

通信感知一体化硬件设计——现状与展望

林粤伟^{①②③} 张奇勋^{*③} 尉志青^③ 李兴旺^④ 刘凡^⑤ 范绍帅^② 王溢^③

^①(青岛科技大学信息科学技术学院 青岛 266061)

^②(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室 北京 100876)

^③(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

^④(河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454003)

^⑤(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 通信感知一体化(ISAC)需要通信和感知共用无线电频段和硬件资源。多频段、大带宽、通信感知对硬件的要求不同等特点对通信感知一体化硬件设计提出更高要求。该文对后5G, 6G, WiFi等通信感知一体化的硬件设计、验证技术, 以及硬件系统性验证平台进行归纳, 对国内外近年相关硬件设计研究及其验证情况进行综述, 关注通信感知两种系统对硬件的需求矛盾、带内全双工(IBFD)自干扰消除(SIC)、功放(PA)效率、电路性能对建模要求更高等硬件设计挑战。首先, 总结、比较已有研究中通信感知一体化收发信机架构设计。然后, 介绍、分析现有通信感知一体化带内全双工自干扰抑制方案、低峰均功率比(PAPR)波形与高性能PA设计、器件高精度建模方法以及硬件系统性验证平台。最后, 总结全文并对未来通信感知一体化硬件设计所面临的开放性问题进行展望。

关键词: 第6代移动通信; 通信感知一体化; 带内全双工; 软件无线电; 雷达

中图分类号: TN911.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2025)01-0001-21

DOI: 10.11999/JEIT240012

1 引言

蜂窝移动通信正在朝着后5G (5.5G, Beyond 5G, 5G-Advanced)、第6代移动通信(6th Generation mobile communication, 6G)标准^[1-5]演进, 工作频段从传统的6 GHz以内频段(Sub-6 GHz)发展到毫米波(mmWave)、太赫兹(THz)乃至可见光频段, 与雷达工作频段产生交集。此外, 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)^[6]、多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)^[7]等技术在无线通信和雷达领域都得到了广泛应用, 无线通信与雷达在信号处

理、工作频段等方面存在很多共同或相似之处, 这促使“通信感知一体化(Integrated Sensing And Communication, ISAC)”^[8,9]成为5G-Advanced (5G-A), 6G、无线局域网(Wireless Fidelity, WiFi)、雷达等无线电领域的研究热点, 并朝着通信、感知、计算一体化(通感算一体化)的网络感知方向发展^[10]。顾名思义, “通信感知一体化”的理念是将无线电通信(蜂窝移动通信、WiFi等)与无线电感知(雷达等)乃至网络人工智能(Artificial Intelligence, AI)计算能力集成为一个整体, 物理层共用频率以及射频硬件资源, 以达到节省频谱、降低成本、减小硬件尺寸与重量、通信感知互相辅助增强等目的。本文聚焦的通信感知一体化主要是指雷达通信一体化。

通感一体化系统的硬件设计与研究需要对射频收发信机进行合理的架构和器件设计, 重点考虑接收机对信号的持续接收性、链路预算、噪声系数等, 对系统的尺寸、重量、功耗、成本等指标更为敏感。通感一体化领域的整体综述^[10,11]、波形设计综述^[12]、信号处理综述^[13]、太赫兹技术综述^[14]、车联网技术综述^[15,16], 以及具体论述其算法、方案细节的文献大多聚焦于理论与软件仿真, 对于硬件设计与技术验证的方案介绍散见于各文献内部, 虽有论述其具体硬件设计与验证方案的文献, 但数量相对理论与算法类文献偏少, 且仍然鲜见聚焦于通感一体化硬件设计的全面系统性综述文献。

收稿日期: 2024-01-16; 改回日期: 2024-05-03; 网络出版: 2024-05-12

*通信作者: 张奇勋 zhangqixun@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(62022020), 国家重点研发计划(2020YFA0711302), 网络与交换技术全国重点实验室(北京邮电大学)开放课题(SKLNST-2023-1-14), 泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学)开放课题, 青岛科技大学公派国内访学项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China Excellent Youth Science Fund Project (62022020), The National Key R&D Program (2020YFA0711302), The Open Foundation of State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications) (SKLNST-2023-1-14), The Open Foundation of Key Laboratory of Universal Wireless Communications (BUPT), Ministry of Education, P.R.China, The Public Domestic Visiting Program of Qingdao University of Science and Technology

目前的理论算法研究以数学推导和软件仿真为主,虽然已有部分研究采用了硬件验证的方法,但相关文献数量较算法仿真类文献大为偏少,且硬件验证的场景与感知功能较为简单、基础^[4]。首先,硬件验证场景多聚焦于物理层点对点链路级,而非网络系统级。其次,少见融入计算功能的硬件验证,即缺乏通感算一体化硬件验证^[15]。最后,所验证感知功能较为基础。多数文献验证了测速、测距、测角等基础功能。对于即时定位与地图构建(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)^[17,18]、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[19,20]成像、3D成像、呼吸与心跳感知等复杂感知场景的感知验证虽已有相关文献,但数量仍然偏少^[4],且部分文献只是探讨了将传统通信波形应用于通感一体化的技术可行性,并未真正实现通感一体化系统。

