

雷达通信一体化波形设计综述

唐波*, 吴文俊, 夏学成, 王雄鹏

(国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 雷达通信一体化通过硬件资源共享与信号波形协同设计, 突破传统分立架构下的频谱冲突、硬件冗余和电磁兼容性瓶颈, 提升平台的综合作战效能与战场生存能力。系统回顾了雷达通信一体化技术从概念萌芽、架构演进到系统实现的发展历程, 重点分析了基于线性调频、正交频分复用、正交时频空等主流信号体制的雷达通信一体化波形设计方法; 深入探讨了以感知性能为中心的多种波形设计准则, 包括方向图匹配、克拉美罗界优化及信息论方法等; 梳理了从软件无线电兼容验证、机载多模态波形融合, 到多节点与多域协同的工程实践之路, 清晰展现了雷达通信一体化技术从理论到实践的演进路径。通过全面展示雷达通信一体化系统从常规体制到多输入多输出体制, 再到原理样机验证的完整技术脉络, 为未来雷达通信一体化技术的研究与开发提供系统的理论指导和实践参考。

关键词: 频谱共享; 雷达通信一体化; 波形设计; 原型验证

中图分类号: TN959.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2026)02-349-18

Survey on dual-function radar-communication waveform design

TANG Bo*, WU Wenjun, XIA Xuecheng, WANG Xiongpeng

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: DFRC (dual-function radar-communication) is proposed to overcome spectrum conflicts, hardware redundancy, and electromagnetic compatibility bottlenecks inherent in traditional separated architectures through hardware resource sharing and isomorphic signal waveform design, whereby the integrated operational effectiveness and battlefield survivability of platforms are significantly enhanced. The evolution of DFRC technology from its conceptual inception, through architectural advancements, to system implementation was systematically reviewed. The DFRC waveform design methodologies based on mainstream signal schemes were analyzed emphatically, including linear frequency modulation, orthogonal frequency division multiplexing, and orthogonal time frequency space. Furthermore, various sensing-centric waveform design criteria were explored in depth, such as beampattern matching, Cramér-Rao bound minimization, information-theoretical design, and so on. The engineering roadmap from software-defined radio compatibility verification and airborne multimodal waveform fusion to multi-node and multi-domain cooperation was summarized, clearly illustrating the theoretical-to-practical transition of DFRC. Through presenting the complete technical evolution of the DFRC system from the conventional system to multiple-input multiple-output system, and then to the prototype demonstrations, this overview provides systematic theoretical guidance and practical references for future research and development of DFRC systems.

Keywords: spectrum sharing; dual-function radar-communication; waveform design; prototype verification

现代战争的形态正经历深刻演变, 制电磁权逐渐成为扭转战场局势的“制高点”, 是决定战争胜负的关键因素之一。为夺取并巩固电磁频谱优势, 现代武器平台需集成包括雷达探测、通信传输、导航制导与电子对抗在内的多种射频功能。然而, 当前普遍采用“功能分立、硬件堆叠”模式, 不仅显著增加了平台的体积、质量与雷达反射截面积, 损害其机动与隐身能力, 更可能会引发复杂

的电磁兼容问题, 导致系统内相互干扰, 从而严重制约整体作战效能。

在诸多矛盾中, 雷达与通信系统因功能诉求不同而导致的频谱资源竞争问题尤为突出。因此, 突破分立式架构局限, 通过一体化设计实现频谱资源的深度融合与高效共享, 已成为提升平台综合生存能力与作战效能, 并最终掌控制电磁权的必然选择和迫切要求^[1]。

收稿日期: 2025-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62171450); 安徽省自然科学基金资助项目(2108085J30)

*第一作者: 唐波(1985—), 男, 江西临川人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: tangbo06@gmail.com

引用格式: 唐波, 吴文俊, 夏学成, 等. 雷达通信一体化波形设计综述 [J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(2): 349-366.

Citation: TANG B, WU W J, XIA X C, et al. Survey on dual-function radar-communication waveform design [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 349-366.

雷达与通信频谱共享(radar and communication spectrum sharing, RCSS)作为实现上述目标的关键技术路径,旨在提高频谱利用效率、缓解系统间用频矛盾,并提升平台作战效能^[2]。RCSS 主要涵盖四种实现框架:①外辐射源雷达系统,通过利用卫星、广播发射机或基站等外部辐射源信号进行探测^[3-4];②频谱共存,即在通信频谱约束下设计雷达波形^[5-6];③频谱共享,即协同设计雷达发射波形和通信信号的协方差矩阵或预编码矩阵^[7];④雷达通信一体化(dual-function radar-communication, DFRC)亦称为感知通信一体化(integrated sensing and communication, ISAC)。相较于前三种框架可能存在的分辨率低、旁瓣高、频谱利用率有限及设计复杂等问题,雷达通信一体化系统通过深度的硬件共享与信号融合,展现出更高的频谱利用率和更低的系统成本^[8-12],因而成为当前研究的热点与主流方向。

1 发展历程

1.1 从分立到融合

1.1.1 概念探索与早期实践

雷达通信一体化技术的发展并非一蹴而就,其演进历程清晰地反映了从“概念探索”“架构革新”到“系统实现”的脉络。1963年,美国马丁公司提出一种雷达通信一体化方法:通过发射3个脉冲,并利用第3个脉冲的位置变化进行二进制编码^[13],这是一体化波形的早期探索。然而,该方案每组脉冲仅能携带1 bit信息,通信效率较低。同年,美国学者 Fiden 进一步提出通过改变雷达脉冲重复频率的方式实现通信功能^[14],但通信速率依然不高。

1.1.2 军用项目推进与系统集成

进入20世纪80年代,雷达通信一体化研究从零散的信号设计转向系统的架构革新。自1985年起,美军资助了一系列研发项目,标志着其开始从系统层面推动雷达、通信、电子战等多种射频功能的综合集成。

美国空军于20世纪80年代中期启动“宝石柱”计划,旨在为F-22A战斗机设计先进的航电系统架构。该计划采用模块化设计和资源共享架构,首次在硬件层面上实现了雷达通信一体化,为后续一体化技术发展奠定了基础^[15]。在“宝石柱”架构的基础上,1988年实施的“宝石台”计划进一步推动了系统的综合化进程^[16],致力于将理论架构转化为可实现的工程原型,其技术成果支撑了F-35战斗机综合航电系统的研制。随着硬

件共享理念的成熟,1994年开展的“先进共用孔径项目(advanced shared aperture program, ASAP)”将一体化推向天线层面,验证了通过共享宽带相控阵列,结合发射/接收(transmitter and receiver, T/R)组件技术,以分时或同步方式实现雷达、通信与电子战功能的可行性,标志射频共享从后台处理走向前端孔径^[17]。

为将机载平台的集成经验扩展至舰载领域,1998年,由美国海军研究办公室主导发起了“先进多功能射频概念(advanced multi-function radio frequency concept, AMRFC)”项目^[18-19]。该项目通过利用先进的有源相控阵天线,替代传统舰船上各自独立、互不兼容的众多射频天线,是一体化上层建筑概念的首次尝试。为进一步增强系统灵活性及扩展性,2004年在AMRFC基础上衍生出“多功能电子战(multi-function electronic warfare, MFEW)”项目^[20],强化了电子战功能在综合射频体系中的深度集成与动态资源适配能力。在上述多项技术积累的支撑下,美军逐步发展出“一体化桅杆(integrated topside, InTop)”计划^[20-21]和“电磁指挥与控制技术发展(electronic maneuvering command and control, EMC2)”计划^[22]。前者致力于实现舰船射频系统的物理集成与隐身外形设计,后者则着眼于体系层面的频谱管理与作战控制,共同推动海军平台向一体化、智能化与高隐身方向演进。2024年,由多个欧洲团队联合研发的“多功能射频系统(CROWN)”项目已顺利完成原型样机的验证工作,实现了雷达、通信等多种功能在单一系统中的一体化集成。

1.2 技术体制演进

上述雷达通信一体化系统主要基于时分复用体制或空分体制以实现多种射频功能。虽然这些体制结构相对简单并在一些武器平台上得到了较好的应用,但其固有局限依然突出,主要体现为:时分体制无法同时实现多种功能;空分体制则存在天线孔径利用率低、天线增益与空间分辨能力受限、作用距离近、数据传输速率慢、频谱资源消耗多等问题。

1.2.1 从空分复用和时分复用向波形复用演进

为克服上述体制在并发性与性能上的固有缺陷,研究者将目光投向了波形复用体制。该体制的核心在于从信号层面进行深度融合,设计一种既能探测目标又能够携带数据的一体化波形,并通过共用天线孔径发射到任务空域,同时实现目标探测、数据传输等多种功能,能够避免因天线阵面分割造成的增益降低、空间分辨能力变差、作用

范围变窄等问题。

在波形复用体制发展早期,主要利用现有的信号以实现多种功能。然而传统相控阵仅能同时发射单一波形,难以实现波形分集,加之现有波形自身存在数据率低、包络不恒定、峰值功率低等局限性,导致一体化体系无法发挥应有的效能^[1]。这一困境随着多输入多输出(multiple-input-multiple-output, MIMO)阵列技术的引入得到根本性改变。1994年,美国斯坦福大学 Paulraj 教授将 MIMO 阵列技术应用到无线通信系统中^[23],并推动了 MIMO 无线通信系统的快速发展^[24]。2003年,麻省理工学院林肯实验室将该技术引入到雷达领域。凭借各通道可发射独立的波形, MIMO 技术带来了显著的波形分集能力,在雷达领域得到了广泛的应用^[25]。随着 MIMO 技术的深入研究,一些学者先后提出基于 MIMO 阵列的雷达通信一体化系统(后续简称为 MIMO 雷达通信一体化系统)这一概念。研究表明,通过对发射波形进行优化设计,该系统能够在同一频谱资源内同时实现探测与通信两种功能,使得综合性能得到提升,解决了传统波形复用体制的灵活性难题。

1.2.2 波束成形架构的兴起与发展

在雷达通信一体化系统中,发射波形需根据实时变化的通信数据和感知环境进行动态调整与优化。通过波束形成设计,不仅能灵活调控系统的空域能量分布,而且有望快速改变系统发射波形以满足一体化需求,故波束成形器的设计已经成为研究重点。

在硬件实现上,波束成形器的结构选择至关重要。数字波束成形(digital beamforming, DBF)虽能提供最优的波束控制灵活性与多流传输能力^[26-28],但其庞大的射频链路数量导致系统成本与功耗难以承受,在大规模天线阵列中这一问题尤为突出。模拟波束成形(analog beamforming, ABF)结构简单、成本低廉,但无法满足一体化系统对多功能并行性的需求。作为二者间的有效折中,混合波束成形(hybrid beamforming, HBF)结构通过少量射频链路结合模拟移相器网络,在维持大部分性能优势的同时,降低系统复杂度和实现成本^[29-30],已成为支持大规模 MIMO 雷达通信一体化系统走向实现的关键技术。

1.2.3 新平台的融合与拓展

技术的演进不仅局限于信号与硬件,更扩展至系统架构与部署平台。近年来,非正交多址^[31-32](non-orthogonal multiple access, NOMA)、可重构超表面^[33-34](reconfigurable intelligent

surfaces, RIS)、无人机^[35-36](unmanned aerial vehicle, UAV)等技术也被引入雷达通信一体化系统,进一步拓展系统设计自由度与应用场景。如图1所示, RIS 可通过调控电磁环境实现波束赋形与干扰抑制, UAV 具备高机动性与广域覆盖能力,适用于应急通信与远程侦察; NOMA 则通过功率域复用提升用户接入数量与频谱效率。

