

方向调制多载波通感一体化波形设计研究

黄高见^{*①②} 张盛壮^① 丁元^③ 廖可非^④ 金双根^② 李兴旺^① 欧阳缙^④

^①(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454003)

^②(河南理工大学测绘与国土信息工程学院 焦作 454003)

^③(Institute of Sensors, Signals and Systems, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS)

^④(桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004)

摘要: 通感一体化(ISAC)利用一种波形实现雷达感知与无线通信两种功能,能够消除雷达与通信电磁互扰,显著提高频谱效率、信息交互效率,已经成为6G潜在关键技术。目前,如何设计ISAC信号波形成为一体化设计广泛研究重点。方向调制(DM)一体化信号波形,因其独特的信号设计特点,能够在一体化信号设计中呈现出天然优势。该文从DM技术出发,介绍DM一体化波形设计理论、优势及挑战,并提出多载波DM一体化信号波形旁瓣干扰抑制机理,分析DM一体化波形参数对安全通信及雷达感知性能影响,为一体化波形在复杂环境中的安全、抗干扰需求设计提供新思路。

关键词: 通感一体化; 方向调制; 物理层安全; 旁瓣干扰抑制

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)02-0640-11

DOI: 10.11999/JEIT250680

CSTR: 32379.14.JEIT250680

1 引言

通感一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)是发展6G的潜在关键技术之一。从雷达研究者角度,ISAC亦称作雷达通信一体化(Joint Radar and Communication, JRC),本质上二者具有共同的优势与类似的挑战^[1]。ISAC利用一种频段波形,在一个硬件平台同时实现无线通信与雷达感知两种功能^[2],其主优势可以归纳为以下几个方面:(1)提高频谱利用效率。6G需满足超大容量、超高速率和低时延等需求,而10 GHz以下频段已十分拥挤。毫米波与太赫兹频段虽具备更大带宽,但其实现依赖智能波束赋形和大规模阵列等先进技术。ISAC通过频谱共享可大幅提升利用率;(2)降低无线通信与雷达电磁互扰。随着IEEE 802通信标准与雷达频段的重叠,通信与雷达互扰日益严重。ISAC共享频段资源,可缓解频谱竞争并消除相互干扰;(3)提高信息交互效率。感知结果可辅助通信定位、跟踪与避障,通信反馈亦能优化雷达参数,从而提升抗干扰与目标识别精度;(4)提高集成度,降低通信、感知系统尺寸和成本。ISAC通过共享传感器、通信和数据处理资源,减少冗余设备与功能模块,从而缩减体积与成本。

尽管优势明显,ISAC仍面临诸多挑战:(1)ISAC体制选择。雷达常用脉冲体制获取距离信息,而通信倾向连续波以保障速率,两者需求存在差异;(2)ISAC波形设计。通信信号随机而雷达信号规则,二者特性冲突,需联合优化或提出新型波形合成与处理算法;(3)ISAC安全和隐私保护。ISAC共用波形,如何保障数据机密性与完整性是关键挑战,需引入多层次安全策略;(4)ISAC能耗和发射功率平衡设计。雷达远距探测需高功率,而通信通常功率较低,如何在近远距离场景下兼顾功耗与覆盖是关键;(5)ISAC硬件设计和标准化。通信与雷达在发射与处理模块上差异显著,需统一架构、接口与标准,并研发低复杂度处理算法。目前,ISAC技术已经引起广泛研究,本文针对ISAC波形设计,提出基于方向调制(Directional

收稿日期: 2025-07-21; 改回日期: 2025-10-25; 网络出版: 2025-11-04

*通信作者: 黄高见 g.huang@hpu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62571182), 中国博士后面上项目(2024M750801), 河南理工大学河南省光电检测与传感集成工程技术研究中心开放课题(KF202505), 河南省科技攻关项目(252102211118), 测绘科学与技术“双一流”学科创建项目高层次研究课题培育项目(GCCYJ202408), 测绘科学与技术“双一流”学科优秀博士、硕士论文发展基金项目(SYSB202506)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62571182), China Postdoctoral Science Foundation (2024M750801), The Opening Project of Henan Province Engineering Technology Research Center for Photoelectric Detection and Sensing Integration, Henan Polytechnic University (KF202505), Henan Scientific and Technological Research Project (252102211118), The Surveying and Mapping Science and Technology Double First-Class Discipline Establishment Project for Nurturing High-level Research Topics (GCCYJ202408), The Surveying and Mapping Science and Technology Double First-Class Discipline Outstanding Doctoral and Master's Thesis Development Fund Project (SYSB202506)

Modulation, DM)的ISAC波形设计方法, 并阐明其优势。

2 通感一体化波形

在ISAC研究领域, 一体化波形设计是其核心问题之一。目前, 一体化波形的研究主要分为以下3类: (1)基于雷达信号的一体化波形; (2)基于通信信号的一体化波形; (3)基于雷达-通信联合设计的一体化波形, 如表1所示。

2.1 基于雷达信号的一体化波形

在基于雷达信号的一体化波形设计中, 最常见的方法是改进和扩展线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号。早期Robertson等人^[3]利用相反斜率LFM区分雷达与通信信号。近年来研究集中于提升通信速率与频谱效率, 如Chen等人^[4]结合最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)与LFM, Liu等人^[5]进一步研究其模糊函数和实现性能。李晓柏等人^[6]基于分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FrFT), 通过不同初始频率的Chirp实现多比特传输。同时, 研究者也探索了多种改进方法。例如, 频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)-FMCW一体化信号^[7]、LFM与连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)结合^[8]以及将索引调制(Index Modulation, IM)引入FMCW系统^[9]。总体而言, 基于LFM的一体化波形旨在保持雷达性能的同时增强通信能力, 但其信息速率仍远低于专用通信系统, 限制了其在高速率场景中的应用。

2.2 基于通信信号的一体化波形

2.2.1 扩频体制

扩频调制利用伪随机码扩频编码, 因其优良自相关特性, 早在无线通信与雷达测距中得到关注。1993年, Mizui等人^[10]提出基于扩频的车-车(Vehicle to Vehicle, V2V)通信与测距系统, 通信端通过PN码解扩获取信息, 雷达端则利用匹配滤波获得距离信息, 该概念在文献[11]中得到硬件验证。随后, Xu等人^[12]提出基于直接序列扩频的一体化系统, 通过不同PN码扩展雷达与通信信号以

避免干扰, 并结合二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)提升通信性能。文献[13]利用Oppermann多相序列实现了兼具理想自相关、互相关特性及良好多普勒容限的信号。针对多用户、多目标干扰问题, 文献[14]提出采用完全互补码的一体化方案, 在多径和多址干扰环境下展现出更优的误码率和频谱效率, 并能探测更多目标。然而, 扩频信号在目标测速时计算量较大, 是其在一体化应用中的主要劣势。

