

文章编号:1007-5321(2022)06-0031-09

DOI:10.13190/j.jbupt.2022-125

通信感知一体化干扰管理:现状与展望

尉志青¹, 牛阳阳¹, 王溢¹, 潘成康², 马良²

(1. 北京邮电大学 泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876; 2. 中国移动通信研究院, 北京 100053)

摘要: 通信感知一体化(ISAC)技术将助力第6代移动通信系统数字化、网络化、智能化的发展。ISAC技术面临诸多挑战,包括通信子系统和感知子系统互惠共生时产生的相互干扰消除和更加灵活高效的干扰避免和干扰利用。首先概述了ISAC技术中干扰管理的必要性,分别讨论了其中3种实现模式下的干扰消除方法,列举了干扰避免和干扰利用的可行方法;最后给出了ISAC干扰管理领域的若干开放性问题。

关键词: 通信感知一体化; 干扰管理; 资源共享; 功能融合

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Integrated Sensing and Communication Interference Management: Recent Advances and Future Trends

WEI Zhiqing¹, NIU Yangyang¹, WANG Yi¹, PAN Chengkang², MA Liang²

(1. Key Laboratory of Universal Wireless Communications (Ministry of Education), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: The integrated sensing and communication (ISAC) technology has the potential to support the development of digitization, networking, and intellectualization of the sixth generation of mobile communications systems. ISAC technology faces many challenges, including mutual interference cancellation, and the requirement of more flexible and efficient interference avoidance and interference utilization methods, when the sensing subsystem and the communication subsystem cooperate mutually. First, the necessity of interference management in the ISAC technology is introduced. Then, the interference elimination methods are reviewed from three paradigms of the ISAC technology, and the feasible methods to realize the vision of interference avoidance and interference utilization are presented. Finally, we present some open problems in the field of ISAC interference management.

Key words: integration of sensing and communication; interference management; resource sharing; functional integration

随着信息技术、移动通信技术、人工智能技术和大数据技术的深度融合,新兴的智慧城市、智慧医疗、智能交通、智慧生产、扩展现实等移动互联网业务的出现和无线设备的快速增长,促使第5代移动

通信系统向第6代移动通信系统(6G, the sixth generation of mobile communications system)演进^[1]。预计到2030年,有源物联网设备将达到241亿部^[2],无线电频谱资源的使用代价变得越来越大。

收稿日期: 2022-06-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0711302); 国家自然科学基金项目(U21B2014)

作者简介: 尉志青(1987—), 男, 副教授, 博士生导师, 邮箱: weizhiqing@bupt.edu.cn。

例如:韩国3家通信运营商为使用3.5 GHz和28 GHz电磁波频段向政府支付了33亿美元^[3]。英国4家通信运营商为使用2.3 GHz和3.4 GHz电磁波频段向通信管理局支付了13.7亿英镑^[4]。为承继6G网络“信息泛在”的理念,进一步将万物互联延伸至智慧层面,实现“智能泛在”的美好愿景^[5],一方面,要拓展频谱资源,研究毫米波、太赫兹和可见光频段,持续提升峰值速率、流量密度等通信性能指标;另一方面,要深度挖掘和应用射频电磁波具有的无线感知能力,提升移动性和定位精度等感知性能指标。

通信感知一体化(ISAC, integrated sensing and communication)技术为目标感知和通信信息传输互惠共生提供了可行范式。利用感知能力获取的信道状态信息和接入节点信息等可以为通信用户随机接入和数据包碰撞检测提供先验信息,从而保证高可靠性、大连接的通信需求;利用通信接收机获取的信道状态信息可以为感知目标的定位和干扰信道的建模提供支持,从而提升感知精度^[1-2]。近年来,ISAC技术受到了国内外学者的广泛关注。美国联邦委员会和国家电信和信息管理局提议将分配给感知应用的3.5 GHz频段中的150 MHz频谱与通信应用共享^[6-7]。2021年4月15日在中国召开了第1届6G通信感知一体化学术研讨会,探讨了ISAC技术指标、面临的挑战、应用场景等问题。同年5月,美国电气与电子工程师协会(IEEE, institute of electrical and electronics engineering)成立了通信感知一体化新兴技术倡议委员会,共同探讨ISAC技术标准化、通信体系结构、信号处理算法等研究成果。这些成果在实现过程中仍然存在诸多问题,例如:ISAC技术中通信信号和感知信号在时空域交叠,但又都需要大带宽、宽口径天线进行传输。发射信号的错误接收会降低通信数据包的有效传输,还会影响真实目标的可靠感知。特别是在多目标、多用户的复杂场景下,难以同时保证高速率通信和高精度感知。例如:在车联网场景中的碰撞检测^[8]、基于热点连接的室内定位^[9]、隐蔽通信等应用场景下,ISAC技术对干扰的鲁棒性将大大影响系统的通信和感知性能。此外,在军事领域,美国海军综合武器系统与包含100个基站的蜂窝系统共享S波段(3.5 GHz频段),在无干扰管理措施时系统的漏检概率可达95%^[10]。因此,在民用和军事新兴移动通信业务驱动下,安全可靠的干