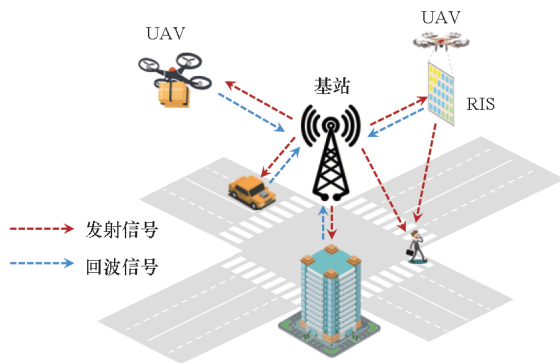


图1 RIS 和 UAV 在雷达通信一体化系统中应用示意图

Fig.1 Deployment of RIS and UAV in DFRC systems

2 常规一体化系统信号体制

在雷达通信一体化系统中,信号波形作为承载感知与通信功能的物理载体,直接影响系统性能及实现复杂度。在常规雷达通信一体化系统中,系统采用单个天线发射一体化波形或者采用相控阵天线发射完全相参的一体化波形。本节以常规一体化系统为切入点,系统分析主流一体化信号方案的技术特征。

2.1 基于 LFM 的雷达通信一体化波形

线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号凭借其高距离分辨率、大带宽与恒包络特性,在雷达系统中获得广泛应用。为缓解通信与感知在波形设计目标间的内在矛盾,研究提出在保持 LFM 信号优异雷达性能的基础上直接嵌入通信信息的技术路径,形成一条以感知优先、通信为辅的演进路线^[37]。现有研究主要通过调制 LFM 信号的幅度、相位与频率等参数实现通信功能,然而这些方法各具特点与挑战^[38]。

2.1.1 幅度调制

幅度调制是实现通信功能最直接的方式,常采用二进制振幅键控(amplitude shift keying, ASK)在 LFM 脉冲特定时段改变幅度来嵌入信息,适用于低复杂度的战术数据链。该方法实现简便,但抗噪性能差,且易在高分辨率距离像中引入虚假目标峰值^[39]。针对此问题,国防科技大学刘晓斌副教授等^[40]基于幅度码调制的处理方法,

利用互补码对消假目标相位,从而在降低误码率的同时抑制虚假目标的产生。

2.1.2 相位调制

相位调制在抗噪性能与功率效率间取得更好平衡,适用于高速平台间的指令与侦察数据传输。LFM 结合相移键控(phase shift keying, PSK)通过改变子脉冲初始相位嵌入信息,以实现信息传输^[41]。然而,相位调制会在雷达模糊函数中引入额外旁瓣,影响测距精度与多目标分辨能力。华中科技大学罗锴教授等^[42]提出一种 LFM-多进制相移键控(multiple phase shift keying, MPSK)波形,通过优化设计能量泄漏、峰值旁瓣比(peak side lobe ratio, PSLR)与符号率之间的权衡关系,在相同能量泄漏与 PSLR 条件下实现更高的符号率。哈尔滨工业大学于启月教授等^[43-44]则结合连续相位调制(continuous phase modulation, CPM)与 LFM 波形,在提升距离分辨率与误码率性能的同时,形成恒包络信号以提高发射效率。

2.1.3 频率调制

频率调制通过调控频率维度以增强系统灵活性与抗干扰能力,适用于复杂电磁对抗环境。中国电子科学研究院王小谟院士等^[45]首先提出将扩频技术与最小频移键控(minimum shift keying, MSK)结合方案,在不降低带宽的前提下,提升多普勒容忍性。哈尔滨工程大学张文旭副教授等提出 MSK-LFM 的改进方案,仿真结果表明该波形包络更稳定、能量分布更集中,且模糊函数图更接近理想的“图钉”形^[46]。另外,将信息嵌入非线性调频(non-linear frequency modulation, NLFM)信号的频率变化曲线,可在承载通信数据的同时优化雷达探测性能^[47]。美国莱特州立大学吴志强教授等^[48]提出一种隐蔽一体化波形设计方案,通过新型调制与可变符号时长设计,将通信信息隐藏于 LFM 信号中,以抵御敌方探测。

总体而言,基于 LFM 的雷达通信一体化信号利用其大带宽与脉冲压缩增益,通过幅度、相位、频率等调制嵌入通信信息,能够初步满足现代武器平台对频谱效率、隐蔽性与一体化的需求。然而,该方案通信速率有限,在高速高机动场景下容易出现通信性能下降的问题,且难以与多用户同时通信。此外,还存在感知与通信性能难以协同提升的问题。因此,该方案主要适用于对通信速率要求不高,但对距离分辨率和抗干扰能力要求较高的战术数据链、无人机侦察等应用场景。

2.2 基于 OFDM 的雷达通信一体化波形

基于正交频分复用(orthogonal frequency-

division multiplexing, OFDM)的雷达通信一体化波形方案代表了从通信波形向感知功能延伸的重要方向^[49]。如图 2 所示,OFDM 通过将高速数据流分解为多个并行子载波传输,并引入循环前缀(cyclic prefix, CP)以抑制多径干扰和消除符号间干扰(inter-symbol interference, ISI),具有高频谱效率和抗频率选择性衰落等优势,已成为现代军事通信系统的核心波形。然而,当将其直接用于雷达探测时,其感知性能受到信号结构与参数设计的制约,即增加 CP 长度会牺牲频谱效率,增大子载波间隔则会加剧对多普勒频移的敏感性^[50]。荷兰代尔夫特理工大学 Nikookar 教授等首次评估了组网 OFDM 雷达的性能,分析了天线方向图及不同接收配置对系统性能的影响^[51]。

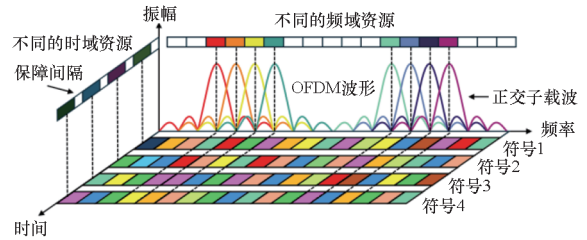


图 2 OFDM 波形

Fig. 2 OFDM waveforms

尽管 OFDM 在通信领域应用广泛,然而其固有的特性在感知应用中却会带来诸多挑战,制约了系统性能的进一步提升。

2.2.1 随机数据制约

OFDM 波形的感知性能会受到随机通信数据的制约。传统 OFDM 信号的模糊函数受调制符号的随机性影响,导致其在距离与多普勒维度呈现较高且不稳定的旁瓣水平,这一特性是限制 OFDM 雷达感知性能的重要原因^[52-53]。针对此问题,现有研究主要从三个方向展开:一是通过发射端调制与序列优化,改善信号的自相关特性。西安电子科技大学曹运合教授等^[54]采用 Walsh 码与 m 序列级联的方法,在保持通信速率的同时优化了 OFDM 波形的模糊函数性能。英国南安普顿大学 Hanzo 教授等^[55]基于索引调制(index modulated, IM) OFDM,通过稀疏激活子载波以提升单子载波功率,在低速目标场景下同时提升了通信与感知性能。二是通过配置子载波资源,在通信帧中嵌入专用感知导频。上海交通大学姜雪研究员等^[56]提出基于导频的波形设计,将通信系统中的现有导频与相位编码信号结合,在不影响通信性能的前提下实现了有效的雷达探测。东南大学刘凡教授等^[57]引入概率星座整形

(probabilistic constellation shaping, PCS)方法,通过优化各子载波的调制分布,实现感知与通信性能之间的平衡,这一技术可根据不同作战阶段的需求动态调整系统性能偏好。三是在接收端采用先进信号处理技术抑制旁瓣。南京信息工程大学葛俊祥教授等^[58]提出一种失配滤波算法,将旁瓣与伪峰外推至雷达观测窗外,从而兼顾高速通信与高性能雷达探测。中国科学院大学梁兴东研究员等^[59]融合最小均方(least mean square, LMS)自适应滤波与失配处理,突破了传统观测窗口宽度与信噪比损失之间的约束。意大利米兰理工大学 Mizmizi 教授等^[60]通过优化时间、频率和能量三维资源分配,实现了旁瓣抑制,并在保障通信质量的同时提升了系统感知性能。这一策略能够增强系统在强干扰环境下的生存能力。

2.2.2 峰均比抑制

OFDM 信号固有的高峰均比(peak to average power ratio, PAPR)严重制约其在雷达探测中的应用^[61-62]。当一体化系统发射机的功率放大器工作于非线性区域时,高 PAPR 会降低系统平均发射功率并导致信号失真,同时影响通信性能与雷达测距精度。可以采用信号预处理与波形优化来降低 OFDM 信号的 PAPR:在预处理方面,采用选择性映射(selective mapping, SLM)、部分传输序列(partial transmit sequence, PTS)等经典 PAPR 抑制技术,通过提升信号复杂度降低 PAPR^[63];在波形设计方面,通过联合序列与资源分配,构造兼具低 PAPR、高通信速率与良好模糊函数特性的 OFDM 波形。北京邮电大学冯志勇教授等^[64]提出雷达子载波随机分布于非连续资源块的新型波形,仿真结果表明,该波形兼具低 PAPR 与优异的探测性能。南京航空航天大学王威研究员等^[65]通过迭代方法优化相位因子,降低了发射波形的 PAPR,且较传统 PTS 算法表现更稳定。航天工程大学曲卫等^[66]通过联合优化权重配置、调制模式与相位编码序列,实现 PSLR 与 PAPR 性能同步改善。

2.2.3 高速动态目标估计

OFDM 系统对高速动态环境的适应性亦存在明显不足。高速目标引起的多普勒频移会破坏子载波间的正交性,引发载波间干扰(inter-carrier interference, ICI),导致模糊函数主瓣展宽与畸变,从而影响目标速度估计精度。尽管已有研究探索 OFDM-LFM 混合波形以降低高速目标匹配滤波损失^[67],但针对雷达通信一体化系统开展的研究较少。

基于 OFDM 的雷达通信一体化波形,通过子载波资源分配、导频嵌入与序列优化等方法,在保持高频谱效率的同时提升感知性能,已形成较为完整的技术体系。然而,该方案受限于高峰均比、由随机数据引起的模糊函数高旁瓣,以及对多普勒频移敏感等问题,导致其在发射效率、感知精度和高速环境适应性方面面临挑战。因此,OFDM 一体化波形主要适用于无人机中继及军事通信网络中的感知扩展应用场景。

2.3 基于 OTFS 的雷达通信一体化波形

正交时频空(orthogonal time frequency space, OTFS)调制通过将信息符号直接调制于延迟-多普勒(delay-Doppler, DD)域,融合了 LFM 波形的动态鲁棒性与 OFDM 的高频谱效率^[68]。该技术通过辛有限傅里叶逆变换(inverse symplectic finite Fourier transform, ISFFT)将信息符号从 DD 域映射至时频域,将时变频率选择性信道在 DD 域中转化为准静态信道,从而抑制高速场景下的多普勒扩展、ICI 和 ISI^[69]。

