资源填充为零, 该过程可以表示为

$$H_{\text{rad}}(n, \mu) = \begin{cases} \frac{Y_r(n, \mu)}{X_r(n, \mu)}, & \mathcal{L}_r(n, \mu) = 1 \\ 0, & \mathcal{L}_r(n, \mu) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

如基于数据进行感知, 假设发送数据已知, 则同样可以采用上述方法提取数据位置的感知符号信息, 并获得数据位置的雷达信号信息。基于上述获取的雷达信道 \mathbf{H}_{rad} , 用于距离和速度检测距离多普勒谱(Range-Doppler Map, RD Map) \mathbf{M}_{RD} 则可以通过2D FFT估计算法^[42]来实现, 即

$$\begin{aligned} M_{\text{RD}}(p, q) &= \frac{1}{N_s N_c} \left| \sum_{\mu=0}^{N_s-1} \left(\sum_{n=0}^{N_c-1} H_{\text{rad}}(n, \mu) e^{-j2\pi \frac{np}{N'_c}} \right) e^{j2\pi \frac{\mu q}{N'_s}} \right|^2 \\ &= \frac{1}{N_s N_c} \left| \text{FFF}_{N'_s} [\text{FFT}_{N'_c}(H_{\text{rad}}(n, \mu))] \right|^2 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $p = 0, 1, \dots, N'_c - 1, q = 0, 1, \dots, N'_s - 1$, N'_c, N'_s 分别表示FFT和IFFT的点数。获得感知信道后, 也可使用基于子空间的估计算法如多重信号分类(MULTiple SIgnal Classification, MUSIC)或压缩感知等算法进行目标检测和参数估计。

3 基于导频进行感知的信号设计

3.1 基于现有通信导频的感知

在以通信为中心的ISAC研究中, 充分利用不同通信标准已有的通信导频信号进行环境和目标感知, 是一种重要的技术路径。导频信号作为通信系统中执行信道估计和同步等功能的重要参考信号, 其设计通常具有已知的时频特性、固定的序列结构以及良好的抗干扰能力, 这些特性使其非常适合用

于感知任务。现有研究包括利用IEEE 802.11系列标准的导频和特定传输信令、4G/5G系统中不同类型的感知信号等来实现无线感知, 表1对典型通信标准下利用现有通信导频的感知方法进行了总结, 以下进行详细阐述。

IEEE 802.11p是IEEE 802.11标准家族中专为车联网(Vehicle-to-Everything, V2X)通信而设计的标准。IEEE 802.11p运行在5.9 GHz频段, 其通信波形被称为专用短距离通信(Dedicated Short-Range Communications, DSRC), 是一种基于IEEE 802.11a标准但针对车辆高速移动和复杂交通环境进行了优化的V2X标准。运用DSRC进行车对车的单站感知, 可以通过在对接收信号进行载波域和符号域的IDFT和DFT, 估计多目标的距离和相对速度^[43], 如果在车上配备多个接收天线, 还可以进行到达角(Direction of Arrival, DoA)估计^[44], 其距离估计精度达到亚米级别。文献^[45]利用周期性传输的安全消息(Safety Message, SM)来进行感知, 通过估计周边车辆的速度和距离来实现碰撞检测。然而, IEEE 802.11p标准的带宽较小, DSRC能实现的传输速率和估计精度都较为有限。为了增加信号带宽, 可以利用相邻ISM频段来提升感知性能^[43],

表1 基于现有通信导频的感知方法
Tab. 1 Summarization of sensing methods based on existing communication reference signals

通信标准	感知所用信号	感知架构	参考文献
IEEE 802.11p	DSRC	单站感知	[43,44]
	DSRC + ISM频段	单站感知	[43]
	SM	单站感知	[45]
IEEE 802.11ad	Preamble	单站感知	[46–50]
	SLS	双站感知	[51–53]
4G LTE	CSRS等各种参考信号	\	[54–57]
	SSB等各种参考信号	\	[58,59]
5G NR	所有信号	双站感知	[60,61]
	SSB	单站+双站感知	[62]
		双站感知	[63]
	SSB+SIB1	单站感知	[64]
CSI-RS + DMRS	DMRS	单站感知	[65]
		双站/多站感知	[66]
	PRS	单站感知	[67–69]
		双站感知	[70]
		单站感知	[71]
CSI-RS + DMRS + PRS	CSI-RS + DMRS + PRS	单站感知	[72]
	PRS + DMRS	单站感知	[73,74]

但这也要求ISAC突破IEEE 802.11p的标准，对感知信号提出更高的要求。

IEEE 802.11ad是为支持超高速通信而设计的标准，运行在60 GHz频段，带宽可达2.16 GHz。IEEE 802.11ad的前导码(preamble)是帧结构的重要组成部分，主要用于同步、信道估计和信号检测。该前导码由Golay互补序列组成，因此具有良好的相关特性，也适用于感知。文献[46,47]展示了通过利用前导码来实现多目标距离和速度的感知，仿真结果表明能够实现厘米级距离精度和厘米/秒级速度精度。此外，还可以进一步辅以波束成形设计，同时进行角度的估计。例如文献[48]设计使用随机发射天线子集形成指向通信接收器的相干波束，同时扰动所得波束图的旁瓣，旁瓣扰动导致随机栅瓣，这些栅瓣可以用来进行雷达感知。利用前导码实现雷达功能所获得的感知信息还可以辅助基站进行精准测距和波束对准，从而显著减少了波束训练时间^[49]。然而，由Golay序列构成的前导码，其相关函数存在着高旁瓣问题，为此，文献[50]提出优化雷达脉冲压缩中匹配滤波器系数，并在CFAR操作之前引入平滑滤波操作以提高回波SNR，通过利用前导码的重复特征优化了CFAR窗口选择，这样的设计能够进一步减少虚警率。在IEEE 802.11ad标准下，除了利用前导码进行感知，还可以利用扇区级扫描(Sector Level Sweep, SLS)期间的探测信号，基于广义似然比检验(Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT)的估计方法，进行目标检测和参数估计，该方法可以达到小于10 cm的目标距离估计精度，但由于探测信号持续时间短，速度估计精度较差^[51,52]。文献[53]同样利用SLS的探测信号，提出了一种自适应程序来检测多个回波并估计其参数，所提出的检测器从接收信号中逐个提取潜在的回波，同时动态消除已检测到的(较强)环境反射引起的干扰，实现对多目标的高效感知。

除基于IEEE 802.11系列标准的信号进行通感一体化设计外，基于4G/5G信号的导频进行无线感知也受到广泛关注。在4G时代，不少研究探索了基于小区特定参考信号(Cell-Specific Reference Signal, CSRS)、同步信号(Synchronization Signal)以及一些其他参考信号来实现雷达感知的方法。文献[54,55]仿真了CSRS和同步信号的模糊函数；文献[56]仿真了CSRS和物理控制信道(Physical Control Channels)信号的模糊函数；文献[57]则考虑了LTE-R (Long-Term Evolution-Railway)的应用场景，给出了利用参考信号的感知模糊函

数，提出了多站感知数据融合的设想。5G NR (New Radio)作为一种新的空口，设计上具有比4G LTE (Long-Term Evolution)更宽的带宽、更低的延迟，其潜在的感知能力值得被关注。5G NR标准下有诸多参考信号可以被用于感知，包括同步信号块(Synchronization Signal and PBCH Block, SSB)、定位参考信号(Positioning Reference Signal, PRS)、信道状态信息参考信号(Channel State Information Reference Signal, CSI-RS)等。许多文献围绕这些参考信号进行了实现感知功能的探索。例如，文献[58]给出了SSB, CSI-RS、物理下行控制信道(Physical Downlink Control Channel, PDCCH)、物理下行共享信道(Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) 4种信号的模糊函数的理论表达式；文献[59]计算并仿真了SSB和CSI-RS的自模糊函数和交叉模糊函数，指出当前的NR波形可以用于感知功能，但匹配滤波器增益低是一个新的挑战。文献[60,61]在5G NR信号结构特征的理论分析基础上，用实验证明了5G网络中实现被动相干定位(Passive Coherent Localization, PCL)的可行性。

在5G NR的参考信号中，SSB具有周期性配置的特性，可用于实现无线感知。SSB是用于小区搜索和初始接入的关键信号，包括主同步信号(Primary Synchronization Signal, PSS)、辅同步信号(Secondary Synchronization Signal, SSS)、解调参考信号(Demodulation Reference Signal, DM-RS)、物理广播信道(Physical Broadcast Channel, PBCH)4个部分。文献[62]利用多个远程射频单元(Remote Radio Units, RRUs)发送的SSB进行主动和被动联合感知，并开发了一种稀疏模型来解耦多个感知参数的估计，以降低直接感知的计算复杂度。虽然SSB在时间上周期发送，但是其时间重复间隔较大，因此基于SSB的感知面临速度模糊性的问题；同时，由于带宽和每波束持续时间的限制，其距离和速度分辨率同时受到限制。文献[63]利用SSB周期性传输的调制脉冲进行基于5G的被动相干定位，针对SSB感知的速度模糊问题，提出了一种在单一目标场景中解决此问题的方法，并通过仿真和实验进行验证。同样为了解决模糊性和分辨率的问题，文献[64]提出了将SSB与在PDCCH传输的下行控制信息(Downlink Control Information, DCI)以及在PDSCH传输的系统信息块1(System Information Block 1, SIB1)符号相结合的解决方法。DMRS作为SSB的一部分，嵌入在PBCH中，且在PBCH的时频资源中以特定的间隔分布，因而也被广泛运

用于感知。例如, 文献[65]研究了基于DMRS的单站感知, 并使用从一维到三维的压缩感知技术进行信号处理, 维度越高, 感知的精度越高, 但是算法的复杂度越大。文献[66]分析了基于DMRS的双基地和多基地雷达的定位精度, 提出了一种分析框架来计算几何精度稀释(Geometric Dilution of Precision, GDOP), 该指标用于表征目标位置估计误差与双基地几何结构和测量误差的关系。

除了SSB, 5G NR标准的定位参考信号(Positioning Reference Signal, PRS)也可用于实现感知功能。PRS具有较高的时间分辨率和频率分辨率, 因此能实现高精度的定位; 同时, PRS的发送频率、带宽和功率支持根据具体应用场景进行灵活配置的能力, 从而可适应不同的定位需求。文献[67]用2D-FFT估计距离和速度, 推导了基于PRS雷达感知的距离和速度估计的CRB, 给出了利用PRS感知的理论性能下界。由于PRS的资源分配可能较为稀疏, 造成雷达处理增益不够。为此, 文献[68]通过将5G PRS与压缩感知方法相结合, 提出一种改进的感知算法, 有效提升了感知性能。虽然PRS支持大带宽从而实现高精度的测距, 但其梳状子载波的结构会在定位和感知中引入距离-速度模糊性挑战。这一模糊性挑战在基于参考信号的雷达感知中普遍存在, 限制了不模糊可探测范围(详见3.2节的详细讨论)。具体到基于PRS的感知, 为了解决模糊性挑战, 文献[69]引入了新的不规则资源模式, 在支持用户定位服务的同时, 实现了高精度的下行链路感知并抑制了模糊性。

为了解决单一参考信号存在的上述问题, 文献[70]提出了一种优化组合不同类型参考信号的方法, 并利用载荷数据作为额外参考信号, 可以有效提升雷达感知性能。类似地, 考虑单站感知的场景, 也有文献探讨了多种参考信号联合的感知方法, 例如DMRS和CSI-RS联合感知的方法^[71], 以及DMRS, PRS和CSI-RS联合感知的方法^[72]。文献[73,74]利用基于5G NR的PRS以及DMRS, 来提升感知的范围。

通信感知一体化技术作为6G网络的关键技术, 其参考信号设计是标准化工作的一项重点。为此, 在现有参考信号的基础上, 针对无线感知的不同应用场景设计特定的感知参考信号, 将有力保证感知的性能, 推动无线感知功能的实际应用落地。

3.2 面向感知需求的导频信号结构设计

基于现有标准中已有的各种导频来实现无线感知, 可以实现对现有系统的最大兼容。然而, 现有导频的结构是面向通信同步和信道估计等目标而设

计的, 虽与无线感知具有一定的功能相似性, 但并不完全一致。因此, 部分研究展开了面向无线感知需求的导频结构设计研究。以通信为中心的导频插入一般包括两种基本模式, 一种是时域上导频后跟数据的布置模式, 常见于IEEE系列标准, 另一种是在OFDM时频资源格上分布式插入导频, 4G/5G标准即采用上述模式。基于上述两种导频插入方式, 导频的结构设计包括两个方面, 导频的序列设计和导频在时频资源上的结构。以下将对上述两方面的相关研究展开阐述。

导频的序列设计往往跟感知模糊函数的旁瓣特性密切相关。针对IEEE 802.11ad标准现有导频结构检测多普勒特性不足的缺点, 文献[75]提出在前导码中引入与Golay序列互补的Prouhet-Thue-Morse序列来提高雷达的多普勒鲁棒性, 实现极低的旁瓣水平, 减少误报概率。文献[76]针对无线感知在给定时延多普勒区间高精度检测的需求, 通过对导频序列进行优化, 大幅抑制在特定区间的模糊函数旁瓣。文献[77]针对动作检测和手势识别两种应用, 通过实验测试了不同序列对于感知精确度的影响。为了对抗噪声对检测精度的影响, 文献[78]通过对导频序列进行相位编码, 并通过迭代信号处理的方法来提升目标检测的精度。

