

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

何亚萍^① 施龙飞^{*①} 王东^② 唐江澜^① 陈俊先^① 马佳智^① 刘甲磊^①

^①(国防科技大学电子科学学院CEMEE国家重点实验室 长沙 410073)

^②(中国人民解放军95316部队 广州 510000)

摘要: 集探测与通信功能为一体的探通一体(DFRC)综合电子设备平台通过共享硬件平台和发射波形,有效缓解了平台受限、资源紧张、电磁兼容等问题,因此成为近年来的研究热点。以探测为核心、兼顾有限通信能力的DFRC技术,在未来实战中的预警监视、跟踪制导等典型探测场景中具有巨大的应用前景。该文重点关注在保证基本通信性能基础之上,通过有效调节探测与通信在多域资源利用方面的冲突和矛盾,实现雷达探测性能最优化的信号设计方法。该文首先总结了DFRC系统的性能衡量准则,然后全面地介绍了典型探测场景下DFRC信号设计方法,并深入分析了各信号设计方法存在的问题以及目前的解决方案。在最后对全文做了总结,并对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 探通一体系统; 探通一体信号设计; 简单探测场景; 复杂探测场景; 优化理论

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2025)04-1046-25

DOI: 10.12000/JR24213

CSTR: 32380.14.JR24213

引用格式: 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(中英文), 2025, 14(4): 1046–1070. doi: 10.12000/JR24213.

Reference format: HE Yaping, SHI Longfei, WANG Dong, *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. doi: 10.12000/JR24213.

Research Progress on Dual Function Radar and Communication Signal Design and its Application in Typical Detection Scenarios

HE Yaping^① SHI Longfei^{*①} WANG Dong^② TANG Jianglan^① CHEN Junxian^①
MA Jiazhi^① LIU Jialei^①

^①(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(PLA 95316, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Dual Function Radar and Communication (DFRC)-integrated electronic equipment platform, which combines detection and communication functions, effectively addresses issues such as platform limitations, resource constraints, and electromagnetic compatibility by sharing hardware platforms and transmitting waveforms. Therefore, it has become a research hotspot in recent years. The DFRC technology, centered on detection functionality and incorporating limited communication capabilities, has remarkable application prospects in typical detection scenarios, such as early warning and surveillance and tracking guidance under future combat conditions. This paper focuses on using the signal design method to optimize radar detection

收稿日期: 2024-10-24; 改回日期: 2025-01-06; 网络出版: 2025-02-11

*通信作者: 施龙飞 longfei_shi@sina.com.cn

*Corresponding Author: SHI Longfei, longfei_shi@sina.com.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62401579)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62401579)

责任主编: 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/>)

performance by effectively adjusting the trade-off between detection and communication in multi-domain resource utilization by guaranteeing a minimum communication performance. First, the performance measurement criteria of DFRC systems were summarized. Then, the paper provides a comprehensive introduction to the DFRC signal design methods under typical detection scenarios and a thorough analysis of the problems and current solutions of each signal design method. Finally, a summary and future research directions are outlined.

Key words: Dual Function Radar and Communication (DFRC) system; DFRC signal design; Simple detection scenario; Complex detection scenarios; Optimization theory

1 引言

随着新型作战方式以及下一代无线网络中各种新兴应用与业务的出现, 雷达系统与通信系统的分离设计已无法同时满足数据传输和高精度探测需求, 其正朝着同时共享硬件平台与共享波形的方向发展。探通一体(Dual Function Radar and Communication, DFRC)系统通过同一设备发射共享波形, 同时实现探测与通信功能, 具有高效率 and 低成本等诸多好处, 是近年来的研究热点^[1-8]。

探通一体技术在军事领域中的发展时间线如图1所示。早在20世纪60年代, 美国洛克希德·马丁公司提出了利用雷达脉冲简单调制实现通信数据的传输^[9]。自此以后, 探测与通信功能的融合研究受到了极大关注。1996年, 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)首次开展了与DFRC系统相关的军事项目, 即先进多功能射频系统(Advanced Multi-function Radio Frequency Concept, AMRFC)项目, 实现了共用孔径的雷达和通信功能^[10]。与此同时, 美国海军研究办公室(Naval Research Laboratory, NRL)先后开展了“宝石柱”和“宝石台”计划, 其中“宝石台”计划实现了雷达通信共享控制和信号处理模块并成功应用于F-35战机上^[11]。2013年, 美国DARPA资助了雷达和通信共享频谱(Shared Spectrum Access for Radar and Commu-

nications, SSPARC)项目, 该项目主要分为两个阶段: 第1阶段探索了在保证雷达和通信性能的前提下进行频谱共享的可能性; 第2阶段已在2015年启动, 雷达和无线通信共享了部分6 GHz雷达系统的频谱资源^[12]。

2010年以来, 由于频谱资源日益紧张以及作战形式的变化, DFRC得到了迅速的发展, 国内外机构和学者在DFRC信号设计方面开展了大量的研究。国外如美国维拉诺瓦大学^[13-17]、澳大利亚新南威尔士大学^[18-20]、美国堪萨斯大学^[21-23]、英国伦敦大学^[24-26]、美国戴顿大学^[27-30]、悉尼科技大学^[31-35]等, 国内如西安电子科技大学^[36-40]、南方科技大学^[41-46]、中国电子科学研究院^[47,48]、电子科技大学^[49-53]、国防科技大学^[54-63]、北京理工大学^[64,65]、空军预警学院^[66-69]、东南大学^[70-76]、西北大学^[77-81]、北京航空航天大学^[82-85]、清华大学^[86-89]、深圳大学^[90-93]、西北工业大学^[94,95]、大连理工大学^[96-98]、北京邮电大学^[99,100]等都在DFRC信号设计方面进行了研究, 并取得了一定的进展。在以探测性能为主的DFRC信号设计方面, 中国电子科学研究院陈兴波等人^[47,48]、北京理工大学刘志鹏等人^[64,65]、空军预警学院杨云飞等人^[68,69]、美国堪萨斯大学Blunt等人^[21,22]以及西安电子科技大学Gu等人^[38]提出了相位连续的DFRC信号设计方法。美国维拉诺瓦大学Amin教授团队Hassanien等人^[13]与

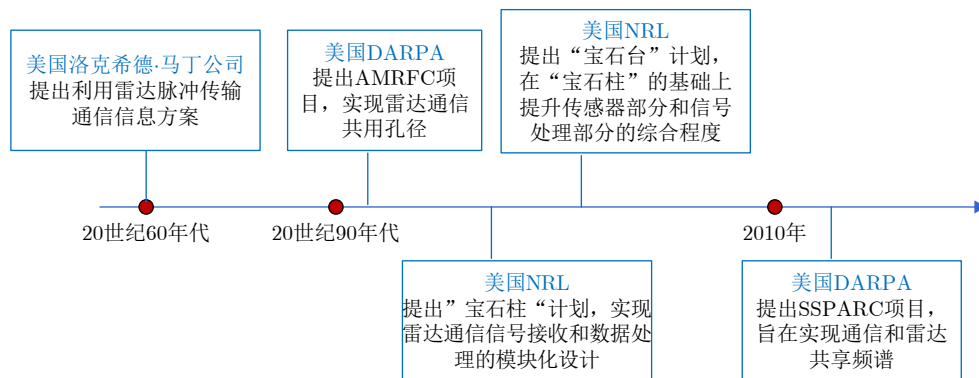


图1 探通一体技术在军事项目中的发展时间线

Fig. 1 The development timeline of DFRC technology in military projects

Eedara等人^[14-17]、澳大利亚新南威尔士大学Baxter等人^[18-20]、北京航空航天大学Xu等人^[84]在多输入多输出(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO)阵列系统中,通过跳频(Frequency Hopping, FH)码片的载频选择、相位调制、码片排序等方式嵌入通信信息,扩展了信号设计的自由度,进一步提升了通信速率。电子科技大学崔国龙等人^[52]以及国防科技大学唐波等人^[57-60]通过空域波束赋形,在保证雷达探测性能的同时,实现了与多个通信用户进行通信的功能。西北大学文才教授团队^[77-81]、深圳大学廖斌教授团队^[92,93]、国防科技大学唐波教授团队^[54-56]针对复杂场景下的DFRC信号设计方法进行了大量的探索研究。南方科技大学刘凡教授团队^[41,42]在探索DFRC系统性能边界方面做了大量工作,并首次提出结合信息论和估计论对DFRC系统性能边界进行刻画。

在以通信功能为核心的DFRC信号设计方面,悉尼科技大学Zhang团队^[101]、北京邮电大学冯志勇团队^[99,100]、东南大学金石团队^[76]和曾勇团队^[70-75]、西安电子科技大学廖桂生团队^[36,37]等做了大量工作。由于本文主要是对以探测功能为核心的DFRC信号设计研究进展进行总结,因而在这里对以通信功能为核心的DFRC信号设计研究进展不做过多的阐述。

面向探测的DFRC典型应用场景如图2所示,DFRC综合平台发射DFRC波形同时实现目标探测和通信功能。一般情况下,目标与通信用户可能分布在不同的空间位置,DFRC信号分别在信道特性

不同的雷达信道和通信信道上传输。雷达接收机接收目标反射回波并提取目标信息,通信接收机接收DFRC信号并进行解调获取通信信息。雷达系统通过发射确定性的信号去捕捉雷达信道中与目标相关的不确定性,而通信系统需要抵消通信信道对随机信号造成的不确定性,以恢复有用信息。雷达系统与通信系统需实现的功能不同使得二者在信号设计方面存在较大的差异,因此需要设计一种在特定场景下能同时实现探测性能和通信性能的DFRC信号。在时频空以及发射功率等资源固定的情况下,二者的性能存在互相制约、此消彼长的关系,这为DFRC信号设计带来了一定的挑战。

没有一种单一的DFRC波形可以适用于所有的应用场景^[7],因此面向雷达探测的DFRC信号设计应是在特定的场景下进行的。DFRC系统的应用场景可分为简单场景和复杂场景两种,简单场景主要是指在DFRC信号设计过程中,只考虑信号本身的特性和接收机噪声对雷达系统性能的影响。然而在实际作战中,理想假设条件下的DFRC信号在很多情况下难以充分发挥其效能,此时必须考虑如何设计能够适应复杂场景的DFRC信号。目前关于DFRC信号设计的研究总结大部分是基于简单场景,还没有相关文献对复杂场景下的DFRC信号设计进行梳理。本文首先对现有研究中基于简单场景的DFRC信号设计方法进行分类梳理,并总结了各类方法的基本原理、优缺点以及不足之处的相关改进方案。其次,将复杂探测场景分为杂波、起伏目标、多目标、电子对抗4种,分别总结了各场景下的DFRC

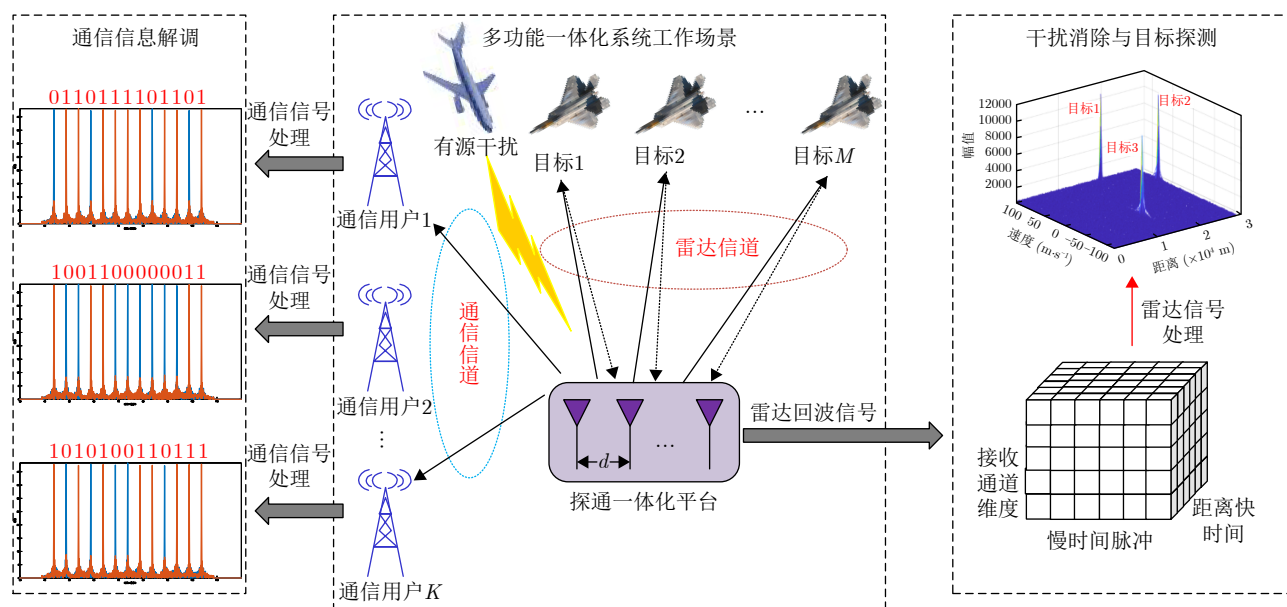


图2 探通一体应用场景示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the DFRC application scenario

系统性能需求、信号设计方法、目前存在的问题以及可能的解决方案。最后对DFRC信号设计面临的挑战和未来的研究方向进行了展望。

2 DFRC信号设计性能指标

目前尚未有一体化指标来衡量整个DFRC系统的性能, DFRC信号设计中仍然是采用分立的性能指标来分别评估雷达系统和通信系统的性能。雷达系统的性能指标可分为检测性能指标、参数估计性能指标、多目标检测性能指标以及抗干扰性能指标。

下面首先对雷达系统的性能指标进行简要概述:

(1) 检测性能指标。根据Chernoff-Stein引理^[102], 相对熵可用于量化目标检测概率。在固定虚警概率的情况下, 相对熵与检测概率 P_d 之间的关系为^[8]

$$D(P_0(\mathbf{Y}_s) \| P_1(\mathbf{Y}_s)) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{N} \ln(1 - P_d) \right) \quad (1)$$

其中, N 为观测次数, \mathbf{Y}_s 为接收信号, $P_1(\mathbf{Y}_s)$ 与 $P_0(\mathbf{Y}_s)$ 分别表示目标存在和不存在假设下的回波概率密度函数(Probability Density Function, PDF), $D(P_0(\mathbf{Y}_s) \| P_1(\mathbf{Y}_s))$ 表示 $P_1(\mathbf{Y}_s)$ 和 $P_0(\mathbf{Y}_s)$ 之间的KL散度(Kullback-Leibler Divergence, KLD)。

(2) 参数估计性能指标。参数估计是评估目标距离、速度以及角度参数测量精度的极限。由于通信信息是随机的, 因此DFRC信号会根据实时传输的通信信息而发生变化, 对应的Cramér-Rao界(Cramér-Rao Bound, CRB)也会随之改变。基于此, 刘凡等人^[8,42]提出在DFRC信号设计中采用贝叶斯CRB(Bayesian Cramér-Rao Bound, BCRB)衡量准则, 通过对所有可能的发射信号对应的CRB取平均来表征随机通信信息对雷达目标参数估计性能的影响。

互信息(Mutual Information, MI)也被引入到衡量雷达对目标参数估计性能的评估准则中^[8,103,104], 最大化MI相当于最小化目标参数估计的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)。

(3) 多目标探测性能指标。通常通过最小化模糊函数(Ambiguity Function, AF)或发射天线方向图的加权积分旁瓣电平(Weighted Integral Sidelobe Level, WISL)或加权峰值旁瓣电平(Weighted Peak Sidelobe Level, WPSL)来提升多目标探测性能。