在通感一体化系统设计中,射频和基带硬件共享是一个重要的关注领域。硬件一体化的解决方案降低了总体功耗、系统大小和两个子系统之间的信息交换延迟,但也给硬件设计带来新的问题。通过对现有文献的调研,本文认为以下4个方面是通感一体化硬件设计目前存在的挑战。

(1)通信与感知对收发信机硬件要求不同甚至矛盾:鉴于通信和感知之间评估指标和算法的差异,通信和感知对收发信机硬件的要求不同,有时甚至彼此矛盾^[21],体现在如下方面:第一,对于发射机,感知功能需要大功率功放(Power Amplifier, PA)来发射调频连续波(Frequency Modulation Continuous Waveform, FMCW)等恒包络单载波信号;通信则需要更大的工作动态范围来线性无失真地发射OFDM等宽带多载波信号。通过无线资源复用,结合空中接口联合设计,发射机的通信和感知可相对容易地实现硬件资源一体化。对于接收机而言,相对发射机来说需求正相反,其硬件复用设计难度和挑战更大。一方面,雷达等感知功能倾向于更大的动态范围,以兼顾弱目标和强目标、远目标和近目标;另一方面,通信则可以使用上行功控来控制终端的信号发射功率,对接收机的动态范围要求并不高。第二,时分双工(Time Division Duplexing, TDD)的通信系统要求接收机与发射机分时工作。然而,对于连续波雷达,不但要求接收机与发射机几乎同时工作,而且要求连续工作以不断检测回波信号,两者之间的矛盾导致硬件实现困难。

为了应对上述通信感知对收发信机硬件的不同要求和矛盾,需要设计合适的通感一体化射频收发信机硬件架构,以及一体化系统中的自干扰消除方

法,以同时满足通信与感知的要求。较为理想的解决方案是采用带内全双工(In Band Full Duplex, IBFD)收发信机架构,结合自干扰消除技术,通信和感知完全复用收发信机链路。此外,文献^[21](详见2.1节)也提出了一种更为实用的较易实现的折中架构。

(2)IBFD接收机自干扰:如前文所述,IBFD收发信机架构是较为理想的通感一体化硬件解决方案,然而,其硬件实现却具有较大挑战性。通感一体化系统的硬件设计与实现不能完全复用已有通信IBFD自干扰消除方法,而是需要针对通感一体化的自身特点专门设计IBFD自干扰消除软硬件方案,能够保留或重构目标回波信号。

对于通信系统而言,现有提高IBFD收发信机隔离度的方法主要从空域干扰抑制(天线空间隔离、交叉极化等)、电气平衡双工器(Electric Balance Duplexer, EBD)设计与循环器(circulator)收发隔离、模拟域干扰消除等方面着手^[22]。例如,收发天线分离并拉开距离、优化天线屏蔽罩设计、发射机接收机联合波束赋形使发射天线零陷对准接收天线主瓣等。结合使用高隔离度EBD和模拟消除技术进一步抑制自干扰,使得残留自干扰信号的强度处于模数转换器(Analog Digital Converter, ADC)的工作动态范围内。经ADC模数转换后,最终由数字域自适应滤波算法消除残留自干扰,将其抑制到接收机底噪以下。

与IBFD通信系统不同,IBFD通感一体化系统接收机收到的自干扰分为两部分,一部分来自内部,即本地发射机直接泄露到接收机的强大自干扰(强大,是相对接收机接收到的弱信号来说)。另一部分来自外部,即由收发信机周围物体反射形成的发射信号的回波(外部微弱自干扰)^[23]。纯通信系统将外部与内部自干扰均视为需要消除的干扰,与之不同,对于通感一体化系统来说,若直接使用已有通信IBFD自干扰消除方法,会将感知(通常是雷达)探测目标的回波信号也一并消除,而目标回波对于雷达来说是有用的需要保留的信号,不应被视为干扰也不应被消除,否则无法对目标进行探测感知。综上,需研究专门的IBFD通感一体化数字自干扰消除方法对感知干扰进行更为精细的区分和消除。

(3)非恒包络一体化波形导致PA功率效率低下:在实现通感一体化信号的设计方法中,OFDM波形存在非恒包络问题^[24-26],峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)过高,而感知系统,比如雷达的PA为动态范围较小的非线性放大器,一般为饱和放大,发射效率高。当设计的一体