相比于对导频序列的设计, 更多研究关注导频在时频域上的插入结构, 特别是针对OFDM系统的导频插入结构研究。导频在时频域上的插入结构以及间隔直接影响到无线感知的最大不模糊检测速度和最大不模糊检测距离。导频的密度越大则感知的最大不模糊时延-多普勒范围越大, 然而导频的开销也越大。针对IEEE 802.11ad导频速度检测开销较大的挑战, 文献[79]通过对IEEE 802.11ad帧结构长度的设计来控制导频在时域上分布间隔, 从而以更小的导频开销来实现更大的不模糊速度检测范围; 文献[80]则通过长短帧的配合来拓展速度的检测范围, 同时通过在长帧中改变导频的设计来支持更大的检测距离。针对OFDM系统的导频插入结构, 常规的导频放置一般分为4类, 即整个OFDM符号所有子载波都插入导频、特定载波所有OFDM符号都插入导频、沿着OFDM符号和载波均匀插入或交替式均匀插入导频, 分别如图2所示。由于导频所占的资源有限, 导频在时间或子载波上往往是不连续且间隔分布的, 其在载波上的间隔决定了最大不模糊的检测距离, 在时域符号上的间隔决定了最大不模糊的检测速度。针对常用的FFT检测算法, 为了避免距离检测和速度检测的栅瓣造成多目标检测的误检, 导频在时间和载波上可采用等间距均匀放置^[81]。

图3展示了与图2所对应的不同导频信号结构设计在RD谱上所展示的模糊峰和最大不模糊可检测范围的示意图，该结果中的模糊峰值计算基于OFDM系统设置120 kHz载波间隔(对应OFDM符号时间为8.9 μ s)和28 GHz中心频点。值得注意的是，若采

用图2(d)所示的参考信号结构，基于模糊峰的位置，其最大不模糊可检测具有两种可选的范围。扩展模糊性能(Extended Ambiguity Performance, EAP)是模糊性的一种指标，包括所有栅瓣和旁瓣，指示了在目标参数估计中无干扰峰值的最大可检测区

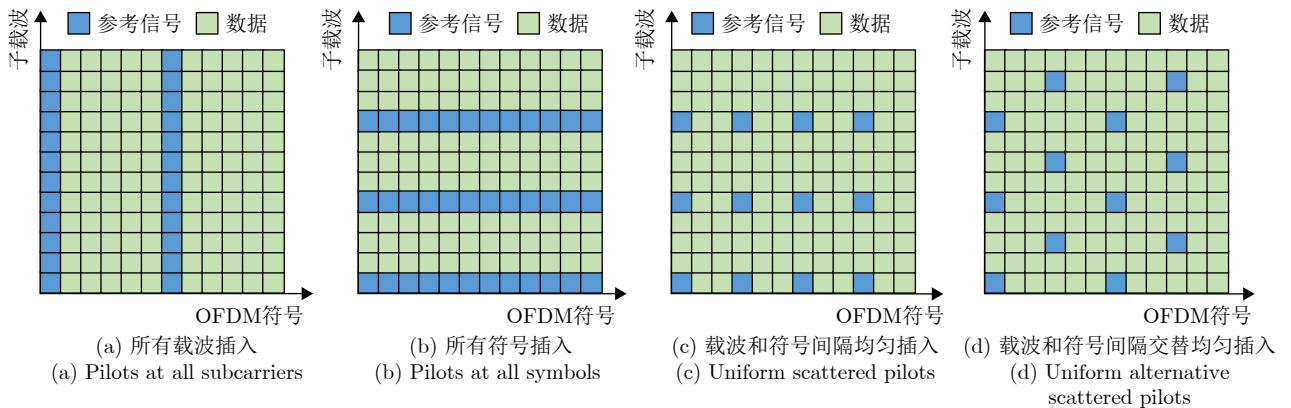


图2 导频在OFDM帧结构中的插入结构
Fig. 2 The pilot structures in OFDM frames

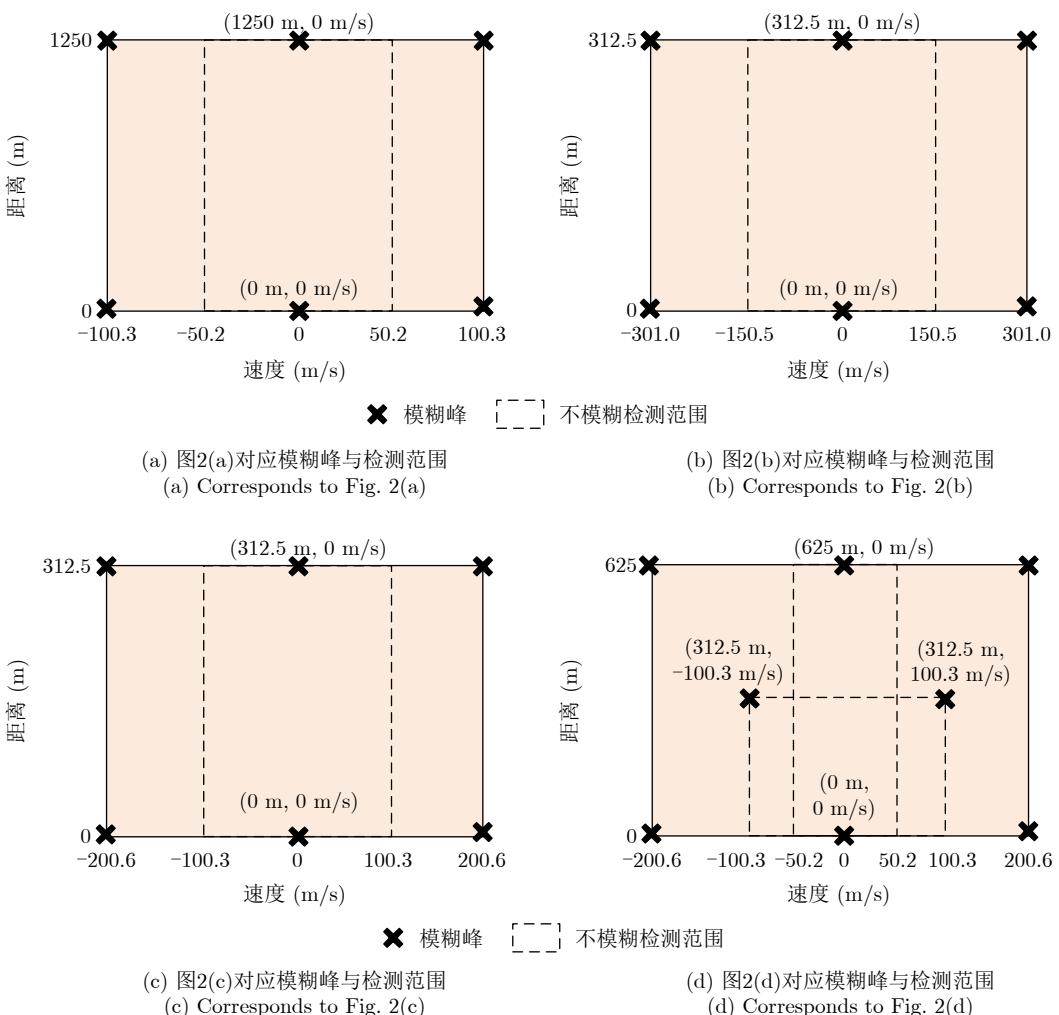


图3 不同导频插入模式对应的模糊峰以及不模糊检测范围示意

Fig. 3 The ambiguous peak and unambiguous detection area for different pilot structures

域。基于EAP的定义，文献[82,83]进一步提出了OFDM参考信号插入结构的设计准则，该设计不仅在不同类型的感知算法下改善了时延和多普勒频移域的EAP，还减少了集成通信与感知的资源开销。对于标准分辨率感知算法，建议采用与参考信号间隔大小互质的线性斜率的交错偏移。而对于超分辨率感知算法，推导了导频信号交错偏移的必要和充分条件。为了降低导频的开销，文献[84]利用参考信号间隔为互质来消除模糊性，并用MUSIC做信号处理。仅用互质性进行模糊峰消除需要同时利用多个相关处理区间进行联合感知，文献[85]也采用类似的思路通过设计导频结构在时频上的互质性来提升最大不模糊检测范围；文献[86]则利用了速度的物理意义，用多个相干处理区间的速度变化来消除模糊性，扩展最远检测距离和最大检测速度。

3.3 面向远距离感知的信号设计与处理

利用现有通信主流波形CP-OFDM进行感知，如果感知目标较远，回波信号可能超出CP的范围，从而产生ISI，恶化感知的性能。考虑一个单站感知的情况，感知接收机收到的回波信号包括多种成分，包括自干扰、多个目标的回波以及环境的杂波等。多种回波信号的典型接收信号时序图如图4所示，发射信号的自干扰几乎无时延就到达接收机，较近的目标回波信号时延低于CP的长度，较远目标的回波信号则会超出CP的长度，此外还存在杂波信号，其时延也可能超过CP长度；在接收机信号处理时，对于第 μ 个OFDM发送符号，去掉CP的采样点，使用FFT将剩下红框内的时域采样点转换成频率符号。由于解码第 μ 个OFDM符号所采样的时域采样点由第 $(\mu-1)$ 个和第 μ 个OFDM发射符号共同组成，因此感知回波信号受到ISI的影响。在面向无人机等远距离目标检测应用时，如何克服OFDM感知的ISI影响是远距离感知的一个重要技术挑战。

为了对抗ISI，最直接的方法就是增加CP的长

度，然而该方案会产生较大的CP开销。目前已有很多的研究展开对该问题的研究。文献[27]引入了虚拟循环前缀(Virtual CP)到OFDM波形中，其中重新分割的接收块末尾的一些样本被叠加到块的前端作为虚拟CP，然而该方法的实现与现有OFDM系统并不完全兼容。文献[80,87]推导了ISI在频域前后符号的数学形式，并指出前后符号可以先保持现有OFDM系统处理流程获得频域符号，然后将相邻频域符号的后者进行固定的相位偏置即可在频域实现ISI的相干叠加处理，从而利用ISI来增加处理增益。该方法可以处理超大载波在间隔导致的ISI跨多个OFDM符号的挑战，同时通过类脉冲雷达的导频设计方案，可有效对抗自干扰消除不完全对远距离感知的影响。文献[88]提出在时域的处理方法，通过相干补偿将每个OFDM间隔后的若干样本添加到前端，用于提高每个OFDM块的SINR。文献[89]则提出了一种巧妙避免感知码间串扰的方法，其通过在一个OFDM符号内交替放置非零功率参考信号(Non-Zero-Power RS, NZP-RS)和零功率参考信号(Zero-Power RS, ZP-RS)，然后通过采样后半部分的时域波形进行感知，从而避免ISI的影响，可以大幅提升无ISI的检测距离。为了降低参考信号的开销，文献[86]基于上述方案提出一种更灵活配置参考信号的方法，通过时域和频域交替插入参考信号，并利用物理速度来区分模糊峰，从而同时避免远距离的ISI干扰并大幅提高最大不模糊速度的检测范围。文献[90]则通过对载波的分离，对部分载波设置更长的循环前缀和循环后缀来避开ISI对远距离感知的影响。文献[91]采用OFDM-Chirp波形，通过设置保护间隔来替换循环前缀，从而降低ISI和载波间串扰(Inter-Carrier Interference, ICI)的影响。

3.4 面向低PAPR的感知信号设计

OFDM系统的优势是可以将一个很大的带宽分解为众多独立的子载波，从而有效克服多径效应导

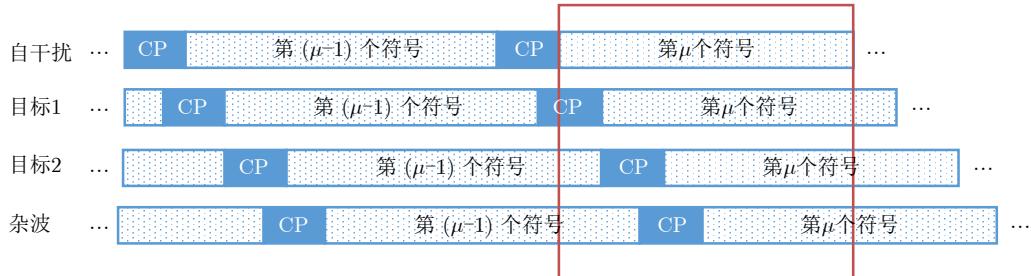


图4 接收OFDM符号的时间轴

Fig. 4 The timeline for received OFDM symbols

致的频率选择性衰落的影响。然而，众多子载波在时域的叠加也带来了一个重要缺点，即时域波形具有较高的PAPR。现有通信系统为了降低PAPR的影响，会对发射的数据进行某种随机化打乱，在一定程度避免了极高PAPR的产生，但是OFDM系统的整体PAPR还是随着载波数量呈对数形式增长。为了避免放大器进入非线性饱和区对OFDM发射信号产生的畸变，发射机不得不通过功率大幅回退的方式来避开PAPR的影响，即OFDM信号的最大发射功率受限于其高PAPR特性，全功率发射会导致信号畸变，放大器功率回退又使得不能充分利用发射机的最大功率来提升感知回波信号能量^[92]。如果仅考虑OFDM感知的高PAPR问题，可以通过迭代优化剔除掉超过功率门限的点，从而达到抑制PAPR的效果^[93]，但是这样的方法未考虑通信感知一体化两方面的需求。因此，面向低PAPR的OFDM ISAC信号设计也受到了广泛关注。

与通信系统中降低PAPR的方法类似，ISAC系统可以通过编码的方式生成低PAPR的信号。例如，文献[94]提出了基于Golay块编码的OFDM ISAC波形设计。具体而言，通信数据通过Reed-Muller码编码为Golay序列的互补序列。然而，随着子载波数量的增加，该算法的编码速率会迅速下降。类似地，文献[95]基于互补序列来构建恒模OFDM符号，从而获得较低的PAPR，但其编解码与现有OFDM架构不完全兼容。文献[96,97]则把预编码问题转化为优化问题求解，在限制PAPR的条件下，获得ISAC波形，该波形能够显著提高通信和感知的性能。其中，文献[96]将优化问题等效转化为多个子问题，并通过半定松弛方法并行求解，文献[97]提出基于ADMM的高效算法进行求解。由于ISAC信号需要实时更新发送，基于优化的预编码方法面临着复杂度的挑战。文献[98]将相位编码技术和子载波预留(Tone Reservation)技术相结合来降低PAPR，且通过对模糊函数的分析，验证了其在PAPR限定下的雷达和通信性能优势。