2.2.2 OFDM 体制

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM)作为一种高效的多载波传输技术, 因其抗多径干扰、频谱利用率高和易于实现等优点, 被广泛应用于通信系统中^[15]。2000年, Levanon^[16]将其引入雷达设计, 随后大量研究聚焦于OFDM信号的一体化应用。2010年, Sturm等人^[17]提出基于OFDM的ISAC波形, 并提出了频域二维快速傅里叶变换(Two-Dimensional Fast Fourier Transform, 2-D FFT)处理方法, 用于目标距离和速度估计。为提升分辨率, 文献[18]通过增加子载波数量扩大系统带宽, 从而提高距离分辨率和探测精度。文献[19]进一步提出在单个脉冲内发送多个OFDM符号, 并分析了其模糊函数特性。考虑到OFDM信号存在高峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)问题, 文献[20]提出结合IM的OFDM一体化系统, 通过仅激活部分子载波降低PAPR以提高功放效率, 并结合压缩感知与2-D FFT获取目标参数。综上, 基于OFDM的一体化波形可直接利用通信信号实现目标距离和速度估计, 展现出突出的应用优势。

2.2.3 OTFS 体制

在高速环境中, OFDM因多普勒敏感而易受载波间干扰, 导致通信性能下降, 且子载波间隔限制了高速目标的多普勒估计, 难以适应高多普勒扩展信道。为此, Hadani等人^[21]提出了正交时频空(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制技术。该技术在时延-多普勒域进行信号处理, 对多普勒频移具有更强的鲁棒性, 更适合高机动性信

表1 ISAC波形设计方法的分类与比较

一体化波形分类	典型波形	优点	缺点
基于雷达信号	LFM	波形恒模、大带宽	通信数据速率低
	扩频	发射功率容忍度高、多址通信	测速计算量大
基于通信信号	OFDM	抗多径干扰能力强、频谱利用率高、易于实现	高速场景下多普勒容忍差
	OTFS	适用于高速场景	复杂度高
基于雷达-通信联合设计	设计新型波形	雷达和通信性能折中	复杂度高, 硬件实现复杂

道,因此在ISAC领域受到广泛关注^[22,23]。然而,OTFS在ISAC中的应用仍面临挑战,如信道估计复杂度、同步要求严格以及硬件实现困难。从工程角度来看,OTFS的普及和应用仍需进一步研究。

2.3 基于雷达-通信联合设计的一体化波形

基于雷达-通信联合设计的ISAC波形是通过重新设计新体制波形,在兼顾感知与通信双功能及约束条件下,通过优化手段实现性能平衡^[24]。该方法通常以特定性能指标为目标函数,在感知与通信间建立联合优化关系。例如,通过联合波束赋形以保证通信用户信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)并提升雷达增益^[25],以及在SINR约束下最小化克拉美罗界的低复杂度算法^[26]。这些方法均体现了基于优化算法的一体化波形设计思路,但往往计算开销大且缺乏硬件支撑,因此在工程实践中仍具挑战。

ISAC波形各具优势与局限。由于OFDM在通信与感知方面均表现突出,因此在ISAC中得到广泛应用,但兼顾通信与感知仍具挑战。近年来,

DM被引入ISAC以增强传输安全性并辅助方位估计^[27],尤其OFDM-DM波形在兼顾高数据速率的同时还能抑制旁瓣干扰^[28],为通信与感知性能的平衡开辟了新的思路,由于DM属于通信技术,因此基于DM的多载波一体化信号可归类于基于通信信号的一体化波形。

3 方向调制概念与基础

DM是一种物理层安全技术,通过天线阵列将通信信息定向投射至合法用户方向,并在其他方向扭曲信号星座格式以提升安全性^[29]。因此,合法用户可正常解调,而窃听者因信号畸变无法获取信息。DM技术面临的主要挑战之一是缺乏有效的信号合成方法。目前,常见的DM信号合成方法主要有3种,如表2所示:(1)基于可重构天线阵列的合成方法;(2)基于可重构天线激励的合成方法;(3)自由合成(Synthesis-free)的设计方法。下面将分别对这3类方法进行简要介绍,并说明其设计特点。

表2 典型DM合成方法分类与比较

合成方式	天线类型	贡献	参考文献
基于可重构天线阵列的设计方法	近场直接天线调制	引入了方向性安全传输的概念	[30]
基于可重构天线激励的设计方法	相控阵	使用相控阵合成DM波形	[31]
	相控阵	方向调制的矢量表示,正交矢量法	[29]
自由合成的设计方法	方向回溯天线	多径接收	[32]
	傅里叶罗特曼透镜	实时数据传输,双波束独立传输信息	[33]
	TMA	OFDM-DM	[34]

3.1 基于可重构天线阵列的设计方法

利用可重构天线阵列,通过合理设计近场特性能够实现DM通信。典型方法为近场直接天线调制(Near-Field Direct Antenna Modulation, NFDAM),其结构由大量耦合至中心驱动天线近场的可重构无源反射器组成^[30],如图1所示。该方法利用反射阵列产生波束与驱动天线主波束叠加,在期望方向形成标准调制星座,在其他方向则产生畸变。然而,NFDAM需大量寄生阵元且近场电磁边界复杂,限制了其在射频系统中的应用。

3.2 基于可重构天线激励的设计方法

利用阵列天线的输入激励,根据符号变换速率动态设计其输入激励,能够实现DM通信。例如基于相控阵的合成方法^[31]以调制速率切换相移器在期望方向形成信息符号,其波束形成网络可以通过模拟或者数字电路实现,如图2所示。此外,利用人工噪声在合法用户与窃听者信道的零空间中生成正交矢量,也可合成DM信号,如正交矢量DM^[29]。

3.3 自由合成设计方法

“自由合成”DM方案是指无须计算阵列激励,仅通过硬件设计实现DM功能。典型实现方式包括利用方向回溯天线^[32]、傅里叶罗特曼透镜^[33]以及时间调制阵列(Time Modulated Array, TMA)^[34]等。其中,利用TMA,不仅射频链路简单并且可以合成多载波DM符号,展现出良好的性能。例如三态TMA OFDM-DM^[34],其设计过程如图3(a)所示。在三态TMA OFDM-DM合成网络中,输入的OFDM信号经功率分配器分成 N 路。其中,每路信

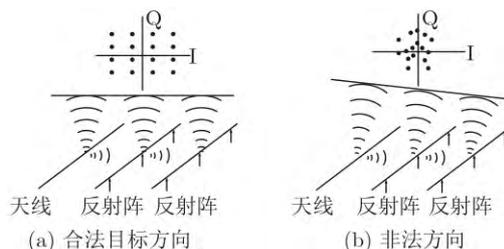


图1 近场直接天线调制信号星座示意图^[30]

号通过移相器 ϕ_n 和三态射频开关，开关的状态分别为闭合、断开和翻转，分别对应逻辑值“1”，“0”和“-1”，其中“-1”表示相位偏移为 π 。再由间距 $d = \lambda/2$ 的 N 元均匀线性阵列发射，其中 λ 为初始频率 f_0 对应的波长。OFDM信号可表示为

$$s(t) = \sum_{\mu=0}^{N_{\text{sym}}-1} \sum_{\eta=0}^{N_c-1} a(\mu N_c + \eta) e^{j2\pi(f_0 + \eta f_p)t} \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_p}{T_p}\right) \quad (1)$$