(4) 抗干扰性能指标。通常采用雷达系统的输出信噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)来评估抗干扰效果, 同时通过最小化模糊函数或天线方向图模板匹配误差等方式, 可减少系统被干扰的可能性。

除上述指标外, DFRC信号设计中一般还会考

虑恒模或峰均比(Peak-to-Average-power Ratio, PAR)特性以及频谱扩展程度等对雷达探测性能的影响。

有效性和可靠性是信息传输的主要性能评估指标, 下面对通信性能指标简要概述:

(1) 有效性指标。数字通信系统中有效性主要采用码元速率、信息速率和频带利用率来表示, 其中码元速率和信息速率分别表示单位时间内传输的码元数和信息比特数, 而频带利用率则表示单位频带传输的码元速率或信息速率。

(2) 可靠性指标。可靠性主要指信息传输的准确度, 一般由误码率、误比特率以及输出SINR来衡量。在实际应用场景中, 其他传输条件相同的情况下, SINR越高, 误码率越低。

除此之外, 在DFRC信号优化设计中还常常采用多用户干扰(Multi-User Interference, MUI)^[105]能量来衡量通信系统的和速率, 采用相长干涉^[96]等技术来提升通信系统的可靠性。

由于雷达与通信系统需实现的功能不同, 在功率资源分配与信号设计方面, DFRC系统必将存在探测与通信性能的权衡问题。刘凡等人^[8,42]提出, 探测与通信的性能折衷至少是双重的, 即子空间折衷与确定-随机折衷, 如图3所示。子空间折衷从功率资源分配的角度来分析性能折衷, 通信子空间与探测子空间的耦合程度越强, 对应雷达探测与通信可复用的功率资源越多, 则雷达探测性能与通信性能分别越来越接近于最优性能。确定-随机折衷则是从信号层面来分析性能折衷, 雷达对信号的确定性要求与通信信号的随机性本是一种矛盾, 在以通信为主的DFRC信号设计中采用高斯信号来实现探测功能, 会造成探测性能的不稳定, 而在以探测为主的DFRC信号设计中采用相位调制的恒模信号来传输信息, 则会造成通信系统的自由度损失。

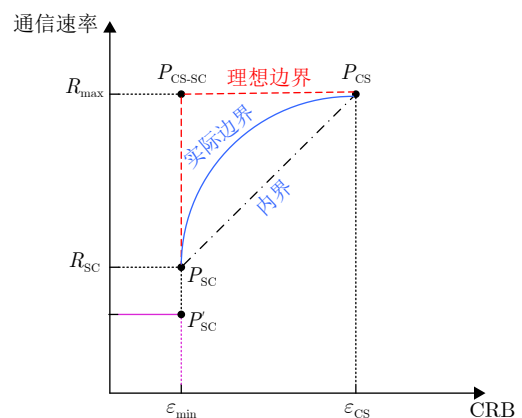


图3 CRB-速率区域示意图

Fig. 3 Illustration of the CRB-rate regions

在以雷达探测功能为主的DFRC信号设计方法中,主要关注的是如何在保证基础通信性能的条件下达达到最优的雷达探测性能。根据目前公开发表的文献来看,从通信性能与雷达探测性能之间的权衡关系中是否引入了优化理论的角度可以将以探测功能为主的DFRC信号设计方法分为两类:DFRC信号的一般设计方法和以提升雷达探测性能为主的DFRC信号优化设计方法。

3 DFRC信号的一般设计方法研究进展

在DFRC信号的一般设计方法中,通常通过对典型的雷达波形参数调制以传输通信信息,或利用波形参数的选择和排序以及发射天线的激活方式等来嵌入通信信息。雷达与通信性能之间权衡关系的调节主要取决于参数调制方式和通信速率,通过控制信号相位跳变幅度、降低通信速率以及修改通信符号分布位置等方式可减小内嵌通信信息对雷达原始波形的影响,从而实现以雷达探测性能为核心的DFRC信号设计。一般来说,雷达探测性能的衡量准则主要是DFRC信号的AF特性、频谱扩展程度等,而对于通信性能则期望具有较高的传输速率和理想的误码性能。

3.1 基于波形参数变化的信息调制方法

线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)和相位编码信号是雷达常用的波形,因此将其作为基础调制波形,借鉴典型的通信调制方法,通过载频、相位等参数的变化来嵌入通信信息是一种可行的方式。

2011年,王小谟院士团队^[47,48]提出了一种基于LFM和最小频移键控(Minimum-Shift Keying, MSK)调制方式的DFRC信号设计方法,LFM-MSK表达式为

$$s(t) = \sum_{k=1}^{N_b} \text{rect}\left(\frac{t - (k-1)T}{T}\right) \cdot \exp\left(j\pi\left(\mu t^2 + p_k q_k \frac{t}{2T} + \frac{1-p_k}{2}\right)\right) \quad (2)$$

其中, T 为比特宽度, N_b 为内嵌比特数目, μ 为LFM的调频斜率, $p_k q_k$ 由调制信息控制。LFM-MSK信号的多普勒分辨率只与信号宽度有关,但时延分辨率与DFRC信号的带宽、比特数目和比特宽度均有关,且存在AF距离旁瓣较高和频谱扩展的问题。2015年,北京理工大学刘志鹏等人^[64,65]通过设计调制通信码元的取值和分布位置改善了LFM-MSK的频谱扩展问题,并基于加窗的反卷积方法,解决了距离旁瓣过高的问题。

2016年,美国戴顿大学^[27-30]提出了一种以LFM为基础雷达波形,并结合减相二相相移键控(Binary Reduced Phase Shift Keying, BRPSK)方法调整二相相位差来控制DFRC信号的相位变化幅度,但仍然存在频谱扩展问题。

2017年,空军预警学院杨云飞等人^[68,69]提出了基于LFM和连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)的DFRC波形,由于MSK是CPM的一种特殊情况,因此LFM-CPM的参数设置灵活性较LFM-MSK更大,且具有良好的距离旁瓣和频谱特性,如图4所示。

2017年,美国堪萨斯大学Blunt教授团队Sahin等人^[21-23]提出了一种基于多相编码频率调制(Polyphase-Coded Frequency-Modulated, PCFM)信号的DFRC信号设计方法,该信号的合成相位为PCFM信号和CPM信号的相位的叠加:

$$s(t) = \sqrt{P} \exp(j(\psi(t) + \phi(t))) \quad (3)$$

其中, $\psi(t)$ 和 $\phi(t)$ 分别为PCFM信号和CPM调制

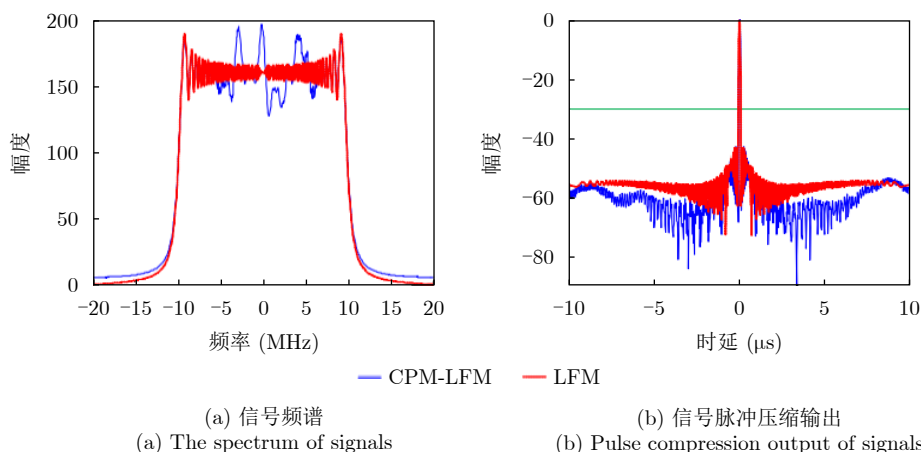


图4 CPM-LFM与LFM信号的频谱及加汉明窗脉冲压缩输出对比^[68]

Fig. 4 Comparison of spectrum and pulse compression output between CPM-LFM and LFM signal^[68]

信号的相位,通过调整通信符号宽度和数目以及相位调制指数可调节距离旁瓣特性和通信传输速率。如图5所示,CPM信号的相位调制指数越小,合成信号的特性越接近于原始雷达信号PCFM。

2018年,西安电子科技大学张林让教授团队^[38]提出了基于频率调制项(Communication Frequency Modulation Term, CFMT)的DFRC信号设计方法,合成信号的相位等同于在原始LFM信号上加入了相位抖动。通过二进制幅度调制,每个子频率调制项传输1比特信息。DFRC信号的表达式为

$$s(t) = \exp \left(j\pi K t^2 + j p \sum_{m_p=1}^{M_p} a_{m_p} \sin(2\pi m_p t / T_p) \right) \quad (4)$$

其中, K 为调频斜率, p 为相位调制指数, M_p 为子频率调制项数目, a_{m_p} 为输入的通信比特信息且 $a_{m_p} \in \{1, -1\}$, T_p 为脉冲宽度。与LFM-MSK相比,其只在原始LFM波形中加入了可控的微小的相位扰动,因此具有更好的频谱效率。雷达与通信之间的权衡关系主要受限于 p 的取值,其值越小,越有利于雷达探测,其值越大,合成信号的频谱扩展问题会变得更加显著。

基于波形参数变化调制的DFRC信号设计方法虽然可以通过调整调制参数与原始雷达波形保持最大的相似度,但可供信息调制使用的自由度非常有限,单个脉冲承载的比特数较低,通信速率严重依赖于脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)。而若通过调整PRF来提高通信速率,则会影响雷达探测的最大不模糊距离。因此需要在保证雷达探测性能的前提下,充分挖掘整个传输系统中可供信息调制的自由度。

3.2 基于波形参数索引的信息调制方法

与通过控制相位、频率等参数的变化来调制通

信信息的方式相比,索引调制为DFRC系统的信息传输提供了新的维度。索引调制利用DFRC系统构成要素的索引来映射额外的通信信息比特,如联合典型波形参数以及发射天线等的选择或排序实现自由度交织,实现更高的信息传输速率。基于参数索引的DFRC波形可分为基于MIMO阵列的跳频(Frequency-Hopping MIMO, FH-MIMO)调制方法和基于稀疏阵列的调制方法。

基于稀疏阵列的索引调制是通过激活发射阵列中的部分天线来调制通信信息^[106],该方法虽然在一定程度上提升了通信速率,但没有最大限度利用发射天线孔径来获得更定向的波束和更高的天线增益。与基于稀疏阵列的DFRC波形设计不同,联合FH-MIMO的DFRC信号使用了所有的发射天线^[33]。2017年, Hassanien等人^[13]将FH-MIMO引入DFRC信号设计中,通过在每根发射天线辐射信号的各跳频间隔内嵌入PSK (Phase-Shift Keying)通信符号来传输通信信息,可实现的数据传输速率与PRF、发射阵元数和通信符号数目成正比。Hassanien等人^[14]在2021年进一步讨论了不同的相位调制方式在DFRC信号的自相关函数旁瓣抑制和频谱扩展抑制方面的性能权衡。2021年,悉尼科技大学Zhang等人^[34]提出了一种对子脉冲进行联合相位和频率选择调制(Phase Frequency-Hopping Code Selection, PFHCS)的FH-MIMO波形,进一步提升了通信速率。

基于参数索引调制的DFRC信号设计提升了信息传输速率,但仍需要解决相位不连续带来的频谱效率低以及脉内跳频码片变化带来的AF距离旁瓣幅度波动的问题。如何借助相关参数的优化将随机通信信息对雷达探测性能的影响限制在可接受的范围内是值得关注的问题。

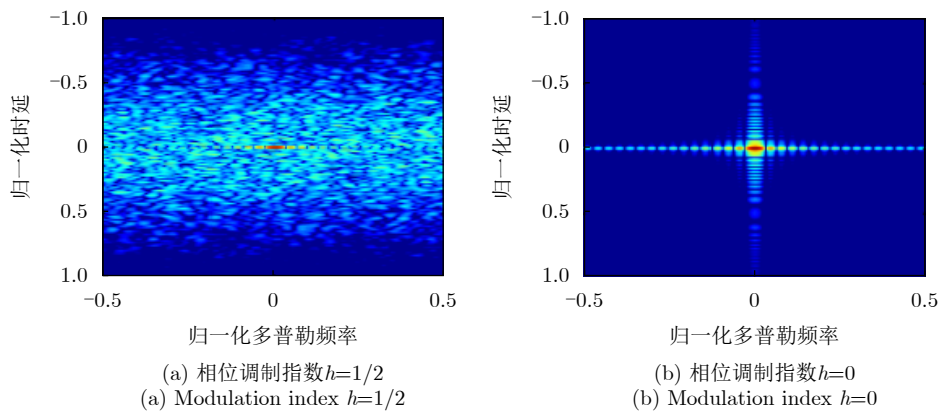


图5 不同相位调制指数对应的距离多普勒响应^[21]

Fig. 5 The range-Doppler response of different CPM modulation index h ^[21]

4 以提升雷达探测性能为主的DFRC信号优化设计方法研究进展

在未来实战环境下的预警监视、跟踪制导等典型探测场景中,探通一体尤其是以探测为核心、兼顾有限通信能力的探通一体技术具有巨大的应用前景。因此,为了使所设计的DFRC信号具有更好的探测性能,可将优化理论引入到DFRC信号设计方法中。与DFRC信号的一般设计方法相比,以提升雷达探测性能为主的DFRC信号优化设计方法不受现有典型探测波形的限制,该方法通过在信号优化模型中将多域资源(时、频、空等域)进行联合调制、设计多个信号约束或引入优化辅助变量等,为探测与通信性能之间的权衡提供了更多的自由度和更大的灵活性。此时,雷达探测性能不仅与参数调制方式有关,还与优化问题的建模以及求解方法相关。

从DFRC信号优化设计中主要关注的雷达探测性能指标角度,将以提升雷达探测性能为主的DFRC信号优化设计方法分为以下4种:

(1) 以提升模糊函数性能为主的DFRC信号优化设计方法。这一类信号设计方法一般以AF特性为优化目标函数,根据雷达实际执行任务的不同,

优化结果可用于提升旁瓣性能或多普勒容限。2023年, Baxter等人^[19,20]推导了基于FH-MIMO系统设计的DFRC信号的平均AF表达式,并指出对符号内跳频码片的排列顺序进行优化可一定程度改善AF的距离旁瓣性能。2023年,北京航空航天大学王向荣教授团队^[84]提出了基于FH-MIMO系统的混合调制方法,如图6所示。通过调制各子脉冲的相位传输通信信息,并通过优化设计各子脉冲载频的取值和排列来有效抑制AF的距离旁瓣,如图7所示。该信号优化设计方案的优势是减小了多维参数联合调制带来的基础波形参数的快速变化。建立优化问题如下:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{C}_{\text{op}}} & \left\{ \frac{\text{mean}(\mathbf{A}_{\text{RAF}})}{\max(\mathbf{A}_{\text{RAF}})} + \text{var}(\mathbf{A}_{\text{RAF}}) \right\} \\ \text{s.t. } & \mathbf{C}_{\text{op}} \subset \mathbb{N}_{N_T \times Q}, \\ & c_{n_T, q} \neq c_{n_T, q'}, \forall q, \\ & c_{n_T, q} \in \mathcal{C} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,约束 $\mathbf{C}_{\text{op}} \subset \mathbb{N}_{N_T \times Q}$ 是为了确保发射频率应从规定的跳频字典中选取, $\text{mean}(\mathbf{A}_{\text{RAF}})$ 和 $\text{var}(\mathbf{A}_{\text{RAF}})$ 分别表示距离AF的均值和方差, $c_{n_T, q}$ 表示第 n_T 根发射天线在第 q 个子脉冲持续时间内的跳频码片。