化OFDM波形信号通过功率放大器时会产生一定程度的非线性失真, 导致发射机功率效率的降低, OFDM信号失真, 雷达与通信性能下降^[27]。即便对于线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)波形来说, 也需要注意恒包络波形问题^[28]。因此, 为减小非恒包络波形失真带来的影响, 需为通感一体化系统设计恒包络波形或高性能线性放大器。需要注意的是, 与纯通信不同, 通感一体化恒包络波形设计需综合考虑通信与感知, 比如, 在产生恒包络信号的同时, 将雷达和通信信号分别发射至指定方向(空分), 如文献^[29]。

(4) 电路性能对建模要求更高: 为实现高精度感知, 通感一体化系统需要使用毫米波、太赫兹等更高的无线频段和更大的带宽, 电磁波的波长更短, 使得电路的尺寸更小且系统性能对器件与电路的材料误差等变得更加敏感。此外, 通感一体化系统电路结构精细, 小型化高集成时需要解决各支路和模块之间的干扰问题。为了解决前述问题, 需要对器件与电路进行更加精确的建模, 并分析外界对电路的影响因素, 以提升电路性能, 以实现高集成度、小型化的通感一体化收发信机^[30]。

综上, 有必要对通感一体化的硬件设计及其验证方案进行归纳总结, 展望未来发展趋势, 以加速通感一体化理论、算法的落地应用与产业化进程。归纳总结已有的复杂场景功能的硬件验证平台或原型机, 以推进业界对通感一体化的研究朝着场景与感知功能复杂化、网络化、通感与计算深度一体化的方向发展。本文首先对通感一体化尤其是雷达通信一体化系统的硬件架构设计、IBFD自干扰抑制方案、技术验证方案的国内外研究现状进行分析与梳理归纳, 进而对未来通感一体化硬件设计的发展趋势进行展望, 本文总体结构如图1所示。

2 研究现状

硬件验证系统的设计与通感一体化架构密切相关。通感一体化架构包括系统级架构与硬件架构^[4], 其中, 硬件架构与通感系统射频前端(RF front-end)、收发信机(transceiver)架构密切相关, 也决定着基站与终端的硬件设计, 而系统级架构则影响决定了通感一体化或通感算一体化验证系统的组网设计实现方法。考虑到以往通信和雷达系统的成本和规模, 通感一体化系统的硬件设计将更接近于传统的通信架构。作为折中, 需要考虑失真参数对感知性能的影响。合适的通感一体化射频收发信机架构设计, 以及一体化系统中的自干扰消除等都是需要解决的关键技术问题, 并需要相应的硬件测试平台或原型机来对其实际效果与通信感知性能进行验证。

2.1 收发信机硬件架构设计

通感一体化收发信机架构可以有多种分类方式, 比如可以根据双工方式分为TDD架构和IBFD架构两大类。主动雷达不支持频分双工(Frequency Division Duplex, FDD), 因此本文不予考虑。收发信机架构也可分为传统超外差式架构和非超外差式架构, 其中, 已有文献中的超外差式架构可根据接收机架构的不同细分为混频器前置架构、PA选择性旁路架构、接收机通信感知完全分离架构、接收机通信感知部分分离架构、低中频架构等, 非超外差式架构主要包括基于多端口干涉器的架构、零中频架构等。本文采用以双工方式为主的分类方式, 兼顾高频段架构等特殊情况。

作为收发信机架构设计的基础, 在收发信机底层器件级硬件设计方面, 2021年, Bozorgi等人^[31]分析了通感一体化在射频前端的技术挑战, 考虑FMCW波形, 针对通信、感知两种不同的应用, 重点分析、比较压控振荡器(Voltage Controlled