2.3.1 OTFS 信号的优势

OTFS 信号在 DD 域的信道冲激响应表现出稀疏性与紧凑性,其延迟与多普勒频率直接对应目标的距离与速度,实现了通信信道与雷达感知环境的统一。基于此,OTFS 信号在军事感知应用方面展现出三大优势,尤其适用于高速机动目标的探测与跟踪^[70-72]。其一,模糊函数在 DD 域能量更为集中,受随机调制数据影响小,从而在目标检测与参数估计方面具备更高的精度与稳定性;其二,目标的距离与速度信息直接映射为 DD 域中的确定性偏移量,多普勒效应转为可观测的域内参数,便于实现高精度联合估计;其三,可主动建模并利用信道干扰,将 ISI 与 ICI 用于感知算法设计,有效克服多目标间的遮蔽效应,提升复杂电磁环境下的感知性能。澳大利亚莫纳什大学 Viterbo 教授等首次研究了 OTFS 信号在雷达探测中的应用,提出一种高效匹配滤波算法用于估计目标距离与速度^[70]。

2.3.2 OTFS 信号面临的挑战

尽管 OTFS 信号优势显著,但其作为多载波调制系统仍面临若干固有挑战,相关优化研究亦随之展开。高 PAPR 问题是其中之一,早期 OTFS 波形包络起伏较大,限制了发射功率并影响雷达探测距离。为此,荷兰代尔夫特理工大学 Yarovoy 等^[73]提出了基于互补序列的 Zak 变换的方法来生成恒模 OTFS 信号,该方法在提升功放效率的同时,维持了优异的雷达感知性能。北京理工大

学魏国华研究员等^[74]设计了在 PAPR 约束下具有低旁瓣电平的导频符号矩阵和高通信速率的数据符号矩阵,使其兼具理想模糊函数特性和高通信速率。此外,OTFS 系统的算法复杂度与波形设计自由度需统筹兼顾。国防科技大学刘伟教授等^[75]基于离散分数傅里叶变换框架设计,通过调节分数阶参数实现通信容量与雷达探测性能的平衡。土耳其梅迪波尔大学 Zegrar 教授等^[76]提出在同一 OTFS-Chirp 波形中为不同用户分配多个正交线性调频分量,并验证了该波形在高数据率通信条件下仍可实现低复杂度的精确参数估计,展现了其在动态战场环境下的应用价值。

基于 OTFS 的一体化波形通过 DD 域调制将时变信道准静态化,显著提升了高速场景下的通信与感知性能。研究聚焦于 PAPR 抑制、导频设计与低复杂度检测算法,已体现其高动态环境优势,但仍面临系统复杂度高、计算量大、工程化成熟度不足等挑战。

2.4 其他雷达通信一体化波形

除 LFM 嵌入、OFDM 及 OTFS 等常见一体化波形外,军事应用需求正推动多种具备结构创新性与战场适应性的新型信号范式涌现。这些方案在波形设计的多个维度上拓展了系统自由度,为满足多样化应用需求提供了重要的技术补充。

2.4.1 仿频分复用

仿频分复用 (affine frequency division multiplexing, AFDM) 信号基于离散仿射傅里叶变换构建,专门针对双色散信道设计。其采用确定性 LFM 调制结构,通过预设参数在极端动态环境中保持稳定感知性能。研究表明,AFDM 信号不仅能实现联合信道估计与数据检测,还可完成高精度雷达参数提取,其模糊函数在特定配置下优于 OFDM 信号与 OTFS 信号,对多普勒扩展具有更强的鲁棒性^[77]。北京航空航天大学黄勤教授

等^[78]提出的双域参数估计方法,可在快时间解耦时延与多普勒频移,即使在多普勒频移场景下仍保持良好性能。最新研究还表明,基于 AFDM 的单导频符号即可实现接近全帧信号的感知性能,提升系统效率^[79]。

2.4.2 正交线性调频分复用

正交线性调频分复用 (orthogonal chirp division multiplexing, OCDM) 通过将通信数据嵌入正交线性调频信号,实现雷达通信功能集成^[80-81]。该波形在保持 OFDM 高频谱效率优势的同时,具备更强抗多径干扰能力,不仅能够有效降低信号被截获的概率,还保证了系统的可靠传输,适用于隐蔽通信需求。

2.4.3 广义自适应扩展调制

广义自适应扩展调制 (generalized adaptive spreading modulation, GASM) 通过时-频二维符号扩展与信道状态的闭环调节,突破传统波形限制^[82]。其核心在于建立扩展参数与信道状态的动态映射,使信号能自适应调整时频能量分布。作为 OFDM、OCDM 等多种波形的广义形式,GASM 信号在通信可靠性与感知精度方面均表现出优越性能,为未来自适应一体化系统建立了统一的设计基准。

综上,常规雷达通信一体化信号体制发展是从基于 LFM 嵌入的“感知优先设计”范式到以 OFDM 为代表的“通信兼容感知”范式,再到以 OTFS 为代表的“信道本质驱动”范式。未来,雷达通信一体化信号设计将超越单一模式的局部优化,向自适应重构、智能波形与混合架构深度融合的方向发展。通过空、时、频、码等多维资源的动态协同与一体化调度,为构建抗干扰、高可靠、全维联合作战体系提供关键技术支撑。最后,本节对所提及的常规一体化系统信号体制特点进行总结,如表 1 所示。

表 1 雷达通信一体化信号体制对比
Tab. 1 Comparison of signal schemes for DFRC

信号体制	主要特点	优势	局限	适用场景
基于 LFM 的一体化波形	感知优先设计	实现简单、恒包络特性	感知与通信性能存在折中	战术数据链
基于 OFDM 的一体化波形	通信兼容感知	高频谱效率、易于系统兼容	高峰均比、对多普勒频移敏感	现代军事通信系统
基于 OTFS 的一体化波形	信道本质驱动	抗多普勒扩展能力强	系统复杂度高、高峰均比	高速机动目标探测与跟踪
其他一体化波形	多维度拓展系统自由度	抗干扰能力强、可重构性好、性能优越	技术成熟度较低、标准化不足	动态环境、隐蔽通信等

3 MIMO 雷达通信一体化波形

在 MIMO 雷达通信一体化系统中,多路发射机发射相互独立的信号,通过空间合成同时实现感知与通信功能。相比于常规雷达通信一体化系统,MIMO 雷达通信一体化系统不仅能提升目标探测性能,而且具备更强的多用户通信能力。多通道一体化波形设计是 MIMO 雷达通信一体化系统的核心关键问题,一般需要围绕感知和通信的性能需求开展针对性的波形设计。

具体而言,一体化系统感知性能侧重于参数估计、目标检测及抗干扰等方面;通信性能则围绕有效性、可靠性与多用户干扰等指标展开^[83]。按照功能优先级,可以将雷达通信一体化波形设计范式划分为:以雷达为中心的一体化波形设计(radar-centric)、以通信为中心的一体化波形设计(communication-centric)、联合优化设计(joint design)。由于雷达与通信系统内在功能上的异构性,二者在功率分配、波形设计等核心环节中不可避免地存在权衡问题^[84-85]。因此,以感知为中心的一体化波形设计核心在于:将通信性能(如用户信干噪比)设置为必须满足的约束条件,进而在此框架下,全力优化系统的感知性能极限。考虑到篇幅限制,本节重点概述以雷达为中心的一体化波形设计进展。

3.1 发射方向图匹配

方向图匹配法是一类重要的雷达通信一体化波形设计思路,其核心思想是对系统发射端进行优化,使发射方向图逼近期望方向图,如式(1)所示:

$$\min_{\mathbf{X} \in C_X} \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q |\beta P_d(\theta_q) - \mathbf{a}_T^H(\theta_q) \mathbf{X} \mathbf{X}^H \mathbf{a}_T(\theta_q)|^2 \quad (1)$$

式中, $\theta_q (q = 1, 2, \dots, Q)$ 表示感兴趣目标方向集合, Q 为感兴趣目标方向的数量, $P_d(\theta_q)$ 为期望发射方向图在 θ_q 方向上的响应, β 为缩放因子, $\mathbf{a}_T(\theta_q)$ 是 θ_q 方向上的发射阵列导引矢量, \mathbf{X} 为发射波形, C_X 表示波形约束集合。

该方法的早期奠基性工作源于美国莱特州立大学 Hassanien 博士等^[86],他们提出利用雷达波束成形技术在特定方向“调制”通信信息^[87-88]。该技术通过在旁瓣中嵌入信息,能够在几乎不影响雷达探测性能的前提下实现隐蔽通信。然而,该方法的信息传输速率受限于正交波形的数量,导致系统整体的数据传输速率较低。

为更好地匹配给定的方向图,在实现雷达探

测的同时,完成多用户通信,文献[89-91]提出了一系列设计方法。深圳大学廖斌教授等^[91]通过将发射能量聚焦至特定的空域中以增强感知性能(可视为方向图匹配法的一种应用),同时施加通信服务质量(quality-of-service, QoS)约束,以兼顾通信性能。

随着深度学习技术的发展,美国加州大学尔湾分校 Swindlehurst 教授等^[92]针对 MIMO 一体化系统提出了一种基于深度学习的混合波束成形优化方法,该模型以波束方向图匹配为感知目标,同时以最小化通信信号的均方误差(mean square error, MSE)为协同优化约束,展现出智能算法在一体化波形设计中的潜力。

尽管方向图匹配法能提升一体化系统的感知性能,但仍存在固有局限。一方面,发射方向图与期望方向图之间的匹配度越高,并不意味着感知性能越好。另一方面,如何设计期望方向图缺乏理论指导,若期望方向图设置不合理,可能难以获得满意的探测性能。

3.2 克拉美罗界最小化

为提升一体化系统的感知性能极限,以克拉美罗界(Cramér-Rao bound, CRB)最小化为代表的、基于参数估计理论的最优性能边界研究及其相应波形设计方法也得到了大量的关注。

东南大学刘凡教授等^[93]以目标响应矩阵估计误差的 CRB 作为一体化波形设计的目标函数,其表达式如下:

$$\mathbf{C}(\mathbf{G}) = \frac{\sigma_R^2 N_R}{L} \text{tr}(\mathbf{R}_X^{-1}) \quad (2)$$

其中, \mathbf{G} 为目标响应矩阵, σ_R^2 为接收机噪声功率, N_R 为接收阵元数, L 为发射码长, \mathbf{R}_X 为发射协方差矩阵。为兼顾通信性能,以通信用户的信干噪比(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)为约束条件,构建发射波束成形设计问题如下:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W} \in C_W} \mathbf{C}(\mathbf{G}) \\ \text{s. t. } \eta_k \geq \Gamma_k, \forall k \end{aligned} \quad (3)$$

其中, C_W 为发射波束成形矩阵 \mathbf{W} 的约束集合, η_k 为第 k 个通信用户接收信号的信干噪比, Γ_k 为其需满足的最低阈值。式(3)中的优化问题可松弛为半正定规划问题,通过对求得的最优协方差矩阵进行秩一分解可获得最优波束成形矢量。然而,该方法计算复杂度高。为此,加拿大阿尔伯塔大学 Tellambura 教授等^[94]提出了一种低复杂度的近似计算方法。

在多目标场景下,上述方法通常要求波形协

方差矩阵满秩。为此,常需引入“数据流增强”方案,即发射多于目标数的数据流。这会带来两个弊端:一是浪费了本可用于提升探测性能的发射功率;二是这些额外的数据流会对通信接收机产生不必要的干扰。此外,在该方法中,待估计的参数数量远多于目标数量,导致所设计的波束成形矩阵方向性很差,降低了目标参数估计精度。