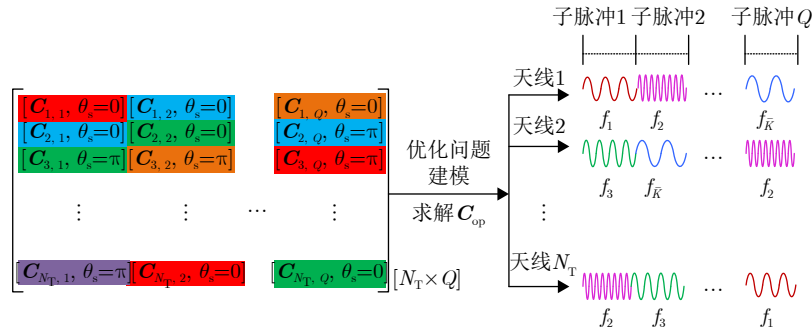


图6 FH-MIMO发射信号矩阵映射示意图

Fig. 6 Schematic diagram of FH-MIMO transmission signal matrix mapping

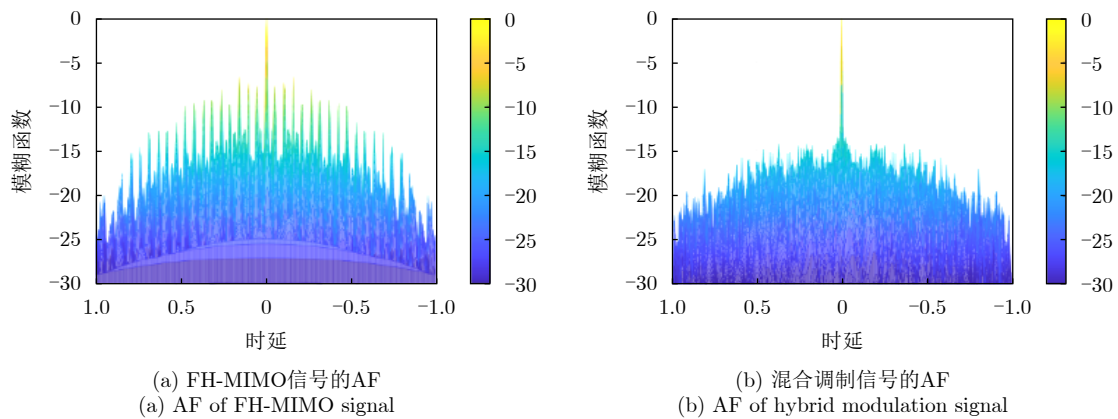


图7 FH-MIMO与基于FH-MIMO的混合调制信号AF对比^[84]

Fig. 7 Comparison of AF between FH-MIMO and hybrid modulation signals based on FH-MIMO^[84]

上述优化问题是非凸的,该团队利用改进的遗传算法避免了穷尽搜索带来的高计算复杂度。接收端通过匹配滤波器或最小二乘估计来提取各子脉冲的频率分量和相位,从而实现通信符号的解调。

2022年,西南交通大学Ye等人^[107]以模糊函数的局部性能为目标设计了DFRC信号,即DFRC信号设计只需要关注时延-多普勒域原点附近,由最大多普勒频率和最大时延定义的小范围区域即可。该方法以增加远离模糊函数原点区域的幅值为代价,在低/零模糊区获得了极好的探测性能。2023年,西南交通大学王佳欢等人^[108]设计了一种在任意多普勒频率的时延切片上都具有局部极低距离旁瓣的高多普勒容限波形,如图8所示,进一步提升了DFRC系统对运动目标的探测性能。

近年来,崔国龙教授团队^[49,50]提出了基于变换域的DFRC信号设计方法,以AF特性为目标函数,将通信信息分别嵌入频域和模糊函数的旁瓣区域,充分利用了时频自由度。

(2) 以提升天线方向图性能为主的DFRC信号

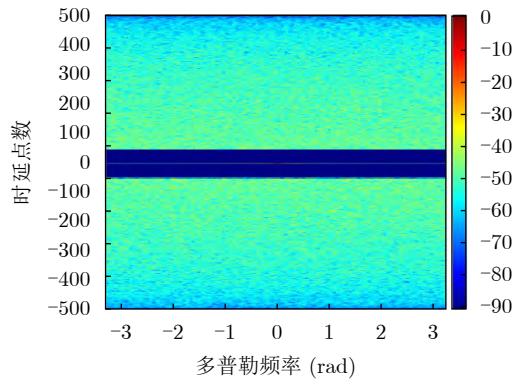


图8 具有多普勒容限的DFRC信号^[108]

Fig. 8 Doppler resilient DFRC signal^[108]

调制信息与子脉冲位置的映射规则		
用户1	信息比特	00 01 10 11
	子脉冲位置	{2, 3} {2, 4} {2, 5} {4, 5}
用户2	信息比特	0 1 0 1 0 1 0 1
	子脉冲位置	{4}{5} {3}{5} {3}{4} {2}{3}
调制信息与子脉冲相位差的映射规则		
用户1	信息比特	00 01 10 11
	子脉冲位置	{0, 0} {0, π } { π , 0} { π , π }
用户2	信息比特	0 1
	子脉冲位置	{ $3\pi/2$ } { $\pi/2$ }

发送信息比特
用户1: 0010
用户2: 10

优化设计方法^[109-113]。这一类信号设计方法主要分为两种:一种是最小化天线方向图模板匹配误差,利用旁瓣嵌入通信信息,如直接采用通信信息控制天线方向图旁瓣电平的高低;另一种是以最小化天线方向图的积分旁瓣电平(Integrated Sidelobe Level, ISL)为目标函数建立优化模型,并在通信用户处合成期望的通信符号。

2024年,崔国龙教授团队Yao等人^[51]提出了一种扩展的索引调制方法,即脉内索引调制(Intrapulse Index Modulation, I2M),该方法通过联合各通信用户对应的子脉冲位置与差分相位(Differential Phase Shift Keying, DPSK)调制来嵌入通信信息,如图9所示。单脉冲内的若干子脉冲被调制并向多个通信用户传输信息,剩下的子脉冲作为保证雷达探测性能的待优化变量。与基于FH-MIMO的传统索引方式不同,在该信号设计方法中不存在脉内频繁跳变的频率码片。

崔国龙团队建立优化模型最小化发射波束方向图的ISL,优化约束包括各通信用户的信号功率、主瓣宽度、恒模约束等。为了求解上述非凸优化问题,该团队利用多相位约束下的坐标下降算法(Coordinate Descent Algorithm under Multiple Phase Constraints, MPCCD),对每个非凸子问题都以封闭形式求解。在通信接收端,各用户首先分别对各子脉冲的绝对相位进行检测,接着将各子脉冲的相位依次与参考子脉冲相位作差,然后将上一步得到的相位差值与DPSK相位集作比较,估计相位的同时也能得到子脉冲位置,从而可解调出通信信息。

2024年,曾勇教授团队^[75]提出了一种基于码本设计的DFRC信号设计方法,与传统基于天线方向图主瓣探测、旁瓣通信的思路不同,该方法将MIMO收发阵列分别划分为两个子阵列,各子阵的

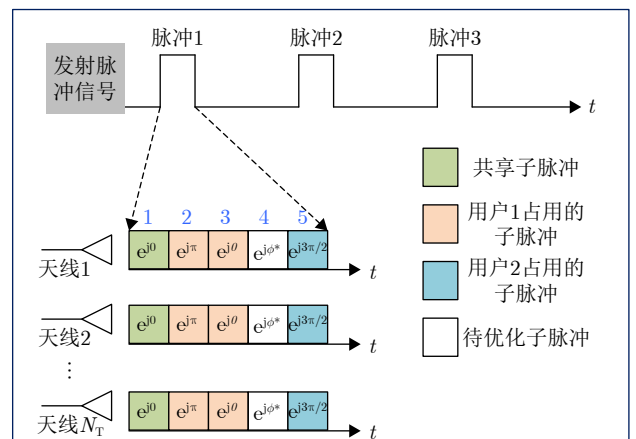


图9 子脉冲位置与相位映射示意图

Fig. 9 Schematic diagram of subpulse position and phase mapping

发射波束成形矢量 \mathbf{f} 从预先设计的码本 \mathcal{F} 中选择,在DFRC信号发射端生成同时指向通信用户和目标的波束。而DFRC信号的接收波束成形矢量 \mathbf{w} 也从预先设计的码本 \mathcal{W} 中选择,用以生成接收目标回波的单波束。其中, \mathbf{f} 和 \mathbf{w} 分别根据目标和通信用户方位进行最优化选择。

(3) 以提升雷达参数估计性能为主的DFRC信号优化设计方法。由于发射信号的协方差矩阵决定了CRB和通信传输速率的取值,因此可以以CRB(\mathbf{Q})和传输速率 $R(\mathbf{Q})$ 分别表征目标探测和通信性能,并通过优化算法得到发射信号的协方差矩阵 \mathbf{Q} 。优化问题的一般模型为^[114]

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{Q} \succeq 0} R(\mathbf{Q}) \\ \text{s.t. CRB}(\mathbf{Q}) \leq \Gamma, \\ \text{tr}(\mathbf{Q}) \leq P \end{aligned} \quad (6)$$

其中, Γ 为目标角度估计的CRB阈值, P 为发射功率阈值。2023年,西北工业大学梁军利教授团队^[94]在双基地雷达探测体制下,同时考虑了目标离开角(Direction-of-Departure, DOD)与到达角(Direction-of-Arrival, DOA)的估计性能,以最小化通信系统的扩展MUI为目标函数建立优化问题为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{X}} \max \frac{\text{MUI}}{\text{BCD}} \\ \text{s.t. CRLB}_{\theta} \leq \varepsilon_1, \\ \text{CRLB}_{\phi} \leq \varepsilon_2, \\ \|\mathbf{X}\|_{\text{F}}^2 \leq P \end{aligned} \quad (7)$$

其中, P 表示发射功率阈值,BCD表示通信符号的类间距离(Between-Class Distance, BCD)即期望符号到非期望符号的距离,最优化MUI/BCD对应增强接收符号的可分离性。为了解决在DOA与DOD分式约束下最小-最大化分式目标函数的复杂分式规划(Fractional Programming, FP)问题,该团队首先引入辅助变量分别将分式目标函数与约束进行

简化,进而采用交替方向乘子(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)方法进行求解。

近年来,MI也被引入到DFRC系统性能的评估指标中,通信系统的MI表征可实现速率,雷达系统的MI可表征探测环境与目标回波之间的熵。在若干波形约束条件下建立可优化模型^[8]:

$$\max \rho I(\mathbf{X}; \mathbf{Y}_c | \mathbf{H}_c) + (1 - \rho) I(\mathbf{H}_s; \mathbf{Y}_s | \mathbf{X}) \quad (8)$$

其中, $I(\mathbf{X}; \mathbf{Y}_c | \mathbf{H}_c)$ 和 $I(\mathbf{H}_s; \mathbf{Y}_s | \mathbf{X})$ 分别为通信系统和雷达系统的MI, \mathbf{X} 为DFRC信号, \mathbf{Y}_c 与 \mathbf{Y}_s 分别为通信用户接收信号和目标回波信号, \mathbf{H}_c 与 \mathbf{H}_s 分别为通信信道与目标响应,权重因子 $\rho \in [0, 1]$ 是为了权衡探测与通信性能。

(4) 以提升雷达检测性能为主的DFRC信号优化设计方法。由于相对熵能直接与发射信号建立关系,因此在作为优化目标函数时往往比检测概率更加灵活。以单天线场景为例,相对熵的表达式可写为^[8]

$$D(P_0 \| P_1) = \text{tr} \left[\sigma^2 (\mathbf{C}_s + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} - \mathbf{I} \right] + \phi \quad (9)$$

其中, $\mathbf{C}_s = \bar{\sigma}^2 \mathbf{x} \mathbf{x}^H$, $\bar{\sigma}^2$ 为目标反射系数分布的方差, \mathbf{x} 为发射信号, σ^2 为高斯白噪声分布的方差。 ϕ 的表达式为

$$\phi = \ln \det (\mathbf{C}_s + \sigma^2 \mathbf{I}) - \ln \det (\sigma^{2N_s}) \quad (10)$$

其中, N_s 为样点数目。

表1从探测与通信在多域资源利用方面的矛盾角度总结了简单场景下的DFRC信号设计存在的问题以及目前的解决方案。

5 复杂场景下的DFRC信号优化设计研究进展

在实际应用中,DFRC系统往往面临着复杂的探测环境,如当环境中存在杂波、电子干扰以及多个探测目标等,给DFRC系统的信号设计提出了挑战。为了使DFRC系统能灵活适应复杂场景下的特定需求,在信号设计中需要充分利用实际环境中的先验信息,根据实际任务所需的探测性能与通信性

表 1 简单场景下DFRC波形存在的主要问题及解决方案总结

Tab. 1 Summary of major problems and solutions for DFRC waveforms in simple scenarios

具体指标	所需条件	主要矛盾	目前解决方案
探测威力	发射波形满足恒包络条件	恒包络约束限制了通信系统的自由度	将恒包络或低PAR作为信号优化约束条件 ^[49,50,110,112]
频谱扩展程度	波形相位连续	采用传统产生相位跳变的信息调制方式会使得主瓣之外的功率谱衰减速度较慢	采用相位连续的通信波形 ^[21-23,47,48,68,69] ; 采用相位变化幅度较小的调制方式 ^[27-30,38] 修改调制码元的取值和分布位置 ^[64,65] ;
模糊函数特性	模糊函数具有良好的旁瓣特性	通信信息的随机特性导致距离旁瓣幅度波动	加窗反卷积技术 ^[64] ; 基于模糊函数特性优化发射信号 ^[49,50,84,107,108] ;
天线方向图特性	发射功率尽量集中在天线方向图主瓣;波束指向性强	通信用户通常与目标处于不同的方位,波束主瓣对应的探测功率被分割	最大化主瓣探测功率或约束旁瓣通信用户的功率 ^[111,112] ; 基于天线方向图模板匹配 ^[109,110,113]
CRB	CRB尽量小	通信速率与CRB相互制约	发射信号具有确定的样本协方差矩阵 ^[41]

能, 确定优化的目标函数、性能约束及相关波形约束, 设计合理的优化算法。

5.1 杂波场景

在存在杂波的探测环境中对DFRC信号进行优化建模时, 通常是根据杂波先验信息推导性能指标如信杂噪比(Signal-to-Clutter-plus-Noise Ratio, SCNR)的表达式, 在通信性能约束下优化雷达在杂波环境下的性能。而对于强度大且分布广的杂波, 还可以利用其空时二维耦合谱特性, 在DFRC信号设计中结合空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)实现杂波抑制^[115]。

2024年, 东南大学刘楠教授团队Li等人^[116]将DFRC系统中的多个通信用户和与发射站相距较近的单个通信用户建模为扩展散射体, 在线性块级预编码的块长度足够大的假设下, 以目标响应与接收回波之间的MI为目标函数建立优化模型, 并分别采用了半正定松弛(Semi-Definite Relaxation, SDR)和上界函数最小化(Majorization-Minimization, MM)方法对波束成形矩阵进行求解。同时该团队还对比了分别以MI, CRB以及天线波束方向图特性为目标函数建立优化模型时求解得到的雷达探测性能, 说明不同的优化模型会对雷达探测性能产生不同的影响。