扰管理方法是支持高移动性、信息时效性和高精度等的关键技术保障。

综上所述,异构环境下大规模部署的分布式无线电设备极大地增加了通信容量的需求,同时通信子系统与感知子系统需要融合互惠,通过有效功能协作、深度资源共享和智能信号处理实现6G愿景,其中干扰管理问题是潜在的技术瓶颈。为此,笔者首先介绍了ISAC技术中干扰问题的来源,然后从干扰消除、干扰避免和干扰利用3个角度对干扰管理方法展开综述。

1 通信感知一体化干扰问题概述

ISAC技术面临电磁环境中复杂多变的干扰问题,如恶劣环境下引入的杂波,多基站多小区通信时带来的多用户之间的干扰,发射机信号泄露带来的自干扰等。此外,ISAC技术在波形设计、收发机设计、信号处理算法等方面的紧密耦合,使感知子系统和通信子系统之间相互影响、相互制约,一方面,降低了网络的吞吐量,影响系统的峰值速率;另一方面,降低了雷达探测的动态范围,削弱了系统的定位精度和覆盖能力。

利用ISAC技术可以从资源和功能2个层面实现一体化,分为3种不同的实现模式^[11]:资源独立,功能一体化;功能独立,资源一体化;资源功能一体化。3种模式的实现原理如图1所示,表现了ISAC技术的3个不同层次。感知信息中包含的信道状态信息有助于提高通信网的广域覆盖能力,同时能通过通信链路获取感知目标的先验信息,实现功能上的一体化,如图1(a)所示。融合不同层次的资源共享形式可以提高频谱资源和设备资源的利用效率,实现资源一体化,如图1(b)所示。综合以上2种模式,为进一步实现同频谱、共设备、功能融合,在一体化平台上利用不同波束或相同波束不同旁瓣实现通信和感知双功能,如图1(c)所示。无论是哪种一体化实现模式,通信和感知子系统之间的耦合都会带来复杂的干扰问题,下面将分别描述3种ISAC实现模式面临的挑战。

资源独立,功能一体化模式中通信和感知过程独立运行并共享无线环境的估计结果,增加了接收机解调期望信号的复杂度。当发射的感知信号无法被通信接收机识别并消除时,误码率增大,通信性能降低,还可能出现虚假目标,从而影响感知精度。功能独立,资源一体化模式在共享频谱

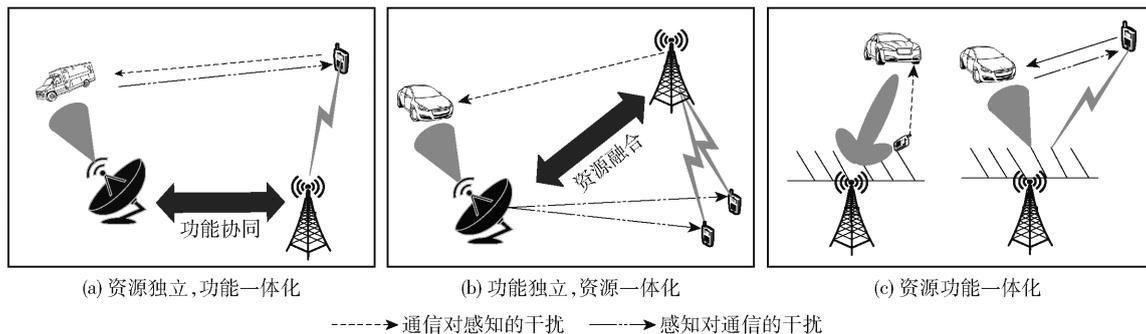


图 1 通信感知一体化实现模式

资源和硬件平台的同时,通信和感知子系统在波形设计、收发机设计和信号处理等方面仍然独立运行,此时通信链路和感知链路资源域的紧耦合造成了通信和感知的互相干扰。资源功能一体化模式以空口技术为核心,联合网络架构和硬件架构在一体化平台上实现感知和通信功能的互惠共存,但是也更易造成通信信号的非期望接收和感知回波解码困难。通信数据和空口参数等信息的非期望接收,不仅会出现虚假目标导致检测概率下降,还会使通信吞吐量受损。

综上所述,ISAC 技术在利用通信和感知信息相

互辅助的同时,存在相互干扰和回馈链路负担重的挑战,在融合利用频谱资源和软硬件平台的同时,存在信号之间紧耦合,期望信号解调困难的问题。因此,需要更加智能高效的干扰管理技术以提升通信感知一体化系统的性能。