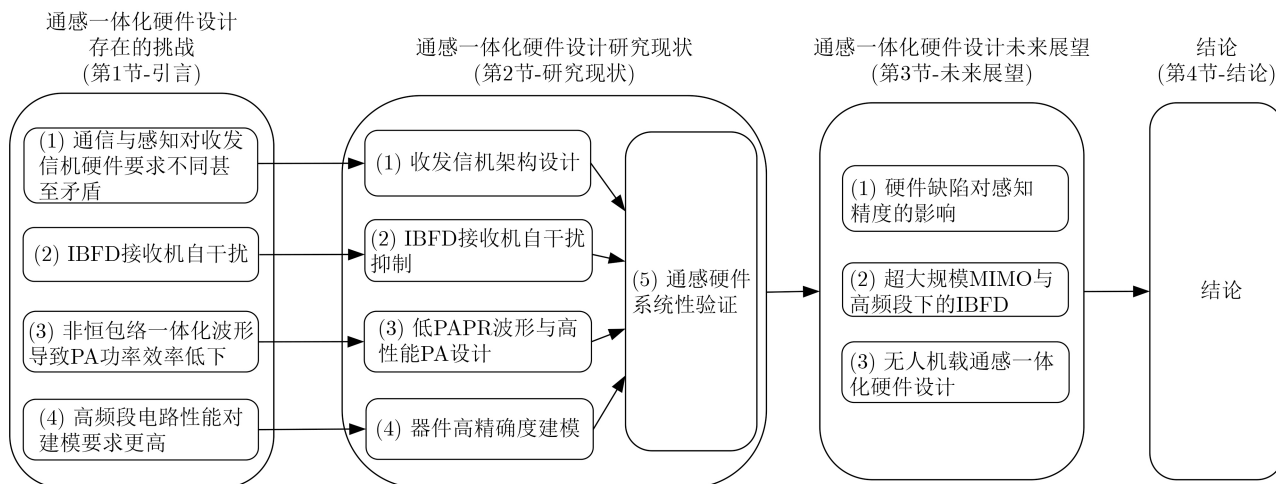


图1 论文结构

Oscillator, VCO)/锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)、PA和低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)等3类收发机组成器件的设计要求。

(1)TDD架构:传统无线电架构(超外差、零中频等)多以TDD的方式支持通感一体化,2010年和2011年,加拿大蒙特利尔大学的Han等人^[32-34]基于传统超外差无线电架构设计了智能交通系统TDD收发信机架构。如图2,在Sub-6 GHz频段实现了专用短距离通信(Dedicated Short-Range Communication, DSRC)原型机,并在2013年的文献^[35]中对其进行改进,将接收机链路由一路分为两路。感知模式和通信模式被安排在不同时隙,雷达FMCW梯形波和通信恒定频率载波在时间上交替出现。射频收发信机结合了传统的通信超外差与雷达模拟去

斜(de-chirp)架构。文献^[32-34]设计的TDD架构基于超外差、零中频等传统无线电收发信机架构,由于可以直接复用已有架构,因此具有便于实现的优点,缺点是由于TDD接收机无法持续接收信号,导致雷达感知最小距离问题,且基于传统架构进行面向通信的设计时,通信和雷达对收发信机的不同要求导致一体化功能实现较为困难。

上述通感一体化系统没有目标角度检测能力,且距离分辨率和通信速率较低,与智能交通、车联网的需求有一定差距。为此,Moghaddasi等人^[35,36]对其进行改进,提升了雷达距离分辨率和通信速率,增加了目标角度检测能力。如图3所示,对接收机硬件架构进行修改,接收机链路被分成通信和雷达两条链路,接收天线数量由1个增加到2个,以

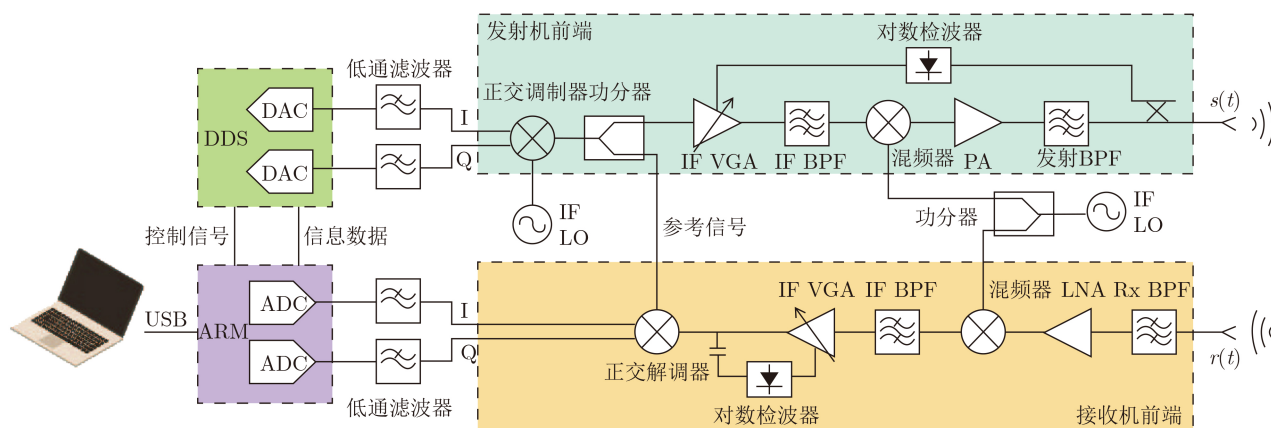


图2 传统TDD收发信机架构^[34]