为克服上述局限,本课题组推导了雷达通信一体化系统目标角度估计误差 CRB 的渐近上界,表达式如式(4)所示^[28]。

$$C_{\omega}(p, p) \leq \frac{6\sigma_R^2}{|\alpha_p|^2 N_R^3 \mathbf{a}_T^H(\theta_p) \mathbf{R}_X^* \mathbf{a}_T(\theta_p)} \quad (4)$$

式中, $C_{\omega}(p, p)$ 为克拉美罗矩阵的第 p 个对角元素, α_p 为第 p 个目标的幅度, $\mathbf{a}_T(\theta_p)$ 是 θ_p 方向上的发射阵列导引矢量。结果表明,渐近 CRB 的上界之和为目标方向图响应的加权调和平均值的倒数。该结果阐释了为何通过发射能量聚焦能够降低目标角度估计误差,同时也为下一步如何设计更有效的 MIMO 阵列发射方向图提供新思路。基于以上结果,文中提出了基于最小化渐近 CRB 上界的雷达通信一体化波形设计方法。为了实现多用户通信,施加了通信用户接收端信干噪比约束。提出两种波形设计方法:一是交替方向乘子法(alternating direction multiplier method, ADMM);另一种方法采用变分技巧,将波形设计问题转变为 minimax 优化问题,并利用面向 minimax 优化的上界函数最小化算法(majorization minimization for minimax, MM4MM)进行求解。

发射方向图如图 3 所示,均方根误差随噪声功率变化曲线如图 4 所示。图 3 和图 4 中的仿真实验结果表明,基于该上界所设计的波束成形矩阵能够同时实现高性能的多目标参数估计与高质量的多用户通信。虽然上述方法设计的一体化波

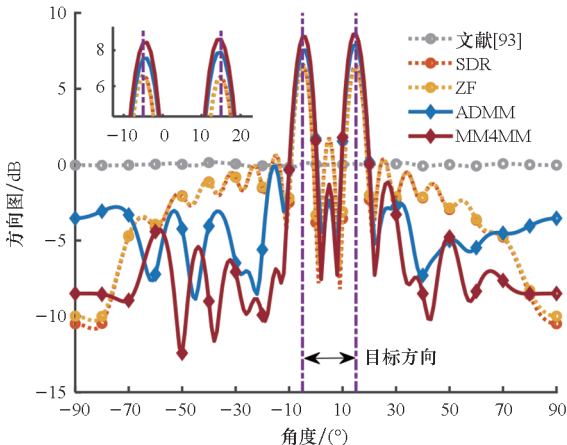


图 3 发射方向图^[28]

Fig. 3 Transmit radiation pattern^[28]

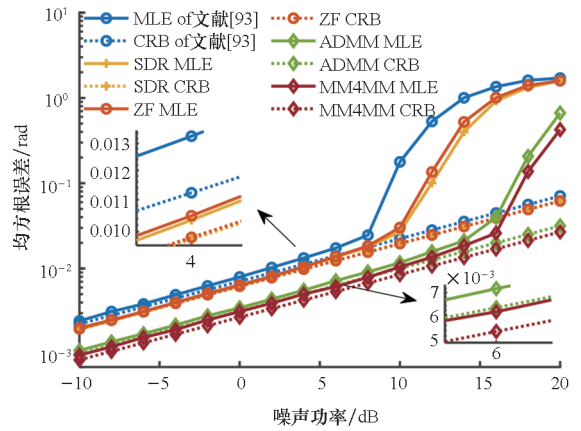


图 4 均方根误差随噪声功率变化曲线^[28]

Fig. 4 Root mean square error versus noise power^[28]

形能够显著提升目标参数估计性能,但该方法需要提前获取较为精确的目标位置和幅度信息,若先验信息存在较大的误差,可能会使感知性能下降。

3.3 信息论准则

在雷达通信一体化系统中,信息论准则主要围绕两个关键的互信息量展开:一是感知互信息(sensing mutual information, SMI),旨在衡量雷达回波 \mathbf{Y} 中所包含的关于目标参数 Φ (如角度、距离、速度等)的信息量,其目标是在给定发射波形 \mathbf{X} 的条件下,最大化感知互信息 $f_1(\Phi; \mathbf{Y} | \mathbf{X})$,从而提升从观测数据中提取目标信息的能力,进而改善参数估计与目标检测的性能;二是通信互信息(communication mutual information, CMI),用于度量传统的通信信道容量,即最大化发射波形 \mathbf{X} 与通信接收端信号 \mathbf{Z} 之间的互信息 $f_1(\mathbf{X}; \mathbf{Z})$,以确保数据传输的可靠性。

若在满足通信用户最低速率需求 R_{th} 的前提下最大化感知互信息,相应的一体化波形设计问题可构建为:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{X} \in C_X} f_1(\Phi; \mathbf{Y} | \mathbf{X}) \\ & \text{s. t. } f_1(\mathbf{X}; \mathbf{Z}) \geq R_{th} \end{aligned} \quad (5)$$

然而,优化问题(5)在理论与实际求解中均面临挑战。首先,感知互信息 $f_1(\Phi; \mathbf{Y} | \mathbf{X})$ 的计算通常依赖于目标参数 Φ 的先验分布,这在实际场景中往往是未知或难以精确获取的。其次,该问题在数学上通常是非凸的,直接求解全局最优解极为困难。

为克服上述困难,一种常见思路是将原约束优化问题转化为加权求和形式,从而构造如下优化问题:

$$\min_{\mathbf{X} \in C_X} [\rho f_1(\Phi; \mathbf{Y} | \mathbf{X}) + (1 - \rho) f_1(\mathbf{X}; \mathbf{Z})] \quad (6)$$

美国纽约大学 Chafii 教授等通过研究式(6)发现,即使从随机初始值出发,经适当优化后仍能能够以较高概率收敛至帕累托边界^[95]。然而,权重系数 ρ 的设定对系统在感知与通信之间的性能折中具有关键影响,其最优选取策略仍有待进一步研究。

除了互信息,信息论中的相对熵准则也可用于雷达通信一体化波形设计中,用于提高目标检测性能。为提高莱斯目标的检测性能,本课题组以相对熵作为波形设计准则,同时对波形施加通信多用户干扰(multi-user interference, MUI)能量约束,以保证多用户通信的服务质量。采用两种方法求解所构建的一体化波形设计问题:一是 ADMM;二是将下界函数最大化(minimization-maximization, MM)与 ADMM 结合的方法,记为 MM-ADMM。如图 5 所示,所设计的一体化波形具有较好的莱斯目标检测与多用户通信性能^[96]。

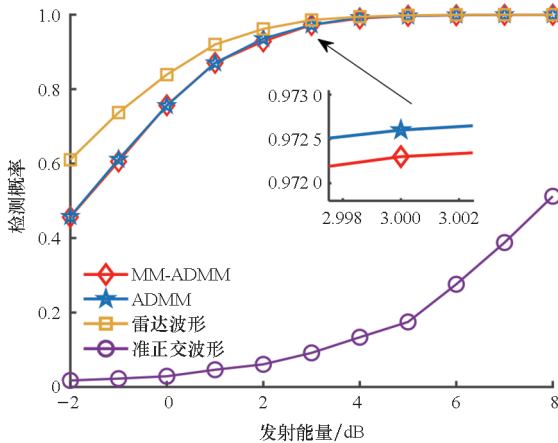


图5 莱斯目标检测概率^[96]

Fig. 5 Detection probability of the Rician target^[96]

基于信息论准则的雷达通信一体化波形设计虽然从理论上为感知与通信的性能权衡提供了统一的描述框架,但是在实际应用中仍面临计算复杂度高、求解困难等问题。

3.4 信干噪比最大化

在雷达和通信系统中,信干噪比是决定系统性能的关键指标。本课题组深入分析了雷达通信一体化系统的目标检测性能,推导了检测概率闭式表达式,指出目标检测概率是信干噪比的单调递增函数^[97-98]。在此基础之上,以最大输出信干噪比为目标函数,提出了最优一体化波形闭式解的构造方法。研究表明,最优发射波形具有低秩特性,其秩不超过通信用户数。特别地,仅有一个通信用户时,系统工作在相控阵模式便可实现雷达通信一体化。另外,当通信接收机处于天

线旁瓣区域时,通信信号总能量决定了输出信干噪比损失;如果所有通信信号能量相同,且目标与通信接收机位于特定的角度,可以没有任何信干噪比损失。

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{X} \in \mathcal{C}_{\mathbf{X}}, \mathbf{w}} \quad & \eta_{\mathbf{R}}(\mathbf{X}, \mathbf{w}) \\ \text{s. t.} \quad & \eta_{C,k} \geq \Gamma_k, \forall k \end{aligned} \quad (7)$$

为减少杂波对一体化系统的干扰,如式(7)所示,清华大学沈渊教授等^[99]以通信用户的信干噪比 $\eta_{C,k}$ 为约束条件,以最大化雷达探测信干噪比 $\eta_{\mathbf{R}}(\mathbf{X}, \mathbf{w})$ 为目标联合设计发射波形 \mathbf{X} 与接收滤波器 \mathbf{w} ,有效提升系统性能。然而,该方法所设计的波形仅满足能量约束,未必具备恒包络特性,在实际工程应用中存在一定局限性。

为更好地产生适用于工程应用的波形,卢森堡学者 Tsinos 等^[100]提出一种一体化波形设计方法,所提方法不仅能够控制通信信号多用户干扰能量,而且能够在杂波方向上形成零陷,从而提升雷达探测性能。然而,该方法同样面临权重系数的选取问题,且难以调控每一个用户的通信性能。

为避开权重系数选择的难题,本课题组提出以每一用户的干扰能量为约束条件,以最大化信干噪比为准,分别在波形相似性约束^[101]与恒模约束^[102]下,对发射波形与接收滤波器进行联合优化。如图 6 所示,在相似性约束下,所形成的波束方向图在目标方向上响应最强,在点杂波位置均产生低于 -120 dB 的零陷,在块杂波方向上形成响应低于 -90 dB 的凹槽,表明该算法能有效抑制杂波,提升系统在复杂环境中的探测能力。

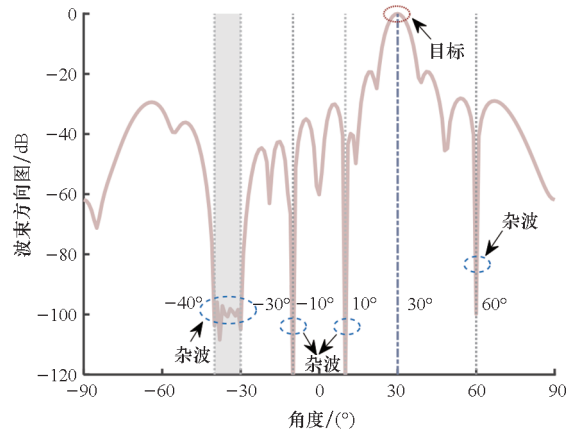


图6 抗干扰波形发射方向图^[101]

Fig. 6 Interference-resistant transmit radiation pattern^[101]