面向ISAC的通感一体化信号设计，可以预留部分子载波用于感知，而这部分感知子载波上的数据可以进行信号的优化来抵消峰值，从而降低信号的PAPR。例如，文献[99]利用最大化-最小化(Majorization-Minimization, MM)的方法优化感知载波的符号，在保证积分周期自相关旁瓣水平为零的同时，显著降低了PAPR；类似地，文献[100]也利用MM的方法优化感知子载波符号，提出一种基于 l -范数的循环算法，能够有效降低ISAC波形的最大PAPR；文献[101]则在通信数据信息速率(Data

Information Rate, DIR)、PAPR和发射功率的约束下，最大化了雷达信道与接收波形之间的感知互信息，并提出了一种优化算法以获得子载波的最优功率分配。这类优化感知载波符号或功率的方法虽然可以达到较理想的PAPR，但是需要占用部分载波专门用来做感知，且需要根据通信的数据实时优化计算感知载波上的值，计算复杂度较高。

3.5 面向通感一体的感知信号优化

由于在ISAC系统中通信和感知复用时频资源，基于导频的感知势必会造成感知和通信两个功能之间性能的折衷，也会涉及时、频、功率等各种资源的分配问题。在有限的资源中优化感知信号，是实现感知与通信功能高效融合的核心。优化感知信号，或者说是优化用于感知的参考信号，主要是优化其数量、位置和功率等参数。由于感知信号和数据信号共享所有的通信资源，因此优化设计过程中事实上是对感知信号和通信信号进行联合优化。一般来说，在ISAC信号的优化设计研究中，从目的而言可以分为3类，如表2所示：第1类是在保证通信功能的前提下，以最大化感知性能为目标的感知信号优化；第2类是以同时最大化感知性能指标和通信性能指标为目标的感知信号优化；第3类是在保障感知和通信功能的前提下，旨在降低系统整体功耗的感知信号优化。

以最大化感知性能为目标的感知信号优化，可以选择不同的感知性能指标进行分析。例如，文献[102]以时延和多普勒的克拉美-罗下限(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)作为感知性能指标，通过联合最小化时延和多普勒估计CRLB来优化OFDM波形。具体而言，将空闲子载波用优化过的频域采

表2 面向通感一体的感知信号优化方法

Tab. 2 Summarization of optimization methods of ISAC sensing signals

优化目的	通信性能指标	感知性能指标	优化对象	参考文献
最大化感知性能	通信速率	MI	载波功率	[101]
	功率	CRLB	载波功率	[102]
	\	CRLB	载波数量和位置	[103]
	\	估计误差	参考信号	[104]
最大化通信性能	有效信道容量	估计误差	载波数量和功率	[105]
	排队长度	Age of information	雷达模式	[106]
	速率	FI	载波功率	[107]
	SER	CRLB	载波功率	[108]
最小化功率	速率	MI	载波位置和功率	[109]
	速率	MI	载波位置和功率	[110]
	速率	SNR	参考信号间隔和功率	[81,111]

样填充, 并通过优化问题的解分配部分属于通信载波的能量, 同时在优化过程中控制和最小化波形的PAPR。文献[103]通过优化DMRS的子载波数量和位置, 以最小化单目标时延CRLB为目标优化感知信号, 并将所得结果扩展到多目标场景。该研究提出的信号设计可以有效减少用于感知的子载波数量, 而CRB的增加几乎可以忽略。除了估计参数的CRLB, 互信息从信息论的角度给出了感知的性能评判。文献[101]通过优化感知载波和通信载波的功率分配, 在通信性能保障、PAPR和发射功率的约束下, 最大化雷达信道与接收波形之间的感知互信息。如果考虑以感知最大误差为性能指标, 同样可以构建优化问题。文献[104]利用上行链路获得的先验信息优化下行导频信号, 以最小化角度估计误差, 该研究中的导频优化问题是一个具有秩为1约束的半定规划问题, 可以通过用平滑近似替代该约束, 并用MM方法进行求解。

以最大化通感能性为目标的感知信号优化, 通常会以通信和感知性能指标的加权和为目标函数。例如, 文献[105]通过优化参考信号载波数量和功率分配参数, 最大化通信有效信道容量以及雷达估计准确度; 文献[106]通过动态改变导频子载波分配, 以实现不同距离的雷达感知, 实现在不同范围雷达的信息年龄(Age of Information)和通信需求之间的平衡; 文献[107]通过优化载波功率分配, 最大化通信速率和雷达感知费希尔信息(Fisher Information, FI), 并提出了交替优化分数规划与Karush-Kuhn-Tucker(KKT)算法求解; 文献[108]通过优化载波功率分配优化, 最小化通信的符号错误率(Symbol Error Rate, SER)以及时延和多普勒估计的CRLB, 并利用深度学习来最小化3个目标函数加权和的功率分配。

以最小化功率为目的的感知信号优化, 通常会预设感知功能和通信功能的期望性能指标, 构建的优化问题往往是非凸的, 不同文献提出了多种优化求解策略。例如, 文献[109]通过联合优化子载波选择和功率分配方案, 以最小化系统功耗, 使ISAC系统能够同时实现雷达和通信的目的; 对于非凸优化问题, 该方法提出在凸松弛重构和问题划分之后, 可以使用一种高效的三步求解技术, 该方案结合了循环最小化算法和KKT最优性条件。文献[110]通过优化子载波位置和功率分配, 获得系统所需的最小总功率, 同时确保感知服务和通信服务的质量; 为解决非凸优化问题, 受信道增益信息的经典子载波分配算法的启发, 将问题分解为两个易于求解的凸优化子问题分别求解。文献[81,111]与之前的研究略有不同, 通过优化RS间隔以及RS与每个数据子载波的功率分配, 满足通信数据速率和雷达

感知SNR要求的同时最小化传输功率, 在RS的优化过程中同时考虑了RS配置对通信信道估计的影响以及系统PAPR的限制。

4 基于数据进行感知的信号设计

基于随机数据的感知可有效地增加雷达感知信号相干处理能量累计, 从而提升雷达感知性能。若将发射信号当作已知信号来处理, 那么可将所有信号当作参考信号, 则参考信号相关的设计和处理方法可用于基于数据的感知处理方法。然而, 考虑到数据随机性对感知性能的影响, 还需要进行深入的性能分析和信号设计。目前针对数据随机性的研究尚不充分, 本文从随机数据感知的自相关函数出发, 对基于数据感知的调制基底选择、星座设计和脉冲整形的优化设计进行了梳理。

4.1 基于随机数据进行感知的自相关函数表征

为了便于分析, 可首先对ISAC信号 $\tilde{x}(t)$ 进行时间网格上的离散化, 采用采样间隔 $T_s = T/L$, 得到

$$\begin{aligned}\tilde{x}(kT_s) &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n p(kT_s - nT) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n \delta(kT_s - nT) \otimes p(kT_s)\end{aligned}\quad (15)$$

其中, $k = 0, 1, \dots, LN - 1$, \otimes 表示由于添加CP而产生的循环卷积。需要注意的是, 为了刻画脉冲整形对感知性能的影响, 需要 $L > 1$ 。如果 $L = 1$, 由于Nyquist脉冲的零ISI特性, 离散化可简化为 $\mathbf{x} = \mathbf{U}\mathbf{s}$, 然而这一简化忽略了脉冲整形滤波器对自相关函数(Auto-Correlation Function, ACF)主瓣和旁瓣的贡献。

定义 $p_k := p(kT_s)$, 以及 $\tilde{x}_k := \tilde{x}(kT_s)$, 则脉冲和基带信号的离散版本可分别表示为向量 $\mathbf{p} = [p_0, p_1, \dots, p_{LN-1}]^T$ 和 $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{x}_0, \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_{LN-1}]$, 其中脉冲的能量归一化为 $\|\mathbf{p}\|^2 = 1$ 。在实际的通信发射机中, 脉冲整形可以通过对 \mathbf{x} 进行过采样和插值来实现, 使得式(15)可转换为以下向量形式:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\mathbf{x}_{\text{up}} \quad (16)$$

其中,

$$\mathbf{x}_{\text{up}} = [x_0, \mathbf{0}_{L-1}^T, x_1, \mathbf{0}_{L-1}^T, \dots, x_{N-1}, \mathbf{0}_{L-1}^T]^T \quad (17)$$

矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{C}^{LN \times LN}$ 为循环矩阵, 定义如下:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_0 & p_{LN-1} & \dots & p_1 \\ p_1 & p_0 & \dots & p_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{LN-1} & p_{LN-2} & \dots & p_0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

该矩阵可理解为对 $\tilde{\mathbf{x}}$ 进行插值，使其在传输前具有更高的分辨率。因此，离散化后的ACF $R(\tau)$ 形式如下：

$$R_k = \tilde{\mathbf{x}}^H \mathbf{J}_k \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_{\text{up}}^H \mathbf{P}^H \mathbf{J}_k \mathbf{P} \mathbf{x}_{\text{up}}, k = 0, 1, \dots, LN - 1 \quad (19)$$

其中， $\mathbf{J}_k \in \mathbb{C}^{LN \times LN}$ 为第 k 个周期移位矩阵，定义如下^[112]：

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{LN-k} \\ \mathbf{I}_k & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (20)$$

以及

$$\mathbf{J}_{-k} = \mathbf{J}_{LN-k} = \mathbf{J}_k^T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_k \\ \mathbf{I}_{LN-k} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (21)$$

注意，矩阵 \mathbf{J}_k 的周期性同样来源于CP的添加。因此，相干累积后的离散ACF可表示为

$$\bar{R}_k = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{\mathbf{x}}^{(m)H} \mathbf{J}_k \tilde{\mathbf{x}}^{(m)} \quad (22)$$

为了分析以通信为中心的ISAC信号感知性能，文献[113]推导了 $|\bar{R}_k|^2$ 的期望值的闭式表达式，给出如下结果：

$$\begin{aligned} & \mathbb{E}(|\bar{R}_k|^2) \\ &= \underbrace{N \left| \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^H \tilde{\mathbf{g}}_k \right|^2}_{\text{冰山}} \\ &+ \underbrace{\frac{1}{M} \left\{ \|\tilde{\mathbf{g}}_k\|^2 + (\kappa - 2) N \left\| \tilde{\mathbf{V}}^T (\tilde{\mathbf{g}}_k \odot \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^*) \right\|^2 \right\}}_{\text{海平面}} \\ &= |\mathbb{E}(\bar{R}_k)|^2 + \text{var}(\bar{R}_k), \\ & k = 0, 1, \dots, LN - 1 \end{aligned} \quad (23)$$

其中， $\tilde{\mathbf{f}}_{k+1} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为大小为 LN 的DFT矩阵 \mathbf{F}_{LN} 第 $(k+1)$ 列的前 N 个元素， $\tilde{\mathbf{V}} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 定义如下：

$$\tilde{\mathbf{V}} = (\mathbf{F}_N \mathbf{U}) \odot (\mathbf{F}_N^* \mathbf{U}^*) \quad (24)$$

其中， \mathbf{U} 为调制基。由于 $\tilde{\mathbf{V}}$ 是由酉矩阵 $\mathbf{F}_N \mathbf{U}$ 的逐元素平方构造而成的，因此它是一个具有非负实数元素的双随机矩阵(Bi-stochastic Matrix)，其行和列元素之和均为1^[114]。此外， κ 表示所采用星座 \mathcal{S} 的峰度(kurtosis)，定义如下^[115]：

$$\kappa := \frac{\mathbb{E}\{|s - \mathbb{E}(s)|^4\}}{\mathbb{E}\{|s - \mathbb{E}(s)|^2\}^2} = E(|s|^4), \forall s \in S \quad (25)$$

即星座的归一化四阶矩。最后，由于折叠频谱准则和 $\alpha \leq 1$ 的滚降系数，向量 $\tilde{\mathbf{g}}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 由脉冲的平方频谱决定，其表达式如下：

$$\tilde{\mathbf{g}}_k = \mathbf{g} + (\mathbf{1}_N - \mathbf{g}) e^{-\frac{j2\pi k}{L}} \quad (26)$$

其中， $\mathbf{g} = [g_0, g_1, \dots, g_{N-1}]^T$ 含有平方频谱 $N(\mathbf{F}_{LN} \mathbf{p}) \odot (\mathbf{F}_{LN}^* \mathbf{p}^*) \in \mathbb{C}^{LN \times 1}$ 的前 N 个采样点。值得注意的是，式(23)充分体现了调制基、星座和脉冲整形3个信号处理模块对ACF形态的影响。

式(23)揭示了一种有趣的“海中冰山”结构。其中，“冰山”部分对应于 \bar{R}_k 的平方均值，经严格推导可证明其恰好等于脉冲本身的平方ACF^[113]，即

$$N \left| \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^H \tilde{\mathbf{g}}_k \right|^2 = |\mathbf{p}^H \mathbf{J}_k \mathbf{p}|^2, k = 0, 1, \dots, LN - 1 \quad (27)$$

该“冰山”部分决定了式(23)的整体形态。而“海平面”部分则由 \bar{R}_k 的方差主导，其主要来源于通信符号的随机性。通过对 M 组独立同分布的ISAC信号的MF输出进行相干积累，可将“海平面”有效降低 M 倍。