2023年, 国防科技大学金添教授团队Zhu等人^[117]以MIMO雷达输出SCNR为目标函数, 提出了杂波环境中的DFRC信号设计方案。优化问题可建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{X}} \eta(\mathbf{R}) \\ & \text{s.t. } |\mathbf{h}_k \mathbf{x}_n - \mathbf{s}_k(n)|^2 \leq \Gamma_k, k = 1, 2, \dots, K, \\ & \quad n = 1, 2, \dots, N_s \\ & |\mathbf{x}_{n_T, n}| = \sqrt{u}, n_T = 1, 2, \dots, N_T, n = 1, 2, \dots, N_s \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\eta(\mathbf{R})$ 为雷达输出的SCNR, N_T 为阵列天线数目, Γ_k 为第 k 个通信用户接收符号的误差约束, N_s 为样点数目, $|\mathbf{x}_{n_T, n}| = \sqrt{u}$ 为发射信号的恒模约束。由于传输的码字是相互独立的, 因此可基于坐标下降(Coordinate Descent, CD)方法将此非凸的高维优化问题转化为多个易于求解的一维子问题进行求解。

2022年, 唐波教授团队^[54]提出了杂波环境下, 发射波形与接收滤波器联合设计的DFRC信号的设计方案。接收信号 \mathbf{y} 经滤波器 $\bar{\mathbf{w}}$ 滤波后的信号为 $\mathbf{z} = \bar{\mathbf{w}}^H \mathbf{y}$ 。在已知杂波干扰幅度和方向以及通信信道状态信息(Channel State Information, CSI)的条件下最大化雷达输出SINR, 优化问题可建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{X}, \bar{\mathbf{w}}} \text{SINR}(\mathbf{X}, \bar{\mathbf{w}}) \\ & \text{s.t. } \psi_k(\mathbf{X}) \leq \varsigma_k, k = 1, 2, \dots, K \\ & \quad \mathbf{X} \in \chi \end{aligned} \quad (12)$$

其中, \mathbf{X} 为发射信号, 第1条约束为多用户干扰约束, 第2条约束为发射信号约束集合。针对上述优化问题, 该团队采用基于循环优化和SDR的嵌套优化算法进行求解。如图10所示, DFRC发射平台的波束方向图能在杂波干扰方向 $\{-10^\circ, 10^\circ, 60^\circ\}$ 上陷零, 而在目标方向 $\theta = 30^\circ$ 上达到最高的增益。然而该DFRC信号不是恒定包络, 且问题的求解复杂度较高。2023年, 唐波团队^[55]进一步提出了杂波场景下恒定包络的DFRC信号优化设计方法, 并提出了基于循环优化、Dinkelbach变换和ADMM的高效嵌套优化算法进行求解。

2022年, 大连理工大学李明教授团队^[96]在强杂波背景下, 首次提出可将STAP和符号级预编码(Symbol-Level Precoding, SLP)技术集成到DFRC系统中, 通过联合设计空时自适应的发射波形和接收滤波器来提升DFRC系统性能。杂波协方差矩阵的表达式可写为

$$\mathbf{R}_C = \mathbb{E}(\mathbf{y}_C \mathbf{y}_C^H) = \sum_{l=-L}^L \bar{\mathbf{J}}_l \bar{\mathbf{X}} \mathbf{M}_l \bar{\mathbf{X}}^H \bar{\mathbf{J}}_l^H \quad (13)$$

其中, \mathbf{y}_C 为杂波回波, $\bar{\mathbf{J}}_l$ 为转移矩阵, \mathbf{M}_l 为第 l 个距离单元内的杂波二阶统计量, $\bar{\mathbf{X}}$ 是发射波形矩阵。由目标回波、杂波和噪声叠加组成的接收信号经过雷达接收机空时滤波器 $\bar{\mathbf{w}}$ 后输出, 并进一步进行目标检测, 如图11所示。由此可建立关于雷达输出SINR的优化问题如下:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{x}, \bar{\mathbf{w}}} \frac{\sigma_0^2 |\bar{\mathbf{w}}^H \bar{\mathbf{X}} \mathbf{u}_0|^2}{\bar{\mathbf{w}}^H \left[\sum_{l=-L}^L \bar{\mathbf{J}}_l \bar{\mathbf{X}} \mathbf{M}_l \bar{\mathbf{X}}^H \bar{\mathbf{J}}_l^H + \sigma_r^2 \mathbf{I} \right] \bar{\mathbf{w}}} \\ & \text{s.t. } \Re\{\bar{\mathbf{h}}_i^H \mathbf{x}\} \geq \bar{\gamma}_i, \forall i = 1, 2, \dots, 2KM_u N_s \\ & \quad \|\mathbf{x}\|^2 = P \\ & \quad \mathbf{x} \in \chi \end{aligned} \quad (14)$$

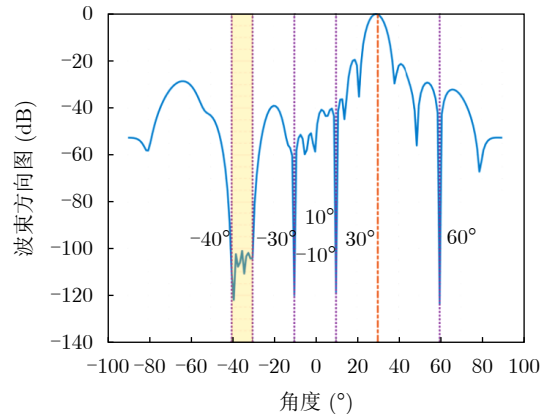
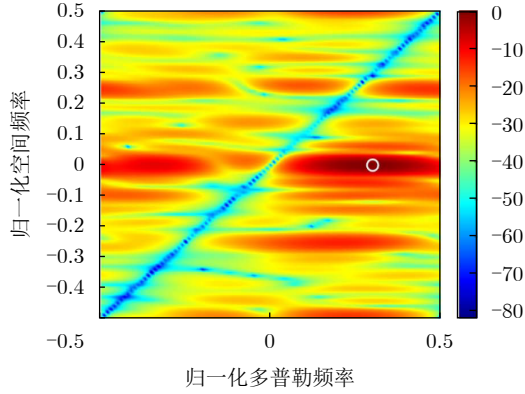


图10 波束方向图(MUI能量为 10^{-3})^[54]

Fig. 10 Beampattern of the dual function radar and communication systems with MUI energy of 10^{-3} ^[54]

图 11 时空互模糊图^[96]Fig. 11 Space-time cross-ambiguity function^[96]

其中, $\Re\{\hat{\mathbf{h}}_i^H \mathbf{x}\} \geq \bar{\gamma}_i, \forall i = 1, 2, \dots, 2KM_u N_s$ 为采用 SLP 技术时 K 个通信用户的符号检测性能约束, M_u 和 N_s 分别是相干处理间隔 (Coherent Processing Interval, CPI) 内的脉冲数目和单脉冲的采样点数, \mathbf{u}_0 是由多普勒频率和导向矢量构成的空时导向矢量。 $\|\mathbf{x}\|^2 = P$ 为发射功率限制, $\mathbf{x} \in \chi$ 为波形约束, 如恒包络。相比于同时采用 STAP 和 SLP 技术的信号联合设计方案, 在只采用 SLP 的方案中对应的雷达输出 SINR 更高, 说明杂波抑制会带来雷达探测性能损失。为了求解由复杂非凸目标函数和非凸约束条件组成的优化问题, 该团队利用 MM 算法的思想推导出上界代理函数, 并借助辅助变量和非线性等式约束 ADMM 算法的思想, 将原问题转化为多个子问题进行迭代求解。

近年来, 由于超大规模 MIMO (Extremely Large-scale MIMO, XL-MIMO) 阵列能在实现高分辨率雷达传感的同时提供高通量通信的潜力, 因此被引入到了 DFRC 系统的设计方法中。为了解决其带来的高成本问题, 借助低分辨率模数转换/数模转换器 (Analog-to-Digital Converts/Digital-to-Analog Converters, ADCs/DACs) 来降低射频链的成本是一种有效的方式^[118,119]。2023 年, 文献^[120]考虑了集中式 MIMO 雷达在杂波环境中的目标探测性能, 以雷达量化信噪比 (Quantized Signal-Clutter-Noise power Ratio, QSCNR) 为目标函数, 以通信性能为约束, 对 DFRC 系统的发射波形与接收滤波器进行联合优化设计。该信号设计方法显著降低了硬件成本, 并同时使 DFRC 系统性能损失控制在可接受范围。

总的来说, 杂波场景下的 DFRC 系统性能与杂波先验信息的准确度直接相关。多数情况下, 杂波强度及其统计特性在不同的距离单元和不同的时刻也被建模为一致。而在实际探测环境中, 杂波可能由于具体的地理环境而具有非均匀时变特性, 或由于天线阵列非正侧视放置而具有非平稳特性。

5.2 起伏目标场景

在实际的目标探测任务中, 目标的雷达截面积 (Radar Cross Section, RCS) 是视角、频率和极化的复杂函数, 不同类型的目标具有不同的 RCS 统计特性。当雷达接收机与目标之间的相对运动较快时, 即使在 CPI 内也会出现脉冲间 RCS 值去相关的现象。因此, 在信号优化设计中需要根据感兴趣目标的 RCS 统计特性来构建优化问题。

2023 年, 唐波教授团队^[56]将 MIMO 雷达的感兴趣目标建模为莱斯目标, 该类型的目标通常由一个主散射体和若干随机散射体组成, 其响应矢量服从循环对称高斯分布, RCS 服从莱斯分布。根据目标检测的假设检验分别推导出存在目标和不存在目标假设下回波的 PDF 即 P_1 和 P_0 , 并使用二者的相对熵 $D(P_0 \| P_1)$ 作为性能指标进行 DFRC 信号优化设计。优化问题可建模为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{X}} D(P_0 \| P_1) \\ & \text{s.t. } f(\mathbf{X}) \leq \varsigma \\ & \quad \text{tr}(\mathbf{X}\mathbf{X}^H) \leq P \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\text{tr}(\mathbf{X}\mathbf{X}^H) \leq P$ 表示发射功率约束, $f(\mathbf{X}) \leq \varsigma$ 表示通信用户的 MUI 性能。为解决该非凸优化问题, 该团队提出了两种方法。在第 1 种方法中, 采用了 MM 方法, 并且在该方法的每次迭代中分别采用 SDR、秩 1 分解法和 ADMM 来解决二次约束二次规划 (Quadratically Constrained Quadratic Programming, QCQP) 问题。在第 2 种方法中, 提出了一种新的 ADMM 算法来直接处理该非凸优化问题。

在实际探测场景中, 运动目标的状态往往具有随机性和机动性的特点, 单个 CPI 内目标的 RCS 也可能发生明显的起伏, 该起伏可能会导致雷达对运动目标的检测性能受到影响, 因此在 DFRC 信号设计中也需要考虑如何对快起伏目标进行建模。

5.3 多目标场景

雷达对多目标的探测主要包括两方面, 即多目标存在性检测和多目标跟踪任务。目标的存在性检测主要关注感兴趣区域内是否存在目标及其个数, 后续多目标处理则需要根据目标在多维参数上的差异来提取各目标的参数信息。而在密集多目标场景下, DFRC 信号设计不仅需要考虑到多目标检测和参数测量精度的问题, 还需要考虑如何获取多目标参数, 实现密集多目标分离。

为了确保雷达对各目标均具有稳健的探测性能, 清华大学张晓平教授团队 Zhao 等人^[121]在 2024 年提出了一种最小-最大化优化模型, 即在各通信用户的 SINR 约束下最小化各目标 DOA 估计的 CRB。设

DFRC系统感兴趣的目标数目为 M ，通信用户数目为 K ，可建立优化模型：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}} \max_{\theta_m \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M\}} C_{\text{CRB}}(\theta_m) \\ \text{s.t. } \text{diag}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) = \frac{P}{N_T}, \\ \gamma_k \geq \Gamma, k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (16)$$

其中， $C_{\text{CRB}}(\theta_m)$ 为雷达对第 m 个探测目标角度估计的CRB， \mathbf{W} 为波束成形矩阵， $\text{diag}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) = P/N_T$ 为发射功率约束， N_T 为阵列天线数目， $\gamma_k \geq \Gamma$ ， $k = 1, 2, \dots, K$ 为各通信用户的SINR约束。该团队将上述非凸优化问题转化为对矩阵特征值的优化问题后，通过SDR方法来进行求解。该信号设计方案在已知目标数目和各目标反射系数的前提下，实现了鲁棒的多目标DOA估计。

2024年，中国科学技术大学邱玲教授团队Ren等人^[122]提出了一种在DFRC系统发射功率和多个通信用户可实现速率约束下，同时考虑多目标检测和跟踪性能的DFRC信号设计方案。首先在目标检测阶段，DFRC系统需要根据目标回波对多目标响应矩阵进行估计，并进一步提取多目标数目和角度信息。在该阶段将多目标响应矩阵估计性能作为优化目标函数。其次在目标跟踪阶段，采用目标复系数和方位角估计性能作为优化目标函数。针对目标检测/跟踪性能建立的优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{S}_x \geq 0} \text{CRB}(\mathbf{S}_x) \\ \text{s.t. } \min_{k \in \mathcal{K}} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\mathbf{h}_k^H \mathbf{S}_x \mathbf{h}_k}{\sigma^2} \right) \right\} \geq \bar{R}, \\ \text{tr}(\mathbf{S}_x) \leq P \end{aligned} \quad (17)$$

其中， $\text{CRB}(\mathbf{S}_x)$ 可表示给定发射信号协方差矩阵 \mathbf{S}_x 的情况下，目标检测或目标跟踪阶段对应的参数估计的CRB， \bar{R} 和 P 分别为通信速率与发射功率约束，对于该复杂非凸的优化问题，该团队提出了基于连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)的优化算法进行求解。

2022年，北京航空航天大学王祖林教授团队^[123]提出了一种发射波束成形矢量和雷达探测接收波束成形矢量的联合设计方法。在已知各目标和杂波干扰源角度分布的情况下，对杂波进行了抑制并最大限度提高了雷达对高价值目标的检测性能。建立优化模型为

$$\begin{aligned} \max_{\{\mathbf{w}, \mathbf{g}_m, \forall m\}} \gamma_{R, \bar{m}} \\ \text{s.t. } \gamma_C \geq \Gamma_C \\ \gamma_{R, k} \geq \Gamma_{R, k}, k \in K_r, k \neq \bar{m} \\ \mathbf{w}^H \mathbf{w} \leq P \\ \mathbf{g}_m^H \mathbf{g}_m = 1, m \in K_r \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $\gamma_{R, \bar{m}}$ 和 $\gamma_{R, k}$ 分别为高价值目标和普通目标的SINR， γ_C 为通信用户的SINR， \mathbf{w} 和 \mathbf{g}_m 分别为发射波束成形矢量和第 m 个目标对应的接收波束成形矢量。

2024年，廖斌教授团队^[92]进一步提出了同时存在多目标、多个通信用户和多个信号相关干扰场景下的发射波束成形矢量和探测接收波束成形矢量联合设计方法，与文献^[123]不同的是，该团队假设干扰源角度和CSI均存在误差。在通信中断概率和雷达输出信噪比约束的情况下，建立优化模型通过最小化发射功率来设计鲁棒的发射和接收波束形成器。