其中， N_{sym} 表示OFDM符号数， μ 表示OFDM符号索引； N_c 表示子载波数， η 表示子载波索引； $a(\mu N_c + \eta)$ 表示第 η 个子载波上第 μ 个符号； f_p 表示

$$x(\theta, t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot s(t) \cdot \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \left\{ e^{j2\pi q f_p t} \left[\sum_{n=1}^N e^{-jq\pi(2\sigma_n^s + \Delta\sigma_n^{(1)})} \left(\frac{\sin(q\pi\Delta\sigma_n^{(1)})}{q\pi} - \frac{\sin(q\pi\Delta\sigma_n^{(2)})}{q\pi} e^{-jq\pi(\Delta\sigma_n^{(1)} + \Delta\sigma_n^{(2)})} \right) \right] \cdot e^{j(n-1)\pi(\cos\theta - \cos\theta_0)} \right\} \cdot V(q, N, \Delta\sigma_n^{(1)}, \Delta\sigma_n^{(2)}, \sigma_n^s, t, \theta) \quad (3)$$

子载波间隔； $\text{rect}(t/T_p)$ 表示长度为 T_p 的窗函数。经过DM合成网络并通过天线阵列发射的信号可表示为

$$x(\theta, t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \left(s(t) \cdot e^{j\phi_n} \cdot U_n(t) \cdot e^{j(n-1)\pi\cos\theta} \right) \quad (2)$$

其中， θ 表示信号波束与天线水平线的夹角， $\theta \in [0, \pi]$ ； ϕ_n 表示第 n 个天线支路的相位延迟，为了使波束指向安全用户方向 θ_0 ，应配置 $\phi_n = -(n-1)\pi\cos\theta_0$ 。 $U_n(t)$ 为第 n 个三态射频开关在周期 T_p 下的时域序列，其波形如图3(b)所示。由于 $U_n(t)$ 是周期函数，可用傅里叶级数展开，因此式(2)可写为

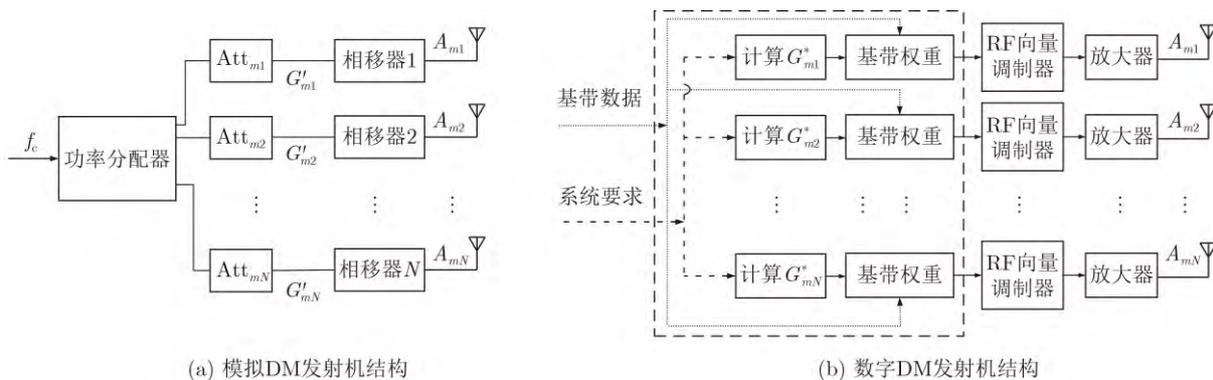


图2 通用模拟和数字DM发射机架构

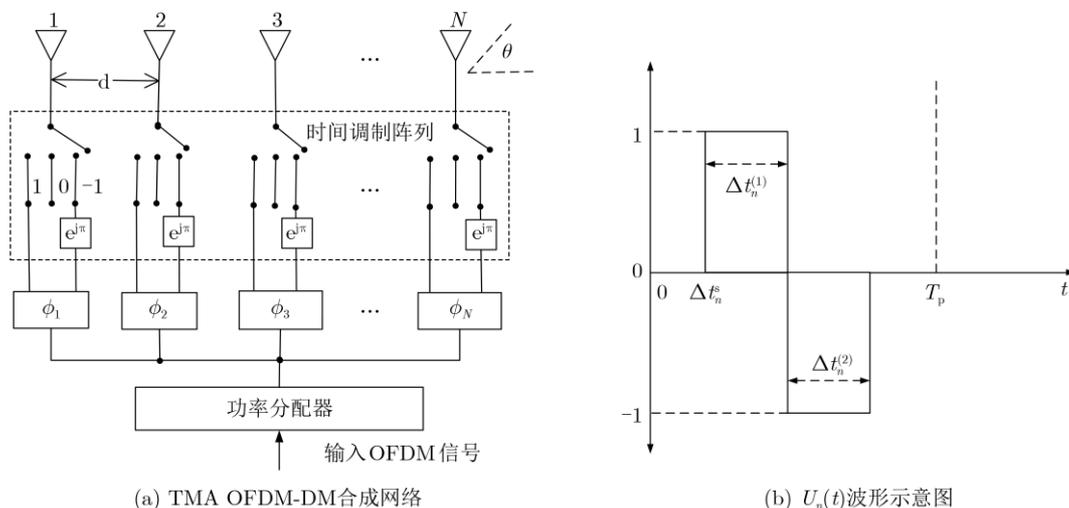


图3 TMA OFDM-DM合成网络与 $U_n(t)$ 波形示意图

其中， $\Delta\sigma_n^{(1)} = \Delta t_n^{(1)}/T_p$ ， $\Delta\sigma_n^{(2)} = \Delta t_n^{(2)}/T_p$ ， $\sigma_n^s = t_n^s/T_p$ 。 t_n^s 表示TMA开启状态“1”的时刻， $\Delta t_n^{(1)}$ 和 $\Delta t_n^{(2)}$ 分别表示状态“1”和“-1”的持续时间。实现 θ_0 方向上合法通信的条件为

$$\left. \begin{aligned} V(q \neq 0, N, \Delta\sigma_n^{(1)}, \Delta\sigma_n^{(2)}, \sigma_n^s, t, \theta_0) &= 0 \\ V(q = 0, N, \Delta\sigma_n^{(1)}, \Delta\sigma_n^{(2)}, \sigma_n^s, t, \theta_0) &\neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于式(4)所示条件的一组解为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_n^{(1)} &\neq \Delta\sigma_n^{(2)}, \Delta\sigma_n^{(1)}, \Delta\sigma_n^{(2)}, \\ \sigma_n^s &\in \left\{ \frac{w-1}{N} \mid w = 1, 2, \dots, N \right\} \\ \sigma_i^s &\neq \sigma_j^s, \Delta\sigma_i^{(1)} = \Delta\sigma_j^{(1)}, \Delta\sigma_i^{(2)} = \Delta\sigma_j^{(2)}, \\ &\text{当 } i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