图5以OFDM信号为例，采用16-QAM星座和 $\alpha = 0.35$ 根升余弦(Root Raised Cosine, RRC)脉冲整形，在过采样因子 $L = 10$ 的设定下，比较了不同 M 取值下的均方ACF。可以观察到，随机OFDM信号的ACF在主瓣区域与脉冲的ACF形态高度一致，对应于“冰山”的“尖端”部分。而在该区域之外，旁瓣部分则由“海平面”主导。随着相干积累次数从 $M = 1$ 增加到100，再到1000，可以明显看到“海平面”分别下降了20 dB和30 dB，使得均方ACF中的“冰山”部分更加显著。

基于上述分析和观察，本文将回顾近年来针对随机ISAC信号的优化方法，包括调制基、星座设计和脉冲整形的改进。这些优化方案旨在提升感知性能的同时保持一定的通信质量，或在感知与通信之间建立可扩展的折衷关系，或在重塑随机ISAC信号ACF的统计特性。

4.2 面向随机信号感知的调制基设计

从式(23)可知，调制基仅通过“海平面”部分的平方范数项 $\|\tilde{\mathbf{V}}^T (\tilde{\mathbf{g}}_k \odot \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^*)\|^2$ 影响旁瓣水平。在给定脉冲整形滤波器和星座的情况下，文献[115]将调制基的设计可表述为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{U} \in \mathbb{U}(N)} (\kappa - 2) \left\| \tilde{\mathbf{V}}^T (\tilde{\mathbf{g}}_k \odot \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^*) \right\|^2 \\ & \text{s.t. } \tilde{\mathbf{V}} = (\mathbf{F}_N \mathbf{U}) \odot (\mathbf{F}_N^* \mathbf{U}^*) \end{aligned} \quad (28)$$

显然，最优调制基的选择取决于 $(\kappa - 2)$ 的正负号，该量也被称为超额峰度(Excess Kurtosis)^[116]。值得注意的是，若星座服从标准复高斯分布，即 $s \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ ，则峰度恰好等于2。在此情况下，无论选择何种调制基，每个时延 k 处的平均旁瓣水平保持不变。其原因正是标准高斯分布在酉变换下不变。受此启发，可以将星座划分为两类：亚高斯

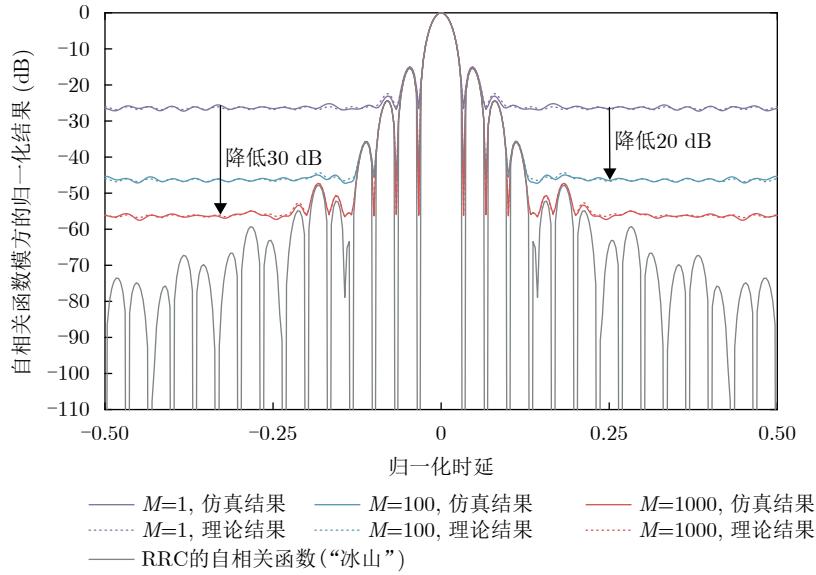


图 5 OFDM信号的均方ACF及其相干积累示意图

Fig. 5 The average squared AFC and corresponding coherent integration versions of an OFDM signal

($\kappa < 2$)和超高斯($\kappa > 2$)。常用星座(如QAM和PSK)通常为亚高斯, 其峰度值总结于表3。另一方面, 超高斯星座在高能效场景或非相干通信中可能具有优势^[117,118], 典型示例包括索引调制和具有指数增长半径的APSK星座。

考虑亚高斯星座下的调制基设计, 优化问题(28)可简化为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{U} \in \mathbb{U}(N)} & \left\| \tilde{\mathbf{V}}^T (\tilde{\mathbf{g}}_k \odot \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^*) \right\|^2 \\ \text{s.t. } & \tilde{\mathbf{V}} = (\mathbf{F}_N \mathbf{U}) \odot (\mathbf{F}_N^* \mathbf{U}^*) \end{aligned} \quad (29)$$

尽管问题(29)在一般情况下是非凸的, 但文献[115]证明了其全局最优解具有以下结构:

$$\mathbf{U}_{\text{sub}}^* = \mathbf{F}_N^H \boldsymbol{\Pi} \text{Diag}(\boldsymbol{\theta}) \quad (30)$$

其中, $\boldsymbol{\Pi}$ 是任意 N 阶置换矩阵, $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为单位模向量。该结果表明, 最优调制方式为OFDM, 且允许对子载波进行置换和相位调整。式(30)的结果揭示了以下重要结论: 对于亚高斯星座, OFDM在所有时延位置均能实现最低的平均测距旁瓣。

针对超高斯星座($\kappa > 2$)下的调制基设计, 优化问题(28)变为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{U} \in \mathbb{U}(N)} & \left\| \tilde{\mathbf{V}}^T (\tilde{\mathbf{g}}_k \odot \tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^*) \right\|^2 \\ \text{s.t. } & \tilde{\mathbf{V}} = (\mathbf{F}_N \mathbf{U}) \odot (\mathbf{F}_N^* \mathbf{U}^*) \end{aligned} \quad (31)$$

文献[115]利用 ℓ_2 范数的Schur凸性, 证明当双随机矩阵 $\tilde{\mathbf{V}}$ 取均匀分布 $\tilde{\mathbf{V}} = (1/N)\mathbf{1}\mathbf{1}^T$ 时, 目标函数达到最小值, 得到最优调制基具有如下结构:

$$\mathbf{U}_{\text{super}}^* = \boldsymbol{\Pi} \text{Diag}(\boldsymbol{\theta}) \quad (32)$$

表 3 典型亚高斯星座的峰度值

Tab. 3 Kurtosis values of typical sub-Gaussian constellations

星座	峰度
PSK	1.0000
16-QAM	1.3200
64-QAM	1.3810
128-QAM	1.3427
256-QAM	1.3953
512-QAM	1.3506
1024-QAM	1.3988
2048-QAM	1.3525

该结果对应于SC调制, 并允许对时域符号进行任意的排列和相位调整。式(32)结果表明: 对于超高斯星座, SC在所有时延位置均能实现最低的平均测距旁瓣。图6展示了一个示例, 用于验证OFDM在亚高斯星座(16-QAM, 峰度 $\kappa = 1.32$)下的最优性。其对比了3种不同的调制基: OFDM, SC以及CDMA2000(其中 \mathbf{U} 采用Hadamard矩阵), 在 $N = 128$ 、过采样比 $L = 10$ 的情况下, 采用 $\alpha = 0.35$ 的RRC脉冲整形滤波器, 并发射 N 个独立同分布符号。如理论分析所预测, 图6显示OFDM在所有时延位置上的旁瓣最低, 相较于SC和CDMA提升了5 dB。此外, 在相干累积 $M = 100$ 组独立MF输出后, 所有信号方案的“海平面”区域旁瓣降低了20 dB。

4.3 面向随机信号感知的星座设计

针对调制基已给定的情况, 基于随机数据的通感一体化信号设计主要关注对感知信号的星座设计

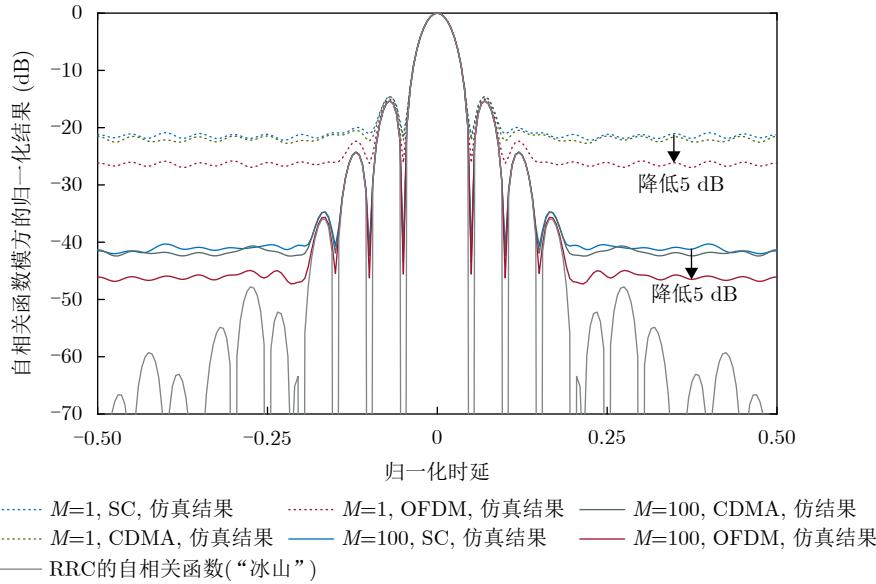


图 6 SC, CDMA 和 OFDM 调制信号的 ACF 及其相干积累示意图

Fig. 6 The average squared ACF and corresponding coherent integration versions of SC, CDMA, and OFDM signals

和优化。这部分工作主要涉及两个方面，一部分工作考虑通过星座的偏移损失部分通信性能，从而获得更高的雷达检测性能或两者的折衷，另一部分工作关注星座整形设计降低ACF旁瓣的影响。

针对传输符号的优化方面，文献[119]针对OFDM调制，通过建立通信互信息和感知互信息两个指标，然后通过优化传输符号，来获取通信和感知两者最大的加权平均互信息。文献[30]在已知通信信道参数的情况下，在满足雷达检测协方差矩阵的要求下，通过对发射的符号进行优化，来最小化接收到的符号和原始数据调制符号的距离；类似地，文献[120]关注通感一体化PAPR的限制，也是针对发射符号进行优化设计，使得通过接收到的符号与原始数据应该调制的符号距离最小；文献[121]则进一步考虑了在通信信道参数存在误差的情况下，如何进行鲁棒的发射符号优化设计问题。在上述设计中，由于优化后的符号与原始调制星座具有一定的偏移，因此调制使用的星座阶数会受到限制，本质上是通过牺牲一定的通信速率来达到雷达感知的设计目标。

在ACF旁瓣抑制方面，文献[122]提出了一种基于稀疏向量编码(Sparse Vector Coding, SVC)的通感一体化信号设计方法，该方法通过将通信信息嵌入到稀疏向量的支持向量中，然后通过扩频码本传输降维后的信号，从而实现对随机信号的旁瓣抑制并提高传输的可靠性。此外，ACF的旁瓣也可以采用星座整形^[123, 124]来降低旁瓣。文献[125]提出了概率星座整形(Probabilistic Constellation Shaping, PCS)方法，其目标是在满足测距旁瓣水

平阈值条件的前提下，最大化通信MI。具体可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{P_s(s)} I(\tilde{y}_c; s) \\ \text{s.t. } & \mathbb{E}(|s|^4) \leq c_0, \mathbb{E}(|s|^2) = 1, \\ & \mathbb{E}(s) = 0, E(s^2) = 0, s \in S \end{aligned} \quad (33)$$

其中， $P_s(s)$ 表示星座的分布， y_c 表示通信接收器处经过匹配滤波后的输出信号。同时，设定常数 $c_0 \geq 1$ 以控制星座的峰度，从而确保平均测距旁瓣保持在可接受范围内。此外， S 表示离散星座点的集合，其必须满足归一化功率和旋转对称性约束，如式(3)中所述。

问题(33)本质上是一个泛函优化问题，因为待优化变量 $P_s(s)$ 定义在集合 S 上，是一个函数。然而，由于 S 为离散集合，目标函数中的MI并不存在封闭表达式。为了解决这一问题，文献[125]提出了一种基于Blahut-Arimoto算法的PCS方法，适用于OFDM调制下的 M_s -阶QAM星座。在这种情况下，多径通信信道被对角化为 N 个平行的正交AWGN信道，从而可以考虑每个单标量AWGN信道的MI，记作 $I(y_c; s)$ ，于是可以通过显示的表达进行进一步的求解。以下通过一个实例对PCS方法在ISAC系统中的有效性进行了说明。图7(a)展示了在不同峰度阈值 c_0 下，16-QAM与64-QAM星座的最优PCS结果，其中每个星座点的传输概率通过颜色深度进行表示。结果表明，随着峰度阈值的降低，单位模长符号的传输概率显著增加，而位于较大或较小幅值圆上的符号传输概率则相应降低。这一现象与理论预测一致，即感知任务更倾向于采用恒模星

座。然而, 这种策略会不可避免地降低通信互信息, 从而在通信速率上引入了折衷。另外, 降低ACF旁瓣水平可显著提升距离域内对弱目标的检测性能, 因为强杂波旁瓣可能对弱目标的主瓣造成严重干扰甚至完全掩盖。因此, 图7(b)展示了在不同传输SNR条件下, 基于OFDM调制的64-QAM星座所实现的通感能力, 反映了在强杂波环境中可达的通信速率以及探测弱目标的概率。通过调节参数 c_0 , PCS方法在感知与通信性能指标之间实现了灵活的折衷, 明显优于采用标准均匀分布的64-QAM与64-PSK星座之间简单时间共享策略的方案。上述概率整形方法对旁瓣抑制的有效性还在文献[126]中通过实验进行了验证。