3.5 低截获设计

如图 7 所示,雷达通信一体化系统固有的开放性与广播特性,使其发射的波形信号在空间中广泛传播。在现代战场环境中,敌方可通过高灵

敏度侦察接收设备实施持续频谱检测与深度信息分析,完成对我方辐射源的检测、识别与精确定位,严重威胁信息系统的安全与作战效能^[104]。因此,在高度对抗的军事应用中,确保一体化信号具备低截获(low probability of intercept, LPI)性能至关重要。低截获概率要求信号不仅在传输过程中难以被敌方侦测发现,即使被捕获,也无法被正确识别与解调,从而将一体化信号“隐藏”于复杂电磁背景中,提升系统的隐蔽性与战场生存能力。

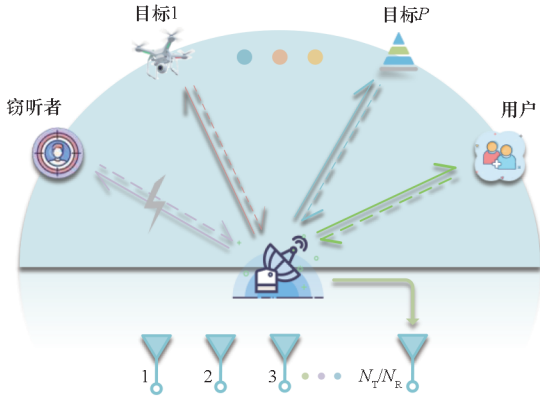


图 7 低截获雷达通信一体化系统示意图^[103]

Fig. 7 Illustration of LPI DFRC systems^[103]

为实现有效的低截获性能,现有雷达通信一体化系统主要采用方向图旁瓣控制和人工噪声(artificial noise, AN)两类反侦察方案。

3.5.1 方向图旁瓣控制

第一类方案主要通过设计发射方向图,精确控制发射能量在空间中的分布,即令发射方向图的主瓣精准指向感兴趣目标,同时在潜在敌方侦察设备所在角度区间形成零陷,将发射信号能量限制在较低水平,以防止被截获。

假设第 q 个敌方侦察设备位于角度区间 $\Theta_q \in [\theta_{q,L}, \theta_{q,U}]$, $\theta_{q,L}$ 和 $\theta_{q,U}$ 分别是该角度区间的上限和下限。雷达通信一体化系统向角度 Θ_q 区域泄漏的能量可以表示为

$$\int_{\nu_{q,L}}^{\nu_{q,U}} \mathbf{c}_\nu^H \mathbf{c}_\nu d\nu = \mathbf{x}^H \mathbf{R}_q \mathbf{x} \quad (8)$$

其中: $\nu_{q,L} = \sin(\theta_{q,L})$; $\nu_{q,U} = \sin(\theta_{q,U})$; $\mathbf{c}_\nu = \text{vec}(\mathbf{X}^T \mathbf{a}_{q,E})$, $\mathbf{a}_{q,E}$ 为潜在窃听者的发射导引矢量; $\nu = \sin(\theta)$; $\mathbf{R}_q = \mathbf{I}_L \otimes \tilde{\mathbf{R}}$, $\tilde{\mathbf{R}}$ 矩阵的第 (m, n) 个元素为

$$\tilde{R}_q(m, n) = \begin{cases} \nu_{q,U} - \nu_{q,L}, & m = n \\ \frac{\exp(j2\pi\nu_{q,U})c - \exp(j2\pi\nu_{q,L})c}{j2\pi c}, & m \neq n \end{cases} \quad (9)$$

式中, $c = (n - m) d_T / \lambda$ 。

基于式(8),本课题组提出了一种一体化波形设计方法^[103]:一是 MM-ADMM;二是将奇异值分解(singular value decomposition, SVD)与 ADMM 结合的方法,记为 SVD-ADMM。如图 8 所示,所设计波形在敌方侦察设备所在的方向上形成凹口,比主瓣响应低 30 dB。这种设计使得系统能够在完成高质量通信和高精度探测的同时,有效防止被敌方所侦察,提升系统在复杂电磁环境下的隐蔽通信能力与战场生存能力。

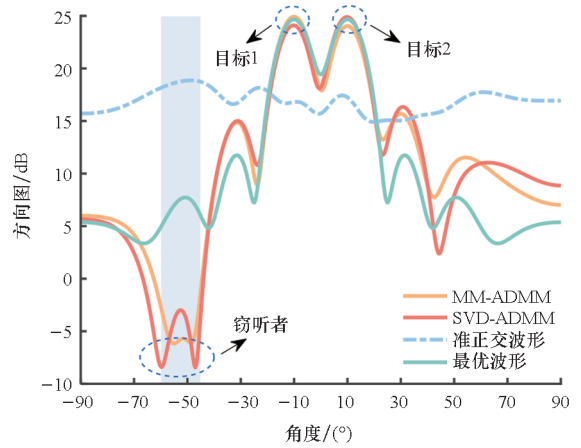


图 8 低截获方向图^[103]

Fig. 8 Radiation pattern with LPI^[103]

3.5.2 人工噪声技术

人工噪声作为一种主动塑造电磁环境的安全增强技术,通过在发射信号中有目的地注入噪声信号,并结合波束赋形和资源分配策略,将噪声能量精确聚焦于潜在敌方接收方向,从而在复杂电磁对抗中增强信息传输的隐蔽性^[105]。基于混合波束成形的隐蔽雷达通信一体化系统所形成的基带信号可以表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}_A \mathbf{B}_{C,D} \mathbf{S}_C + \mathbf{B}_A \mathbf{B}_{E,D} \mathbf{S}_E = \mathbf{B}_A \mathbf{B}_D \mathbf{S} \quad (10)$$

其中, \mathbf{B}_A 为基于移相器的模拟波束形成矩阵, $\mathbf{B}_{C,D}$ 和 $\mathbf{B}_{E,D}$ 分别表示一体化信号和人工噪声对应的数字波束形成矩阵, $\mathbf{B}_D = [\mathbf{B}_{C,D}, \mathbf{B}_{E,D}]$, \mathbf{S}_C 表示下行基带信号; \mathbf{S}_E 表示不携带任何信息的人工噪声, $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_C^T, \mathbf{S}_E^T]^T$ 。在雷达通信一体化系统中,人工噪声的独特优势在于其“已知性”。因此, \mathbf{S}_E 不仅能干扰敌方侦察设备,其本身作为一种已知发射信号,也可用于目标探测,从而在增强通信隐蔽性的同时,提升系统的感知性能。

中国科学技术大学邱玲教授和香港中文大学(深圳)许杰副教授等^[106]针对敌方侦察信道信息非完美已知情况,提出了一种鲁棒的联合波束成形设计方法。该设计将感知信号同时用作人工噪声,实现了“一发双能”。在有界误差与高斯随

机误差两种典型的信道信息误差模型下,所提方法能够有效平衡通信、感知与安全之间的关系,从而在保证合法用户通信质量与雷达探测性能的同时,最大限度地干扰潜在窃听器。

大连理工大学的李明教授等^[107]针对敌方侦察信道状态未知场景,提出了一种基于人工噪声

辅助的联合波束成形设计,利用系统闲置功率产生人工噪声,在保证通信与感知性能不受影响的前提下,增强对潜在侦察方的干扰,从而提升雷达通信一体化系统的安全性。

对本节中所提的 MIMO 雷达通信一体化波形设计准则的性能进行总结,结果如表 2 所示。

表 2 MIMO 雷达通信一体化波形设计准则对比

Tab. 2 Performance comparison of MIMO DFRC waveform design criteria

设计准则	主要目的	通信所需信息	感知所需信息
发射方向图匹配	发射能量聚焦	信道状态	目标位置范围
CRB 最小化	高精度参数估计	信道状态	目标位置和幅度
信息论准则	提高信息量	信道状态	目标先验分布等
信干噪比最大化	抑制杂波干扰	信道状态	杂波和干扰参数
低截获设计	隐蔽通信	信道状态、潜在侦察方信道	目标位置等

4 雷达通信一体化波形系统验证

雷达通信一体化技术的演进,是一个从理论构想走向系统实现的持续深化过程。其发展脉络清晰地体现为:首先通过基础原型验证技术可行性,继而针对特定场景优化系统性能,最终迈向网络化协同与多功能深度融合。本节将沿此主线,系统梳理雷达通信一体化波形与系统从原理验证走向实际应用的实践历程。

4.1 原理可行性验证

4.1.1 基于 OFDM 信号的雷达通信一体化系统验证

2009 年,德国卡尔斯鲁厄理工学院 Wiesbeck 团队首次在硬件层面论证了 OFDM 信号用于雷达通信一体化的可行性^[108]。2012 年,该学院 Braun 等提出了基于通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)的 OFDM 雷达通信一体化实验平台^[109],该平台由 2 台 USRP N210 设备(搭载 XCVR2450 子板)、上位机和喇叭天线组成,XCVR2450 子板基于 MAX2829 收发器芯片,支持 5 GHz 频段传输,最大接收带宽为 36 MHz,适用于车载或小型军事平台的部署需求。

该实验采用 OFDM 信号作为雷达通信一体化波形,在固定和移动场景下展开测试。固定测量使用高增益喇叭天线,成功探测到建筑物和车辆,但也暴露出发收通道间直接耦合严重、动态范围受限的问题;移动测量则将天线集成于车辆保险杠,在高速公路环境中依然有效探测到后方车辆及静止目标,验证了系统的车载可行性。实验

结果表明,该 USRP 测试平台具备固定与移动场景中的目标探测能力,但其动态范围和距离分辨率受限于硬件带宽和直接耦合效应。

4.1.2 基于 BEEMER 的 FFRED 雷达通信一体化系统验证

2017 年,美国堪萨斯大学的 Blunt 等^[110]提出了一种远场辐射发射设计(far-field radiated emission design, FFRED)方法,该方法可在远场不同方向同时合成雷达与通信信号,并基于一种全基带数字 MIMO 实验雷达(baseband-digital at every element MIMO experimental radar, BEEMER)平台进行了实验验证^[111]。

该平台采用 4 通道软件定义雷达(software-defined radar, SDR)架构,搭配 18 阵元线性贴片阵列(中心频率 3.5 GHz,半波长间距 8.57 cm)与 18 dBi 增益的喇叭接收天线。实验表明,该平台所设计的波形具有恒定包络与良好的频谱约束特性,其实测发射波形在一个方向上与期望雷达波形高度匹配,在另一个方向可实现通信信号的有效解调,验证了“同一孔径、同时辐射”方案的可行性。

4.1.3 其他相关验证

2019 年,Blunt 等^[112]又基于 FM 噪声雷达波形嵌入 OFDM 通信子载波,通过 Tektronix AWG 与 Rohde & Schwarz FSW 硬件在开放空间中实现了隐蔽探测与数据回传,64-QAM 调制下误码率仅为 1.8×10^{-3} 。同年,芬兰坦佩雷大学 Valkama 等^[113]基于 PXIe-1082 矢量信号收发器(vector signal transceiver, VST)平台,设计多抽头抵消器

与非线性数字抵消器,实现 100 dB 自干扰隔离,成功检测 40 m 外的无人机与移动车辆。2021 年,美国北卡罗来纳州立大学 Heath 等^[114]构建毫米波全数字单输入多输出(single input multiple output, SIMO)雷达通信一体化系统,采用低分辨率模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)(2 ~ 4 位)降低复杂度,对比商用 INRAS Radarbook 可实现更高距离分辨率,展现出在近距离战术侦察中的应用潜力。