为了获取更大的DFRC系统性能调节自由度，学者引入了辅助变量以更灵活地调节DFRC系统性能。2023年，文才教授团队^[77]提出了一种对DFRC系统发射信号、目标回波信号滤波器和通信接收复系数进行联合设计的信号设计方法，其中通信接收复系数的引入为DFRC信号设计增加了设计自由度，有利于更加灵活地权衡探测和通信性能。考虑多目标、多个任意位置杂波干扰和多个通信用户共存的情况，该团队建立了最大化雷达系统输出SINR的优化问题。优化问题建模为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}, \alpha, \{\bar{\mathbf{w}}_m\}_{m=1}^M} \min_m \text{SINR}_{R, m}(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{w}}_m) \\ \text{s.t. } \bar{\mathbf{w}}_m^H \bar{\mathbf{A}}_m \mathbf{x} = 1, \forall m \\ \text{SINR}_{C, k}(\mathbf{x}, \alpha_k) \geq \gamma_k, \forall k \\ \|\mathbf{x}_n\|^2 = P, \forall n \\ |\mathbf{x}_n(\bar{l})|^2 \leq \bar{\eta}, \forall n, \forall \bar{l} \end{aligned} \quad (19)$$

其中， \mathbf{x} 为发射信号， $\bar{\mathbf{w}}$ 为目标回波接收滤波器， $\bar{\mathbf{A}}_m$ 为阵列导向矢量， α 为预编码增益(与通信接收复系数直接相关)， $\text{SINR}_{R, m}$ 为第 m 个探测目标的SINR， $\text{SINR}_{C, k}$ 为第 k 个通信用户的SINR， P 和 $\bar{\eta}$ 分别为发射功率和PAR阈值。对于上述NP难的非凸问题，该团队提出了一种基于SCA的迭代算法进行求解。

2020年，清华大学刘一民教授团队Liu等人^[86]提出了一种由雷达波形和通信符号的加权和组成的DFRC信号，其表达式为

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}_r \mathbf{s} + \mathbf{W}_c \mathbf{c} \quad (20)$$

其中， \mathbf{s} 和 \mathbf{c} 分别为包含雷达波形和通信符号的矢量， \mathbf{W}_r 和 \mathbf{W}_c 分别雷达波形和通信符号的预编码矩阵。通过同时对通信符号和雷达波形进行预编码，将DFRC系统中的MIMO雷达自由度扩展至与天线数目相等，可精准控制天线波束方向图特性。2023年，文才教授团队^[78]基于文献^[86]提出了一种对收发阵列导向矢量以及CSI误差具有鲁棒性的发射与接收波束形成联合设计方法。在通信中断概

率、发射功率以及雷达和通信系统相关误差量的约束下,建立优化模型以保证雷达的弱目标检测性能。2022年,麻省理工学院Pritzker等人^[124]采用了与文献[86]相似的加权预编码方法,但优化问题的建立分别是以保证雷达探测性能与侧重雷达探测性能为准则。在保证雷达探测性能准则下的优化问题中,以雷达探测性能为约束,最大化通信用户的最小SINR,并且将DFRC系统的剩余功率资源用于通信功能。在侧重雷达探测性能准则下的优化问题中,同时以雷达探测性能和通信性能为约束,最大化关闭的通信链路数,DFRC系统的所有剩余功率均分配给雷达探测子系统。该信号设计方法最大限度提升了DFRC系统中雷达子系统的性能。2024年,电子科技大学唐万斌教授团队Zhang等人^[125]采用了与文献[86]相似的加权预编码方法,考虑了一种多目标、杂波以及多个隐蔽和公开通信用户共存的复杂场景,提出了对CSI误差具有鲁棒性的发射和接收波束形成器联合设计的优化框架。在通信性能、发射功率以及通信系统隐蔽性约束下,以最大化雷达输出SINR为目标函数建立优化模型,求解DFRC系统的发射波束形成器和雷达探测系统的接收波束形成器。

上述分别对通信符号和雷达波形进行线性预编码的方法^[78,86,124,125]是基于对传输信号的统计,根据该方法得到的DFRC信号不一定能实现期望的雷达模糊函数特性。2023年,文才教授团队^[79]提出了一种基于混合线性-非线性预编码技术(Hybrid Linear-Nonlinear Precoding, HLNP)的DFRC信号优化设计方法,在多个通信用户的SINR约束、发射功率约束和发射信号PAR约束下,最优化发射天线波束方向图的综合主旁瓣比(Integrated Main-Lobe-to-Sidelobe Ratio, IMSR)和辐射信号在各目标方向上的模糊函数特性。发射信号的表达式为

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}_{\text{LP}}\mathbf{S} + \mathbf{V} \quad (21)$$

其中, \mathbf{S} 为通信符号组成的矩阵, \mathbf{W}_{LP} 为线性预编码矩阵, \mathbf{V} 为 \mathbf{S} 的非线性预编码信号。 $\mathbf{W}_{\text{LP}}\mathbf{S}$ 的特性使得发射信号适合于通信功能的实现,通过引入非线性预编码信号 \mathbf{V} ,可进一步提升雷达探测系统的性能。目标函数 $f_0(\mathbf{W}_{\text{LP}}, \mathbf{V})$ 的表达式为

$$f_0(\mathbf{W}_{\text{LP}}, \mathbf{V}) = \frac{1}{\text{IMSR}(\mathbf{W}_{\text{LP}}, \mathbf{V})} + \beta \sum_{m=1}^M |\text{SL}_m(\mathbf{W}_{\text{LP}}, \mathbf{V})|^2 \quad (22)$$

其中, M 为目标数目, β 为模糊函数特性优化的权重, $\text{IMSR}(\mathbf{W}_{\text{LP}}, \mathbf{V})$ 表示发射天线波束方向图的IMSR, $\text{SL}_m(\mathbf{W}_{\text{LP}}, \mathbf{V})$ 表示在第 m 个目标方位处的波形相似性。

目前DFRC系统在发射天线波束方向图的设计方面大多只对单个固定角度进行优化,未关注目标移动带来的雷达视线方向失配问题。2023年,廖斌教授团队^[93]提出可通过将天线波束方向图的主要能量集中在目标移动范围即感兴趣区域(Region-of-Interest, ROI),以满足DFRC系统需连续探测移动多目标的任务需求。建立优化模型最大化ROI的探测功率:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{W}} \min_{\theta \in \Theta_{\text{ROI}}} B(\mathbf{W}, \theta) \\ & \text{s.t. } \text{SINR}_k(\mathbf{W}) \geq \gamma_k, \forall k, \\ & \quad \mathbf{h}_k \in \mathcal{H}_k, \forall k, \\ & \quad \mathbf{R}_k = \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H, \forall k, \\ & \quad \|\mathbf{W}\|_{\text{F}}^2 \leq P, \mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \cdots \ \mathbf{w}_K] \end{aligned} \quad (23)$$

其中, $B(\mathbf{W}, \theta)$ 为发射天线波束方向图, Θ_{ROI} 为离散的目标角度集合, SINR_k 和 \mathbf{w}_k 分别为第 k 个通信用户的SINR与波束成形矢量, $\mathbf{h}_k \in \mathcal{H}_k, \forall k$ 为CSI误差约束, P 为发射功率阈值。该DFRC信号设计方法对不精确的CSI具有鲁棒性,且可在一定空间范围内形成多波束对移动多目标进行检测,但优化问题的求解复杂度较高。

2023年,王向荣教授团队^[82]提出了一种基于强化学习(Reinforcement Learning, RL)的多目标检测算法,消除了DFRC信号设计对环境先验信息的依赖性,增强了DFRC系统在未知环境中的目标检测能力。在RL的单个训练中包含两个连续的回波脉冲,其中第1个脉冲表示定向探测的回波脉冲,第2个脉冲表示全向探测的回波脉冲,采用定向与全向探测回波脉冲联合训练的优势在于其既能对可能存在目标的角度区间进行持续探测,也能通过对所有角度空间持续扫描从而捕获弱目标。通信信息是通过调制通信用户方向的复波束方向图的幅度或相位嵌入。如图12所示,在第70次脉冲的时刻,4个动态目标的方向和信噪比都发生了变化,此时该信号设计方法仍然能够实时有效地捕获所有目标。

综上所述,目前对多目标场景下的DFRC信号

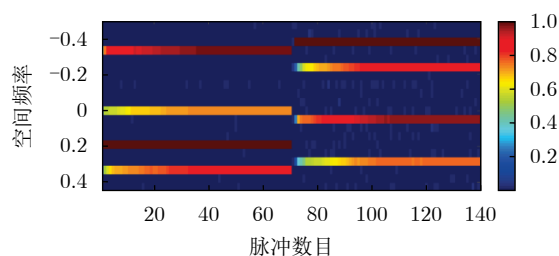


图12 动态环境下的多目标检测概率与RL训练时长之间的关系^[82]

Fig. 12 Detection probability of multi-target in dynamic environment^[82]

优化设计方法的研究较为全面,但对于辐射信号的模糊函数特性和目标移动带来的检测问题考虑较少,也缺乏对如何利用DFRC信号设计和处理方法获取密集多目标的距离、速度等参数实现多目标有效分离方面的关注。

5.4 电子对抗场景

随着电子战形态不断演变,未来的电子对抗必将朝着多功能集成作战的方向发展。相比于传统DFRC系统,多功能系统可集探测、通信、干扰和抗干扰等功能为一体,具有广阔的应用前景^[84]。

2022年,唐波教授等人^[59]提出了基于MIMO阵列的综合射频(Multi-Function Radio Frequency, MFRF)系统,该系统集雷达探测、通信和电子干扰功能为一体,在实现探通功能的同时可对敌方实施电子干扰。2023年,该团队进一步研究了对探测目标、通信用户以及干扰对象角度估计误差具有鲁棒性的DFRC信号设计方法^[60]。第 k 个感兴趣方向 $\theta_k \in \Omega_k, k = 1, 2, \dots, \bar{K}$ 的角度估计误差被限制在一定范围内,其中 $\Omega_k = [\theta_{k,1} \ \theta_{k,2} \ \dots \ \theta_{k,N_k}]$ 。在DFRC发射信号功率和PAR约束下,以最小化实际合成信号与期望信号的匹配误差为目标函数建立优化模型:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{S}_T} \max_{\theta_{k,m} \in \Omega_k} & \left\| \boldsymbol{\alpha}^H(\theta_{k,m}) \mathbf{S}_T - \mathbf{d}^H(\theta_k) \right\|_2^2 \\ \text{s.t. } & \mathbf{s}_n^H \mathbf{s}_n = P/N_T, \\ & \text{PAPR}(\mathbf{s}_n) \leq \bar{\eta}, n = 1, 2, \dots, N_T \end{aligned} \quad (24)$$

其中, \mathbf{S}_T 为发射信号矩阵且有 $\mathbf{S}_T = [\mathbf{s}_1 \ \mathbf{s}_2 \ \dots \ \mathbf{s}_{N_T}]^T$, N_T 为发射天线数, $\boldsymbol{\alpha}$ 为发射阵列导向矢量, \mathbf{d} 为期望的合成信号, P 为发射总功率, $\bar{\eta}$ 为发射信号的PAR阈值。该信号设计方法降低了DFRC系统对感兴趣目标、通信用户以及干扰对象角度估计精确度的要求,并在实现探通功能的同时显著降低了敌方雷达的目标检测概率。

文献^[59,60]研究了如何利用MIMO阵列设计DFRC信号,分区域同时进行雷达探测、通信以及电子干扰。在抗干扰方面,2023年,西南交通大学Zhou等人^[126]提出了一种通过发射信号和接收滤波器联合优化设计以抑制部分脉冲重复干扰(Partial Pulse Repeater Jamming, PPRJ)的方法。发射信号和雷达接收滤波器的ISL表示为

$$\text{ISL}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{w}}) = \sum_{l_s=1-L_s, k \neq 0}^{L_s-1} |\bar{\mathbf{x}}^H \mathbf{U}_{l_s} \bar{\mathbf{w}}|^2 \quad (25)$$

其中, $\bar{\mathbf{x}}$ 和 $\bar{\mathbf{w}}$ 分别为DFRC发射信号和雷达接收滤波器, \mathbf{U}_{l_s} 为时延转移矩阵, L_s 为脉冲的离散长度。DFRC系统对PPRJ信号的抑制效果可表示为

$$\text{IL}(\mathbf{x}_J, \bar{\mathbf{w}}) = \sum_{l_s=1-L_s}^{L_s-1} |\mathbf{x}_J^H \mathbf{U}_{l_s} \bar{\mathbf{w}}|^2 \quad (26)$$

其中, $\mathbf{x}_J = \mathbf{J}\bar{\mathbf{x}}$ 为干扰信号, \mathbf{J} 矩阵决定了干扰机对发射信号进行部分采样的长度以及重复转发的次数。优化模型为

$$\begin{aligned} \min_{\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{w}}} & \rho \text{ISL}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{w}}) + (1 - \rho) \text{IL}(\mathbf{x}_J, \bar{\mathbf{w}}) \\ \text{s.t. } & C_1: |\arg \mathbf{x}(\bar{l}) - \arg \mathbf{s}_c(\bar{l})| < \xi, \bar{l} = 0, 1, \dots, L_s-1 \\ & C_2 - C_5 \end{aligned} \quad (27)$$

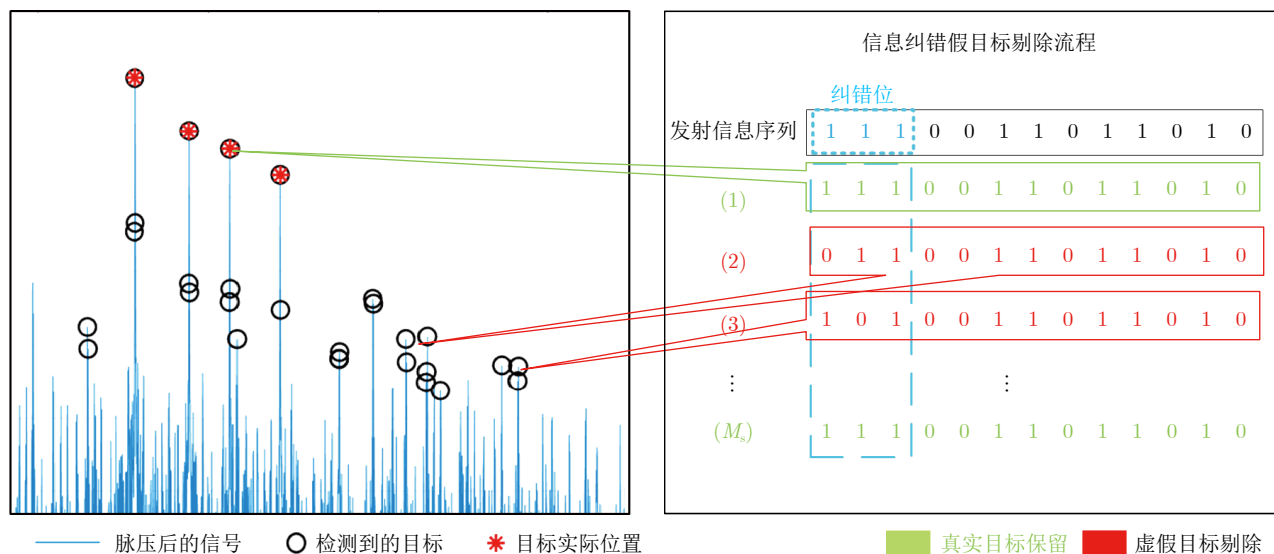
其中, $\rho \in [0, 1]$ 为探测性能与干扰抑制性能之间的权重因子, $C_2 - C_5$ 表示能量约束、非匹配滤波体制带来的SNR损失约束以及PAR约束。 C_1 表示优化序列与通信符号之间的相似性, \mathbf{s}_c 为通信符号序列, ξ 的值越小,实际嵌入的通信符号与期望传输的通信符号之间的误差越小。对于上述非凸多约束问题,该团队提出了一种新的解耦MM (Decoupled Majorization-Minimization, DMM)算法进行求解。该信号优化设计方法有效抑制了PPRJ干扰信号,未来还应考虑其他间歇采样转发干扰(Intermittent Sampling Repeater Jamming, ISRJ)方式,如间歇采样逐次循环转发和基于间歇采样转发的组合型干扰等,以增强DFRC系统抗密集假目标干扰的能力。