4.4 面向随机信号感知的脉冲整形设计

针对脉冲整形设计, 仔细分析式(23)可知, $\mathbb{E}(|\bar{R}_k|^2)$ 是 $\tilde{\mathbf{g}}_k$ 的凸二次函数, 从而在脉冲的平方谱(即向量 \mathbf{g})上也保持凸性。基于这一性质, 可以在 \mathbf{g} 的可行集上, 通过最小化区域 \mathcal{K}_{SL} 内的旁瓣水平来实现脉冲整形的优化设计。首先讨论向量 \mathbf{g} 的约束条件。式(26)中隐式满足的折叠谱准则(5)确保了脉冲的奈奎斯特特性, 从而有效消除了ISI, 保证了通信性能不受影响。此外, 脉冲具有滚降因子 $\alpha \in [0, 1]$, 这意味着向量 \mathbf{g} 中有 $(1 - \alpha)N$ 个元素的取值为0或1。令 $N_\alpha = \alpha N$, 并假设 $N - N_\alpha$ 为偶数, 则上述约束可表述为

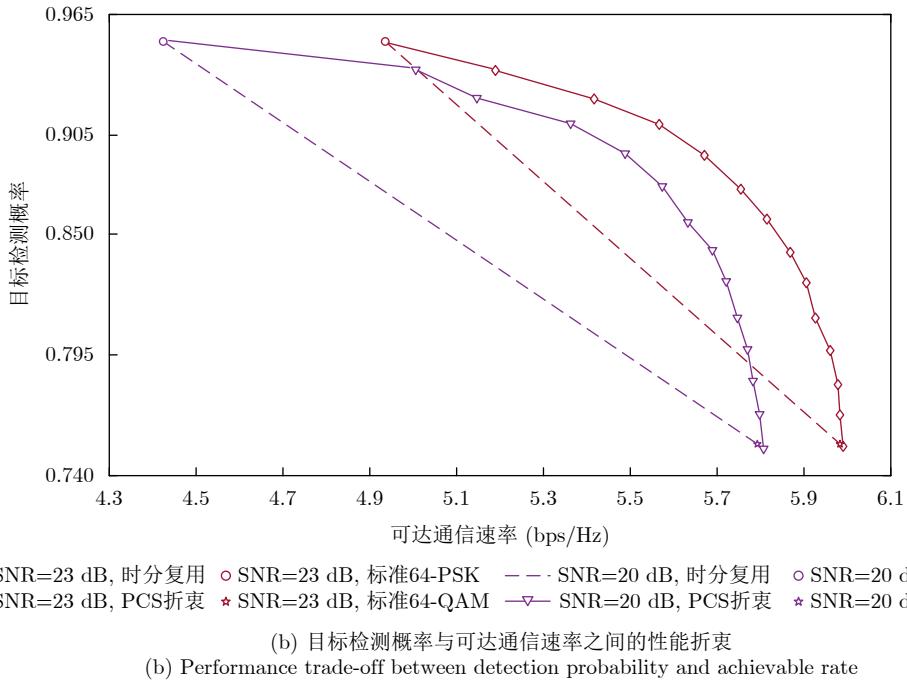
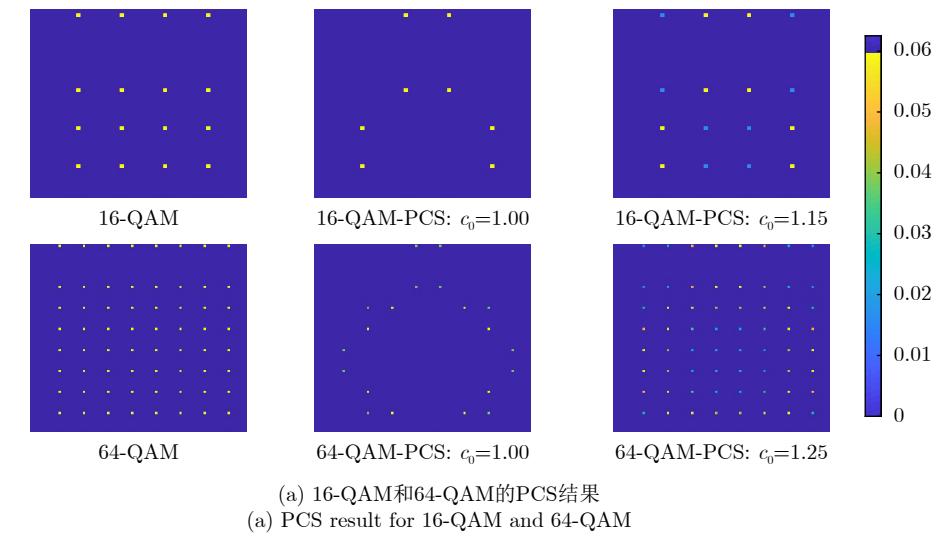


图 7 PCS技术在随机ISAC信号设计中的应用实例

Fig. 7 An illustrative example of the PCS technique for random ISAC signals

$$g_n = \begin{cases} 0, & 0 \leq n \leq \frac{N - N_\alpha}{2} - 1 \\ 1, & \frac{N + N_\alpha}{2} \leq n \leq N - 1 \end{cases} \quad (34)$$

为了确保滚降部分是单调递增的，可施加以下约束：

$$g_{n+1} - g_n \geq 0, \frac{N - N_\alpha}{2} \leq n \leq \frac{N + N_\alpha}{2} - 2 \quad (35)$$

最后，脉冲的功率已被归一化，得到约束：

$$\sum_{n=0}^{N-1} g_n = \frac{N}{2} \quad (36)$$

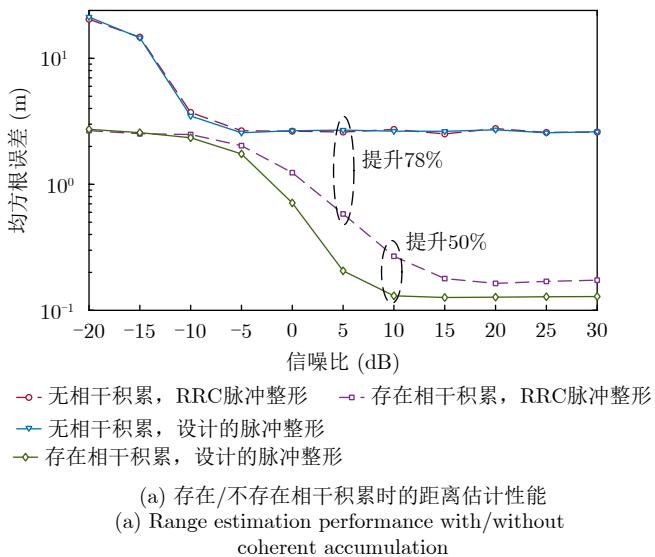
因此，文献[127]将通用脉冲整形问题表述为

$$\begin{aligned} & \min_{0 \leq \mathbf{g} \leq 1} \mathbb{E}(|\bar{R}_k|^2), \forall k \in \mathcal{K}_{SL} \\ & \text{s.t. Eqs. (34) - (36)} \end{aligned} \quad (37)$$

这是一个线性约束的凸Pareto问题。

为了进一步简化问题，注意到当相干积累数 M 足够大时， $\mathbb{E}(|\bar{R}_k|^2)$ 的几何形状主要由“冰山”部分决定。基于这一观察，可以专注于整形“冰山”部分，即脉冲整形滤波器本身的平方ACF，而不是同时最小化“冰山”和“海平面”两部分的旁瓣。为此，可通过最小化区域 \mathcal{K}_{SL} 内的旁瓣之和，或者该区域内的最大旁瓣，从而得到以下优化问题：

$$\begin{aligned} & \min_{0 \leq \mathbf{g} \leq 1} \sum_{k \in \mathcal{K}_{SL}} |\tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^H \tilde{\mathbf{g}}_k|^2 \text{ or } \max_k |\tilde{\mathbf{f}}_{k+1}^H \tilde{\mathbf{g}}_k|^2 \\ & \text{s.t. Eqs. (34) - (36)} \end{aligned} \quad (38)$$

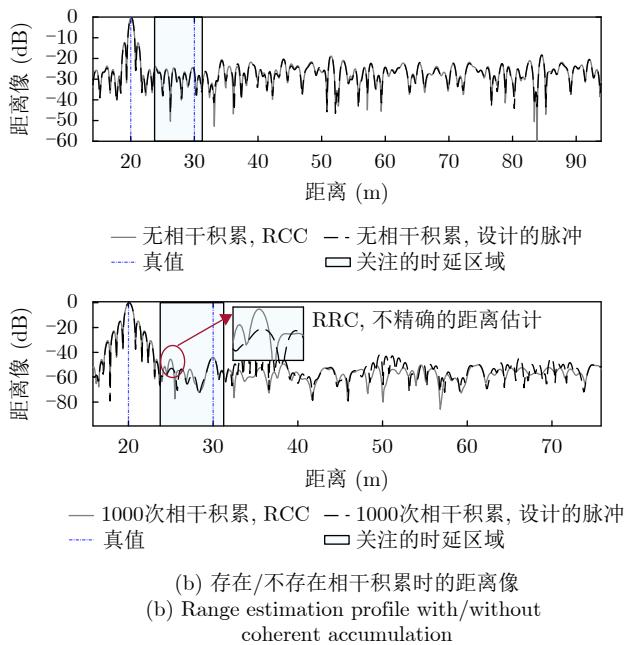


(a) 存在/不存在相干积累时的距离估计性能

(a) Range estimation performance with/without coherent accumulation

这是一个线性约束的凸二次程序，可以通过现成的数值工具高效求解。

图8展示了带有相干积累的ISAC脉冲整形滤波器设计示例。该示例应用了式(38)中的冰山整形技术，以最小化区域[23.74 m, 31.24 m]内的测距旁瓣之和。ISAC信号采用OFDM调制，承载 $N = 128$ 个独立同分布的16-QAM符号，超采样比率为 $L = 10$ 。为了展示通过减少“冰山”部分旁瓣所获得的性能改进，考虑一个双目标检测场景：一个目标位于20 m，另一个位于30 m。其中，20 m处目标的幅度比30 m处目标高43~46 dB。基准方法是RRC脉冲整形。为公平起见，RRC和冰山整形技术设置相同的滚降因子0.35。图8(a)显示了在存在/不存在相干积累的情况下，测距均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)曲线。可以观察到，在不进行相干积累时，RRC和冰山整形技术的测距性能都较差。然而，在对 $M = 1000$ 个独立同分布的匹配滤波输出信号进行相干积累后，测距RMSE减少了超过78%。此外，与RRC方法相比，冰山整形技术在测距精度上实现了额外50%的提升。这种性能改进在图8(b)中显示的相应距离像中也得到了清晰的体现。在没有相干积累时，弱目标被“海平面”产生的旁瓣所遮掩，导致测距估计误差较大。经过1000次相干积累后，“海平面”旁瓣有效降低30 dB，此时测距性能主要由脉冲本身产生的旁瓣决定。在这种情况下，ISAC信号方案能够准确检测到弱目标的峰值，这得益于在感兴趣区域内对旁瓣的优化。然



(b) 存在/不存在相干积累时的距离像

(b) Range estimation profile with/without coherent accumulation

图 8 OFDM调制下使用16-QAM星座的两目标距离估计性能和距离像

Fig. 8 The range estimation performance and profiles of two targets under OFDM with 16-QAM constellation

而, 对于RRC脉冲整形, 由于24.5 m处的高旁瓣, 弱目标可能被错误地定位。

5 研究挑战和未来展望

本文考虑以通信为中心的通感一体信号设计, 对基于导频的感知信号设计进行了较为全面的综述, 并对基于数据进行感知的信号设计方法进行了梳理。本节在此基础上对未来通感一体化信号设计的一些挑战以及研究方向进行展望。

(1) 新通信波形下的通感一体化信号设计: 现有典型通信系统如WiFi和5G系统主要都是基于OFDM波形。OFDM波形利用子载波之间的正交性, 可有效对抗多径效应, 提升通信的频谱利用效率。然而, OFDM波形用于感知时, 还存在多方面的挑战, 例如本文中已经讨论的子载波数量过多造成高PAPR会限制雷达的发射功率、远距离感知受到码间串扰等影响。此外, 针对高速移动目标, 由于目标回波信号携带较大的多普勒, 会破坏OFDM信号子载波的正交性, 从而严重影响感知的性能。为此, 面向未来一些高移动性等场景, 一些新的潜在波形(如OTFS、AFDM)被提出来增强感知性能。OTFS调制由于其工作在时延-多普勒域, 可直接对应雷达目标的参数, 被视为ISAC应用的潜在候选波形^[128,129]。在最近的研究中, AFDM调制作为新型通信波形进入ISAC的视野, 它可以在高移动性场景中同时提升感知与通信性能^[39,130]。因此, 针对OTFS和AFDM等新波形的通感一体化信号设计的探索, 无论基于导频还是基于数据的设计, 都是未来值得深入研究的方向。

(2) 基于数据进行感知的二维模糊函数表征: 当前的研究主要利用ACF来分析以通信为中心的ISAC信号在时延维度的感知性能。然而, ACF表示模糊函数(Ambiguity Function, AF)的零多普勒切片(Zero-Doppler Slice)^[131], 仅能刻画静态或准静态条件下的多目标测距性能。未来的6G网络预计将支持为众多移动目标和用户提供的感知与通信服务。因此, 时延-多普勒二维AF将是评估随机ISAC信号感知性能的更为适宜的度量。然而, 考虑到二维AF是时间-频率域中随机ISAC信号的二维自相关, 其在随机信号体制下的统计特性分析将变得非常复杂。此外, 如何基于二维的结果进行进一步的信号设计和优化, 也是未来亟待解决的研究问题。