2 三种一体化模式中的干扰消除方法

ISAC 技术不仅是单纯的资源复用与分配,更是感知和通信性能的相互促进与权衡。下面分别阐述 3 种 ISAC 实现模式中的干扰消除方法。各干扰消除方法的优劣如表 1 所示。

表 1 干扰消除方法优劣势

一体化实现模式	干扰消除方法	优势	劣势
资源独立功能一体化	中继协作 ^[12-13]	通过功能协同实现一体化	耗费资源,回馈链路负担太重
	融合中心 ^[14-15]		
功能独立资源一体化	资源分配 ^[16-20]	在处理域上干扰消除效果好	受信道衰落影响大
	干扰解码 ^[21-23]	信号处理算法丰富	
	收发机设计 ^[24-30]	将干扰信号置于干扰信道零空间,对信道容量影响小	对信道先验信息依赖性强
资源功能一体化	一体化波形设计 ^[31-32]	可实现特定功能的干扰消除	难以兼顾通信和感知性能
	波束成形设计 ^[33-35]	可以实现功能精细化、定制化干扰消除	硬件实现困难
	干扰解码 ^[15,36-38]	可结合智能算法,方法灵活	信号处理算法复杂,依赖信道的先验信息
	协作多点 ^[39-41]	充分利用先验信息,干扰消除效果合理	协同代价大

2.1 资源独立,功能一体化

针对通信子系统和感知子系统在功能协同时带来的互干扰,采用中继协作和融合中心协调的方法进行干扰消除,使接收机干扰信号功率最小。

1) 中继协作。处理中继基站获取的物理环境和电磁波信道信息并共享给临近基站^[12],为干扰信道建模提供先验信息。利用中继基站辅助通信接收机处理数据,降低反馈信道对目标感知性能

的影响,减少基站频繁发送训练序列进行干扰信道建模的资源开销。优化中继集群网络中每个中继的功率预算,通过协调和设计多波束资源消除干扰^[13]。

2) 融合中心协调。在融合中心将通信和感知过程中获取的环境信息进行融合分析,信息融合处理结果可以为干扰消除提供先验信息。例如:用基于感知的信息融合控制中心的方法来协调干

扰信道状态的估计和发射预编码矩阵的设计^[14],可以消除信息交互过程中对感知过程的干扰。但是,搭建信息融合中心的代价较大,大规模设备接入时网络信号之间的相互干扰加剧,还会使期望信号解码消耗的算力资源增大。为此,引入智能化计算能力,基于融合中心获取干扰信号的先验信息,结合深度神经网络算法识别干扰信号和期望信号^[15]。

综上所述,资源独立情况下实现功能一体化是走向频谱深度融合和资源功能一体化的过渡阶段,此时依靠系统间的信息共享可以实现感知辅助通信和通信辅助感知的功能一体化。虽然可以从中继协作和融合中心调度的角度设置接收滤波矩阵对干扰进行消除,但会加重通信子系统和感知子系统信息交互时的回馈链路负担,为此,进一步加强功能和资源的深度融合是必要的。

2.2 功能独立,资源一体化

资源一体化系统中的干扰消除包括通信接收机中的感知干扰消除和感知接收机中的通信干扰消除,包含资源分配、收发机设计和干扰解码等方法。

1) 资源分配。在空域、时域、码域上从资源正交化分配的角度消除通信和感知功能之间的相互影响。一方面,消除通信接收机处感知过程带来的干扰,例如:基于空间分集技术实现多用户接入和目标位置估计可以在空域上降低感知和通信功能的相互影响^[16];基于时间反演波束成形技术在频域和空域上通过计算最接近原始时间反演解决方案的发射波束成形方案,实现干扰迫零^[17];基于波束设计技术在时频域上消除感知波束和通信波束的相互干扰^[18]。另一方面,为消除感知接收机处通信功能带来的干扰,Dong等^[19]提出了一种联合感知节点选择和资源分配的多目标跟踪策略,通过优化感知节点的选择和满足感知网络的多个传输资源预算来最小化多个目标的跟踪误差。此外,在资源一体化系统中,用空时编码技术通过分组转发数据,在码域降低通信用户的安全中断概率和反馈检测时的误码率,从而实现干扰消除。进一步地,在相邻信道面临严重的阴影衰落或者多径衰落时,采用动态分组的方案取代固定分组方案,并结合混合波束赋形技术,加强频谱融合时波束的指向性,削减干扰的影响^[20]。