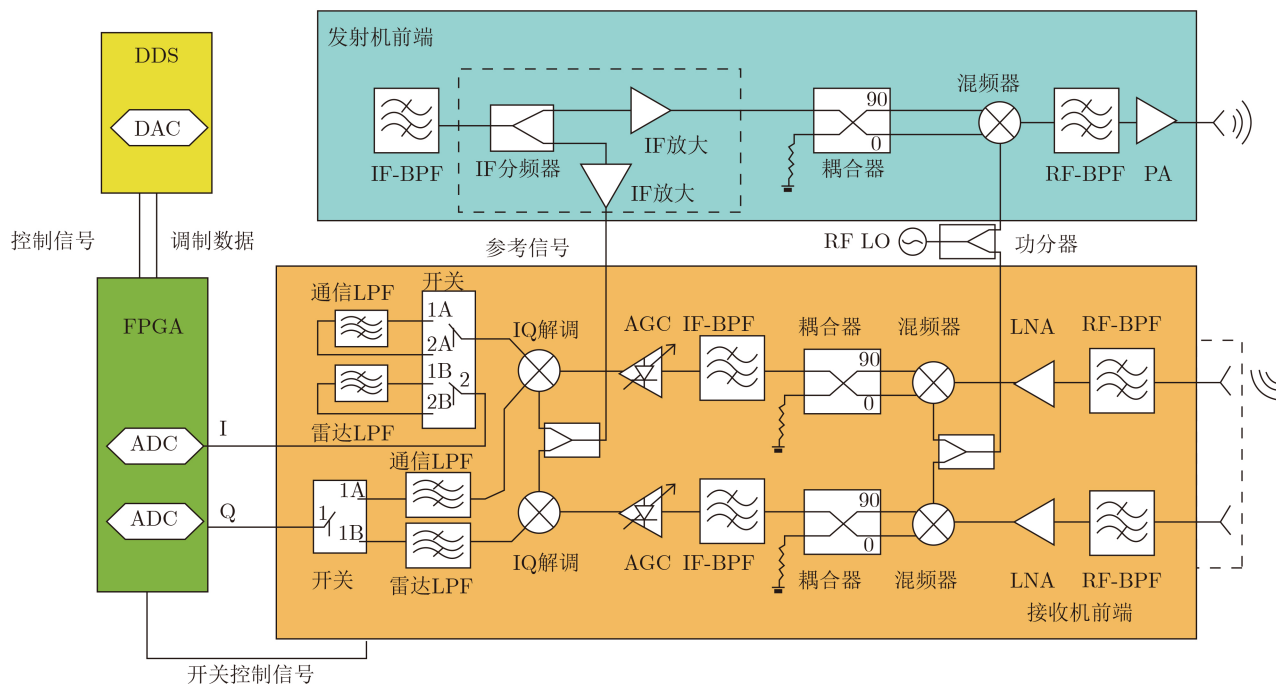


图3 接收机通信与感知部分分离的架构^[36]

便利用两根天线所接收两路信号的相位差估计到达角(Angle Of Arrival, AOA)。所实现接收机硬件架构与文献[21]所述架构的不同之处在于: 接收机两条链路并非完全独立, 天线、射频、大部分中频硬件彼此独立, 而中频下变频同相和正交(In-phase Quadrature, IQ)分量混频器和基带硬件通过两个开关时分复用, 两条链路分别处理雷达回波与通信信号, 链路之间的相位差用于测角。文献[36]使用了两个开关, 如图3, 既可通过控制带宽帮助保持通信与感知两种模式下接收机的灵敏度, 还可通过复用两个通道(链路)的IQ分量将ADC的使用数量最小化为两个。因此, 本文所设计架构的优点是可以保持接收机灵敏度、节省ADC数量、降低成本, 缺点是由于接收机额外增加了一条感知链路, 导致体积、重量的增大。另外, 该文献经硬件实测试验验证对比了所设计硬件架构较之前传统架构所取得的通信与感知性能增益: 在5.8 GHz频段、150 MHz带宽下雷达距离分辨率达1.53 m、通信最大数据率为75 MSPS, 较传统5.8 GHz频段架构, 不仅在测距测速的基础上额外支持测角功能, 而且取得了较为明显的通信与感知性能增益(详见文献[36]表9)。

对于TDD毫米波频段, 2007年, Zhang等人[37]阐述了24 GHz毫米波软件定义车载雷达设计方案与硬件测试情况。进而在2011年和2012年, 文献[38,39]论述了24 GHz毫米波通信雷达一体化系统的设计与硬件验证。使用文献[32-34]提出的收发信机架构, 对之前文献提出的FMCW梯形波进行优化。2013年, Han等人[40]对通信雷达一体化硬件设计与验证演示进展进行综述, 并对所综述文献进

行性能对比(详见文献[40]表2)。由于当时的技术发展限制, 该综述并未涉及IBFD通感一体化技术, 所述文献通信速率在Gbit/s量级以下, 且未考虑互信息、克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)等通感一体化指标。

前文所述通感一体化收发信机TDD架构主要基于传统的超外差式、零中频式等架构。与传统TDD架构不同, 2013年, Moghaddasi等人[41]提出一种基于多端口干涉器的通感一体化收发信机TDD架构, 如图4所示, 频点5.8 GHz, 带宽50 MHz。2018年, Moghaddasi等人[42]进一步设计实现了一种能够同时进行雷达到达角检测和数据通信的多功能接收机架构, 所提出的多功能接收机架构基于上述多端口干涉器技术进行改进, 集成了两个早先提出的6端口接收机, 可通过简单的相位调整信号处理方法估计到达角。论文推导了所开发多端口接收机的数学模型, 从理论上分析了其主要功能, 并实现了基于该多端口接收机的收发机架构和工作在77.5 GHz频点的原型机, 对到达角感知和数据通信分别进行测试。

