

“射频计算”专栏

编者语

射频技术在信息科学与技术发展与应用中一直扮演着重要角色。射频信号在无线通信中是通信介质,在智能无线感知中作为感知媒介,在无源物联网中还作为能量来源。随着物联网与人工智能技术深度融合发展,射频技术正经历由传统信息媒介向新型计算载体的角色演进。射频计算以射频信号为信息载体和计算对象,通过在射频域直接对其进行处理、操控和转换,实现丰富的计算功能。这一理念跳出了传统计算主要在数字域内进行符号运算的范围,将计算过程拓展至连续、开放且动态演化的射频空间,有望突破长期困扰物联网发展的能耗下限,为感知、通信、计算一体化开辟新的实现路径。

射频计算的研究空间广阔。与数字计算不同,射频计算建立在器件非理想性、信号传播不确定性与任务需求多样性共同作用的开放物理系统之上,其核心科学问题在于如何将连续电磁过程转化为稳定、可解释和可利用的计算能力。从底层器件到空间传播,再到信息表征与任务决策,射频信息经历跨尺度、跨域和多层次的耦合演化:器件的噪声、非线性和记忆效应影响信号质量,复杂环境中的多径、遮挡与干扰改变信息结构,而有限样本和场景变化又对智能模型的泛化能力提出挑战。因此,射频计算并非射频技术与人工智能的简单叠加,而是需要贯通“器件—信号—空间—任务”,揭示电磁传播机理、硬件物理特性与数据表征规律之间的内在联系,形成物理机理约束与数据驱动学习相融合的理论和方法体系。

近年来,各学科领域围绕射频计算开展了大量相关研究,取得了积极进展。一方面,面向特定任务优化射频器件与行为模型,可在信息获取和信号变换的源头提升计算质量;另一方面,将传播规律、器件特性和行为先验嵌入智能算法,可增强模型在复杂环境、小样本和未知场景下的适应能力。由此,射频系统正从按照固定流程完成信号收发与处理,逐步转向对物理空间信息进行自主提取、关联建模和任务推理。射频计算的研究重点,也由单一环节的性能优化拓展至物理过程与计算任务的协同设计,为构建泛在、低成本、非接触的空间智能系统提供了重要支撑。

本专栏围绕射频计算这一主题,聚焦射频器件与电路建模、复杂射频信号处理、物理层身份认知以及空间感知与人机交互等方向,共收录6篇论文,呈现了从底层射频前端、信号建模与表征,到高层环境感知和行为理解的多层次研究进展。

在射频前端与器件行为建模方面,本专栏收录了毫米波低噪声放大器和功率放大器行为模型两项研究工作。《面向K/Ka波段应用的宽带高线性CMOS低噪声放大器设计》针对毫米波接收前端难以兼顾宽带、低噪声、高增益与高线性度的问题,采用源极电感退化反馈、三阶非线性跨导优化、栅极电容峰化及三维交错版图布局等方法,实现了K/Ka波段宽带高线性

低噪声放大,为高动态范围毫米波信号获取提供了电路基础。《射频功率放大器行为模型基函数自适应生成技术》面向宽带功率放大器强非线性与记忆效应导致的行为模型维数膨胀问题,提出基于线性B样条基的自适应生成方法,通过贪婪迭代搜索按需构建基函数,并将模型转化为硬件友好的查找表与线性插值结构,在保持建模和数字预失真性能的同时,降低了模型规模与实现复杂度。

在复杂射频信号处理与身份认知方面,本专栏收录了同频盲信号分离和小样本辐射源识别两项研究工作。《基于动态图神经网络与对比学习的单通道同频盲信号分离方法》针对单通道条件下目标信号与干扰信号高度混叠、非局部关联难以刻画等问题,通过多尺度动态构图、图消息传递和目标匹配驱动的对比学习,增强复杂非平稳干扰的表征能力以及目标与干扰在隐空间中的可分性,并利用流形混合增强提高对未知干扰的鲁棒性。《基于无损VMD和Mamba的小样本辐射源识别方法》针对射频指纹易受噪声和调制信息掩盖、现有模型依赖大量标注数据且长序列处理效率不足的问题,利用无损变分模态分解增强指纹特征表示,并结合Mamba、自监督预训练与迁移学习,实现小样本条件下的高效辐射源识别,为射频物理层身份认证提供了新的技术路径。

在射频空间感知与智能交互方面,本专栏收录了无源物联网室内定位和RFID手势识别两项研究工作。《PCDA-MPAT:物理约束数据增强与多径Transformer的无源物联网室内定位方法》面向室内多径遮挡、标签性能差异和样本不均衡问题,将相位—频率斜率一致性作为数据生成的物理约束,并设计多径感知Transformer捕捉准静态信道的时域演化规律,实现了复杂陈列环境下定位性能的提升。《基于行为多样性数据增强的RFID手势识别技术》针对射频数据采集成本高、训练样本多样性不足的问题,从信号传播机理出发,将手势距离和运动速度显式编码为生成条件,利用条件扩散模型生成兼具物理一致性与行为多样性的样本,从而提升模型对未知样本的泛化能力,拓展了射频计算在非接触式人机交互中的应用。

本专栏收录的工作覆盖射频信息产生、接收、建模、分离、识别与感知等环节,体现了射频计算由底层硬件支撑向信号智能解析和空间语义理解逐层演进的技术逻辑。相关研究既关注器件非线性、噪声和宽带特性等物理问题,也探索图神经网络、对比学习、状态空间模型、生成对抗网络和扩散模型等智能方法,展现了物理机理与数据驱动融合在提升射频系统性能、效率及泛化能力方面的潜力。期望本专栏能够为相关领域研究人员提供有益的学术参考与实践启示,促进射频电路、无线通信、人工智能和空间感知等方向的交叉融合,推动射频计算基础理论、关键技术与应用体系的进一步发展。

客座编委:何 源 清华大学
程 强 东南大学
戴俊彦 东南大学
郭秀珍 浙江大学