4.2 系统性能优化

在验证了雷达通信一体化技术路线的可信性后,研究重点从“能否实现”转向“如何优化”,致力于通过先进的波形设计与硬件架构,在复杂场景下实现感知与通信性能的协同提升。

4.2.1 机载 MIMO 多模态雷达通信一体化波形优化与性能评估

2019 年,中国科学院空天院梁兴东团队^[115-116]首次实现了机载平台下基于 MIMO 的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像与通信协同硬件验证。该研究针对传统机载雷达与通信设备分离导致的资源浪费问题,提出改进型 OFDM 波形与空时编码(space-time coding, STC)波形两种方案,为不同功能模式设计专用波形。该实验采用机载平台验证 STC 波形方案,改进 OFDM 波形方案仅通过实验室搭建平台验证(实验装置如图 9 所示)。室内实验验证,改进 OFDM 波形方案可同时实现 250 Mbit/s 的高速数据传输与 1.5 m 高分辨率 SAR 成像;机载实验则表明,STC 波形方案能同时实现 0.3 m 高分辨率 SAR 成像与无线图像数据传输。实验结果表明,两种波形均能实现高分辨率成像与高速通信。然而,改进 OFDM 波形需在俯仰方向布设阵列以实

现数字波束成形,对空间配置要求较高;STC 方案虽适用于空间受限平台,但其脉冲重复频率加倍,且 Alamouti 解码会带来处理增益的损失。

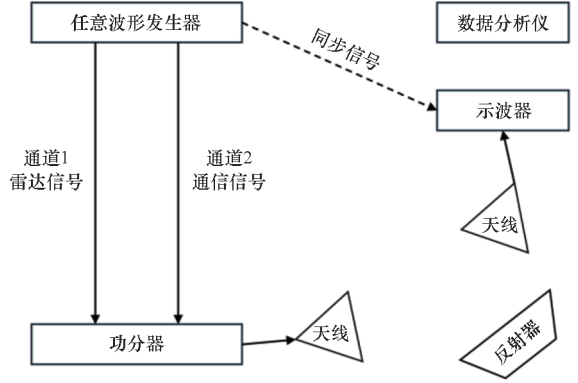


图 9 基于改进波形 OFDM 的测试平台示意图^[115-116]

Fig. 9 Illustration of the test platform based on enhanced OFDM waveforms^[115-116]

4.2.2 基于空间调制技术的雷达通信一体化系统优化与性能评估

2021 年,清华大学黄天耀等^[117]提出了一种基于广义空间调制(generalized spatial modulation, GSM)的雷达通信一体化系统,命名为 SpaCoR。该系统使用独立但共存的雷达与通信波形,通过空间调制技术实现频谱与空间资源的动态共享。具体来说,通过动态控制符号周期内天线阵列的激活状态,实现雷达感知与无线通信。

该系统包含 16 单元二维天线阵列,使用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)、数模转换器(digital-to-analog converter, DAC)以及 ADC 实现基带与射频信号的生成与接收,还配备了雷达回波模拟器(radar echo generator, REG),用于模拟多目标场景,其实验装置如图 10 所示。

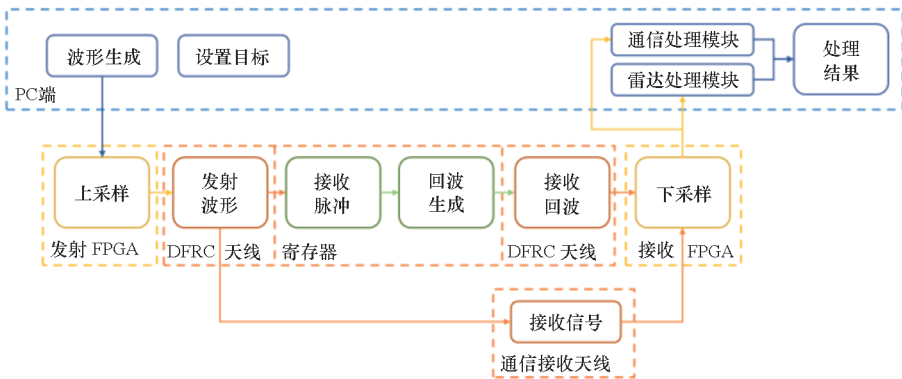


图 10 SpaCoR 系统示意图

Fig. 10 Illustration of the SpaCoR prototype

实验结果表明,SpaCoR 系统在保持与全天线阵列相近的角度分辨率和低旁瓣的同时,其通信子系统在相同数据速率下较固定天线通信系统实现了更低的误比特率。

4.2.3 基于 MIMO-OFDM 的一体化波形优化与性能评估

2022 年,英国伦敦大学许同阳与东南大学刘凡等^[118]提出了一种可灵活权衡感知与通信性能的波形优化方法,其发射波形通过求解一个带能量约束的优化问题产生,问题如下:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{X}} & [\rho \|\mathbf{H}\mathbf{X} - \mathbf{S}\|_{\text{F}}^2 + (1 - \rho) \|\mathbf{X} - \mathbf{X}_0\|_{\text{F}}^2] \\ \text{s. t. } & \frac{1}{L} \|\mathbf{X}\|_{\text{F}}^2 = P_{\text{T}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, \mathbf{H} 为通信信道矩阵, \mathbf{S} 为期望通信信号, \mathbf{X}_0 为期望发射波形, P_{T} 为发射能量。第一项旨在最小化 MUI, 第二项则使得发射波形逼近期望发射波形 \mathbf{X}_0 。通过调节权衡因子 ρ 在 0 到 1 之间取值, 系统可在纯感知、纯通信以及两者兼顾的模式间切换。

为验证该理论, 文中构建了一套 6×2 MIMO OFDM 软件定义无线电实验平台。该平台由 6 个发射 USRP 设备构成均匀线性阵列, 工作于 2.4 GHz 频段, 能够生成并发射经过预编码的双功能 OFDM 信号。接收端由两个通信用户和一个用于雷达波束测量的定向天线装置组成。实验利用同一波形实现了通信与感知双重功能, 并验证了不同权衡因子下的雷达与通信的性能: 较小的权衡因子会导致通信性能下降, 具体表现为星座点更加分散, 但系统却能生成高质量的波束方向图; 反之, 随着权衡因子增大, 星座点更加集中, 这意味着误码率更低, 但需以增加波束方向图失真程度为代价。综合来看, 在权衡因子 $\rho = 0.9$ 时, 系统既能实现较好的波束聚焦, 又能保证良好的通信性能。

4.3 网络化深度融合

随着应用场景复杂度的提升, 雷达通信一体化的前沿已从单平台系统优化, 迈向以多节点多域协作为特征的网络化深度融合阶段。

4.3.1 多节点协作雷达通信一体化系统

2023 年, 北京邮电大学张奇勋教授等^[119]针对现阶段缺乏对多节点协同感知机制的探索的问题, 研究了基于网络化集成雷达通信一体化的硬件测试平台及其性能评估, 利用 5G NR (new radio) 灵活的帧结构, 将雷达感知功能嵌入通信信号中, 提升了硬件系统的感知性能。该平台由

2 个独立的基于 5G NR 帧结构的雷达通信一体化系统构成, 每个系统由 2 个 5G NR 毫米波通信平台与 2 个 64 单元相控阵天线构成。另外, 用 1 辆装有喇叭天线的自动驾驶小车作为接收端, 持续接收通信数据。

在波形设计层面, 该工作并未设计新的波形, 而是直接利用 5G NR 中已有的物理下行共享信道及其解调参考信号 (demodulation reference signal, DMRS) 进行联合感知与通信。实验证明, 2 部雷达通信一体化系统通过协作与数据融合, 相比于单系统, 目标定位的均方根误差降低约 61%, 并同时能够维持 2.8 Gbit/s 的高通信吞吐量, 实现了感知与通信性能的有效协同。

4.3.2 多域协作雷达通信一体化系统

为了应对未来军事应用中对于高分辨率环境与鲁棒通信的迫切需求, 发展支持多模态融合的雷达通信一体化系统变得至关重要。2025 年, 东南大学金石教授等^[120]构建了一个面向多域协同通信网络的雷达通信一体化系统, 该系统集成单站、双站与网络感知模式, 并支持多模态数据采集与同步。双站感知架构由基站 (base station, BS) 和用户设备 (user equipment, UE) 组成, 形成基站发射 - 用户接收的双站感知模式; 单站感知架构的站点配备 2 套毫米波相控阵, 分别用于发射和接收, 实现自发射 - 自接收的单站感知模式; 网络感知架构的基站同时支持多个用户设备, 每个用户设备通过双站或单站感知检测本地无线电环境, 并将感知结果上传至基站进行融合。这种协同方式可以提升感知精度、扩展感知范围, 且原理同样适用于多基站场景。

该雷达通信一体化系统通过灵活的多模态硬件架构, 成功地将通信与雷达感知功能融为一体。实验结果证明, 该系统具备实时角度 - 距离成像与无线电同步定位与地图构建 (simultaneous localization and mapping, SLAM) 能力, 其在 28 GHz 频段角度估计误差为 2.3° 、距离估计误差为 0.3 m, 通过多模态辅助将无线电 SLAM 的定位和建图精度分别提升至 0.25 m 和 0.8 m, 为未来开发面向复杂战场、具备更高性能的下一代雷达通信一体化装备奠定了基础。

5 总结与展望

通过硬件共享与信号融合, 雷达通信一体化技术能够有效缓解频谱竞争, 是实现未来多功能、一体化军事电子系统的必然趋势。技术演进从分立式架构走向波形深度融合, 发展出 LFM 嵌入、

OFDM、OTFS 等多样化的一体化信号体制,并结合 MIMO 阵列的运用达到了更好的探测和通信性能。从早期的 USRP 验证平台到现阶段的 5G NR 与多域协同系统,工程实践不断证实了一体化技术从理论走向实用的可行性与巨大潜力。面向未来,雷达通信一体化技术仍面临诸多挑战与发展机遇:

一是理论体系的深化与创新。未来研究需进一步构建更为完备的雷达通信一体化信息理论框架,深刻揭示感知性能(如估计精度、分辨能力等)与通信性能(如信道容量、可靠性)之间的内在权衡关系与统一性能边界。针对多用户、多目标等复杂场景的性能权衡研究仍处于起步阶段,急需突破传统“通信-感知”割裂分析范式。通过雷达通信一体化系统理论的构建,有望明确系统在不同资源配置策略、不同任务负载以及不同环境下的最优运行边界,为后续架构设计、协议制定和算法优化提供更坚实的理论基础。

二是雷达通信一体化的应用将从单一平台向“网络化”“协同化”方向发展。研究多基地、无人机集群等分布式雷达通信一体化网络的协同感知与通信机制,通过时空频多维资源联合调度,实现广域、高精度的协同探测与无缝通信,将是构建未来作战网络的核心。然而,构建网络化雷达通信一体化系统仍面临严峻挑战:一方面,系统需要实现亚米级甚至更高精度的协同定位能力;另一方面,必须实现时钟级别的网络同步,以支持分布式波形参与多节点融合等功能。这些技术成为制约系统发展的瓶颈,也是后续研究亟待突破的方向。