(3) 基于随机信号的自适应调制: 以牺牲通信速率代价, 感知更倾向于具有较低功率变化性甚至恒模信号。这些信号通常具有更高的功率效率,

能够提供更高的SNR, 并提供了利用无线干扰的机会^[132]。这为通过自适应调制(Adaptive Modulation, AM)方案^[133,134]和建设性干扰(Constructive Interference, CI)利用^[135]来恢复部分速率损失提供了潜在机会。一方面, 这将使得感知与通信的折衷从上述方式转移到更有利的通信性能的方向, 从而在以通信为中心的ISAC场景中更好地保证通信服务质量(Quality of Service, QoS)。另一方面, 需要开发新的AM方法, 并基于前述星座整形框架来进行符号级预编码设计。

(4) 导频与随机数据相结合的信号设计: 本文分别探讨了基于导频和基于数据进行感知的信号设计。在实际应用中, 还可以将导频和数据联合起来进行信号的设计。对于通信而言, 导频即资源的开销, 因此应该最小化导频的使用, 而将数据信号补充用来进行感知, 有望大幅降低导频的开销。然后, 将导频与数据联合起来用于感知, 还面临多方面的挑战。对于单站感知而言, 导频信号和数据信号均可视为已知, 但导频信号是确定性信号而数据信号是随机信号。如何通过数学模型来刻画两者对于感知性能的影响是首先需要解决的挑战。基于推导的模型, 如何进行两者的优化设计是进一步需要解决的挑战。对于双站感知而言, 导频信号已知而数据信号未知。一种潜在的方法是先解码数据信号, 然后将数据信号与导频信号相结合进行感知。然而上述思路还需要解决两方面的挑战, 其一是解码数据总是带有一定的误码率, 如何克服错误的解码数据对感知性能的影响; 其二是上述方法必然会大幅增加系统的复杂度, 并带来较大的时延, 如何设计低复杂度高性能的处理算法也是解决问题的关键。

(5) 网络ISAC信号设计: 在本报告考虑的点对点ISAC场景基础上, 网络化ISAC是一种在大范围内实现无缝感知和通信的变革性方法^[136-138], 在低空经济和智能交通系统等应用中尤其具有前景^[139]。与传统的独立单站和双站系统不同, 网络ISAC面临着独特的挑战。首先是多站点之间的同步问题, 实现高精度同步是实现高可靠感知的前提。目前已有不少工作对此展开了研究和实验验证^[140,141]。然而, 当网络中存在多个站点需要保持严格同步时, 如何设计相应的同步信号以及处理算法是亟需在未来研究中解决的重要挑战。其次是在多站点协同的干扰管理方面的挑战。来自分布式节点的同时传输可能会显著降低网络中的感知与通信的性能, 而通信信号的固有随机性进一步复杂化了干扰的分析和管理。为了解决这一挑战, 需要对基站同步、适应性基站聚类与调度、协作预编码以及网络级联合资

源分配进行全面研究，其中信号的设计将会是其中的一个重要研究课题。

(6) 预编码与通感信号的联合设计：本文重点讨论了通感一体化信号本身的设计，在多天线系统或者考虑MIMO信道，在发射端还涉及预编码或波束赋形的研究。针对通感一体化的波束赋形研究，目前已有比较广泛的研究。通过对预编码或波束赋形的优化，可以最大化通信信号或者雷达信号的信干噪比^[142,143]。为了充分探索通感一体化在信号设计方面的自由度，考虑将预编码与通感信号的联合设计是一种重要的实现方式。此外，在考虑MIMO系统后，特别是与大规模MIMO系统相结合的ISAC系统^[144]，信道的估计和目标的复杂度会大幅增加^[145,146]，因此相关的低复杂度算法设计也将是未来的研究重点。

6 结语

通信感知一体化能够实现收发机的软硬件复用以及频谱复用，可有效地提高资源利用效率，被视为6G网络的关键使能技术之一。考虑将感知功能集成到广泛布置的通信基础设施中，以通信为中心的信号设计将会是实现通感一体化需要解决的关键技术问题。本文考虑了以通信为中心信号设计的两种主要技术路线，即基于导频的感知和基于数据的感知，对其研究现状分别进行了深入而全面的阐述，并对未来的一些研究挑战和方向进行了展望。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

- [1] SAAD W, BENNIS M, and CHEN Mingzhe. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems[J]. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 134–142. doi: [10.1109/MNET.001.1900287](https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287).
- [2] PAULRAJ A J and KAILATH T. Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission/directional reception (DTDR)[P]. US, 5345599, 1994.
- [3] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. MIMO radar: An idea whose time has come[C]. 2004 IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2004: 71–78. doi: [10.1109/NRC.2004.1316398](https://doi.org/10.1109/NRC.2004.1316398).
- [4] HUGHES P K and CHOE J Y. Overview of advanced multifunction RF system (AMRFS)[C]. 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, Dana Point, USA, 2000: 21–24. doi: [10.1109/PAST.2000.858893](https://doi.org/10.1109/PAST.2000.858893).
- [5] ROBERTON M and BROWN E R. Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Philadelphia, USA, 2003: 611–614. doi: [10.1109/MWSYM.2003.1211013](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2003.1211013).
- [6] STURM C and WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236–1259. doi: [10.1109/JPROC.2011.2131110](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2131110).
- [7] LIU Fan, CUI Yuanhao, MASOUROS C, et al. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728–1767. doi: [10.1109/JSAC.2022.3156632](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156632).
- [8] 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. doi: [10.12000/JR20113](https://doi.org/10.12000/JR20113).
- [9] LIU Fan, YUAN Weijie, YUAN Jinhong, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: Overview and prospect[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 467–484. doi: [10.12000/JR20113](https://doi.org/10.12000/JR20113).
- [10] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[R]. ITU-R M.2160-0, 2023.
- [11] 3GPP. Study on integrated sensing and communication[R]. TR 22.837, 2024.
- [12] XIONG Yifeng, LIU Fan, CUI Yuanhao, et al. On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2023, 69(9): 5723–5751. doi: [10.1109/TIT.2023.3284449](https://doi.org/10.1109/TIT.2023.3284449).
- [13] XIONG Yifeng, LIU Fan, WAN Kai, et al. From torch to projector: Fundamental tradeoff of integrated sensing and communications[J]. *IEEE BITS the Information Theory Magazine*, 2024, 4(1): 73–90. doi: [10.1109/MBITS.2024.3376638](https://doi.org/10.1109/MBITS.2024.3376638).
- [14] ZHANG Zhengyu, HE Ruisi, AI Bo, et al. A general channel model for integrated sensing and communication scenarios[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 68–74. doi: [10.1109/MCOM.001.2200420](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200420).
- [15] LUO Chenhao, TANG Aimin, GAO Fei, et al. Channel modeling framework for both communications and bistatic sensing under 3GPP standard[J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Sensors*, 2024, 1: 166–176. doi: [10.1109/JSAS.2024.3451411](https://doi.org/10.1109/JSAS.2024.3451411).
- [16] QI Chenhao, CI Wei, ZHANG Jinming, et al. Hybrid beamforming for millimeter wave MIMO integrated sensing

- and communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(5): 1136–1140. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3157751](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3157751).
- [16] WANG Xinyi, FEI Zesong, ZHANG J A, et al. Partially-connected hybrid beamforming design for integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(10): 6648–6660. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3202215](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3202215).
- [17] ZHAO Qimin, TANG Aimin, WANG Xudong, et al. Joint transmit and receive beamforming for integrated bistatic radar sensing and MU-MIMO communications[C]. The 98th Vehicular Technology Conference, Hong Kong, China, 2023: 1–6. doi: [10.1109/VTC2023-Fall60731.2023.10333698](https://doi.org/10.1109/VTC2023-Fall60731.2023.10333698).
- [18] TANG Aimin, WANG Xudong, and ZHANG J A. Interference management for full-duplex ISAC in B5G/6G networks: Architectures, challenges, and solutions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(9): 20–26. doi: [10.1109/MCOM.001.2300654](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300654).
- [19] LI Songqian, LUO Chenhao, TANG Aimin, et al. Integrating passive bistatic sensing into mmWave B5G/6G networks: Design and experiment measurement[C]. IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023: 2952–2957. doi: [10.1109/ICC45041.2023.10279065](https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279065).
- [20] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Dual-function radar-communications: Information embedding using sidelobe control and waveform diversity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(8): 2168–2181. doi: [10.1109/TSP.2015.2505667](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2505667).
- [21] TEMIZ M, HORNE C, PETERS N J, et al. An experimental study of radar-centric transmission for integrated sensing and communications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(7): 3203–3216. doi: [10.1109/TMTT.2023.3234309](https://doi.org/10.1109/TMTT.2023.3234309).
- [22] MA Dingyou, SHLEZINGER N, HUANG Tianyao, et al. FRaC: FMCW-based joint radar-communications system via index modulation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(6): 1348–1364. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3118219](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3118219).
- [23] HUANG Tianyao, SHLEZINGER N, XU Xingyu, et al. MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3423–3438. doi: [10.1109/TSP.2020.2994394](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2994394).
- [24] ZHENG Le, LOPS M, ELDAR Y C, et al. Radar and communication coexistence: An overview: A review of recent methods[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(5): 85–99. doi: [10.1109/MSP.2019.2907329](https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2907329).
- [25] 余显祥, 姚雪, 杨婧, 等. 面向感知应用的通感一体化信号设计技术与综述[J]. 雷达学报, 2023, 12(2): 247–261. doi: [10.12000/JR23015](https://doi.org/10.12000/JR23015).
- [26] YU Xianxiang, YAO Xue, YANG Jing, et al. Radar-centric DFRC signal design: Overview and future research avenues[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(2): 247–261. doi: [10.12000/JR23015](https://doi.org/10.12000/JR23015).
- [27] JAMIL M, ZEPERNICK H J, and PETTERSSON M I. On integrated radar and communication systems using Oppermann sequences[C]. 2008 IEEE Military Communications Conference, San Diego, USA, 2008: 1–6. doi: [10.1109/MILCOM.2008.4753277](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2008.4753277).
- [28] WU Kai, ZHANG J A, HUANG Xiaojing, et al. Integrating low-complexity and flexible sensing into communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1873–1889. doi: [10.1109/JSAC.2022.3156649](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156649).
- [29] MA Dingyou, SHLEZINGER N, HUANG Tianyao, et al. Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2020, 37(4): 85–97. doi: [10.1109/MSP.2020.2983832](https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2983832).
- [30] MA Dingyou, SHLEZINGER N, HUANG Tianyao, et al. Spatial modulation for joint radar-communications systems: Design, analysis, and hardware prototype[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2283–2298. doi: [10.1109/TVT.2021.3056408](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3056408).
- [31] LIU Fan, ZHOU Longfei, MASOUROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(16): 4264–4279. doi: [10.1109/TSP.2018.2847648](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2847648).
- [32] LIU Fan, LIU Yafeng, LI Ang, et al. Cramér-Rao bound optimization for joint radar-communication beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 240–253. doi: [10.1109/TSP.2021.3135692](https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3135692).
- [33] HUA Haocheng, HAN Tongxiao, and XU Jie. MIMO integrated sensing and communication: CRB-rate tradeoff[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(4): 2839–2854. doi: [10.1109/TWC.2023.3303326](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3303326).
- [34] 马丁友, 刘祥, 黄天耀, 等. 雷达通信一体化: 共用波形设计和性能边界[J]. 雷达学报, 2022, 11(2): 198–212. doi: [10.12000/JR21146](https://doi.org/10.12000/JR21146).
- MA Dingyou, LIU Xiang, HUANG Tianyao, et al. Joint radar and communications: Shared waveform designs and performance bounds[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(2): 198–212. doi: [10.12000/JR21146](https://doi.org/10.12000/JR21146).