2) 干扰解码。干扰解码是一种在接收机解调有用信号之前先解调干扰信号,然后在接收机去

除此信号来消除干扰的方法,是干扰消除最直接的方法。典型的干扰解码方法为串行干扰消除方法。用干扰消除方法在接收机同时收到一个强感知信号和一个通信信号时,将感知信号检测出来并将其抵消,增大有用信号检测时的信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)。当有多个信号叠加时,根据干扰信号强度逐个消除,或选择性地仅消除最强的干扰信号^[21]。但是,上述方法受限于干扰信道建模的效果,且在干扰信号分离过程中往往造成电磁环境中本底噪声的缺失和部分感知结果的丢失。为此,Hakobyan等^[22]使用了线性预测的方法,将去除的子载波信号通过前向后向线性预测方法从相邻子载波携带的信号中重构,在实现干扰消除的同时增加接收机有用信号的信噪比,或通过对接收到的信号进行稀疏采样和干扰信号的重构^[23]。

3) 收发机设计。联合设计发射预编码矩阵和接收滤波矩阵,使期望信号有效指向目标接收机,并将干扰信号迫零。一种有效的方法是对干扰信道矩阵进行奇异值分解得到投影矩阵^[24],利用该矩阵对感知信号进行预编码可以保证感知信号对通信信号的干扰功率为零。当感知目标不再被视作点目标时,为了消除感知目标对通信过程产生的间歇性干扰(取决于散射体),Zheng等^[25]将通信系统等价为一组并行的信道,在感知功能所需信噪比的约束下通过优化通信子系统的预编码矩阵,消除通信接收机中收到的感知回波干扰,从而最大化通信传输速率。

当目标的相对位置、发射波形和信道状态等信息相对缺乏或错误时,结合智能算法进行干扰消除。例如:通过人工智能(AI, artificial intelligence)算法对干扰信道进行盲估计和半盲估计;结合压缩感知技术在通信接收机中对感知信号进行感知参数估计^[26]。在此基础上,通信接收机以最大化通信速率为优化目标,优化发射预编码矩阵和接收滤波矩阵,进而在通信数据解调之前将感知子系统带来的干扰消除。进一步地,Li等^[27]通过对比感知采样方案和通信系统共享与不共享时的解决方案,得出结论:合作方式下通信接收机具有更小的干扰功率和恢复误差。

此外,基于迫零接收的思路衍生出一系列的干扰消除方法,旨在降低干扰信号对期望信号的影响。其中,干扰对齐(IA, interference alignment)和干扰

中和 (IN, interference neutralization) 方法最为典型。IA 方法中通过设计预编码矩阵将多个来自非期望发射机的干扰信号尽可能对齐到一个较小维度的子空间中, 从而在接收机处通过设计滤波矩阵消除干扰。例如: Rihan 等^[28] 提出在多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 感知和通信共存系统中基于 IA 的频谱共享策略, 在感知子系统和通信子系统在使用迭代算法分别以最大化 SINR 和最大化通信和速率为目标函数, 得到发射和接收波束形成矩阵。实现干扰对准后的感知子系统在理论上可以完全消除通信干扰的影响, 但是受限于有限的感知信道参数和回波信号的时变特点, 干扰消除效果往往与理论值有较大偏差。为了降低对信道参数的依赖, 洪冰清^[29] 在解决 K 用户 MIMO 系统中通信和感知之间的互干扰抑制问题上提出了一种遍历干扰对齐算法, 算法的核心是找到一对互补的信道, 使得不同时隙的直接信道参数不相等而间接信道参数相等。只要时隙选择合适可消除接收机处的非期望用户干扰。遍历干扰对齐算法虽然可以有效地消除雷达子系统和通信子系统之间的互干扰, 但是会占用额外的时隙发送相同的信号, 发射机的功率消耗较大。因此, 该作者又进一步提出了一种遍历干扰导向算法, 利用空间中多个信号之间的相互作用, 将干扰导向目标子空间, 从而消除对目标接收机的干扰。用 IN 方法将携带相同信息的干扰信号进行反向相加从而消除干扰, 进一步地, 利用 IA 在协作开销和 IN 在自由度成本上的优势, 联合 IA-IN 能实现更灵活的干扰消除^[30]。

综上所述, 资源一体化系统下共享频谱资源和硬件资源是产生通信和感知相互干扰的主要原因。通过资源复用的方式消除干扰会损耗一定资源的利用效率, 空口技术的革新带动的干扰消除方法 (新型编码方式) 和收发机联合设计方法的运算复杂度高。因此, 加强资源一体化, 实现更深层次的资源共享和功能融合, 研究精细化、可移植性强、低复杂度的干扰管理方法很有价值。

2.3 资源功能一体化

资源功能一体化干扰管理包含一体化波形设计、混合波束成形、干扰解码和多点协作等方法。

1) 波形设计。根据不同场景下的感知和通信需求, 波形设计分为基于感知功能的一体化波形设计、基于通信功能的一体化波形设计和融合双功能波形设计。波形设计是实现资源功能一体化