假设 $\Delta\sigma_n^{(1)}$ 和 $\Delta\sigma_n^{(2)}$ 独立于 n ，那么 $\Delta\sigma_n^{(1)}$ 和 $\Delta\sigma_n^{(2)}$ 分别可以表示为 $\Delta\sigma^{(1)}$ 和 $\Delta\sigma^{(2)}$ 。因此，在 θ_0 方向上的接收到的信号为 $x(\theta_0, t) = \sqrt{N}\xi s(t)$ ，其中 $\xi = |\Delta\sigma^{(1)} - \Delta\sigma^{(2)}|$ 表示增益控制因子，是一个常数增益。然而，在非安全通信方向(即 $\theta \neq \theta_0$)时，第 μ 个OFDM信号在第 $x(x = 1, 2, \dots, N_c)$ 个子载波可以表示为

$$x_\mu(\theta, t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{\eta=0}^{N_c-1} \left[a(\mu N_c + \eta) e^{j2\pi(f_0 + \eta f_p)t} \cdot V(q = x - \eta, N, \Delta\sigma^{(1)}, \Delta\sigma^{(2)}, \sigma_n^s, t, \theta) \right] \quad (6)$$

由式(6)可以发现，当非目标方向上(即 $\theta \neq \theta_0$)的窃听者试图解调第 x 子载波时，会得到一个干扰信号。具体来说，第 x 个子载波携带的信号是 N_c 个原始子载波分别与函数 $V(\cdot)$ 相乘然后叠加得到的，致使数据符号成为杂乱的干扰信号，导致无法正确解码信息。

4 方向调制通感一体化波形设计理论

将OFDM-DM信号应用于V2V ISAC系统，可以实现高速率与较高的距离分辨率，并且能够抑制

非目标方向干扰。其应用场景如图4所示，车辆#1通过发送OFDM-DM ISAC信号向车辆#2传递通信信息，同时利用车辆#2的反射回波信号获取目标信息，包括距离、速度和方位等参数。需要注意的是，反射信号不仅包含目标的回波信号，还可能包括来自非目标方向的干扰信号。其中，图中DM合成网络结构如图3所示。

4.1 一体化波形方位角估计原理

在传统OFDM ISAC系统中，方位角估计常采用多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)算法，但其计算量较大；而在OFDM-DM ISAC系统中，采用收发同置部署方式，可通过计算雷达接收端的误比特率(Bit Error Rate, BER)获取方位角信息。其原理是利用DM信号特点，在接收端对目标回波信号进行解调并计算BER，在空域中，BER主瓣方向可以表征目标方位角。图5展示了OFDM-DM一体化波形与OFDM波形BER指示方位角特点，其中，仿真中调制方式采用正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)，系统参数设置如下： $N = 16$ ， $N_c = 1024$ ， $N_{\text{sym}} = 256$ ， $T_p = 11 \mu\text{s}$ ， $\text{SNR} = 23 \text{ dB}$ ， $\theta_0 = 90^\circ$ ， $\Delta\sigma^{(1)} = 13/16$ ， $\Delta\sigma^{(2)} = 15/16$ ，即 $\xi = 2/16$ 。可以发现，利用OFDM-DM波形，其接收端的BER主瓣能够指示目标方位角；相比之下，传统OFDM ISAC波形，其回波BER旁瓣较高，影响主瓣估计正确性，因此，难以利用其BER主瓣估计目标。

4.2 OFDM-DM ISAC干扰抑制机理

在图4所示场景中，车辆#1发射ISAC信号，会接收来自目标车辆#2和干扰车辆#3和车辆#4的反射回波信号。设目标与干扰车辆的距离分别为 R_0 和 R_{inter} ，则车辆#1接收到的信号可以表示为

$$y(\theta_0, \theta_{\text{inter}}, t) = \alpha_1 y_0(\theta_0, t) + \alpha_2 y_{\text{inter}}(\theta_{\text{inter}}, t) \quad (7)$$

其中， α_1 和 α_2 表示衰减系数， θ_0 和 θ_{inter} 分别表示目标车辆和干扰车辆的方位角。 $y_0(\theta_0, t)$ 和 $y_{\text{inter}}(\theta_{\text{inter}}, t)$ 分别表示来自目标和干扰源的反射信号，其表达式为

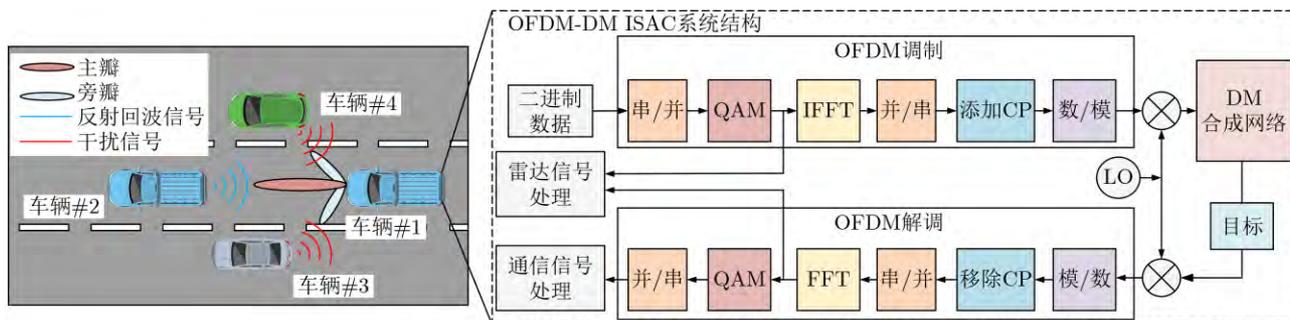


图4 OFDM-DM ISAC应用场景以及系统架构

$$y_0(\theta_0, t) = \sqrt{N}\xi \cdot \sum_{\mu=0}^{N_{\text{sym}}-1} e^{j2\pi f_D^0 t} \sum_{\eta=0}^{N_c-1} a(\mu N_c + \eta) \cdot e^{j2\pi(f_0 + \eta f_p)(t - \frac{2R_0}{c})} \quad (8)$$

和

$$\begin{aligned} y_{\text{inter}}(\theta_{\text{inter}}, t) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{\mu=0}^{N_{\text{sym}}-1} e^{j2\pi f_D^{\text{inter}} t} \\ &\cdot \sum_{\eta=0}^{N_c-1} \left[a(\mu N_c + \eta) \cdot e^{j2\pi(f_0 + \eta f_p)(t - \frac{2R_{\text{inter}}}{c})} \right. \\ &\cdot V\left(q = x - \eta, N, \Delta\sigma^{(1)}, \Delta\sigma^{(2)}, \sigma_n^s, \right. \\ &\left. \left. t - \frac{2R_{\text{inter}}}{c}, \theta_{\text{inter}} \right) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