- [35] BARNETO C B, LIYANAARACHCHI S D, HEINO M, *et al.* Full duplex radio/radar technology: The enabler for advanced joint communication and sensing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(1): 82–88. doi: [10.1109/MWC.001.2000220](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000220).
- [36] PROAKIS J G and SALEHI M. Digital Communications[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [37] ZHANG Yumeng, ADITYA S, and CLERCKX B. Input distribution optimization in OFDM dual-function radar-communication systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 5258–5273. doi: [10.1109/TSP.2024.3491899](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3491899).
- [38] DERRYBERRY R T, GRAY S D, IONESCU D M, *et al.* Transmit diversity in 3G CDMA systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(4): 68–75. doi: [10.1109/35.995853](https://doi.org/10.1109/35.995853).
- [39] BEMANI Ali, KSAIRI N, and KOUNTOURIS M. Affine frequency division multiplexing for next generation wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8214–8229. doi: [10.1109/TWC.2023.3260906](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3260906).
- [40] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, *et al.* Orthogonal time frequency space modulation[C]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925924](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925924).
- [41] COHEN D and ELDAR Y C. Sub-nyquist radar systems: Temporal, spectral, and spatial compression[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(6): 35–58. doi: [10.1109/MSP.2018.2868137](https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2868137).
- [42] BRAUN M, STURM C, and JONDRAL F K. Maximum likelihood speed and distance estimation for OFDM radar[C]. 2010 IEEE Radar Conference, Arlington, USA, 2010: 256–261. doi: [10.1109/RADAR.2010.5494616](https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494616).
- [43] REICHARDT L, STURM C, GRÜNHAUPT F, *et al.* Demonstrating the use of the IEEE 802.11P Car-to-Car communication standard for automotive radar[C]. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation, Prague, Czech Republic, 2012: 1576–1580. doi: [10.1109/EuCAP.2012.6206084](https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206084).
- [44] USMAN MAZHER K, SHIMIZU T, HEATH R W, *et al.* Automotive radar using IEEE 802.11p signals[C]. 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Barcelona, Spain, 2018: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2018.8377043](https://doi.org/10.1109/WCNC.2018.8377043).
- [45] KIHEI B, COPELAND J A, and CHANG Yusun. Design considerations for vehicle-to-vehicle IEEE 802.11p radar in collision avoidance[C]. 2015 IEEE Global Communications Conference, San Diego, USA, 2015: 1–7. doi: [10.1109/GLOCOM.2015.7417441](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417441).
- [46] KUMARI P, GONZALEZ-PRELCIC N, and HEATH R W. Investigating the IEEE 802.11ad standard for millimeter wave automotive radar[C]. 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, Boston, USA, 2015: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2015.7390996](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2015.7390996).
- [47] KUMARI P, CHOI J, GONZÁLEZ-PRELCIC N, *et al.* IEEE 802.11ad-based radar: An approach to joint vehicular communication-radar system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(4): 3012–3027. doi: [10.1109/TVT.2017.2774762](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2774762).
- [48] KUMARI P, ELTAYEB M E, and HEATH R W. Sparsity-aware adaptive beamforming design for IEEE 802.11ad-based joint communication-radar[C]. 2018 IEEE Radar Conference, Oklahoma City, USA, 2018: 923–928. doi: [10.1109/RADAR.2018.8378684](https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8378684).
- [49] MUNS G R, MISHRA K V, GUERRA C B, *et al.* Beam alignment and tracking for autonomous vehicular communication using IEEE 802.11ad-based radar[C]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops, Paris, France, 2019: 535–540. doi: [10.1109/INFCOMW.2019.8845121](https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2019.8845121).
- [50] LIU Linglin, JU Honghao, FANG Xuming, *et al.* Systematic design of radar detection under IEEE 802.11ad framework[C]. 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference, Norman, USA, 2021: 1–5. doi: [10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625293](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625293).
- [51] GROSSI E, LOPS M, VENTURINO L, *et al.* Opportunistic automotive radar using the IEEE 802.11ad standard[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1196–1200. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944386](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944386).
- [52] GROSSI E, LOPS M, VENTURINO L, *et al.* Opportunistic radar in IEEE 802.11ad networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(9): 2441–2454. doi: [10.1109/TSP.2018.2813300](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2813300).
- [53] GROSSI E, LOPS M, and VENTURINO L. Adaptive detection and localization exploiting the IEEE 802.11ad standard[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(7): 4394–4407. doi: [10.1109/TWC.2020.2983032](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2983032).
- [54] EVERSON A and JACKSON J A. Analysis of an LTE waveform for radar applications[C]. 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 0200–0205. doi: [10.1109/RADAR.2014.6875584](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.6875584).
- [55] EVERSON A and JACKSON J A. Cross-ambiguity characterization of communication waveform features for passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 3440–3455. doi: [10.1109/TAES.2015.140622](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140622).
- [56] DAN Yangpeng, WAN Xianrong, YI Jianxin, *et al.* Ambiguity function analysis of Long Term Evolution

- transmission for passive radar[C]. 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Hangzhou, China, 2018: 1–4. doi: [10.1109/ISAPE.2018.8634255](https://doi.org/10.1109/ISAPE.2018.8634255).
- [57] BLÁZQUEZ-GARCÍA R, CASAMAYÓN-ANTÓN J, and BURGOS-GARCÍA M. LTE-R based passive multistatic radar for high-speed railway network surveillance[C]. 2018 15th European Radar Conference, Madrid, Spain, 2018: 6–9. doi: [10.23919/EuRAD.2018.8546516](https://doi.org/10.23919/EuRAD.2018.8546516).
- [58] LIU Yan, DAN Yangpeng, WAN Xianrong, et al. Investigations on 5G-based passive sensing for IoT applications[C]. 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications, Chengdu, China, 2022: 823–828. doi: [10.1109/ICCC56324.2022.10065876](https://doi.org/10.1109/ICCC56324.2022.10065876).
- [59] CUI Yuanhao, JING Xiaojun, and MU Junsheng. Integrated sensing and communications via 5G NR waveform: Performance analysis[C]. 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Singapore, Singapore, 2022: 8747–8751. doi: [10.1109/ICASSP43922.2022.9746355](https://doi.org/10.1109/ICASSP43922.2022.9746355).
- [60] SAMCZYŃSKI P, ABRATKIEWICZ K, PŁOTKA M, et al. 5G network-based passive radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5108209. doi: [10.1109/TGRS.2021.3137904](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3137904).
- [61] KSIEŻYK A, PŁOTKA M, ABRATKIEWICZ K, et al. Opportunities and limitations in radar sensing based on 5G broadband cellular networks[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2023, 38(9): 4–21. doi: [10.1109/MAES.2023.3267061](https://doi.org/10.1109/MAES.2023.3267061).
- [62] LI Hang, XIANG Yang, GUO Qinghua, et al. An efficient direct downlink sensing method using 5G NR SSB signals in perceptive mobile networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(11): 15360–15369. doi: [10.1109/JIOT.2025.3527234](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3527234).
- [63] ABRATKIEWICZ K, KSIEŻYK A, PŁOTKA M, et al. SSB-based signal processing for passive radar using a 5G network[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3469–3484. doi: [10.1109/JSTARS.2023.3262291](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3262291).
- [64] GOLZADEH M, THIROLA E, ANTILA L, et al. Downlink sensing in 5G-advanced and 6G: SIB1-assisted SSB approach[C]. 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference, Florence, Italy, 2023: 1–7. doi: [10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200933](https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200933).
- [65] RAHMAN L, CUI Pengfei, ZHANG J A, et al. Joint communication and radar sensing in 5G mobile network by compressive sensing[C]. 2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2019: 599–604. doi: [10.1109/ISCIT.2019.8905229](https://doi.org/10.1109/ISCIT.2019.8905229).
- [66] KANHERE O, GOYAL S, BELURI M, et al. Target localization using bistatic and multistatic radar with 5G NR waveform[C]. 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference, Helsinki, Finland, 2021: 1–7. doi: [10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9449071](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9449071).
- [67] WEI Zhiqing, WANG Yuan, MA Liang, et al. 5G PRS-based sensing: A sensing reference signal approach for joint sensing and communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 3250–3263. doi: [10.1109/TVT.2022.3215159](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3215159).
- [68] ÖZBAY E, BISHOYI P K, and PETROVA M. Empowering 5G PRS-based ISAC with compressed sensing[C]. 2024 IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Lucca, Italy, 2024: 341–345. doi: [10.1109/SPAWC60668.2024.10694602](https://doi.org/10.1109/SPAWC60668.2024.10694602).
- [69] GOLZADEH M, THIROLA E, TALVITIE J, et al. Joint sensing and UE positioning in 5G-6G: PRS range estimation with suppressed ambiguity[C]. 2024 IEEE Radar Conference, Denver, USA, 2024: 1–6. doi: [10.1109/RadarConf2458775.2024.10548650](https://doi.org/10.1109/RadarConf2458775.2024.10548650).
- [70] NATARAJA N K, SHARMA S, ALI K, et al. Bistatic vehicular radar with 5G-NR signals[C]. 2023 IEEE Global Communications Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023: 5605–5610. doi: [10.1109/GLOBECOM54140.2023.10436863](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM54140.2023.10436863).
- [71] MA Liang, PAN Chengkang, WANG Qixing, et al. A downlink pilot based signal processing method for integrated sensing and communication towards 6G[C]. 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference, Helsinki, Finland, 2022: 1–5. doi: [10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860693](https://doi.org/10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860693).
- [72] WEI Zhiqing, LI Fengyun, LIU Haotian, et al. Multiple reference signals collaborative sensing for integrated sensing and communication system towards 5G-A and 6G[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(10): 15185–15199. doi: [10.1109/TVT.2024.3410352](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3410352).
- [73] KHOSROSHAHI K, SEHIER P, and MEKKI S. Leveraging PRS and PDSCH for integrated sensing and communication systems[C]. 2024 IEEE Global Communications Conference, Cape Town, South Africa, 2024: 4702–4707. doi: [10.1109/GLOBECOM52923.2024.10901798](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM52923.2024.10901798).
- [74] KHOSROSHAHI K, SEHIER P, and MEKKI S. Doppler ambiguity elimination using 5G signals in integrated sensing and communication[C]. 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference, Washington, USA, 2024: 1–6. doi: [10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757748](https://doi.org/10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757748).
- [75] DUGGAL G, VISHWAKARMA S, MISHRA K V, et al. Doppler-resilient 802.11ad-based ultrashort range

- automotive joint radar-communications system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(5): 4035–4048. doi: [10.1109/TAES.2020.2990393](https://doi.org/10.1109/TAES.2020.2990393).
- [76] YE Zhifan, ZHOU Zhengchun, FAN Pingzhi, et al. Low ambiguity zone: Theoretical bounds and Doppler-resilient sequence design in integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1809–1822. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155510](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155510).
- [77] WANG Diao, CHEN Weiwei, HE Yinghui, et al. Experimental study on ISAC performance with different sensing sequences[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(11): 2538–2542. doi: [10.1109/LCOMM.2024.3455779](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2024.3455779).
- [78] WEI Zhiqing, QU Hanyang, JIANG Wangjun, et al. Iterative signal processing for integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(1): 401–412. doi: [10.1109/TGCN.2023.3234825](https://doi.org/10.1109/TGCN.2023.3234825).
- [79] KUMARI P, VOROBYOV S A, and HEATH R W. Adaptive virtual waveform design for millimeter-wave joint communication-radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 715–730. doi: [10.1109/TSP.2019.2956689](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2956689).
- [80] TANG Aimin, LI Songqian, and WANG Xudong. Self-interference-resistant IEEE 802.11ad-based joint communication and automotive radar design[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(6): 1484–1499. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3118888](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3118888).
- [81] ZHAO Qimin, TANG Aimin, and WANG Xudong. Reference signal design and power optimization for energy-efficient 5G V2X integrated sensing and communications[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(1): 379–392. doi: [10.1109/TGCN.2023.3234392](https://doi.org/10.1109/TGCN.2023.3234392).
- [82] ZHANG Rui, TSAI S, CHOU T H, et al. Staggered comb reference signal design for integrated communication and sensing[C]. 2024 IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Valencia, Spain, 2024: 1–7. doi: [10.1109/PIMRC59610.2024.10817393](https://doi.org/10.1109/PIMRC59610.2024.10817393).
- [83] ZHANG Rui, TSAI S, CHOU T H, et al. OFDM reference signal pattern design criteria for integrated communication and sensing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(6): 7389–7404. doi: [10.1109/JIOT.2024.3495562](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3495562).
- [84] MEI Dongyang, WEI Zhiqing, CHEN Xu, et al. A coprime and periodic pilot design for ISAC system[C]. 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Dubai, United Arab Emirates, 2024: 1–6. doi: [10.1109/WCNC57260.2024.10571182](https://doi.org/10.1109/WCNC57260.2024.10571182).
- [85] LIU Wenjia, HOU Xiaolin, LIU Juan, et al. Low-overhead sensing RS design for integrated sensing and communication (ISAC)[C]. 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Milan, Italy, 2025: 1–6. doi: [10.1109/WCNC61545.2025.10978510](https://doi.org/10.1109/WCNC61545.2025.10978510).
- [86] 唐爱民, 王书涵, 曲文泽. 面向远距离高速无人机检测的OFDM通信感知一体化参考信号设计[J]. 雷达学报(中英文), 2025, 14(4): 842–853. doi: [10.12000/JR24240](https://doi.org/10.12000/JR24240).
- TANG Aimin, WANG Shuhan, and QU Wenze. Reference signal design in OFDM ISAC for long-range and high-speed UAV detection[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(4): 842–853. doi: [10.12000/JR24240](https://doi.org/10.12000/JR24240).
- [87] TANG Aimin and WANG Xudong. Self-interference-resistant IEEE 802.11ad-based joint communication and automotive long range radar[C]. 2020 IEEE Global Communications Conference, Taipei, China, 2020: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348201](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9348201).
- [88] WANG Lin, WEI Zhiqing, SU Liyan, et al. Coherent compensation based ISAC signal processing for long-range sensing: (Invited Paper)[C]. The 21st International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, Singapore, Singapore, 2023: 689–695. doi: [10.23919/WiOpt58741.2023.10349853](https://doi.org/10.23919/WiOpt58741.2023.10349853).
- [89] TANG Aimin, ZHAO Qimin, WANG Xudong, et al. ISI-resistant reference signal design and processing for OFDM integrated communications and long-range radar sensing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(6): 1322–1326. doi: [10.1109/LCOMM.2024.3394545](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2024.3394545).
- [90] ZHOU Yanmi, XU Chaojun, LIU Jianguo, et al. Improving ISAC system long-range sensing with alternating cyclic prefix and postfix signals[C]. 2024 IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Valencia, Spain, 2024: 1–6. doi: [10.1109/PIMRC59610.2024.10817467](https://doi.org/10.1109/PIMRC59610.2024.10817467).
- [91] 赵玉振, 陈龙永, 张福博. 一种基于OFDM-chirp的雷达通信一体化波形设计与处理方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 453–466. doi: [10.12000/JR21028](https://doi.org/10.12000/JR21028).
- ZHAO Yuzhen, CHEN Longyong, and ZHANG Fubo. A new method of joint radar and communication waveform design and signal processing based on OFDM-chirp[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 453–466. doi: [10.12000/JR21028](https://doi.org/10.12000/JR21028).
- [92] HAN S H and LEE J H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(2): 56–65. doi: [10.1109/MWC.2005.1421929](https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929).
- [93] BOURDOUX A, FENG Ruoyu, and BAUDUIN M. Low PAPR design for OFDM symbols with guard bands and baseband filtering[C]. 2024 IEEE Radar Conference, Denver, USA, 2024. doi: [10.1109/RadarConf2458775.2024.10548775](https://doi.org/10.1109/RadarConf2458775.2024.10548775).