上述接收机多端口干涉器架构中, 两根接收天线之间的相位差代表着所接收到的两路回波信号之间的时延, 该时延被直接关联到相对于天线平面的AOA, 因此该架构便于估计AOA。此外, 与传统的超外差和零中频架构相比, 成本和功耗较低(无需较为昂贵的混频器、本振功率约-20 dBm)[41]。然而该架构会导致接收机灵敏度减小[41], 并且由于零偏置二极管检测器的限制, 多端口架构的动态范围往往性能较差[41], 以上缺点导致其雷达探测距离减小。

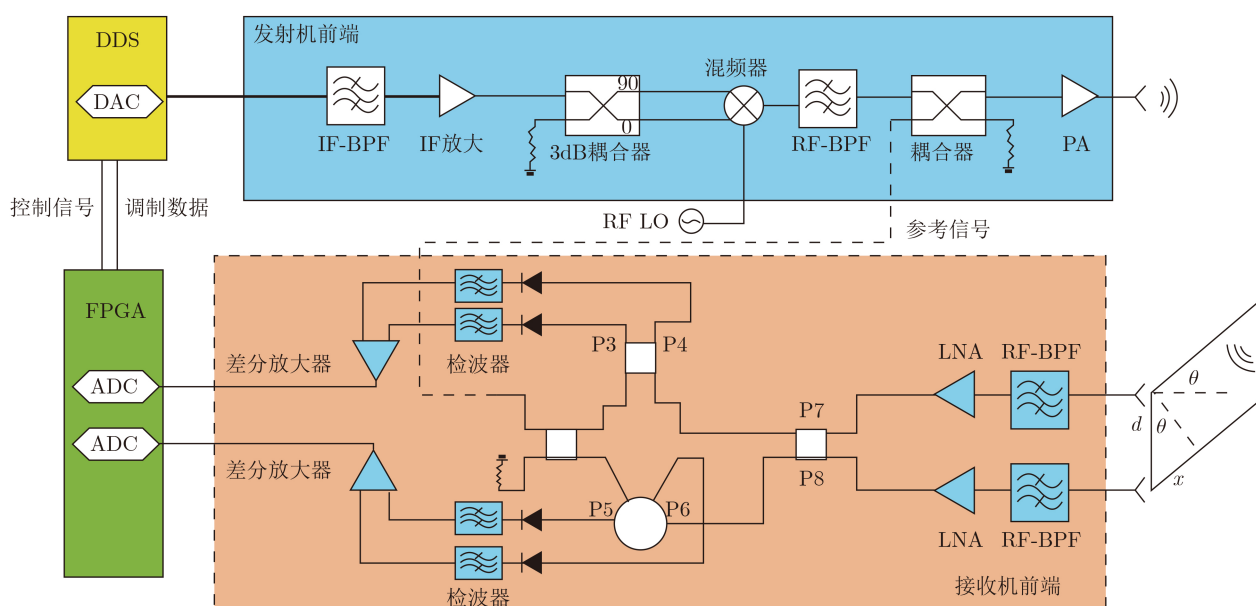


图4 基于多端口干涉器的收发信机架构[41]

表 1 通感一体化IBFD架构性能对比

文献	频点 (GHz)	带宽 (MHz)	波形	感知性能	通信性能	收发信机 隔离度(dB)
[44,45]	1.74	40	IEEE 802.11 OFDM波形	在保持与另一通信节点的IBFD链路的同时，在室内检测20 m内的目标，能够对速度为0.2~1 m/s的运动物体测速	误码率低于 1.5%	大于85
[46]	2.4	100	4G LTE与5G NR OFDM波形	可在室外对距离102.1 m、相对速度9 m/s的车辆进行测距测速，可以取得1 m量级的距离估计精度和超过90%的目标检测概率	未提供	100

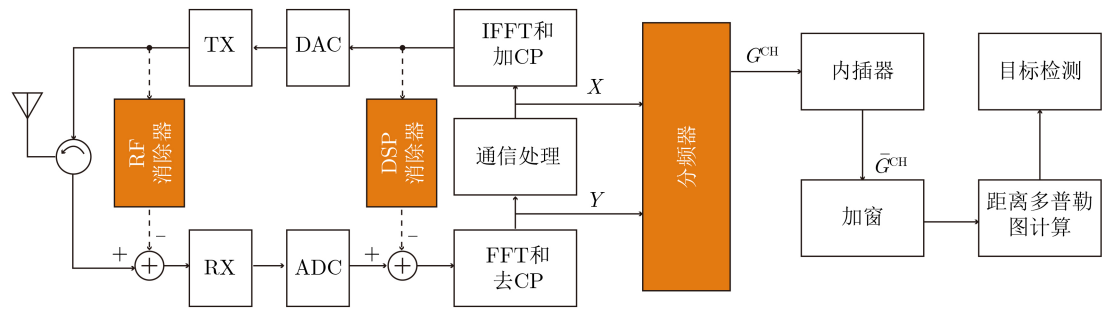


图 6 IBFD收发信机架构[46]