由于双多基地等分布式探测体制具有抗干扰优势,因此,通过DFRC信号优化设计改善分布式探测性能的研究工作受到了广泛关注。国防科技大学施龙飞研究员团队^[61,62]在2020年提出了一种将同步信息嵌入探测信号的双多基地雷达体制——通信化雷达。该体制不仅有效解决了收发站之间严格的同步需求限制探测系统灵活性和生存能力的问题,还实现了利用内嵌校验码以识别和剔除密集假目标的目的^[63],其基本原理如图13所示。

与目前DFRC系统应用的典型体制相比,通信化雷达体制具有以下特点:(1)目标检测与通信信息解调是互相影响的过程,通过设计合理的信号处理方法,可实现通信性能与雷达性能的均衡;(2)在DFRC发射平台与接收站之间的高速通信链路被敌方恶意破坏时,该体制能利用目标的前向散射回波建立临时通信链路;(3)与追求高通信速率的体制不同,通信化雷达体制在信息内容和传输数据量方面具有较为稳定的需求,大大降低了DFRC信号设计面临的困难。

综上所述,复杂场景下DFRC信号设计还存在以下5点不足之处:

(1) 对复杂场景考虑不全面,如低空突防场景、典型ISRJ干扰场景以及分布式探测体制下的信号优化设计方法还需进一步研究;

图 13 通过信息纠错剔除虚假目标原理^[63]Fig. 13 Principle of eliminating false targets through information error correction^[63]

(2) 系统性能较为依赖场景先验信息, 信号鲁棒性有待提升。在部分DFRC信号优化设计方法中, 环境先验信息是完美已知的, 因此系统性能对目标和干扰源相关信息的估计误差可能比较敏感;

(3) 对探测性能随传输信息不同而起伏的问题考虑较少。目前的DFRC信号优化设计大多是在单个CPI内进行的, 针对随机通信信息对雷达探测性能产生的影响方面讨论较少。在未来的DFRC信号优化设计方法研究中, 一方面应设计对传输信息变化不敏感的信号或采用将通信信息变化影响考虑在内的性能指标指导信号优化设计^[8,42], 另一方面也应研究能快速生成最优化信号的方法;

(4) 对雷达探测性能所需的模糊函数特性即波形自相关、互相关性能以及多普勒容限等方面关注较少。未来的DFRC信号优化设计可引入如波形相似性约束^[79]等对模糊函数特性进行控制;

(5) 对动态环境下的波形自适应与动态调整方面关注较少。在目前对DFRC信号设计的研究中, 发射信号难以与复杂环境进行交互感知。在DFRC信号设计中引入认知技术, 以机器学习方法为辅助工具, 根据环境和目标的相关知识对发射信号参数进行实时优化以提升DFRC系统性能是一种有效的方式^[82,127]。

表2总结了复杂场景下的DFRC信号设计研究存在的问题及可能的解决方案。

DFRC系统的应用场景、主要关注的性能以及相关性能约束不同, 优化问题的内在结构也随之变化, 传统的凸优化方法可能难以直接应用, 如何设计高效的优化算法也是DFRC信号设计需要关注的

问题。DFRC信号设计中的优化问题主要有以下两个特点:

(1) 优化问题往往是高度非线性的。目标函数通常是形式复杂的高度非线性函数, 如相对熵、CRB等, 同时可能还存在多个非线性约束。非线性目标函数与非线性约束的复杂表达式耦合在一起, 使得最终的优化问题变得高度非线性;

(2) 优化问题往往是非凸的。优化问题中可能同时存在复杂的非凸目标函数和非凸等式、不等式约束, 很难直接获得全局最优解。

对于上述复杂优化问题, 应根据具体的问题结构设计求解方法, 常用的求解方法有SDR^[128], ADMM^[129], MM^[130]以及CD^[131]。对于DFRC信号设计中目标函数形式复杂的优化问题, 可首先基于MM框架推导出易于求解的代理函数, 然后在MM的每一次迭代中根据实际问题结构联合ADMM或SDR等进行求解。对于约束条件复杂且非凸的优化问题, 可直接采用ADMM算法, 构建辅助变量, 将原始优化问题转化为多个容易求解的子问题, 通过交替优化原始变量和辅助变量得到原问题的解。对于DFRC信号设计中的多维非凸优化问题, 往往首先将其分解为多个容易求解的一维子问题, 然后对原始优化问题进行迭代求解。

表3从优化问题求解的角度总结了DFRC信号设计中常用的优化算法。

6 总结与展望

本文全面地介绍了面向探测应用的DFRC信号设计方法, 梳理了典型雷达探测场景下信号设计方法的最新进展以及仍然存在的问题和挑战。尽管国

表2 复杂场景下的DFRC信号设计研究进展总结

Tab. 2 Summary of research progress on DFRC signal design in complex scenarios

复杂场景	需考虑的因素	目前存在的问题总结	可能的解决方案
杂波	杂波参数的获取 非均匀时变杂波 非平稳杂波	1. 考虑的复杂环境不全面；	1. 应根据实际的复杂地理环境、目标特性以及电子干扰特性等进行DFRC信号设计；
起伏目标	慢起伏目标 快起伏目标	2. DFRC系统性能大部分情况下高度依赖于场景先验信息 ^[54,55,77,82] ；	2. 在信号设计过程中考虑先验信息的误差，设计鲁棒的发射信号 ^[86,92,93,125] ；
多目标	多目标检测性能 多目标参数估计性能 密集多目标分离	3. DFRC信号设计对探测性能随内嵌通信信息的不同而出现起伏的问题考虑较少 ^[66,116] ；	3. 可采用将通信信息变化考虑在内的性能指标 ^[8,42] 、设计对传输信息变化不敏感的信号和快速生成发射信号的方法等；
电子对抗	干扰参数的获取 典型有源/无源干扰 分布式雷达探测体制	4. DFRC信号优化设计对模糊函数特性关注较少 ^[54-56,77,82,86,93,116-126] 。 5. 对动态环境下的波形自适应与动态调整方面关注较少。	4. 可在优化模型中引入模糊函数特性 ^[79] ； 5. 引入认知技术、机器学习工具 ^[82] 等。

表3 DFRC信号设计中常用优化算法总结

Tab. 3 Summary of commonly used optimization algorithms in DFRC signal design

优化算法	可适用的问题	算法原理	算法主要优势
CD	可分解的多维优化问题 ^[61,117]	每次优化迭代只沿单一维度搜索，得到当前维度的极小值之后再循环沿其他维度搜索，最终得到目标函数的收敛值。	1. 可用于处理大规模问题； 2. 对于可分离的问题，通常具有较快的收敛速度。
SDR	非凸的QCQP优化问题 ^[56,93,116,121]	通过放宽非凸约束，将原问题松弛为半正定规划问题，进而获取原问题的近似解。	1. 将非凸问题转化为凸优化问题，并利用成熟的算法(如内点法)可在多项式时间内得到最优解。
MM	复杂非凸目标函数的优化问题 ^[56,59]	易于求解的上界函数替代复杂的目标函数，通过优化上界函数来完成对原始目标函数的优化求解。	1. 适用性广泛，可以处理各种类型的目标函数； 2. 通常具有较好的收敛性。
ADMM	约束条件复杂且非凸的优化问题 ^[56,56,59]	将原始优化问题分解成若干个相对简单的子问题，再将子问题的解结合起来得到原始问题的最优解。	1. 适用范围较广且通常具有较快的收敛速度； 2. 可通过并行实现减少对大规模问题处理时的复杂度。

内外学者和机构在探通信号设计方面已做了很多工作，该领域依然存在很多需要探索的研究方向。

(1) 一体化指标设计。在DFRC系统性能评估方面，目前仍然是分别独立对雷达系统和通信系统进行的，如何构建统一的性能指标对整个系统性能进行评估是亟待解决的问题。

(2) 探测通信协作。目前已有相关工作研究探测功能辅助下的隐蔽通信^[132]。在面向雷达探测的DFRC信号设计中，不但需要保证雷达探测性能受到的影响尽量小，同时还可以利用有限的通信功能服务于雷达系统进行目标定位、抗干扰等。

(3) 多功能场景下的DFRC信号设计。战场环境日趋复杂，通常是若干场景的组合，因此多功能集成是未来电子设备平台发展的必然趋势。目前大量学者已开始研究利用DFRC信号优化设计实现安全通信功能^[133-136]。如何通过信号优化设计，同时高效实现探测、通信、干扰以及抗干扰等功能需要进一步深入研究。

(4) 基于XL-MIMO阵列的DFRC系统。XL-MIMO的应用对DFRC信号设计带来了以下3点挑战：

(a) 近场环境下的DFRC设计^[71,83,97,137]。在面对

探测性能边界的变化方面，需要根据实际DFRC系统推导距离和角度的CRB来指导信号设计。在天线波束方向图设计方面，对于通信用户和目标分别处在相同角度但距离不同、近场和远场以及宽带近场环境的情况下，可在DFRC信号设计中考虑利用聚焦波束、波束分裂效应以及高效的功率分配等来提升目标的检测性能；

(b) 高计算复杂度。目前低复杂度的信道估计问题解决方案主要分为4类：基于统计特性的信道估计方法、基于极化域稀疏性的信道估计方法、基于信道知识地图的信道估计方法以及基于机器学习的信道估计方法，低复杂度的预编码技术可分为基于子阵列技术、基于距离感知技术以及迫零(Zero Forcing, ZF)预编码技术的改进等^[138]。低复杂度的CSI估计方法、预编码技术是实现鲁棒的通信与探测性能的关键，也是未来一个重要的研究方向；

(c) 低功耗与高效能设计。采用低比特量化技术^[118,120]、稀疏阵列技术^[139]以及可移动/流体天线阵列^[139]等降低XL-MIMO阵列的功耗是未来值得关注的研究方向。

(5) 不完美硬件对DFRC信号设计的影响^[34,95,140,141]。

在实际情况下,硬件设备总是存在一定的缺陷如量化误差、载波频偏、时间偏移以及相位噪声等,对DFRC系统性能产生了不利影响。梁军利教授团队^[95]与Zhang教授团队^[34]都分别对存在硬件缺陷情况下的信号设计方法进行了研究。如何联合信号设计与处理方法减轻硬件缺陷带来的系统性能损失,是未来值得研究的方向之一。

(6) 可重构智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RISs)、多频段可重构全息超表面(Multi-Band Reconfigurable Holographic Surfaces, MB-RHS)、大型智能表面(Large Intelligent Surface, LIS)、连续孔径阵列(Continuous Aperture Array, CAPA)等新技术在DFRC信号设计中的应用^[98-101,142-146]。上述新技术在带来更高的自由度和空间分辨率的同时,也存在信道维度过高带来的射频链路成本、功耗、波束成形复杂度等问题,因此设计低复杂度的波束成形优化求解方法以及推导目标参数估计精度衡量准则的表达式是信号优化设计的关键部分。

(7) 通感算一体化。通感算一体化技术利用通信功能支撑多节点的协作感知,结合分布式算力,增强对复杂探测环境和目标位置、速度、姿态等多维度信息的获取能力。其中通感算一体化信号优化设计、智能信号处理技术以及三者的性能理论极限、协作机制等问题是实现通感算一体化需重点考虑的问题^[41]。

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] 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](#).
- [2] FENG Zhiyong, FANG Zixi, WEI Zhiqing, *et al.* Joint radar and communication: A survey[J]. *China Communications*, 2020, 17(1): 1–27. doi: [10.23919/JCC.2020.01.001](#).
- [3] LIU Fan, MASOUIROS C, PETROPULU A P, *et al.* Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3834–3862. doi: [10.1109/TCOMM.2020.2973976](#).
- [4] ZHANG J A, LIU Fan, 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. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3113120](#).
- [5] WILD T, BRAUN V, and VISWANATHAN H. Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 30845–30857. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3059488](#).
- [6] LIU Fan, CUI Yuanhao, MASOUIROS 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](#).
- [7] 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](#).
- [8] 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](#).
- [9] 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](#).
- [10] 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. doi: [10.1109/TSET.1963.4337601](#).
- [11] 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. doi: [10.1109/TMTT.2005.843485](#).
- [12] BROUSSEAU R, SANDERS A, HUFFMAN D R, *et al.* An open system architecture for integrated RF systems[C]. 16th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Reflections to the Future, Irvine, USA, 1997: 5.1–1. doi: [10.1109/DASC.1997.635082](#).
- [13] DARPA. Shared spectrum access for radar and communications (SSPARC)[EB/OL]. <https://www.federalgrantswire.com/shared-spectrum-access-for-radar-and-communications-ssparc-darpa-baa-13-24.html#X40Vavk6s7M>, 2013.
- [14] HASSANIEN A, HIMED B, and RIGLING B D. A dual-function MIMO radar-communications system using frequency-hopping waveforms[C]. 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1721–1725. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944485](#).
- [15] EEDARA I P, HASSANIEN A, and AMIN M G. Performance analysis of dual-function multiple-input multiple-output radar-communications using frequency hopping waveforms and phase shift keying signalling[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(4): 402–418. doi: [10.1049/rst2.12100](#).