三是智能赋能驱动波形动态重构能力跃升。未来战场复杂对抗的电磁环境中,基于智能赋能的深度强化学习的一体化波形生成与动态重构技术,将成为夺取频谱主导权、实现电磁敏捷性的关键。利用大模型构建从“环境状态-任务需求”到“最优波形参数”的映射,系统可依据实时战场态势动态生成抗干扰、低截获的一体化波形,在通信速率、感知精度、旁瓣电平、峰均比等多重约束下实现智能权衡,从而实现波形自适应。未来需突破小样本学习、强对抗下决策可解释性不足等挑战,推动系统实现能力跨越。

四是大模型驱动的一体化系统向“认知战场”节点演进。通过融合多源情报与电磁频谱态势,大模型可为波形设计与资源调度提供跨域、前瞻性的策略支撑,实现从“信号优化”到“认知博弈”的跨越。但目前仍受限于高质量多模态战场数据获取困难、大模型在战术边缘侧部署难以及

对抗环境下模型安全性与稳定性等瓶颈。未来需聚焦边缘适配的轻量化大模型架构以及具备博弈对抗韧性的决策机制研究,从而将一体化系统真正构建为未来智能化作战体系中的关键认知节点,实现从频谱优势向决策优势的转化。

参考文献 (References)

- [1] 唐波, 汤俊, 胡元奎. 基于 MIMO 阵列的综合射频系统技术研究[J]. 信息对抗技术, 2022, 1(1): 62-72. TANG B, TANG J, HU Y K. Multifunction radio frequency systems based on MIMO array [J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(1): 62-72. (in Chinese)
- [2] 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. LIU F, YUAN W J, YUAN J H, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: overview and prospect[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 467-484. (in Chinese)
- [3] HOWLAND P. Passive radar systems[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(3): 105-106.
- [4] KUSCHEL H, CRISTALLINI D, OLSEN K E. Tutorial: passive radar tutorial[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2019, 34(2): 2-19.
- [5] TANG B, LI J. Spectrally constrained MIMO radar waveform design based on mutual information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(3): 821-834.
- [6] AUBRY A, DE MAIO A, GOVONI M A, et al. On the design of multi-spectrally constrained constant modulus radar signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 2231-2243.
- [7] LI D, TANG B, WANG X Y, et al. Codesign for spectral coexistence between RIS-aided MIMO radar and MIMO communication systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(6): 8166-8183.
- [8] HASSANIEN A, AMIN M G, ABOUTANIOS E, et al. Dual-function radar communication systems: a solution to the spectrum congestion problem[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(5): 115-126.
- [9] ZHENG L, 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.
- [10] ZHANG J A, LIU F, MASOUIROS C, et al. An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1295-1315.
- [11] LIU F, ZHENG L, CUI Y H, et al. Seventy years of radar and communications: the road from separation to integration[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2023, 40(5): 106-121.
- [12] 王先梅, 刘向博, 任语铮, 等. 人工智能驱动的雷达通信一体化研究综述[J]. 雷达学报, 2025, 14(4): 1071-1091. WANG X M, LIU X B, REN Y Z, et al. Review of research on artificial intelligence-driven joint radar communication[J]. Journal of Radars, 2025, 14(4): 1071-1091. (in Chinese)
- [13] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system[J]. IEEE Transactions on

- Space Electronics and Telemetry, 1963, 9(2): 37–42.
- [14] FIDEN W H, CZUBIAK D W. Radar-compatible data link system(U): US7298313B1[P]. 2007–11–20.
- [15] 薛慧, 张昊. 机载多功能综合射频一体化发展研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5): 532–539.
XUE H, ZHANG H. Research on airborne multi-functional RF integration system [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(5): 532–539. (in Chinese)
- [16] MORGAN D R. PAVE PACE: system avionics for the 21st century [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1989, 4(1): 12–22.
- [17] HEMMI C, DOVER R T, VESPA A, et al. Advanced shared aperture program (ASAP) array design [C]//Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996: 278–282.
- [18] TAVIK G C, HILTERBRICK C L, EVINS J B, et al. The advanced multifunction RF concept [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(3): 1009–1020.
- [19] HUGHES P K, CHOE J Y. Overview of advanced multifunction RF system (AMRFS) [C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, 2000: 21–24.
- [20] 姚迪, 赵楠, 杜晓佳. 美军综合集成上层建筑(InTop)演示验证项目探析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(5): 149–153.
YAO D, ZHAO N, DU X J. U. S. naval integrated topside prototype programme [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(5): 149–153. (in Chinese)
- [21] MOLNAR J A, CORRETJER I, TAVIK G. Integrated topside-integration of narrowband and wideband array antennas for shipboard communications [C]//Proceedings of MILCOM Military Communications Conference, 2011: 1802–1807.
- [22] RICHARD S. ONR plans EMC2 technology maturation effort [J]. Jane's International Defense Review, 2015, 49(1): 10.
- [23] PAULRAJ A J, KAILATH T. Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmissi-on/directional reception; US5345599A[P]. 1994–09–06.
- [24] PAULRAJ A J, GORE D A, NABAR R U, et al. An overview of MIMO communications: a key to gigabit wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 198–218.
- [25] LI J, STOICA P. MIMO radar signal processing [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [26] DONG F W, WANG W, LI X, et al. Joint beamforming design for dual-functional MIMO radar and communication systems guaranteeing physical layer security [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2023, 7(1): 537–549.
- [27] SU N C, LIU F, WEI Z X, et al. Secure dual-functional radar-communication transmission; exploiting interference for resilience against target eavesdropping [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(9): 7238–7252.
- [28] TANG B, LI D, WU W J, et al. Dual-function beamforming design for multi-target localization and reliable communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2025, 73: 559–573.
- [29] HAN S F, CHIH-LIN I, XU Z K, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 186–194.
- [30] ALKHATEEB A, EL AYACH O, LEUS G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 831–846.
- [31] WANG Z L, LIU Y W, MU X D, et al. NOMA empowered integrated sensing and communication [J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(3): 677–681.
- [32] LI X H, WU Z Q, CAI Y X, et al. Win-win of communication and sensing security for MC-NOMA ISAC systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(9): 3214–3230.
- [33] WANG X Y, FEI Z S, ZHENG Z, et al. Joint waveform design and passive beamforming for RIS-assisted dual-functional radar-communication system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5): 5131–5136.
- [34] MAGBOOL A, KUMAR V, WU Q Q, et al. A survey on integrated sensing and communication with intelligent metasurfaces: trends, challenges, and opportunities [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025, 6: 7270–7318.
- [35] CHEN K J, QI C H, DOBRE O A, et al. Simultaneous beam training and target sensing in ISAC systems with RIS [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(4): 2696–2710.
- [36] 赵川斌, 张腾宇, 冯源, 等. 面向低空无人机的通感一体化关键技术及原型验证研究 [J]. 物联网学报, 2025, 9(2): 27–38.
ZHAO C B, ZHANG T Y, FENG Y, et al. Key technologies and prototype validation research of integrated sensing and communications for low altitude UAV [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2025, 9(2): 27–38. (in Chinese)
- [37] NOWAK M J, ZHANG Z P, LOMONTE L, et al. Mixed-modulated linear frequency modulated radar-communications [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(2): 313–320.
- [38] 李轩, 周逸潇, 赵尚弘, 等. 基于线性调频的雷达通信一体化波形研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 0500003.
LI X, ZHOU Y X, ZHAO S H, et al. Research progress of integrated radar-communication waveform based on linear frequency modulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0500003. (in Chinese)
- [39] 曾浩, 吉利霞, 李凤, 等. 16QAM-LFM 雷达通信一体化信号设计 [J]. 通信学报, 2020, 41(3): 182–189.
ZENG H, JI L X, LI F, et al. 16QAM-LFM waveform design for integrated radar and communication [J]. Journal on Communications, 2020, 41(3): 182–189. (in Chinese)
- [40] JIAO C Y, LIU X B, QIAO Z Y, et al. Radar communication integrated signal design and processing methods based on amplitude coded modulation [J]. Digital Signal Processing, 2025, 166: 105362.
- [41] LIU Z P, CHEN X B, WANG X M, et al. Communication analysis of integrated waveform based on LFM and MSK [C]//Proceedings of IET International Radar Conference, 2015: 1–5.
- [42] XIE R, LUO K, JIANG T. Waveform design for LFM-MPSK-based integrated radar and communication toward IoT

- applications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(7): 5128–5141.
- [43] ZHANG Q Y, ZHOU Y, ZHANG L R, et al. Application of LFM-CPM signal into a DFRC system based on circulating code array [J]. *Digital Signal Processing*, 2020, 101: 102712.
- [44] CAO Y, YU Q Y. A dual mode multi-beam and integrated CPM-LFM signal for dual-functional radar communication systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(10): 15270–15285.
- [45] CHEN X B, WANG X M, XU S F, et al. A novel radar waveform compatible with communication [C]//*Proceedings of 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, 2011: 177–181.
- [46] DOU Z, ZHONG X K, ZHANG W X. Radar-communication integration based on MSK-LFM spread spectrum signal [J]. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2017, 10(8): 108–117.
- [47] 姜孟超, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种 NLFM-CPM 雷达通信一体化信号设计 [J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(1): 35–42.
- JIANG M C, LIAO G S, YANG Z W, et al. Signal design for integrated radar and communication based on NLFM-CPM [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(1): 35–42. (in Chinese)
- [48] ZHANG Z P, QU Y, WU Z Q, et al. RF steganography via LFM chirp radar signals [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1221–1236.
- [49] 左家骏, 杨瑞娟, 罗少华, 等. TDS-OFDM 雷达通信共享信号波形设计 [J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(5): 9–15.
- ZUO J J, YANG R J, LUO S H, et al. Waveform design of integrated radar and communication signals based on TDS-OFDM [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(5): 9–15. (in Chinese)
- [50] ZHANG Y M, ADITYA S, CLERCKX B. Input distribution optimization in OFDM dual-function radar-communication systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 5258–5273.
- [51] LELLOUCH G, NIKOOKAR H. On the capability of a radar network to support communications [C]//*Proceedings of the 14th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux*, 2007: 1–5.
- [52] WAN Y B, HU Z X, LIU A, et al. OFDM-based multiband sensing for ISAC: resolution limit, algorithm design, and open issues [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2024, 19(2): 51–59.
- [53] XIA X C, FANG Z Y, XU K, et al. An ambiguity-function-assisted active sensing scheme for OFDM-based ISAC systems toward low-altitude airspace [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(12): 19471–19487.
- [54] WANG Y, CAO Y H, YEO T S, et al. Joint sequence optimization-based OFDM waveform design for integrated radar and communication systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(12): 12734–12748.
- [55] HAWKINS H, XU C, YANG L L, et al. IM-OFDM ISAC outperforms OFDM ISAC by combining multiple sensing observations [J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2024, 5: 312–329.
- [56] LI Z H, JIANG X, ZHU B Q. Integrated waveform design via pilot-based OFDM for joint radar and communication system [C]//*Proceedings of 2022 IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, 2022: 969–974.
- [57] DU Z, LIU F, XIONG Y F, et al. Reshaping the ISAC tradeoff under OFDM signaling: a probabilistic constellation shaping approach [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 4782–4797.
- [58] 雍萍, 王杰, 葛俊祥. 基于失配处理的 OFDM 雷达通信一体化共享信号旁瓣抑制技术 [J]. *信号处理*, 2020, 36(10): 1698–1707.
- YONG P, WANG J, GE J X. A novel side-lobe suppression technology for the OFDM-based joint radar and communication waveforms using the mismatching [J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(10): 1698–1707. (in Chinese)
- [59] 张霄霄, 梁兴东, 王杰, 等. 融合失配处理和 LMS 滤波的雷达通信一体化 OFDM 信号距离旁瓣抑制技术 [J]. *信号处理*, 2021, 37(9): 1727–1738.
- ZHANG X X, LIANG X D, WANG J, et al. Range sidelobe suppression using mismatching and LMS adaptive filter for radar communication integrated OFDM signal [J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(9): 1727–1738. (in Chinese)
- [60] MURA S, TAGLIAFERRI D, MIZMIZI M, et al. Optimized waveform design for OFDM-based ISAC systems under limited resource occupancy [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(6): 5241–5254.
- [61] JIANG C Y, YANG G C, HAN R L, et al. Gated dynamic neural network model for digital predistortion of RF power amplifiers with varying transmission configurations [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(8): 3605–3616.
- [62] JIANG C Y, ZHANG Q Q, WANG J S, et al. Complexity-reduced neural network for behavioral modeling and digital predistortion of RF wireless transmitters [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 2532615.
- [63] VENKATESWARLU K, SRAVANYA C, NYALAPOGULA M, et al. Performance analysis of PAPR minimization in OFDM system using clipping, SLM and PTS techniques [J]. *International Journal of Research in Science & Engineering*, 2023, 3(2): 33–45.
- [64] YAO R B, WEI Z Q, SU L Y, et al. Low-PAPR integrated sensing and communication waveform design [C]//*Proceedings of 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2023: 1–6.
- [65] LIU B H, LI J, WANG W, et al. Phase optimization for PAPR reduction in OFDM-LFM-CPM waveform for integrated sensing and communication [C]//*Proceedings of 2024 IEEE 24th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2024: 1304–1308.
- [66] XIAO B, QU W, QIU L, et al. OFDM integrated waveform design for joint radar and communication [J]. *Wireless Networks*, 2024, 30(6): 5425–5436.
- [67] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. OFDM 雷达通信一体化波形相参积累研究 [J]. *信号处理*, 2017, 33(3): 253–259.
- LIU Y J, LIAO G S, YANG Z W. A study for the coherent integration with integrated radar and communication waveform based on OFDM [J]. *Journal of Signal Processing*, 2017, 33(3): 253–259. (in Chinese)
- [68] LIU Y, CHEN M, PAN C H, et al. OTFS versus OFDM;