的核心, 将波形设计和干扰消除联系起来可以使系统在信号发射初期就具备抑制干扰的功能, 例如: Liu 等^[31] 联合波束设计降低了下行多用户干扰对通信接收机的影响, 通过加权优化双功能波形的设计, 在总功率和单天线功率约束下, 以轻微损害雷达性能为代价显著提高了通信性能。波形设计时通过改变阵元发射信号时的初始频率, 减弱干扰信号到达接收机时的功率, 可实现空域可靠通信和波束全覆盖^[32]。在波形设计时约束条件越多越能适应复杂情况下的感知需求, 但是也会造成算法复杂度高、硬件实现困难等问题。

2) 波束成形设计。通过合理分配波束资源实现通信和感知双功能, 利用波束的指向性将干扰信号与期望信号分开并滤除。一方面, 当不同波束分别执行感知和通信功能时, 感知波束在一定范围内周期性扫描以获取目标参数, 而通信链路指向性强。当波束间有信号泄露或覆盖区域部分重叠时, 波束间会产生相互干扰。另一方面, 当波束主瓣和旁瓣执行不同功能时, 在抑制旁瓣干扰的同时要兼顾主瓣功能, 避免干扰进入主瓣时通信感知一体化系统的性能急剧下降。

一方面, 以特定功能为导向, 设计部署波束发射方式。例如: 以 MIMO 雷达为基础的一体化系统中, 将独立的雷达信号和通信数据加权, 得到一体化波形, 并在不同的波束上传输, 分别发送给感知目标和通信接收机^[33], 可以为系统提供更多的自由度。以感知功能为主的一体化系统中, 以特定的感知发射波形的协方差为条件, 设计波束成形方案, 解决多用户发射波束形成矩阵中信噪比平衡问题^[34]。另一方面, 设计波束成形矩阵, 使一体化信号能量集中在最有效的空间扇区内^[35], 减少干扰信号的影响。

3) 干扰解码。资源功能一体化下的干扰解码难点在于功能上的解耦。例如: 结合先验信息对干扰信道进行建模, 筛选振幅高于最强干扰阈值的信号并将其减去; 设计基于导频技术的解码解调器, 检测感知回波并消除干扰^[36]; 从规则间隔的导频符号中提取有用的通信信号^[37], 利用导频进行干扰信号重构, 从而提高雷达的动态范围。当信道先验信息未知时, 利用递归神经网络组成的自动编码器进行盲干扰检测^[15], 重构发射信号并对干扰信号来源进行自动检测、识别和定位。与资源一体化系统相同, 资源功能一体化系统也可以采用基于 IA 的方法实

现干扰消除。不同的是,资源功能一体化系统中信号耦合更紧密,需要联合多个处理域进行干扰消除。例如:Jing 等^[38]将空域和时域相结合,针对 K 用户 MIMO 干扰信道,提出一种线性空时干扰对齐算法,有效减少了系统完全消除干扰时所需的天线数量,对多干扰源、干扰程度高的恶劣通信场景具有鲁棒性。

4) 协作多点干扰消除。多个通信感知一体化系统组成的集群网络中的干扰消除面临更大挑战,一方面,交互信息复杂多变且高度耦合;另一方面,多个一体化系统之间的时钟同步和资源协调开销更大,复杂度更高。基于协作多点 (CoMP, coordinated multi-point) 的 ISAC 集群网络联合多个一体化基站的通信和感知能力有助于构建一个广域覆盖、泛在感知的无线网络架构。在此架构下,利用灵活的功率配置和干扰消除方法有望实现跨空间、跨区域的深层次干扰消除。例如:在协作双蜂窝网络中^[39],联合波束形成设计和接收滤波器设计可实现协作干扰消除。在基站间基于注水功率分配算法^[40]进行天线的联合部署和协调,当检测到无线环境良好时,为天线分配更高的发射功率。进一步地,在 CoMP 框架下,联合连续干扰消除和分布式干扰消除方法,对消除干扰过程中的确定性和复杂性进行权衡。CoMP 联合干扰消除方法应用于多用户非正交多址接入集群系统中,在消除干扰的同时具有更高的系统吞吐量^[41],显示了协作干扰消除的适用性。

综上所述,功能资源一体化系统可以结合信道先验信息从资源功能紧耦合的信号中进行干扰解码、重构或对齐来实现干扰消除。此外,波形设计、波束管理和 CoMP 等方法为未来干扰消除提供了新思路。其中,按照不同的性能需求进行一体化波形设计从根本上解决了干扰对期望信号的影响;混合波束成形技术通过产生可控指向性的波束实现通信信号的有效传输和干扰影响最小化;基于 CoMP 的干扰消除架构为未来智能网络化干扰消除的实现提供了可行方案。