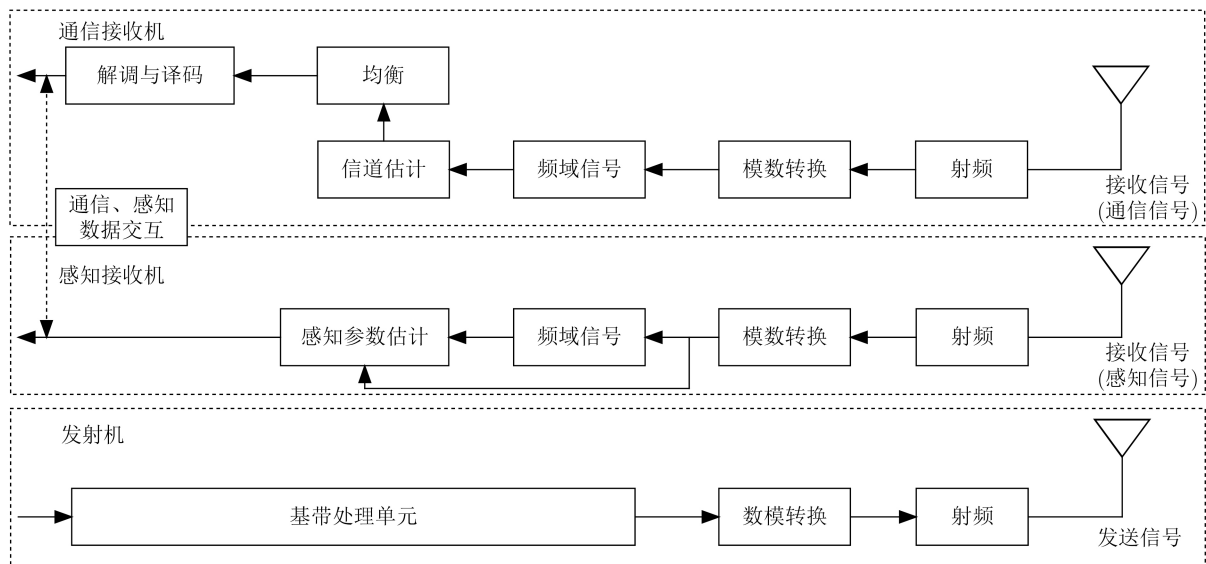


图 7 接收机通信与感知完全分离的架构[21]

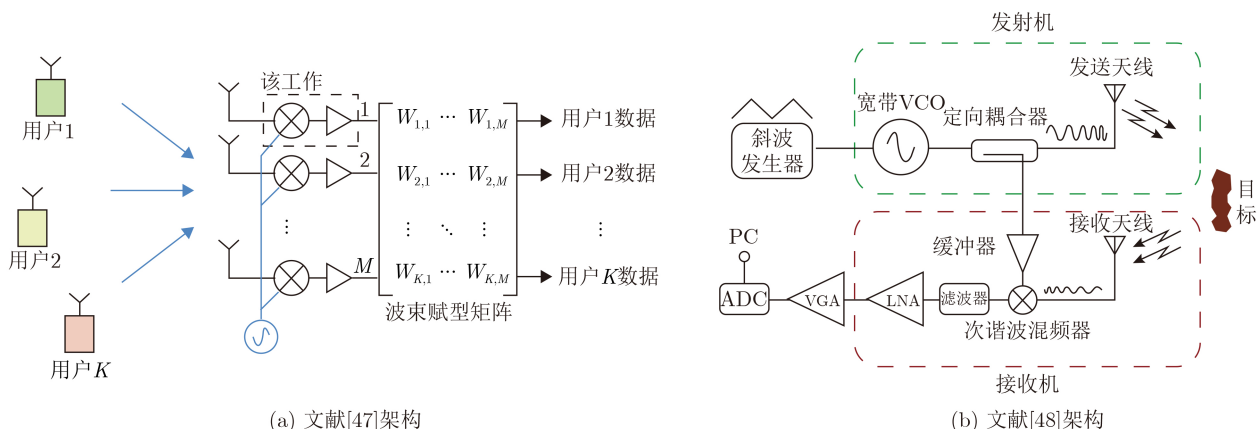
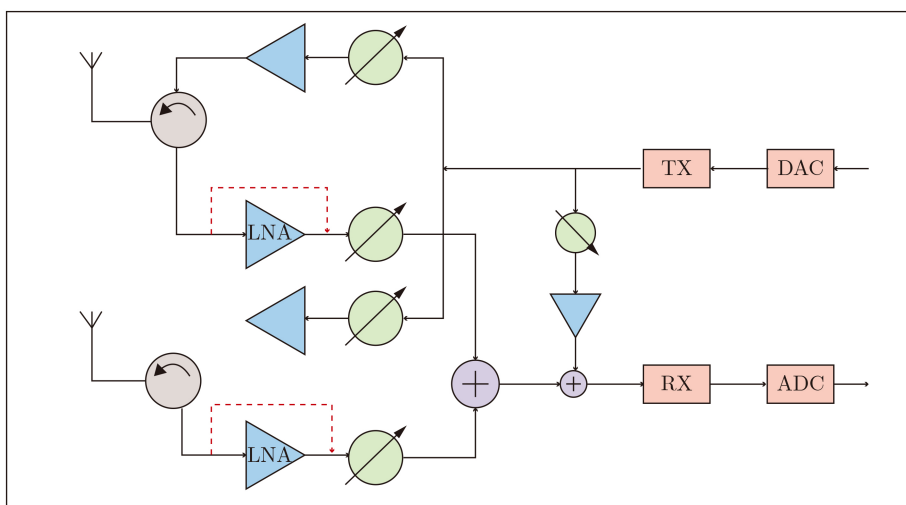
实现，无雷达感知最小距离问题，然而这种架构需要接收机额外增加感知链路，代价是体积、重量的增大。