- [10.1049/rsn2.12043](https://doi.org/10.1049/rsn2.12043).
- [15] EEDARA I P, AMIN M G, and HASSANIEN A. Controlling clutter modulation in frequency hopping MIMO dual-function radar communication systems[C]. 2020 IEEE International Radar Conference, Washington, USA, 2020: 466–471. doi: [10.1109/RADAR42522.2020.9114840](https://doi.org/10.1109/RADAR42522.2020.9114840).
- [16] EEDARA I P and AMIN M G. Dual function FH MIMO radar system with DPSK signal embedding[C]. 27th European Signal Processing Conference, A Coruna, Spain, 2019: 1–5. doi: [10.23919/EUSIPCO.2019.8902743](https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2019.8902743).
- [17] EEDARA I P, AMIN M G, HOORFAR A, *et al.* Dual-function frequency-hopping MIMO radar system with CSK signaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(3): 1501–1513. doi: [10.1109/TAES.2021.3139445](https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3139445).
- [18] BAXTER W, ABOUTANIOS E, and HASSANIEN A. Joint radar and communications for frequency-hopped MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 729–742. doi: [10.1109/TSP.2022.3142909](https://doi.org/10.1109/TSP.2022.3142909).
- [19] ABOUTANIOS E, BAXTER W, and ZHANG Y D. Improved implementation of the frequency hopped code selection DFRC scheme[C]. 2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23), San Antonio, TX, USA, 2023: 1–6. doi: [10.1109/RadarConf2351548.2023.10149725](https://doi.org/10.1109/RadarConf2351548.2023.10149725).
- [20] BAXTER W, ABOUTANIOS E, and HASSANIEN A. Ambiguity function analysis of the frequency-hopped code selection scheme[C]. 2023 IEEE International Radar Conference (RADAR), Sydney, Australia, 2023: 1–6. doi: [10.1109/RADAR54928.2023.10371075](https://doi.org/10.1109/RADAR54928.2023.10371075).
- [21] SAHIN C, JAKABOSKY J, MCCORMICK P M, *et al.* A novel approach for embedding communication symbols into physical radar waveforms[C]. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, USA, 2017: 1498–1503. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944444](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944444).
- [22] SAHIN C, METCALF J G, and BLUNT S D. Filter design to address range sidelobe modulation in transmit-encoded radar-embedded communications[C]. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, WA, USA, 2017: 1509–1514. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944446](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944446).
- [23] SAHIN C, METCALF J G, and BLUNT S D. Characterization of range sidelobe modulation arising from radar-embedded communications[C]. International Conference on Radar Systems, Belfast, UK, 2017: 1–6. doi: [10.1049/cp.2017.0372](https://doi.org/10.1049/cp.2017.0372).
- [24] 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).
- [25] LIU Fan, MASOUIROS C, LI Ang, *et al.* MU-MIMO communications with MIMO radar: From co-existence to joint transmission[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(4): 2755–2770. doi: [10.1109/TWC.2018.2803045](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2803045).
- [26] 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).
- [27] ZHANG Zhiping, NOWAK M J, WICKS M, *et al.* Bio-inspired RF steganography via linear chirp radar signals[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(6): 82–86. doi: [10.1109/MCOM.2016.7497771](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7497771).
- [28] NOWAK M, WICKS M, ZHANG Zhiping, *et al.* Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 28–35. doi: [10.1109/MAES.2016.150236](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150236).
- [29] NOWAK M J, ZHANG Zhiping, QU Yang, *et al.* Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[C]. MILCOM 2016 - 2016 IEEE Military Communications Conference, Baltimore, USA, 2016: 918–923. doi: [10.1109/MILCOM.2016.7795447](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2016.7795447).
- [30] NOWAK M J, ZHANG Zhiping, LOMONTE L, *et al.* Mixed-modulated linear frequency modulated radar-communications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(2): 313–320. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0249](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0249).
- [31] HU Yanmo, WU Kai, ZHANG J A, *et al.* Performance bounds and optimization for CSI-ratio-based Bi-static Doppler sensing in ISAC systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(11): 17461–17477. doi: [10.1109/TWC.2024.3453902](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3453902).
- [32] ZHANG J A, WU Kai, HUANG Xiaojing, *et al.* Integration of radar sensing into communications with asynchronous transceivers[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(11): 106–112. doi: [10.1109/MCOM.003.2200096](https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2200096).
- [33] WU Kai, ZHANG J A, HUANG Xiaojing, *et al.* Frequency-hopping MIMO radar-based communications: An overview[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2022, 37(4): 42–54. doi: [10.1109/MAES.2021.3081176](https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3081176).
- [34] WU Kai, ZHANG J A, HUANG Xiaojing, *et al.* Waveform design and accurate channel estimation for frequency-hopping MIMO radar-based communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1244–1258. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3034357](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3034357).

- [35] WU Kai, ZHANG J A, NI Zhitong, *et al.* Joint communications and sensing employing optimized MIMO-OFDM signals[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(6): 10368–10383. doi: [10.1109/JIOT.2023.3327989](https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3327989).
- [36] LIU Yongjun, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059539](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059539).
- [37] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种超分辨OFDM雷达通信一体化设计方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 425–433. doi: [10.11999/JEIT150320](https://doi.org/10.11999/JEIT150320).
- LIU Yongjun, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *et al.* A super-resolution design method for integration of OFDM radar and communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 425–433. doi: [10.11999/JEIT150320](https://doi.org/10.11999/JEIT150320).
- [38] GU Yabin, ZHANG Linrang, ZHOU Yu, *et al.* Embedding communication symbols into radar waveform with orthogonal FM scheme[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(21): 8709–8719. doi: [10.1109/JSEN.2018.2868542](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2868542).
- [39] 王诏丰. 雷达通信一体化波形设计与处理方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2018.
- WANG Zhaofeng. Research on waveform design and signal processing method for integration of radar and communication[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2018.
- [40] 吴文华. 基于MIMO的雷达通信一体化波形设计方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2020. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2020.000038](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2020.000038).
- WU Wenhua. Study on integrated radar and communications waveform design method based on MIMO[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2020. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2020.000038](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2020.000038).
- [41] 熊一枫, 刘凡, 袁伟杰, 等. 通信感知一体化的信息理论极限[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(11): 2057–2086. doi: [10.1360/SSI-2023-0056](https://doi.org/10.1360/SSI-2023-0056).
- XIONG Yifeng, LIU Fan, YUAN Weijie, *et al.* Information-theoretic limits of integrated sensing and communications[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2023, 53(11): 2057–2086. doi: [10.1360/SSI-2023-0056](https://doi.org/10.1360/SSI-2023-0056).
- [42] 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).
- [43] LIU Fan, ZHENG Le, CUI Yuanhao, *et al.* Seventy years of radar and communications: The road from separation to integration[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2023, 40(5): 106–121. doi: [10.1109/MSP.2023.3272881](https://doi.org/10.1109/MSP.2023.3272881).
- [44] LU Shihang, LIU Fan, and HANZO L. The degrees-of-freedom in monostatic ISAC channels: NLoS exploitation vs. reduction[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(2): 2643–2648. doi: [10.1109/TVT.2022.3210307](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3210307).
- [45] LU Shihang, MENG Xiao, DU Zhen, *et al.* On the performance gain of integrated sensing and communications: A subspace correlation perspective[C]. ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023: 2735–2740. doi: [10.1109/ICC45041.2023.10279428](https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279428).
- [46] 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: 1–13. doi: [10.1109/MBITS.2024.3376638](https://doi.org/10.1109/MBITS.2024.3376638).
- [47] CHEN Xingbo, WANG Xiaomo, XU Shanfeng, *et al.* A novel radar waveform compatible with communication[C]. 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), Chengdu, China, 2011: 177–181. doi: [10.1109/ICCP.2011.6092272](https://doi.org/10.1109/ICCP.2011.6092272).
- [48] 陈兴波, 王小谟, 曹晨, 等. 雷达通信综合化波形设计技术分析[J]. 现代雷达, 2013, 35(12): 56–59, 63. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2013.12.016](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2013.12.016).
- CHEN Xingbo, WANG Xiaomo, CAO Chen, *et al.* Techniques analysis of radar-communication integrating waveform[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(12): 56–59, 63. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2013.12.016](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2013.12.016).
- [49] YANG Jing, TAN Youshan, YU Xianxiang, *et al.* Waveform design for watermark framework based DFRC system with application on joint SAR imaging and communication[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5200214. doi: [10.1109/TGRS.2022.3232528](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3232528).
- [50] YANG Jing, CUI Guolong, YU Xianxiang, *et al.* Dual-use signal design for radar and communication via ambiguity function sidelobe control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 9781–9794. doi: [10.1109/TVT.2020.3002773](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3002773).
- [51] YAO Xue, YANG Jing, XIONG Kui, *et al.* Integrated signal design for MIMO DFRC with intrapulse index modulation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(2): 1490–1504. doi: [10.1109/TAES.2023.3339118](https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3339118).
- [52] CUI Guolong, YANG Jing, LU Shuping, *et al.* Dual-use unimodular sequence design via frequency nulling modulation[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 62470–62481. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2876644](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876644).
- [53] 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](#).
- 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](#).
- [54] 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. doi: [10.12000/JR22105](#).
- WU Wenjun, TANG Bo, TANG Jun, *et al.* Waveform design for dual-function radar-communication systems in clutter[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(4): 570–580. doi: [10.12000/JR22105](#).
- [55] WU Wenjun, TANG Bo, and WANG Xuyang. 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. doi: [10.1109/TAES.2023.3234927](#).
- [56] WANG Xuyang, TANG Bo, WU Wenjun, *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. doi: [10.1109/JSEN.2023.3264458](#).
- [57] LI Da, TANG Bo, and XUE Lei. Waveform design for MIMO DFRC systems: Finer sensing and safer communications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 4509–4524. doi: [10.1109/TSP.2024.3470219](#).
- [58] 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. doi: [10.12399/j.issn.2097-163x.2022.01.006](#).
- TANG Bo, TANG Jun, and HU Yuankui. Multifunction radio frequency systems based on MIMO array[J]. *Information Countermeasure Technology*, 2022, 1(1): 62–72. doi: [10.12399/j.issn.2097-163x.2022.01.006](#).
- [59] TANG Bo and STOICA P. MIMO multifunction RF systems: Detection performance and waveform design[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 4381–4394. doi: [10.1109/TSP.2022.3202315](#).
- [60] 唐波, 吴文俊, 史英春, 等. 基于MIMO阵列的综合射频系统鲁棒波形设计算法研究[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(11): 3918–3926. doi: [10.11999/JEIT220969](#).
- TANG Bo, WU Wenjun, SHI Yingchun, *et al.* Robust waveform design based on MIMO multi-function radio frequency systems under angle uncertainties[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(11): 3918–3926. doi: [10.11999/JEIT220969](#).
- [61] 施龙飞, 全源, 范金涛, 等. 通信化雷达探测技术[J]. 雷达学报, 2020, 9(6): 1056–1063. doi: [10.12000/JR20088](#).
- SHI Longfei, QUAN Yuan, FAN Jintao, *et al.* Communicational radar detection technology[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(6): 1056–1063. doi: [10.12000/JR20088](#).
- [62] 全源. 通信化雷达波形设计与信号处理研究[D]. [硕士学位论文], 国防科技大学, 2020. doi: [10.27052/d.cnki.gzjgu.2020.000865](#).
- QUAN Yuan. Research on communicational radar waveform design and signal processing[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2020. doi: [10.27052/d.cnki.gzjgu.2020.000865](#).
- [63] 关一夫, 施龙飞, 刘甲磊, 等. 多假目标场景下的信息提取方法、装置及设备[P]. 中国, 202211537856.3, 2023.
- GUAN Yifu, SHI Longfei, LIU Jialei, *et al.* Information extraction method, device and equipment in multi-false-target scene[P]. CN, 202211537856.3, 2023.
- [64] 刘志鹏. 雷达通信一体化波形研究[D]. [博士学位论文], 北京理工大学, 2015.
- LIU Zhipeng. Waveform research on integration of radar and communication[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing Institute of Technology, 2015.
- [65] LIU Zhipeng, CHEN Xingbo, 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](#).
- [66] 杨瑞娟, 陈小民, 李晓柏, 等. 雷达通信一体化共享信号技术研究[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(1): 39–43.
- YANG Ruijuan, CHEN Xiaomin, LI Xiaobai, *et al.* Study of signal sharing technologies for integration of radar and communication systems[J]. *Journal of Air & Space Early Warning Research*, 2013, 27(1): 39–43.
- [67] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟. 基于频率调制的多载波Chirp信号雷达通信一体化研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 406–412. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00567](#).
- LI Xiaobai, YANG Ruijuan, and CHENG Wei. Integrated radar and communication based on multicarrier frequency modulation Chirp signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 406–412. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00567](#).
- [68] 杨云飞, 马晓岩, 杨瑞娟, 等. CPM-LFM雷达通信一体化共享信号探测性能研究[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(3): 157–161. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2017.03.001](#).
- YANG Yunfei, MA Xiaoyan, YANG Ruijuan, *et al.* Research on detection performance of radar communication integrated shared signal based on CPM-LFM[J]. *Journal of Air & Space Early Warning Research*, 2017, 31(3): 157–161. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2017.03.001](#).
- [69] 杨云飞, 杨瑞娟, 古秦弋. CPM-LFM 雷达通信一体化共享信号解调处理与仿真[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(4): 243–247. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2017.04.002](#).

- YANG Yunfei, YANG Ruijuan, and GU Qinyi. Demodulation processing and simulation of CPM-LFM radar-communication integrated shared signal[J]. *Journal of Air & Space Early Warning Research*, 2017, 31(4): 243–247. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2017.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2017.04.002).
- [70] XIAO Zhiqiang and ZENG Yong. Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1823–1837. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155509](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155509).
- [71] 曾勇, 董珍君, 王蕙质, 等. 面向6G通信感知一体化的固定与可移动天线技术[J]. 信号处理, 2024, 40(8): 1377–1407. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2024.08.001](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2024.08.001).
- ZENG Yong, DONG Zhenjun, WANG Huizhi, *et al.* Fixed and movable antenna technology for 6G integrated sensing and communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2024, 40(8): 1377–1407. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2024.08.001](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2024.08.001).
- [72] XU Zihan, ZHOU Ziwen, WU Di, *et al.* Channel knowledge map-enhanced clutter suppression for integrated sensing and communication[C]. 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), Hangzhou, China, 2024: 90–95. doi: [10.1109/ICCCWorkshops62562.2024.10693799](https://doi.org/10.1109/ICCCWorkshops62562.2024.10693799).
- [73] XIAO Zhiqiang, ZENG Yong, WEN Fuxi, *et al.* Integrated sensing and channel estimation by exploiting dual timescales for delay-Doppler alignment modulation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024. doi: [10.1109/TWC.2024.3493255](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3493255).
- [74] XU Jingran, WANG Huizhi, ZENG Yong, *et al.* Little pilot is needed for channel estimation with integrated super-resolution sensing and communication[C]. 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Dubai, United Arab Emirates, 2024: 1–6. doi: [10.1109/WCNC57260.2024.10570698](https://doi.org/10.1109/WCNC57260.2024.10570698).
- [75] XIAO Zhiqiang, CHENG Shiqi, and ZENG Yong. Simultaneous multi-beam sweeping for mmWave massive MIMO integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 8141–8152. doi: [10.1109/TVT.2024.3350714](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3350714).
- [76] 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](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3465499).
- [77] WEN Cai, HUANG Yan, and DAVIDSON T N. Efficient transceiver design for MIMO dual-function radar-communication systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 1786–1801. doi: [10.1109/TSP.2023.3275274](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3275274).
- [78] LIANG Runchen, WEN Cai, and DAVIDSON T N. Robust joint transmit and receive beamformer design for dual-function radar-communication systems[C]. 2023 57th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2023: 452–459. doi: [10.1109/IEEECONF59524.2023.10476960](https://doi.org/10.1109/IEEECONF59524.2023.10476960).
- [79] WEN Cai, HUANG Yan, ZHENG Le, *et al.* Transmit waveform design for dual-function radar-communication systems via hybrid linear-nonlinear precoding[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 2130–2145. doi: [10.1109/TSP.2023.3278858](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3278858).
- [80] CHEN Yating, WEN Cai, HUANG Yan, *et al.* CRB optimization for integrated sensing and communication systems using hybrid linear-nonlinear precoding[C]. 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops (ICASSPW), Seoul, Korea, 2024: 365–369. doi: [10.1109/ICASSPW62465.2024.10627273](https://doi.org/10.1109/ICASSPW62465.2024.10627273).
- [81] WEN Cai and DAVIDSON T N. Transceiver design for MIMO-DFRC systems[C]. ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Rhodes Island, Greece, 2023: 1–5. doi: [10.1109/ICASSP49357.2023.10096008](https://doi.org/10.1109/ICASSP49357.2023.10096008).
- [82] ZHAI Weitong, WANG Xiangrong, CAO Xianbin, *et al.* Reinforcement learning based dual-functional massive MIMO systems for multi-target detection and communications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 741–755. doi: [10.1109/TSP.2023.3252885](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3252885).
- [83] WANG Xiangrong, ZHAI Weitong, WANG Xianghua, *et al.* Wideband near-field integrated sensing and communication with sparse transceiver design[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2024, 18(4): 662–677. doi: [10.1109/JSTSP.2024.3394970](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2024.3394970).
- [84] XU Jing, WANG Xiangrong, ABOUTANIOS E, *et al.* Hybrid index modulation for dual-functional radar communications systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(3): 3186–3200. doi: [10.1109/TVT.2022.3219888](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3219888).
- [85] ZHANG Xuan, WANG Xiangrong, SO H C, *et al.* Transmit waveform design for integrated wideband MIMO radar and bi-directional communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(9): 13482–13497. doi: [10.1109/TVT.2024.3386755](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3386755).
- [86] 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](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3004739).