3 干扰避免和利用

为进一步减小干扰信号对感知子系统和通信子系统的影响,从干扰避免和干扰利用的层面(见表 2)进一步挖掘,使干扰管理更加灵活,体现了绿色通信的理念。

表 2 干扰避免和干扰消除方法的优劣

干扰管理层面	干扰管理方法	优势	劣势
干扰避免	增加人工噪声 ^[42-43]	可以进行定制化的干扰避免	会增加额外的发射功率
	自适应算法 ^[44-46]	灵活、可移植性强	算力资源消耗大,实现困难
干扰利用	功率利用 ^[47-50]	利用干扰信号潜在的功率,实现绿色通信	复杂度高,可靠性差
	辅助判决 ^[49,51-52]	辅助通信符号判决,提升感知精度	依赖信道的先验信息

3.1 干扰避免

1) 增加人工噪声。通信发射机到期望用户之间的有用信息被感知目标错误接收会带来干扰和安全隐患,通过在通信发射机处增加人工噪声,并以最小化感知目标接收到的 SINR 为目标,避免通信对感知过程的干扰,有助于通信信号的可靠传输^[42]。此外,在非完美信道状态信息和感知目标模糊等特殊场景下,联合波束成形技术可以进一步提高加入人工噪声的有效性。但是,在发射机处增加人工噪声会带来额外的功率损耗,因此,Su 等^[43]重新设计了发射波形和接收波束形成器,将人工噪声定向调制到非通信用户所在的波束方向上。定向调制是一种天线级的调制技术,通过在感兴趣的用户处调整符号的振幅和相位,将干扰信号推离信号星座图的检测阈值从而避免干扰。但是,当通信连接频繁或感知目标高速运动时,添加人工噪声来避免干扰的效果急剧下降。

2) 自适应算法。一方面,具有认知智能的系统通过频谱感知技术预测下一个传输周期内的干扰信号种类、结构等信息,进而自适应地使用设计波形、调整收发机参数和选择信号处理算法等方法来避免干扰。其中自适应空间包括频域、时域、空域和码域。例如:Liu 等^[44]针对认知物联网设计了一种包含聚类模块的收发器,利用改进的基于期望最大化算法来获取干扰信号的调制约束信息,进而采取干扰避免措施。用深度学习技术学习输入数据中的复杂非线性关系,在求解复杂非线性决策边界时具有极大优势。但是,深度学习技术需要访问大量的数据集,以便使模型得到充分的训练,因此,对小数据集干扰信息的处理精度大大降低。

另一方面,资源自适应可以在特定的性能指标下优化 ISAC 技术性能。例如:以频谱感知为基础,通过自适应调整载波频率和测量起始时间,使感知和通信功能逐步适应电磁和物理环境,即载波频率适用于整个可用带宽内的每个测量周期,最大限度地避免来自其他雷达传感器的干扰^[45]。以优化功率分配为目标,结合自适应 AI 算法估计信道状态信息并预测克服干扰所需要的发射功率水平^[46],进而通过对发射功率资源的合理分配避免干扰。自适应算法使无线信号的接收逐渐适配环境,在拓扑结构变化的同时使性能得到提升。

3.2 干扰利用

1) 干扰信号功率利用。干扰利用是指通过对 ISAC 技术中先验已知的干扰进行交替转换,提高期望信号的信噪比,而不是简单地消除所有干扰。一方面,干扰信号可以用来增大接收机的有效信噪比。例如:Masouros 等^[47]提出一种预编码算法,通过选择性地保留对通信用户有益的多址接入干扰,增大接收机的有效信噪比。Su 等^[48]提出了一种干扰旋转技术,将用户接收到的信号旋转到决策区域,进而将多用户之间的干扰用于增强有用信号发射。Masouros 等^[49]又将干扰利用应用于蜂窝系统的下行链路,进一步说明了与消除系统内存在的已知干扰信号相比,利用已知的干扰信号的功率来增加期望信号的接收 SINR,能在改善系统通信性能的同时降低发射功率,更能体现绿色通信的理念。另一方面,利用干扰信号降低发射信号的期望功率。Hong 等^[50]提出了一种数据辅助的发射预编码方案,根据发射机发送的已知数据和信道信息,把系统内已知的有益干扰作为有用功率,降低发射信号的期望功率。因此,在相同的总发射功率约束下,干扰信号功率的再利用可以在消除干扰的同时降低能耗。

2) 建设性干扰辅助判决。建设性干扰即可用来辅助通信或感知功能的一部分干扰信号,与之相对的是破坏性干扰。例如:在相移键控调制的多用户 MIMO 系统中,建设性干扰可以帮助下行链路用户的符号决策。类似地,信道间干扰^[51]和已知的通信用户间干扰^[52]可以用来加强下行用户的接收 SINR,同时最小化对感知功能的干扰。此外,对已知的破坏性干扰,通过优化技术将破坏性干扰旋转到建设性区域^[49],在节能的同时能够提升目标检测概率。