其中, f_D^0 和 f_D^{inter} 分别表示目标与干扰源相对速度引起的多普勒频移, c 为自由空间中的电磁波传播速度。

4.2.1 时域相关算法

在时域利用相关算法, 计算接收信号 $y(\theta_0, \theta_{\text{inter}}, t)$ 与发射端 $s(t)$ 的互相关函数估计目标的距离 (这里假设目标静止)。互相关函数 $r_{ys}(\theta_0, \theta_{\text{inter}}, \tau)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} r_{ys}(\theta_0, \theta_{\text{inter}}, \tau) &= \int_0^{\infty} y_0(\theta_0, t) s^*(t - \tau) dt \\ &+ \int_0^{\infty} y_{\text{inter}}(\theta_{\text{inter}}, t) s^*(t - \tau) dt \\ &= \alpha_1 \sqrt{N}\xi \cdot \int_0^{\infty} s\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) s^*(t - \tau) dt \\ &+ \frac{\alpha_2}{\sqrt{N}} \int_0^{\infty} \left[s\left(t - \frac{2R_{\text{inter}}}{c}\right) \right. \\ &\cdot s^*(t - \tau) \\ &\cdot \sum_{q=-\infty}^{\infty} V\left(q, N, \Delta\sigma^{(1)}, \Delta\sigma^{(2)}, \right. \\ &\left. \left. \sigma_n^s, t - \frac{2R_{\text{inter}}}{c}, \theta_{\text{inter}} \right) \right] dt \quad (10) \end{aligned}$$

由式(10)可以发现, 在目标方向 θ_0 , $y_0(\theta_0, t)$ 是 $s(t)$ 信号的变形, 利用相关处理算法, 会出现峰值, 能够检测目标; 而在非目标方向 θ_{inter} , 因受到 $V(\cdot)$ 函数干扰, $y_{\text{inter}}(\theta_{\text{inter}}, t)$ 变成随机信号, 导致与 $s(t)$ 的互相关值很低, 从而实现抑制干扰的效果。

利用时域相关算法, 目标雷达距离剖面图如图6所示, 仿真参数设置为: $N_c = 1024$, $N_{\text{sym}} =$

256, SNR = 23 dB, $T_p = 11 \mu\text{s}$; $\Delta\sigma^{(1)} = 1/16$, $\Delta\sigma^{(2)} = 15/16$, 即 $\xi = 14/16$; $\theta_0 = 90^\circ$, $R_0 = 45 \text{ m}$, $\theta_{\text{inter}1} = 30^\circ$, $R_{\text{inter}1} = 30 \text{ m}$; $\theta_{\text{inter}2} = 120^\circ$, $R_{\text{inter}2} = 15 \text{ m}$ 。从图6中可以发现, OFDM ISAC和OFDM-DM ISAC方案都在45 m处出现峰值, 这表明两种波形方案都能获得目标距离信息。然而, 在OFDM ISAC方案中, 可以观察到在30 m和15 m距离处出现了约-7 dB和-5 dB的峰值, 这表明传统的OFDM ISAC无法抑制非目标方向干扰, 致使目标估计出现模糊。而在OFDM-DM ISAC方案中, 在30 m和15 m处旁瓣均显示低值, 表明干扰车辆#3和车辆#4反射的干扰回波被有效抑制, 从而提高目标感知精度。

4.2.2 频域2-D FFT算法

在频域利用2-D FFT方法可同时估计目标距离和速度, 利用该方法首先对接收符号矩阵进行逐项复除法(Element-Wise Complex Division, EWCD), 从接收到的反向散射信号中去除发送的调制符号。经过EWCD之后所得矩阵 D_{div} 包含目标和干扰源位置信息, 可表示为

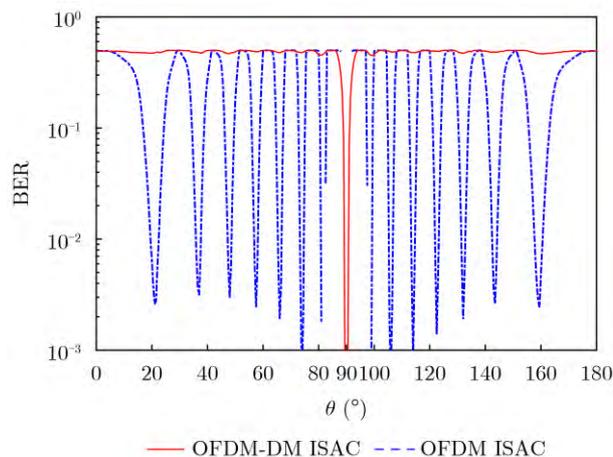


图5 OFDM-DM ISAC与OFDM ISAC方案BER对比

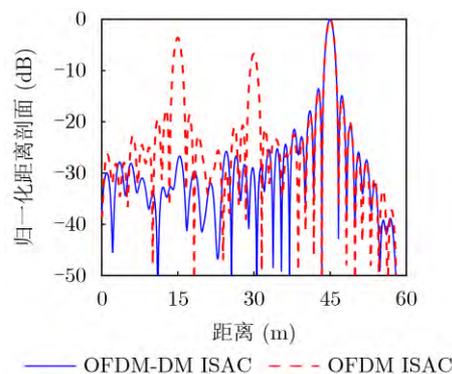


图6 时域相关算法下OFDM和OFDM-DM ISAC的雷达距离剖面图

$$\mathbf{D}_{\text{div}} = \alpha_1 \sqrt{N} \xi \cdot (\mathbf{w}_R^0 \otimes \mathbf{w}_D^0) + \alpha_2 \mathbf{D}_{\text{inter}} \odot (\mathbf{w}_R^{\text{inter}} \otimes \mathbf{w}_D^{\text{inter}}) \quad (11)$$

其中, \otimes 为张量积, \odot 为Hadamard积, 此外 \mathbf{w}_R^0 和 $\mathbf{w}_R^{\text{inter}}$ 分别表示目标和干扰源的距离矢量, 其中第 η 个元素分别可以记作 $e^{-j2\pi\eta f_p(2R_0/c)}$ 和 $e^{-j2\pi\eta f_p(2R_{\text{inter}}/c)}$, \mathbf{w}_D^0 和 $\mathbf{w}_D^{\text{inter}}$ 分别表示目标和干扰源的速度矢量, 其中第 μ 个元素分别可以记作 $e^{j2\pi\mu T_p(2v_0 f_0/c)}$ 和 $e^{j2\pi\mu T_p(2v_{\text{inter}} f_0/c)}$, v_0 和 v_{inter} 表示目标和干扰源的相对速度。矩阵 $\mathbf{D}_{\text{inter}}$ 中位于第 η 行第 μ 列元素 $(d_{\text{inter}})_{\eta,\mu}$ 可以表示为

$$(d_{\text{inter}})_{\eta,\mu} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{q=0}^{N_c-1} \left[V \left(q = x - \eta, N, \Delta\sigma^{(1)}, \Delta\sigma^{(2)}, \sigma_n^s, t - \frac{2R_{\text{inter}}}{c}, \theta_{\text{inter}} \right) a(\mu N_c + \eta) \right] \right\} / a(\mu N_c + \eta) \quad (12)$$

将式(12)、 $\mathbf{w}_R^{\text{inter}}$ 和 $\mathbf{w}_D^{\text{inter}}$ 代入式(11)进行2-D FFT算法处理, 能够发现干扰源受到 $\mathbf{D}_{\text{inter}}$ 的影响会被有效抑制。本质上是因为OFDM-DM波形在信号结构中引入了特定失真, 进一步能够抑制干扰源的位置信息。