- which is superior in multiuser LEO satellite communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(1): 139–155.
- [69] YUAN W J, ZHOU L, 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.
- [70] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation based radar system[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2019: 1–6.
- [71] GAUDIO L, KOBAYASHI M, BISSINGER B, et al. Performance analysis of joint radar and communication using OFDM and OTFS [C]//*Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2019: 1–6.
- [72] DAYARATHNA S, SMITH P, SENANAYAKE R, et al. OTFS based joint radar and communication: signal analysis using the ambiguity function[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2024, 31: 919–923.
- [73] CORREAS-SERRANO A, PETROV N, GONZALEZ-HUICI M A, et al. Constant modulus OTFS based on Zak transform of complementary sequences for joint radar and communications[J]. *IEEE Transactions on Radar Systems*, 2025, 3: 1131–1144.
- [74] SONG G B, BAI J H, WANG X Y, et al. Low sidelobe level and PAPR OTFS waveform design for ISAC systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(9): 7952–7966.
- [75] LI M, LIU W, LEI J, et al. Integrated OTFS waveform design based on unified matrix for joint communication and radar system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(18): 29235–29251.
- [76] ZEGRAR S E, BOUDJELAL A A, ARSLAN H. A novel OTFS-chirp waveform for low-complexity multiuser joint sensing and communication[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(8): 10114–10126.
- [77] RAYAN RANASINGHE K R, GE Y, ABREU G, et al. Joint channel estimation and data detection for AFDM receivers with oversampling [C]//*Proceedings of 2025 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2025: 823–828.
- [78] NI Y H, WANG Z L, YUAN P, et al. An AFDM-based integrated sensing and communications[C]//*Proceedings of 2022 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2022: 1–6.
- [79] BEMANI A, KSAIRI N, KOUNTOURIS M. Integrated sensing and communications with affine frequency division multiplexing[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(5): 1255–1259.
- [80] 夏笑天, 宁强, 姚如贵, 等. 基于 OCDM 的通信感知一体化信号 PAPR 抑制方法[J]. *信号处理*, 2024, 40(7): 1218–1226.
- XIA X T, NING Q, YAO R G, et al. PAPR suppression method of integrated sensing and communication signal based on OCDM[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(7): 1218–1226. (in Chinese)
- [81] 王晶琦, 曾欢, 陶詹, 等. 一种基于 OCDM 的新型雷达通信一体化系统[J]. *微波学报*, 2022, 38(6): 14–18.
- WANG J Q, ZENG H, TAO Z, et al. A new radar-communication integrated system based on OCDM [J]. *Journal of Microwaves*, 2022, 38(6): 14–18. (in Chinese)
- [82] SINGH D, KUMAR A, JOSHI H D, et al. Generalized adaptive spreading modulation: a novel waveform for integrated sensing and communication oriented vehicular applications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(18): 29486–29493.
- [83] 何亚萍, 施龙飞, 王东, 等. 探通一体信号设计及其在典型探测场景中的应用研究进展[J]. *雷达学报*, 2025, 14(4): 1046–1070.
- HE Y P, SHI L F, WANG D, et al. Research progress on dual function radar and communication signal design and its application in typical detection scenarios [J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(4): 1046–1070. (in Chinese)
- [84] LU S H, LIU F, LI Y X, et al. Integrated sensing and communications: recent advances and ten open challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(11): 19094–19120.
- [85] XIONG Y F, LIU F, CUI Y H, 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.
- [86] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Signaling strategies for dual-function radar communications: an overview[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 36–45.
- [87] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. A dual function radar-communications system using sidelobe control and waveform diversity [C]//*Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, 2015: 1260–1263.
- [88] 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.
- [89] TANG B, WANG H, QIN L L, et al. Waveform design for dual-function MIMO radar-communication systems [C]//*Proceedings of 2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2020: 1–5.
- [90] LIU F, ZHOU L F, MASOUIROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: optimal waveform design[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(16): 4264–4279.
- [91] CHENG Z Y, LIAO B. QoS-aware hybrid beamforming and DOA estimation in multi-carrier dual-function radar-communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1890–1905.
- [92] NGUYEN N T, NGUYEN L V, SHLEZINGER N, et al. Joint communications and sensing hybrid beamforming design via deep unfolding[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2024, 18(5): 901–916.
- [93] LIU F, LIU Y F, LI A, et al. Cramér-Rao bound optimization for joint radar-communication beamforming [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 240–253.
- [94] ZARGARI S, GALAPPATHTHIGE D, TELLAMBURA C. Low-complexity CRB minimization for ISAC with a generalized target response matrix [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(7): 2234–2238.
- [95] BAZZI A, CHAFII M. Mutual information based pilot design

- for ISAC[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(9): 7914 – 7930.
- [96] WANG X Y, TANG B, WU W J, et al. Relative entropy-based waveform optimization for rician target detection with dual-function radar communication systems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(10): 10718 – 10730.
- [97] TANG B, STOICA P. MIMO multifunction RF systems; detection performance and waveform design [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 4381 – 4394.
- [98] TANG B, HUANG Z, QIN L, et al. Fundamental limits on detection with a dual-function radar communication system[C]//*Proceedings of CIE International Conference on Radar*, 2022; 2862 – 2866.
- [99] ZHAO N, WANG Y L, ZHANG Z B, et al. Joint transmit and receive beamforming design for integrated sensing and communication [J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(3): 662 – 666.
- [100] TSINOS C G, ARORA A, CHATZINOTAS S, et al. Joint transmit waveform and receive filter design for dual-function radar-communication systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(6): 1378 – 1392.
- [101] 吴文俊, 唐波, 汤俊, 等. 杂波环境中雷达通信一体化系统波形设计算法研究[J]. *雷达学报*, 2022, 11(4): 570 – 580.
- WU W J, TANG B, TANG J, et al. Waveform design for dual-function radar-communication systems in clutter [J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(4): 570 – 580. (in Chinese)
- [102] WU W J, TANG B, WANG X Y. Constant-modulus waveform design for dual-function radar-communication systems in the presence of clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(4): 4005 – 4017.
- [103] LI D, TANG B, XUE L. Waveform design for MIMO DFRC systems; finer sensing and safer communications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 4509 – 4524.
- [104] FAN L H, TANG B, HUANG Z R, et al. Designing constant-envelope transmissions for secret communications in MISO wiretap channels [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17791 – 17797.
- [105] WEI Z X, LIU F, MASOUIROS C, et al. Toward multi-functional 6G wireless networks; integrating sensing, communication, and security [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(4): 65 – 71.
- [106] REN Z X, QIU L, XU J, et al. Robust transmit beamforming for secure integrated sensing and communication [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(9): 5549 – 5564.
- [107] CHU J J, LIU R, LI M, et al. Joint secure transmit beamforming designs for integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(4): 4778 – 4791.
- [108] STURM C, ZWICK T, WIESBECK W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations[C]//*Proceedings of VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009: 1 – 5.
- [109] BRAUN M, MÜLLER M, FUHR M, et al. A USRP-based testbed for OFDM-based radar and communication systems[EB/OL]. [2025 – 11 – 04]. https://www.cel.kit.edu/download/BraunMuellerJondral_Symposium2012.pdf.
- [110] MCCORMICK P M, BLUNT S D, METCALF J G. Simultaneous radar and communications emissions from a common aperture, part I: theory[C]//*Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2017: 1685 – 1690.
- [111] MCCORMICK P M, RAVENSCROFT B, BLUNT S D, et al. Simultaneous radar and communication emissions from a common aperture, part II: experimentation [C]//*Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, 2017: 1697 – 1702.
- [112] RAVENSCROFT B, MCCORMICK P M, BLUNT S, et al. Experimental assessment of tandem-hopped radar and communications (THoRaCs) [C]//*Proceedings of 2019 International Radar Conference (RADAR)*, 2019: 1 – 6.
- [113] BAQUERO BARNETO C, RIIHONEN T, TURUNEN M, et al. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: challenges, solutions, and measurements [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(10): 4042 – 4054.
- [114] KUMARI P, MEZGHANI A, HEATH R W. JCR70: a low-complexity millimeter-wave proof-of-concept platform for a fully-digital SIMO joint communication-radar [J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2021, 2: 218 – 234.
- [115] WANG J, LIANG X D, CHEN L Y, et al. Joint wireless communication and high resolution SAR imaging using airborne mimo radar system [C]//*Proceedings of IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2019: 2511 – 2514.
- [116] WANG J, LIANG X D, CHEN L Y, et al. First demonstration of joint wireless communication and high-resolution SAR imaging using airborne MIMO radar system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6619 – 6632.
- [117] MA D Y, SHLEZINGER N, HUANG T Y, 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.
- [118] XU T Y, LIU F, MASOUIROS C, et al. An experimental proof of concept for integrated sensing and communications waveform design [J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1643 – 1655.
- [119] JI K J, ZHANG Q X, WEI Z Q, et al. Networking based ISAC hardware testbed and performance evaluation [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 76 – 82.
- [120] YANG J, QUE H, DU T, et al. ISAC prototype system for multi-domain cooperative communication networks [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(1): 108 – 112.