综上所述,干扰避免和利用的核心思想是加强

对干扰信号的识别和预测,最大限度地削弱干扰信号的影响。增加人工噪声的方法能避免特定性能指标受损,自适应方法则从资源配置、波形优化、智能预测等方面避免干扰。建设性干扰可以作为一种能源运输工具,降低总发射功率,提升期望信号的 SINR 并辅助检测判决,为未来绿色通信提供可行方案。但是,干扰信号的先验信息有限、软硬件平台实现复杂和可移植性差的问题仍未得到很好地解决。考虑到 AI 算法具备学习和记忆能力,在识别、避免和利用干扰信号时具有优势,可利用智能算法最大限度地获取干扰信号的先验信息,并将干扰信号转化到建设性区域,在提升系统抗干扰能力的同时实现绿色通信。

4 结束语

ISAC 技术是实现 6G“智能泛在”的关键技术之一,针对广域通信能力和泛在感知能力融合共生过程中通信子系统和感知子系统之间的相互干扰问题,从干扰消除、干扰避免和干扰利用 3 个角度综述了干扰管理方法。不同模式不同场景下的干扰管理方法对干扰消除的灵活性和可移植性有更高的要求。在实现通信和感知功能的前提下,结合智能信号处理和 CoMP 的网络化干扰消除方法有望成为突破现有干扰消除框架的新思路。协作干扰避免和干扰利用能够实现绿色低碳通信的美好愿景,但对系统算力、信息交互能力和软硬件平台的实现提出了更高要求。总体来讲,未来 ISAC 技术中的干扰管理仍需解决的问题包括:降低对干扰信号先验信息的依赖,使干扰管理方法具有可移植性;降低干扰管理的资源开销,实现绿色通信;研究精细化、定制化的干扰管理方法,以满足新型移动业务的性能需求。

参考文献:

- [1] 闫实,彭木根,王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11.
YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4): 1-11.
- [2] ITU-T. Network 2030: a blueprint of technology, applications and market drivers towards the year 2030 and beyond [EB/OL]. (2019-05-30)[2022-05-25]. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/>

White_Paper.pdf.

- [3] KINNEY S. Update on global 5G spectrum auctions[EB/OL]. (2018-08-21) [2022-05-25]. <https://www.rcrwireless.com/20180821/5g/5g-spectrum-auctions>.
- [4] GLOVER J. Statement; award of the 2.3 and 3.4 GHz spectrum bands [EB/OL]. (2017-01-03) [2022-05-25]. <https://www.ofcom.org.uk/consultations-and-statements/category-1/award-of-the-spectrum-bands>.
- [5] 栾宁, 熊轲, 张煜, 等. 6G: 典型应用、关键技术与面临挑战[J]. 物联网学报, 2022, 6(1): 29-43.
LUAN N, XIONG K, ZHANG Y, et al. 6G: typical applications, key technologies and challenges[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(1): 29-43.
- [6] FCC. FCC proposes innovative small cell use in 3.5 GHz band [EB/OL]. (2012-12-12) [2022-05-25]. <https://www.fcc.gov/document/fcc-proposes-innovative-small-cell-use-35-ghz-band>.
- [7] NTIA. An assessment of the near-term viability of accommodating wireless broadband systems in the 1675 ~ 1710 MHz, 1755 ~ 1780 MHz, 3500 ~ 3650 MHz, and 4200 ~ 4220 MHz, 4380 ~ 4400 MHz bands (president's spectrum plan report) [EB/OL]. (2010-11-15) [2022-05-25]. <https://www.ntia.doc.gov/report/2010/assessment-near-term-viability-accommodating-wireless-broadband-systems-1675-1710-mhz-17>.
- [8] DANIELS R C, YEH E R, HEATH R W. Forward collision vehicular radar with IEEE 802.11: feasibility demonstration through measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1404-1416.
- [9] YANG C C, SHAO H R. WiFi-based indoor positioning[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 150-157.
- [10] KHAWAR A, ABDELHADI A, CLANCY T C. A mathematical analysis of cellular interference on the performance of S-band military radar systems[C]//2014 Wireless Telecommunications Symposium. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 1-8.
- [11] 潘成康, 王爱玲, 刘建军, 等. 无线感知通信一体化关键技术分析[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(2): 143-148.
PAN C K, WANG A L, LIU J J, et al. Analysis of key technologies of wireless sensing communication integration[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(2): 143-148.
- [12] 鞠晓杰, 李璞, 王雪, 等. 协作干扰管理技术研究综述[J]. 通信技术, 2017, 50(10): 2144-2149.
JU X J, LI P, WANG X, et al. Overview on cooperative interference management technology[J]. Communications Technology, 2017, 50(10): 2144-2149.
- [13] YANG Z L, DONG M. Low-complexity coordinated relay beamforming design for multi-cluster relay interference networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2215-2228.
- [14] LI B, PETROPULU A P. Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2846-2864.
- [15] WU Q Q, SUN Z, ZHOU X. Interference detection and recognition based on signal reconstruction using recurrent neural network[C]//2019 IEEE Globecom Workshops. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [16] SIT Y L, ZWICK T. MIMO OFDM radar with communication and interference cancellation features[C]//2014 IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 265-268.
- [17] VITERI-MERA C A, TEIXEIRA F L, SAINATH K. Interference-nulling time-reversal beamforming for mm-Wave massive MIMO systems[C]//2015 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [18] AN J B, DAI L L. Wideband beam tracking in THz massive MIMO systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(6): 1693-1710.
- [19] DONG J, SHI C G, ZHOU J J, et al. Joint radar selection and resource allocation for multi-target tracking in radar network under communication interference[C]//2021 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2021: 73-77.
- [20] 白智全, 王丽, 梁兴燕, 等. 基于 STBC 方案的鲁棒性协作频谱感知技术[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(9): 956-960.
BAI Z Q, WANG L, LIANG X Y, et al. Robust cooperative spectrum sensing based on STBC scheme[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(9): 956-960.
- [21] SIT Y L, STURM C, ZWICK T. Interference cancellation for dynamic range improvement in an OFDM joint radar and communication system[C]//2011 8th European Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 333-336.
- [22] HAKOBYAN G, YANG B. A novel narrowband interfer-