图7展示了在存在干扰的V2V应用场景下, 基于2-D FFT方法获得的目标距离-相对速度雷达达成

像结果。具体仿真参数设置为: $N_c = 1024$, $N_{\text{sym}} = 256$, $\text{SNR} = 23 \text{ dB}$, $T_p = 11 \mu\text{s}$; $\Delta\sigma^{(1)} = 1/16$, $\Delta\sigma^{(2)} = 15/16$, 即 $\xi = 14/16$; $R_0 = 30 \text{ m}$, $v_0 = 20 \text{ m/s}$, $\theta_0 = 90^\circ$; $R_{\text{inter}1} = 40 \text{ m}$, $v_{\text{inter}1} = 20 \text{ m/s}$, $\theta_{\text{inter}1} = 30^\circ$; $R_{\text{inter}2} = 30 \text{ m}$, $v_{\text{inter}2} = 30 \text{ m/s}$, $\theta_{\text{inter}2} = 120^\circ$ 。从图7(a)可以观察到, 在采用OFDM-DM ISAC方案时, 目标的距离和速度均能够被准确估计, 表现出良好的成像性能。而在图7(b)中, 采用传统OFDM ISAC方案时, 由于干扰的存在, 目标特征出现模糊现象, 导致雷达成像失真, 从而降低了感知功能的精度。为了进一步说明OFDM-DM ISAC系统的干扰抑制能力, 图8分别给出了固定速度 $v = 20 \text{ m/s}$ 时得到的一维距离曲线以及对应距离 $R = 30 \text{ m}$ 时得到的速度曲线。可以发现, 相比于传统OFDM ISAC方案, OFDM-DM ISAC方案在距离与速度剖面中均仅出现一个明显的目标峰值, 而干扰位置的归一化幅值约为 -35 dB 。这一结果表明, OFDM-DM ISAC方案能够显著抑制干扰源回波。

4.3 OFDM-DM ISAC信号特征

可以发现, OFDM-DM ISAC信号在提高目标感知与通信性能方面展现出独特优势, 该类信号在提升系统性能、安全性以及工程实现可行性方面具

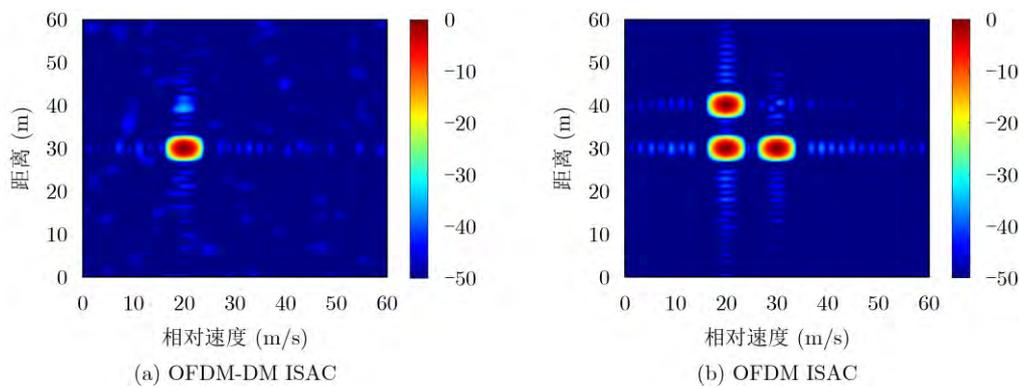


图7 2-D FFT方法获得的目标距离-相对速度二维雷达像

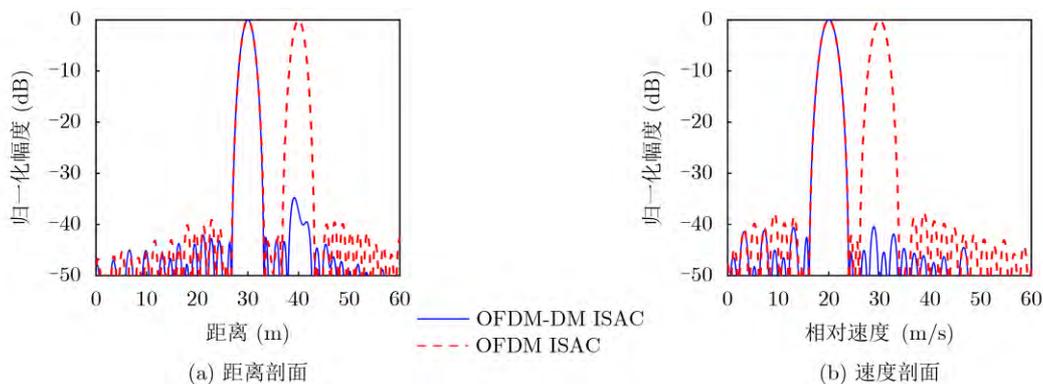


图8 2-D FFT方法获得的目标距离-相对速度雷达像剖面图

有重要潜力，其主要优势可归纳如下：(1)旁瓣干扰自动抑制。传统ISAC信号在感知过程中存在明显的旁瓣回波，易导致多目标干扰和目标模糊，从而影响感知精度。OFDM-DM ISAC信号通过方向调制的角度选择性辐射图，在信号构造阶段实现对非法方向信息泄露的抑制，进而实现对旁瓣干扰的内生性自动抑制，显著提升了目标分辨能力；(2)抑制非法方向窃听合法目标信息。OFDM-DM ISAC信号继承了DM信号的特点，能够在合法接收方向上维持完整的星座图结构，而在非法接收方向上引入随机扰动，导致星座点混乱。该特性有效破坏了非法方向的信息解调能力，从而提升了物理层安全性，为感知和通信过程中的敏感信息提供天然加密保护；(3)不需要消耗额外的计算资源。相较于传统ISAC系统中通过复杂加密与干扰消除算法实现安全与抗干扰能力的方式，OFDM-DM ISAC信号利用物理层特性实现对非法接收与干扰信号的自动抑制，显著降低了对计算资源和处理单元的依赖，有利于在资源受限平台上的高效部署；(4)兼容现有OFDM硬件实现模组。OFDM-DM ISAC信号在构造上保留了传统OFDM信号的框架，不需要对底层硬件结构进行大幅度修改，具备良好的软硬件兼容性。通过在已有OFDM基带信号中引入方向调制处理模块，便可实现通感一体化功能，有效降低部署成本并加速系统的工程转化进程。