- [87] LIU Xiang, HUANG Tianyao, and LIU Yimin. Transmit design for joint MIMO radar and multiuser communications with transmit covariance constraint[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1932–1950. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155512](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155512).
- [88] LIU Xiang, HUANG Tianyao, LIU Yimin, *et al.* Transmit beamforming with fixed covariance for integrated MIMO radar and multiuser communications[C]. ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Singapore, Singapore, 2022: 8732–8736. doi: [10.1109/ICASSP43922.2022.9747403](https://doi.org/10.1109/ICASSP43922.2022.9747403).
- [89] LIU Xiang, HUANG Tianyao, LIU Yimin, *et al.* Constant modulus waveform design for joint multiuser MIMO communication and MIMO radar[C]. 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Nanjing, China, 2021: 1–5. doi: [10.1109/WCNCW49093.2021.9420010](https://doi.org/10.1109/WCNCW49093.2021.9420010).
- [90] CHEN Weijie, LIAO Bin, HUANG Huiping, *et al.* MIMO-DFRC hybrid beamforming design via transmit pattern optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024. doi: [10.1109/TAES.2024.3469185](https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3469185).
- [91] CHEN Weijie, DENG Yaling, GUO Chongtao, *et al.* Transmit beampattern optimization for MIMO-ISAC systems with hybrid beamforming[C]. ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Seoul, Korea, 2024: 8651–8655. doi: [10.1109/ICASSP48485.2024.10447252](https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10447252).
- [92] XIONG Xue, LIANG Hao, and LIAO Bin. Robust beamforming for DFRC systems in complex environments[C]. ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Seoul, Korea, 2024: 8461–8465. doi: [10.1109/ICASSP48485.2024.10446108](https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10446108).
- [93] LIAO Bin, XIONG Xue, and QUAN Zhi. Robust beamforming design for dual-function radar-communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(6): 7508–7516. doi: [10.1109/TVT.2023.3240234](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3240234).
- [94] GUO Baoxi, LIANG Junli, TANG Bo, *et al.* Bistatic MIMO DFRC system waveform design via symbol distance/direction discrimination[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 3996–4010. doi: [10.1109/TSP.2023.3322815](https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3322815).
- [95] GUO Baoxi, LIANG Junli, WANG Tao, *et al.* Transmit hardware impairment aware waveform design for MIMO DFRC[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 2858–2873. doi: [10.1109/TSP.2024.3404018](https://doi.org/10.1109/TSP.2024.3404018).
- [96] LIU Rang, LI Ming, LIU Qian, *et al.* Joint waveform and filter designs for STAP-SLP-based MIMO-DFRC systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1918–1931. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155501](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155501).
- [97] LU Manwei, LUO Honghao, LIU Rang, *et al.* Beamforming design for near-field integrated sensing and communications[C]. 2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology (ICCT), Wuxi, China, 2023: 434–438. doi: [10.1109/ICCT59356.2023.10419546](https://doi.org/10.1109/ICCT59356.2023.10419546).
- [98] LIU Rang, LI Ming, LUO Honghao, *et al.* Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: Opportunities, applications, and future directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(1): 50–57. doi: [10.1109/MWC.002.2200206](https://doi.org/10.1109/MWC.002.2200206).
- [99] WANG Yi, ZHANG Qixun, ZHANG J A, *et al.* Interference characterization and mitigation for multi-beam ISAC systems in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(10): 14729–14742. doi: [10.1109/TWC.2024.3418519](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3418519).
- [100] 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).
- [101] ZHANG J A, HUANG Xiaojing, GUO Y J, *et al.* Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 671–685. doi: [10.1109/TVT.2018.2883796](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2883796).
- [102] COVER T M and THOMAS J A. Elements of Information Theory[M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006: 380–392. doi: [10.1002/047174882X](https://doi.org/10.1002/047174882X).
- [103] OUYANG Chongjun, LIU Yuanwei, YANG Hongwen, *et al.* Integrated sensing and communications: A mutual information-based framework[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 26–32. doi: [10.1109/MCOM.001.2200493](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200493).
- [104] ZHOU Wenxing, ZHANG Ruoyu, CHENG Guangyi, *et al.* Integrated sensing and communication waveform design: A survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1930–1949. doi: [10.1109/OJCOMS.2022.3215683](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3215683).
- [105] 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](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2847648).
- [106] WANG Xiangrong, HASSANIEN A, and AMIN M G. Dual-function MIMO radar communications system design

- via sparse array optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1213–1226. doi: [10.1109/TAES.2018.2866038](https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2866038).
- [107] 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).
- [108] 王佳欢, 范平志, 时巧, 等. 一种具有多普勒容忍性的通感一体化波形设计[J]. *雷达学报*, 2023, 12(2): 275–286. doi: [10.12000/JR22155](https://doi.org/10.12000/JR22155).
WANG Jiahuan, FAN Pingzhi, SHI Qiao, *et al.* Doppler resilient integrated sensing and communication waveforms design[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(2): 275–286. doi: [10.12000/JR22155](https://doi.org/10.12000/JR22155).
- [109] AHMED A, ZHANG Y D, and HIMED B. Multi-user dual-function radar-communications exploiting sidelobe control and waveform diversity[C]. 2018 IEEE Radar Conference, Oklahoma, USA, 2018: 698–702. doi: [10.1109/RADAR.2018.8378644](https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8378644).
- [110] AHMED A, ZHANG Y D, and GU Yujie. Dual-function radar-communications using QAM-based sidelobe modulation[J]. *Digital Signal Processing*, 2018, 82: 166–174. doi: [10.1016/j.dsp.2018.06.018](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.06.018).
- [111] GEMECHU A Y, CUI Guolong, YU Xianxiang, *et al.* Phase-only beam pattern synthesis with nulling for linear antenna arrays[C]. 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology, Waltham, USA, 2019: 1–7. doi: [10.1109/PAST43306.2019.9020782](https://doi.org/10.1109/PAST43306.2019.9020782).
- [112] YU Xianxiang, YAO Xue, YANG Jing, *et al.* Integrated waveform design for MIMO radar and communication via spatio-spectral modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 2293–2305. doi: [10.1109/TSP.2022.3170687](https://doi.org/10.1109/TSP.2022.3170687).
- [113] WU Wenhua, HAN Guojun, CAO Yunhe, *et al.* MIMO waveform design for dual functions of radar and communication with space-time coding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1906–1917. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155508](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155508).
- [114] HUA Haocheng, HAN T X, 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).
- [115] Richards M A. 雷达信号处理基础[M]. 2版. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2017: 407–433.
Richards M A. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. 2nd ed. Tran. XING Mengdao, WANG Tong, LI Zhenfang, *et al.* Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 407–433.
- [116] LI Jin, ZHOU Gui, GONG Tantai, *et al.* A framework for mutual information-based MIMO integrated sensing and communication beamforming design[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 8352–8366. doi: [10.1109/TVT.2024.3355899](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3355899).
- [117] ZHU Jinkun, LI Wei, WONG K K, *et al.* Waveform design of DFRC system for target detection in clutter environment[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2023, 30: 1517–1521. doi: [10.1109/LSP.2023.3324298](https://doi.org/10.1109/LSP.2023.3324298).
- [118] NAM Y, DO H, JEON Y, *et al.* On the capacity of MISO channels with one-bit ADCs and DACs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(9): 2132–2145. doi: [10.1109/JSAC.2019.2929427](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2929427).
- [119] 杨诗兴, 张国鑫, 梁云飞, 等. 动平台分布式雷达系统动目标低比特数据检测算法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2024, 13(3): 584–600. doi: [10.12000/JR23240](https://doi.org/10.12000/JR23240).
YANG Shixing, ZHANG Guoxin, LIANG Yunfei, *et al.* Moving targets detection with low-bit quantization in distributed radar on moving platforms[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(3): 584–600. doi: [10.12000/JR23240](https://doi.org/10.12000/JR23240).
- [120] WANG Bowen, LI Hongyu, and CHENG Ziyang. Joint transceiver design for massive MIMO DFRC systems with one-bit DACs/ADCs[C]. 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023: 649–654. doi: [10.1109/GCWkshps58843.2023.10465142](https://doi.org/10.1109/GCWkshps58843.2023.10465142).
- [121] ZHAO Zongyao, ZHANG Long, JIANG Rui, *et al.* Joint beamforming scheme for ISAC systems via robust Cramér-Rao bound optimization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(3): 889–893. doi: [10.1109/LWC.2024.3349488](https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3349488).
- [122] REN Zhixiang, PENG Yunfei, SONG Xianxin, *et al.* Fundamental CRB-rate tradeoff in multi-antenna ISAC systems with information multicasting and multi-target sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(4): 3870–3885. doi: [10.1109/TWC.2023.3312723](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3312723).
- [123] NI Yuanhan, WANG Zulin, and HUANG Qin. Joint transceiver beamforming for multi-target single-user joint radar and communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(11): 2360–2364. doi: [10.1109/LWC.2022.3203386](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3203386).
- [124] PRITZKER J, WARD J, and ELDAR Y C. Transmit precoder design approaches for dual-function radar-communication systems[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2203.09571>, 2022.
- [125] ZHANG Yucheng, NI Wanli, WANG Jianquan, *et al.* Robust transceiver design for covert integrated sensing and

- communications with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024. doi: [10.1109/TCOMM.2024.3387869](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2024.3387869).
- [126] ZHOU Yu, SHI Qiao, ZHOU Zhengchun, *et al.* Waveform design for integrated sensing and communication in the presence of DRFM forwarding interference[C]. IET International Radar Conference (IRC 2023), Chongqing, China, 2023: 1316–1321. doi: [10.1049/icp.2024.1277](https://doi.org/10.1049/icp.2024.1277).
- [127] 冯翔. 复杂场景下认知雷达探测技术研究[D]. [博士论文], 哈尔滨工业大学, 2018.
- FENG Xiang. Research on technologies of cognitive radar probe in complex background[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2018.
- [128] LUO Zhiquan, MA W K, SO A M C, *et al.* Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 20–34. doi: [10.1109/MSP.2010.936019](https://doi.org/10.1109/MSP.2010.936019).
- [129] BOYD S, PARIKH N, CHU E, *et al.* Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 2011, 3(1): 1–122. doi: [10.1561/22000000016](https://doi.org/10.1561/22000000016).
- [130] ZHAO Licheng, SONG Junxiao, BABU P, *et al.* A unified framework for low autocorrelation sequence design via majorization-minimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(2): 438–453. doi: [10.1109/TSP.2016.2620113](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2620113).
- [131] KERAHROODI M A, AUBRY A, DE MAIO A, *et al.* A coordinate-descent framework to design low PSL/ISL sequences[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(22): 5942–5956. doi: [10.1109/TSP.2017.2723354](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2723354).
- [132] WANG Xinyi, FEI Zesong, LIU Peng, *et al.* Sensing aided covert communications: Turning interference into allies[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(9): 10726–10739. doi: [10.1109/TWC.2024.3374775](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3374775).
- [133] MA Shuai, SHENG Haihong, YANG Ruixin, *et al.* Covert beamforming design for integrated radar sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(1): 718–731. doi: [10.1109/TWC.2022.3197940](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3197940).
- [134] HU Langtao, YANG Rui, WU Lei, *et al.* RIS-assisted integrated sensing and covert communication design[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 16505–16516. doi: [10.1109/JIOT.2024.3354247](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3354247).
- [135] HU Jingsong, LIN Qingzhuan, YAN Shihao, *et al.* Covert transmission via integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(3): 4441–4446. doi: [10.1109/TVT.2023.3326455](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3326455).
- [136] JIA Hanbo, MA Lin, and QIN Danyang. Robust beamforming design for covert integrated sensing and communication in the presence of multiple wardens[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(11): 17135–17150. doi: [10.1109/TVT.2024.3425960](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3425960).
- [137] CONG Jiayi, YOU Changsheng, LI Jiapeng, *et al.* Near-field integrated sensing and communication: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(6): 162–169. doi: [10.1109/MWC.002.2400033](https://doi.org/10.1109/MWC.002.2400033).
- [138] LU Haiquan, ZENG Yong, YOU Changsheng, *et al.* A tutorial on near-field XL-MIMO communications toward 6G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(4): 2213–2257. doi: [10.1109/COMST.2024.3387749](https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3387749).
- [139] LIU Yuanwei, OUYANG Chongjun, WANG Zhaolin, *et al.* Near-field communications: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024. doi: [10.1109/COMST.2024.3475884](https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3475884).
- [140] ZHAO Jinbo, LU Zhaoming, ZHANG J A, *et al.* Performance bounds for passive sensing in asynchronous ISAC systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(11): 15872–15887. doi: [10.1109/TWC.2024.3434704](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3434704).
- [141] YANG Xiaoyu, WEI Zhiqing, XU Jie, *et al.* Coordinated transmit beamforming for networked ISAC with imperfect CSI and time synchronization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(12): 18019–18035. doi: [10.1109/TWC.2024.3459036](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3459036).
- [142] GUO Jia, LIU Yuanwei, and NALLANATHAN A. Multi-user continuous-aperture array communications: How to learn current distribution?[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2408.11230>, 2024.
- [143] ZHAO Boqun, OUYANG Chongjun, ZHANG Xingqi, *et al.* Continuous aperture array (CAPA)-based wireless communications: Capacity characterization[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2406.15056>, 2024.
- [144] OUYANG Chongjun, WANG Zhaolin, ZHANG Xingqi, *et al.* Diversity and multiplexing for continuous aperture array (CAPA)-based communications[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2408.13948>, 2024.
- [145] HU Jingzhi, CHEN Zhe, ZHENG Tianyue, *et al.* HoloFed: Environment-adaptive positioning via multi-band reconfigurable holographic surfaces and federated learning[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(12): 3736–3751. doi: [10.1109/JSAC.2023.3322788](https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3322788).
- [146] HU Jingzhi, CHEN Zhe, and LUO Jun. Multi-band reconfigurable holographic surface based ISAC systems: Design and optimization[C]. ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023: 2927–2932. doi: [10.1109/ICC45041.2023.10279416](https://doi.org/10.1109/ICC45041.2023.10279416).

作者简介

何亚萍，博士生，主要研究方向为探通一体化信号设计与处理、雷达电子防御。

施龙飞，博士，研究员，主要研究方向为新体制雷达、雷达电子防御。

王 东，硕士，助理工程师，主要研究方向为雷达电子防御。

唐江澜，博士生，主要研究方向为雷达波形设计与处理、雷达电子防御。

陈俊先，硕士生，主要研究方向为雷达波形设计与处理、雷达电子防御。

马佳智，博士，副研究员，主要研究方向为雷达电子防御、雷达极化信息处理。

刘甲磊，硕士，工程师，主要研究方向为雷达电子防御。

(责任编辑：于青)