- [94] LI Wanlu, XIANG Zheng, and REN Peng. Waveform design for dual-function radar-communication system with Golay block coding[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 184053–184062. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2960658](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2960658).
- [95] LAVERY S P and RATNARAJAH T. Remote sensing with constant-modulus OFDM signals from complementary sequences[C]. 2024 IEEE Radar Conference, Denver, USA, 2024. doi: [10.1109/RadarConf2458775.2024.10548669](https://doi.org/10.1109/RadarConf2458775.2024.10548669).
- [96] HU Xiaoyan, MASOUROS C, LIU Fan, et al. Low-PAPR DFRC MIMO-OFDM waveform design for integrated sensing and communications[C]. IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, Republic of, 2022: 1599–1604. doi: [10.1109/ICC45855.2022.9838548](https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838548).
- [97] CHEN Yating, WEN Cai, HUANG Yan, et al. Joint design of ISAC waveform under PAPR constraints[J]. *China Communications*, 2024, 21(7): 186–211. doi: [10.23919/JCC.2023-0156.202407](https://doi.org/10.23919/JCC.2023-0156.202407).
- [98] TIAN Xuanxuan, ZHANG Tingting, ZHANG Qinyu, et al. HRRP-based extended target recognition in OFDM-based RadCom systems[C]. 2018 IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018: 1–6. doi: [10.1109/GLOCOM.2018.8647263](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647263).
- [99] VARSHNEY P, BABU P, and STOICA P. Low-PAPR OFDM waveform design for radar and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Radar Systems*, 2023, 1: 69–74. doi: [10.1109/TRS.2023.3275210](https://doi.org/10.1109/TRS.2023.3275210).
- [100] HUANG Yixuan, HU Su, MA Shiyong, et al. Designing low-PAPR waveform for OFDM-based RadCom systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 6979–6993. doi: [10.1109/TWC.2022.3153606](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3153606).
- [101] YAO Rubing, WEI Zhiqing, SU Liyan, et al. Low-PAPR integrated sensing and communication waveform design[C]. 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Glasgow, United Kingdom, 2023: 1–6. doi: [10.1109/WCNC55385.2023.10119026](https://doi.org/10.1109/WCNC55385.2023.10119026).
- [102] LIYANAARACHCHI S D, RIIHONEN T, BARNETO C B, et al. Optimized waveforms for 5G-6G communication with sensing: Theory, simulations and experiments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 8301–8315. doi: [10.1109/TWC.2021.3091806](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3091806).
- [103] HU Yanmo, DENG Weibo, ZHANG J A, et al. Resource optimization for delay estimation in perceptive mobile networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(1): 223–227. doi: [10.1109/LWC.2023.3325961](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3325961).
- [104] HUANG Zhe, WANG Kexuan, LIU An, et al. Joint pilot optimization, target detection and channel estimation for integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(12): 10351–10365. doi: [10.1109/TWC.2022.3183621](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3183621).
- [105] OZKAPTAN C D, EKICI E, ALTINTAS O, et al. OFDM pilot-based radar for joint vehicular communication and radar systems[C]. 2018 IEEE Vehicular Networking Conference, Taipei, China, 2018. doi: [10.1109/VNC.2018.8628347](https://doi.org/10.1109/VNC.2018.8628347).
- [106] WANG Changheng, ALTINTAS O, OZKAPTAN C D, et al. Multi-range joint automotive radar and communication using pilot-based OFDM radar[C]. 2020 IEEE Vehicular Networking Conference, New York, USA, 2020: 1–4. doi: [10.1109/VNC51378.2020.9318373](https://doi.org/10.1109/VNC51378.2020.9318373).
- [107] PU Zhiwei, WANG Wei, LAO Zhiwei, et al. Power allocation of integrated sensing and communication system for the internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2024, 8(4): 1717–1728. doi: [10.1109/TGCN.2024.3391015](https://doi.org/10.1109/TGCN.2024.3391015).
- [108] WANG Xuan and HAN Shengqian. Optimization of power allocation for OFDM based ISAC systems[C]. 2024 IEEE Global Communications Conference, Cape Town, South Africa, 2024: 5387–5392. doi: [10.1109/GLOBECOM52923.2024.10901655](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM52923.2024.10901655).
- [109] SHI Chengguang, WANG Yijie, WANG Fei, et al. Joint optimization scheme for subcarrier selection and power allocation in multicarrier dual-function radar-communication system[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(1): 947–958. doi: [10.1109/JSYST.2020.2984637](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2984637).
- [110] ZHU Jia, CUI Yuanhao, MU Junsheng, et al. Power minimization strategy based subcarrier allocation and power assignment for integrated sensing and communication[C]. 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Glasgow, United Kingdom, 2023: 1–6. doi: [10.1109/WCNC55385.2023.10118989](https://doi.org/10.1109/WCNC55385.2023.10118989).
- [111] ZHAO Qimin, LI Songqian, TANG Aimin, et al. Energy-efficient reference signal optimization for 5G V2X joint communication and sensing[C]. IEEE International Conference on Communications, Seoul, Republic of Korea, 2022: 1040–1045. doi: [10.1109/ICC45855.2022.9838978](https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838978).
- [112] STOICA P, HE Hao, and LI Jian. On designing sequences with impulse-like periodic correlation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(8): 703–706. doi: [10.1109/LSP.2009.2021378](https://doi.org/10.1109/LSP.2009.2021378).
- [113] LIU Fan, XIONG Yifeng, LU Shihang, et al. Uncovering the iceberg in the sea: Fundamentals of pulse shaping and modulation design for random ISAC signals[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2025, 73: 2511–2526. doi: [10.1109/TSP.2025.3580596](https://doi.org/10.1109/TSP.2025.3580596).
- [114] CHTERENTAL O and ĐOKOVIĆ Đ Ž. On orthostochastic, unistochastic and qustochastic matrices[J]. *Linear Algebra and its Applications*, 2008, 428(4): 1178–1201. doi: [10.1016/j.laa.2007.09.022](https://doi.org/10.1016/j.laa.2007.09.022).

- [115] LIU Fan, ZHANG Ying, XIONG Yifeng, et al. CP-OFDM achieves the lowest average ranging sidelobe under QAM/PSK constellation[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*. doi: 10.1109/TIT.2025.3591267.
- [116] DECARLO L T. On the meaning and use of kurtosis[J]. *Psychological Methods*, 1997, 2(3): 292–307. doi: 10.1037/1082-989X.2.3.292.
- [117] ABOU-FAYCAL I C, TROTT M D, and SHAMAI S. The capacity of discrete-time memoryless Rayleigh-fading channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(4): 1290–1301. doi: 10.1109/18.923716.
- [118] GURSOY M C, POOR H V, and VERDU S. Noncoherent Rician fading Channel-part II: Spectral efficiency in the low-power regime[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2207–2221. doi: 10.1109/TWC.2005.853971.
- [119] WEI Zhiqing, PIAO Jinghui, YUAN Xin, et al. Waveform design for MIMO-OFDM integrated sensing and communication system: An information theoretical approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(1): 496–509. doi: 10.1109/TCOMM.2023.3317258.
- [120] BAZZI A and CHAFII M. On integrated sensing and communication waveforms with tunable PAPR[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 7345–7360. doi: 10.1109/TWC.2023.3250263.
- [121] WANG Shixiong, DAI Wei, WANG Haowei, et al. Robust waveform design for integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 3122–3138. doi: 10.1109/TSP.2024.3410142.
- [122] ZHANG Ruoyu, SHIM B, YUAN Weijie, et al. Integrated sensing and communication waveform design with sparse vector coding: Low sidelobes and ultra reliability[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 4489–4494. doi: 10.1109/TVT.2022.3146280.
- [123] BARRUECO J, MONTALBAN J, IRADIER E, et al. Constellation design for future communication systems: A comprehensive survey[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 89778–89797. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3090774.
- [124] CHO J and WINZER P J. Probabilistic constellation shaping for optical fiber communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(6): 1590–1607. doi: 10.1109/JLT.2019.2898855.
- [125] DU Zhen, LIU Fan, XIONG Yifeng, et al. Reshaping the ISAC tradeoff under OFDM signaling: A probabilistic constellation shaping approach[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 4782–4797. doi: 10.1109/TSP.2024.3465499.
- [126] XU Jingjing, DU Zhen, WANG Jie, et al. An experimental validation of ISAC with probabilistic constellation shaping under OFDM signaling[C]. 2024 IEEE International Conference on Unmanned Systems, Nanjing, China, 2024: 1579–1584. doi: 10.1109/ICUS61736.2024.10840131.
- [127] LIAO Zihan, LIU Fan, LI Shuangyang, et al. Pulse shaping for random ISAC signals: The ambiguity function between symbols matters[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(4): 2832–2846. doi: 10.1109/TWC.2024.3525440.
- [128] GAUDIO L, KOBAYASHI M, CAIRE G, et al. On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 5951–5965. doi: 10.1109/TWC.2020.2998583.
- [129] YUAN Weijie, ZHOU Lin, DEHKORDI S K, et al. From OTFS to DD-ISAC: Integrating sensing and communications in the delay Doppler domain[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(6): 152–160. doi: 10.1109/MWC.018.2300607.
- [130] BEMANI A, KSAIRI N, and KOUNTOURIS M. Integrated sensing and communications with affine frequency division multiplexing[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(5): 1255–1259. doi: 10.1109/LWC.2024.3367178.
- [131] LEVANON N and MOZESON E. Radar Signals[M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [132] LI Ang, SPANO D, KRIVOCHEZ J, et al. A tutorial on interference exploitation via symbol-level precoding: Overview, state-of-the-art and future directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 796–839. doi: 10.1109/COMST.2020.2980570.
- [133] CHUNG S T and GOLDSMITH A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(9): 1561–1571. doi: 10.1109/26.950343.
- [134] LI Ang and MASOUROS C. A two-stage vector perturbation scheme for adaptive modulation in downlink MU-MIMO[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9): 7785–7791. doi: 10.1109/TVT.2015.2489263.
- [135] MASOUROS C and ZHENG Gan. Exploiting known interference as green signal power for downlink beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(14): 3628–3640. doi: 10.1109/TSP.2015.2430839.
- [136] MENG Kaitao, MASOUROS C, CHEN Guangji, et al. Network-level integrated sensing and communication: Interference management and BS coordination using stochastic geometry[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(12): 19365–19381. doi: 10.1109/TWC.2024.3483031.
- [137] MENG Kaitao, MASOUROS C, PETROPULU A P, et al. Cooperative ISAC networks: Opportunities and

- challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, 32(3): 212–219. doi: [10.1109/MWC.008.2400151](https://doi.org/10.1109/MWC.008.2400151).
- [138] HUANG Yi, FANG Yuan, LI Xinmin, et al. Coordinated power control for network integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(12): 13361–13365. doi: [10.1109/TVT.2022.3194139](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3194139).
- [139] LYU Zhonghao, ZHU Guangxu, and XU Jie. Joint maneuver and beamforming design for UAV-enabled integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(4): 2424–2440. doi: [10.1109/TWC.2022.3211533](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3211533).
- [140] WU Kai, PEGORARO J, MENEGHELLO F, et al. Sensing in bistatic ISAC systems with clock asynchronism: A signal processing perspective[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2024, 41(5): 31–43. doi: [10.1109/MSP.2024.3418725](https://doi.org/10.1109/MSP.2024.3418725).
- [141] LUO Chenhao, WANG Chongrui, TANG Aimin, et al. Experimental study on reference-path-aided system calibration for mmWave bistatic ISAC systems[C]. 2025 IEEE Global Communications Conference, Taipei, China, 2025: 1–6.
- [142] HUA Haocheng, XU Jie, and HAN T X. Optimal transmit beamforming for integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(8): 10588–10603. doi: [10.1109/TVT.2023.3262513](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3262513).
- [143] WEI Zhiqing, YAO Rubing, YUAN Xin, et al. Precoding optimization for MIMO-OFDM integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(1): 288–299. doi: [10.1109/TCCN.2024.3445376](https://doi.org/10.1109/TCCN.2024.3445376).
- [144] 张若愚, 袁伟杰, 崔原豪, 等. 面向6G的大规模MIMO通信感知一体化: 现状与展望[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 17–23. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003).
ZHANG Ruoyu, YUAN Weijie, CUI Yuanhao, et al. Integrated sensing and communications with massive MIMO for 6G: Status and prospect[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(6): 17–23. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003).
- [145] ZHANG Ruoyu, CHENG Lei, WANG Shuai, et al. Integrated sensing and communication with massive MIMO: A unified tensor approach for channel and target parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 8571–8587. doi: [10.1109/TWC.2024.3351856](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3351856).
- [146] ZHANG Ruoyu, WU Xiaopeng, LOU Yi, et al. Channel-training-aided target sensing for terahertz integrated sensing and massive MIMO communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(4): 3755–3770. doi: [10.1109/JIOT.2024.3447584](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3447584).

作者简介

唐爱民, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为B5G/6G网络、通信感知一体化技术、全双工通信。

刘凡, 博士, 研究员, 主要研究方向为6G无线通信、通信感知一体化、低空无线网络。

袁伟杰, 博士, 副研究员, 主要研究方向为正交时频空间调制、通信感知一体化、车联网。

杨杰, 博士, 讲师, 主要研究方向为通信感知一体化、毫米波通信、人工智能。

王书涵, 硕士生, 主要研究方向为通信感知一体化技术。

兰 岚, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达探测、信号与信息智能处理、阵列通感一体化技术。

余显祥, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达探测与成像、信号处理、人工智能。

冯志勇, 博士, 教授, 主要研究方向为下一代通信网络、频谱感知、通信感知一体化。

金石, 博士, 教授, 主要研究方向为无线通信理论、随机矩阵理论、信息论。

(责任编辑: 于青)