尽管OFDM-DM ISAC信号在理论与仿真层面取得了初步成果，但在实际应用和大规模部署过程中，仍面临以下关键挑战与待解决问题：(1)多目标/多用户场景下的信号设计挑战：实际应用中常常涉及多个通信用户或多个感知目标，对信号的空间分辨与多波束能力提出更高要求。如何在OFDM-DM框架下高效构造多波束调制信号，同时避免波束间干扰、保持通信质量和感知精度，是当前研究中的一大难点；(2)OFDM通信速率与雷达探测距离之间的矛盾：在OFDM-DM ISAC中，提升通信速率通常需要提高子载波间隔，而探测远距离目标则要求保持较高时间分辨率。如何在时频资源受限条件下协调通信速率与感知性能之间的矛盾，需要深入研究波形优化与系统资源分配机制；(3)专用硬件架构的缺失：目前大多数关于DM ISAC的研究仍停留在算法设计与理论分析层面，缺乏系统化的硬件验证平台。为了推动技术落地，亟需开发支持DM与OFDM协同处理的定制化一体化硬件架构，包括通感共用射频前端设计、低复杂度方向调制实现单元以及统一的ISAC硬件标准接口。

5 结束语

本文提出了OFDM-DM ISAC波形，并系统分析了其在感知与通信双重功能中的优势特性。该波形能够自动抑制非目标方向的干扰信号，有效消除传统ISAC系统中存在的目标模糊问题，从而显著提升了感知精度。同时，该波形继承了DM技术的空间选择性特性，使得信息仅能在合法目标方向上被正确解调，非法方向则无法恢复有效信息，从而在物理层实现了本质安全。与现有多种ISAC信号处理技术相比，本文所提出的OFDM-DM ISAC波形无须额外计算资源即可实现信息安全与干扰抑制的协同优化，为资源受限平台提供了一种轻量级、高性能的波形设计方案。因此，OFDM-DM ISAC波形不仅实现了高精度雷达感知，同时兼顾了通信安全性与硬件可实现性，为多载波ISAC信号的设计提供了全新思路。

参考文献

- [1] LU Shihang, LIU Fan, LI Yunxin, *et al.* Integrated sensing and communications: Recent advances and ten open challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(11): 19094–19120. doi: 10.1109/JIOT.2024.3361173.
- [2] 林粤伟, 张奇勋, 尉志青, 等. 通信感知一体化硬件设计——现状与展望[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(1): 1–21. doi: 10.11999/JEIT240012.
LIN Yuewei, ZHANG Qixun, WEI Zhiqing, *et al.* Status and prospect of hardware design on integrated sensing and communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(1): 1–21. doi: 10.11999/JEIT240012.
- [3] 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.
- [4] CHEN Xiaobo, WANG Xiaomo, ZHANG Zhao, *et al.* A communication with LFM carrier modulated by MSK scheme[C]. *IEEE ICCP2012*, Nanjing, China, 2012: 461–463.
- [5] LIU Zhipeng, CHEN Xiaobo, WANG Xiaomo, *et al.* Communication analysis of integrated waveform based on LFM and MSK[C]. *IET International Radar Conference 2015*, Hangzhou, China, 2015: 1–5. doi: 10.1049/cp.2015.1017.
- [6] 李晓柏, 杨瑞娟, 陈新永, 等. 基于分数阶傅里叶变换的雷达通信一体化信号共享研究[J]. *信号处理*, 2012, 28(4): 487–494. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2012.04.004.
LI Xiaobai, YANG Ruijuan, CHEN Xinyong, *et al.* The sharing signal for integrated radar and communication based on FRFT[J]. *Journal of Signal Processing*, 2012,

- 28(4): 487–494. doi: 10.3969/j.issn.1003-0530.2012.04.004.
- [7] FAGHIIH-NAINI S, SCHNEIDER M, PETERS S, *et al.* Combining an FMCW radar system with FSK modulation to a joint communication and sensing system[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2025, 17(2): 381–388. doi: 10.1017/S1759078725000121.
- [8] CAO Yu and YU Qiyue. 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. doi: 10.1109/TVT.2024.3412711.
- [9] 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.
- [10] MIZUI K, UCHIDA M, and NAKAGAWA M. Vehicle-to-vehicle communication and ranging system using spread spectrum technique (Proposal of Boomerang Transmission System)[C]. IEEE 43rd Vehicular Technology Conference, Secaucus, USA, 1993: 335–338. doi: 10.1109/VETEC.1993.507206.
- [11] UCHIDA M, KAGAWA Y, and OKUNO A. A vehicle-to-vehicle communication and ranging system based on spread spectrum technique-SS communication radar[C]. VNIS'94 - 1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Yokohama, Japan, 1994: 169–174. doi: 10.1109/VNIS.1994.396845.
- [12] XU Shaojian, CHEN Bing, and ZHANG Ping. Radar-communication integration based on DSSS techniques[C]. 2006 8th International Conference on Signal Processing, Guilin, China, 2006: 16–20. doi: 10.1109/ICOSP.2006.346041.
- [13] JAMIL M, ZEPERNICK H, and PETERSSON M. On integrated radar and communication systems using Oppermann sequences[C]. MILCOM 2008-2008 IEEE Military Communications Conference, San Diego, USA, 2008: 1–6. doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753277.
- [14] 赵羚岚, 杨奕冉, 刘喜庆, 等. 基于完全互补码扩频的通信雷达一体化系统[J]. *无线电通信技术*, 2023, 49(1): 118–125. doi: 10.3969/j.issn.1003-3114.2023.01.014.
- ZHAO Linglan, YANG Yiran, LIU Xiqing, *et al.* Integrated communication and radar system based on complete complementary code spread spectrum[J]. *Radio Communications Technology*, 2023, 49(1): 118–125. doi: 10.3969/j.issn.1003-3114.2023.01.014.
- [15] 叶子豪, 鄢社锋, 杨斌斌. 基于子载波间干扰深度估计的 MIMO-OFDM 水声通信接收机[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(7): 2519–2527. doi: 10.11999/JEIT220794.
- YE Zihao, YAN Shefeng, and YANG Binbin. MIMO-OFDM underwater acoustic communication receiver based on intercarrier interference depth estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(7): 2519–2527. doi: 10.11999/JEIT220794.
- [16] LEVANON N. Multifrequency complementary phase-coded radar signal[J]. *IEEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2000, 147(6): 276–284. doi: 10.1049/ip-rsn:20000734.
- [17] 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.
- [18] 韩潇弘毅, 鲍蕾蕾, 杨瑞娟, 等. 基于 OFDM 雷达通信共享信号性能分析[J]. *空军预警学院学报*, 2013, 27(4): 270–274. doi: 10.3969/j.issn.2095-5839.2013.04.011.
- HAN Xiaohongyi, BAO Leilei, YANG Ruijuan, *et al.* Performance analysis of radar and communication signals sharing based on OFDM[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2013, 27(4): 270–274. doi: 10.3969/j.issn.2095-5839.2013.04.011.
- [19] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. 基于 OFDM 的雷达通信一体化波形模糊函数分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(9): 2008–2018. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.09.07.
- LIU Yongjun, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Ambiguity function analysis of integrated radar and communication waveform based on OFDM[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(9): 2008–2018. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.09.07.
- [20] HUANG Gaojian, DING Yuan, OUYANG Shan, *et al.* Index modulation for OFDM RadCom systems[J]. *The Journal of Engineering*, 2021, 2021(2): 61–72. doi: 10.1049/tje2.12003.
- [21] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, *et al.* Orthogonal time frequency space modulation[C]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: 10.1109/WCNC.2017.7925924.
- [22] 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.
- [23] WEI Xinyuan, YUAN Weijie, ZHANG Kecheng, *et al.* OTFS-assisted ISAC system: Delay Doppler channel estimation and SDR-based implementation[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(11): 11865–11878. doi: 10.1109/TMC.2025.3582421.
- [24] LIU Fan, ZHOU Longfei, MASOUIROS 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.
- [25] LIU Xiang, HUANG Tianyao, SHLEZINGER N, *et al.* Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3929–3944. doi: 10.1109/TSP.2020.3004739.
- [26] WANG Jionghui, WANG Bin, FANG Jun, *et al.* Low-complexity joint communication and sensing beamforming for ISAC systems: A bisection search approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(13): 25620–25632. doi: 10.1109/JIOT.2025.3558954.
- [27] HUANG Gaojian, DING Yuan, OUYANG Shan, *et al.* Target localization using time-modulated directional modulated transmitters[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 13508–13518. doi: 10.1109/JSEN.2022.3178699.
- [28] HUANG Gaojian, ZHANG Kailuo, ZHANG Yanliang, *et al.* Orthogonal frequency division multiplexing directional modulation waveform design for integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(18): 29588–29599. doi: 10.1109/JIOT.2024.3367490.
- [29] DING Yuan and FUSCO V F. A vector approach for the analysis and synthesis of directional modulation transmitters[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(1): 361–370. doi: 10.1109/TAP.2013.2287001.
- [30] BABAKHANI A, RUTLEDGE D, and HAJIMIRI A. Transmitter architectures based on near-field direct antenna modulation[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, 43(12): 2674–2692. doi: 10.1109/JSSC.2008.2004864.
- [31] DALY M P and BERNHARD J T. Directional modulation technique for phased arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(9): 2633–2640. doi: 10.1109/TAP.2009.2027047.
- [32] DING Yuan and FUSCO V. A synthesis-free directional modulation transmitter using retrodirective array[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 428–441. doi: 10.1109/JSTSP.2016.2605066.
- [33] DING Yuan, ZHANG Yunhua, and FUSCO Vincent. Fourier Rotman lens enabled directional modulation transmitter[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 2015: 285986. doi: 10.1155/2015/285986.
- [34] HUANG Gaojian, DING Yuan, OUYANG Shan, *et al.* Three-state time modulated array-enabled directional modulation for secure orthogonal frequency-division multiplexing wireless transmission[J]. *IET Communications*, 2022, 16(19): 2321–2327. doi: 10.1049/emu2.12485.
- 黄高见: 男, 讲师, 研究方向为通感一体化、阵列信号处理、物理层安全通信等。
- 张盛壮: 男, 硕士生, 研究方向为通感一体化。
- 丁元: 男, 副教授, 研究方向为天线阵列、物理层安全。
- 廖可非: 男, 教授, 研究方向为雷达成像、RCS测量、认知雷达等。
- 金双根: 男, 教授, 研究方向为卫星导航定位技术等。
- 李兴旺: 男, 副教授, 研究方向为无线通信、新一代宽带移动通信系统的新理论及技术。
- 欧阳缙: 男, 教授, 研究方向为雷达信号处理、通信信号处理。