- ence suppression method for OFDM radar [C] // 2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 2230-2234.
- [23] BECHTER J, ROOS F, RAHMAN M, et al. Automotive radar interference mitigation using a sparse sampling approach [C] // 2017 European Radar Conference (EURAD). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 90-93.
- [24] KHAWAR A, ABDEL-HADI A, CLANCY T C. Spectrum sharing between S-band radar and LTE cellular system; a spatial approach [C] // 2014 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 7-14.
- [25] ZHENG L, LOPS M, WANG X D, et al. Joint design of overlaid communication systems and pulsed radars [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(1): 139-154.
- [26] ZHENG L, LOPS M, WANG X D. Adaptive interference removal for uncoordinated radar/communication coexistence [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2018, 12(1): 45-60.
- [27] LI B, PETROPULU A P, TRAPPE W. Optimum codesign for spectrum sharing between matrix completion based MIMO radars and a MIMO communication system [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(17): 4562-4575.
- [28] RIHAN M, HUANG L. Optimum co-design of spectrum sharing between MIMO radar and MIMO communication systems; an interference alignment approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11667-11680.
- [29] 洪冰清. 雷达通信一体化互干扰处理方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
HONG B Q. Research on mutual interference processing method of radar communication integration [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [30] LI Z, CHEN J, ZHEN L, et al. Coordinated multi-point transmissions based on interference alignment and neutralization [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(7): 3347-3365.
- [31] LIU F, ZHOU L F, MASOUIROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems; optimal waveform design [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(16): 4264-4279.
- [32] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于 OFDM-LFM 信号的 MIMO 雷达通信一体化信号共享设计研究 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 801-808.
- LIU B F, CHEN B X. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2019, 41(4): 801-808.
- [33] LIU X, HUANG T Y, SHLEZINGER N, et al. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 3929-3944.
- [34] LIU X, HUANG T Y, LIU Y M, et al. Transmit beamforming with fixed covariance for integrated MIMO radar and multiuser communications [C] // 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2022: 8732-8736.
- [35] CHENG Z Y, LIAO B. QoS-aware hybrid beamforming and DOA estimation in multi-carrier dual-function radar-communication systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1890-1905.
- [36] DENG J H, CHEN S H, KU M L. Multiuser MIMO precoders with proactive primary interference cancellation and link quality enhancement for cognitive radio relay systems [J]. IEEE Access, 2017, 5: 17701-17712.
- [37] SIT Y L, REICHARDT L, STURM C, et al. Extension of the OFDM joint radar-communication system for a multipath, multiuser scenario [C] // 2011 IEEE Radar-Con. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 718-723.
- [38] JING X R, MO L L, LIU H Q, et al. Linear space-time interference alignment for K -user MIMO interference channels [J]. IEEE Access, 2018, 6: 3085-3095.
- [39] LI Y Q, JIANG M. Joint transmit beamforming and receive filters design for coordinated two-cell interfering dual-functional radar-communication networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022(99): 1-6.
- [40] ZHAO X S, ZHANG X Y, LI S, et al. A cooperative interference eliminated mechanism in MIMO systems [C] // 2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 569-572.
- [41] KILZI A, FARAH J, ABDEL NOUR C, et al. Mutual successive interference cancellation strategies in NOMA for enhancing the spectral efficiency of CoMP systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 1213-1226.