责任编辑: 马秀强

Research on Directional Modulation Multi-carrier Waveform Design for Integrated Sensing and Communication

HUANG Gaojian^{①②} ZHANG Shengzhuang^① DING Yuan^③ LIAO Kefei^④
JIN Shuanggen^② LI Xingwang^① OUYANG Shan^④

^①(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

^②(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003, China)

^③(Institute of Sensors, Signals and Systems (ISSS), Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, U.K)

^④(School of Information and Communications, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract:

Objective With the concurrent evolution of wireless communication and radar technologies, spectrum congestion has become increasingly severe. Integrated Sensing and Communication (ISAC) has emerged as an

effective approach that unifies sensing and communication functionalities to achieve efficient spectrum and hardware sharing. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signals are regarded as a key candidate waveform due to their high flexibility. However, estimating target azimuth angles and suppressing interference from non-target directions remain computationally demanding, and confidential information transmitted in these directions is vulnerable to eavesdropping. To address these challenges, the combination of Directional Modulation (DM) and OFDM, termed OFDM-DM, provides a promising solution. This approach enables secure communication toward the desired direction, suppresses interference in other directions, and reduces radar signal processing complexity. The potential of OFDM-DM for interference suppression and secure waveform design is investigated in this study.

Methods As a physical-layer security technique, DM is used to preserve signal integrity in the intended direction while deliberately distorting signals in other directions. Based on this principle, an OFDM-DM ISAC waveform is developed to enable secure communication toward the target direction while simultaneously estimating distance, velocity, and azimuth angle. The proposed waveform has two main advantages: the Bit Error Rate (BER) at the radar receiver is employed for simple and adjustable azimuth estimation, and interference from non-target directions is suppressed without additional computational cost. The waveform maintains the OFDM constellation in the target direction while distorting constellation points elsewhere, which reduces correlation with the original signal and enhances target detection through time-domain correlation. Moreover, because element-wise complex division in the Two-Dimensional Fast Fourier Transform (2-D FFT) depends on signal integrity, phase distortion in signals from non-target directions disrupts phase relationships and further diminishes the positional information of interference sources.

Results and Discussions In the OFDM-DM ISAC system, the transmitted signal retains its communication structure within the target beam, whereas constellation distortion occurs in other directions. Therefore, the BER at the radar receiver exhibits a pronounced main lobe in the target direction, enabling accurate azimuth estimation (Fig. 5). In the time-domain correlation algorithm, the target distance is precisely determined, while correlation in non-target directions deteriorates markedly due to DM, thereby achieving effective interference suppression (Fig. 6). Additionally, during 2-D FFT processing, signal distortion disrupts the linear phase relationship among modulation symbols in non-target directions, causing conventional two-dimensional spectral estimation to fail and further suppressing positional information of interference sources (Fig. 7). Additional simulations yield one-dimensional range and velocity profiles (Fig. 8). The results demonstrate that the OFDM-DM ISAC waveform provides structural flexibility, physical-layer security, and low computational complexity, making it particularly suitable for environments requiring high security or operating under strong interference conditions.

Conclusions This study proposes an OFDM-DM ISAC waveform and systematically analyzes its advantages in both sensing and communication. The proposed waveform inherently suppresses interference from non-target directions, eliminating target ambiguity commonly encountered in traditional ISAC systems and thereby enhancing sensing accuracy. Owing to the spatial selectivity of DM, only legitimate directions can correctly demodulate information, whereas unintended directions fail to recover valid data, achieving intrinsic physical-layer security. Compared with existing methods, the proposed waveform simultaneously attains secure communication and interference suppression without additional computational burden, offering a lightweight and high-performance solution suitable for resource-constrained platforms. Therefore, the OFDM-DM ISAC waveform enables high-precision sensing while maintaining communication security and hardware feasibility, providing new insights for multi-carrier ISAC waveform design.

Key words: Integrated Sensing and Communication (ISAC); Directional Modulation (DM); Physical layer security; Sidelobe interference suppression