(4)高频段架构：传统毫米波接收机的低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)需要宽带级间匹配网络，导致面积与功耗的显著增大，接收机“混频器前置”架构可以减轻或避免该问题，代价是接收机噪声系数(Noise Figure, NF)的增大和雷达探测距离的减小，需要研究降低接收机输入端噪声水平的方法。由于5G,6G使用了基于大规模/超大规模MIMO的波束赋形技术，天线数量增加带来的多天线分集增益降低了对信干噪比的要求，即接

收机对干扰、噪声具有更高的容忍度，因此较为适合该架构。

2017和2020年，文献[47,48]分别针对多天线MIMO和170 GHz高频段通感一体化系统提出“混频器前置”的通感一体化射频收发信机架构，如图8所示。其中文献[47]所设计28 nm CMOS原型在毫米波频段较传统架构降低了功耗，且保持了较好的噪声系数：在71~95 GHz频段功耗仅为12 mW，噪声系数在10 dB以内；在74~94 GHz频段具有类似的性能，且功耗可进一步降低到8 mW。

与之类似，2019年，文献[49]为通感一体化提出一种LNA选择性旁路的收发信机架构，如图9所

图8 混频器前置收发信机架构^[47,48]图9 LNA选择性旁路收发信机架构^[49]

示。当gNB在传输下行链路信号的同时接收目标的反射信号时，将接收机LNA旁路。文献[49]的图3对所提出的架构与传统TDD架构进行了性能对比，仿真结果表明在雷达模式下旁路LNA后，只需较少的射频干扰消除量，且对于具有数百个元件的毫米波大规模天线阵列场景，所提出架构具有更强的扩展性。

本节介绍的接收机混频器前置架构与接收机LNA选择性旁路架构属于TDD的双工方式，这两种架构的好处是可以缓解接收机饱和问题、面积与功耗减小、无雷达感知最小距离问题，但也会引入接收机噪声系数增大、灵敏度减小、雷达探测距离减小的问题。由于这两种架构都是在接收机LNA方面做改进，且都面向大规模/超大规模MIMO高频段场景，因此本文将这两种架构单独归类，没有归类到前文所述TDD架构。

通感一体化收发信机架构总结如表2，可以看出，与TDD和IBFD等架构相比，接收机通信感知链路分离架构可以避免自干扰、工程易实现、无雷

达感知最小距离问题，代价是接收机额外增加感知链路，体积、重量增大，是学术研究与目前产业测试的折中过渡方案，而IBFD架构是学术研究与未来产业落地的较为理想的方案。

2.2 IBFD自干扰抑制

IBFD通感一体化系统中，存在本地发射机对接收机的信号直接泄露(direct leakage)和周围物体反射回波带来的自干扰问题。与通信IBFD不同，通感一体化IBFD需要甄别发射机泄露自干扰与目标反射回波自干扰，并针对雷达分别予以抑制和保留，因此其处理过程较通信IBFD更为复杂。为了防止LNA和接收机链路饱和，学术界研究了不同的收发天线隔离和自干扰抑制技术，主要包括增大天线隔离度、模拟射频自干扰消除、数字基带自干扰消除等^[44]，以增加收发信机隔离度，代价是计算、硬件复杂度的增加。

(1)模拟射频自干扰消除：用于小型手持设备中无线收发信机的下一代前端模块需要支持越来越多的频段，传统FDD双工器采用的声表面波

表 2 通感一体化收发信机架构总结

文献	收发信机架构	通信双工方式	优点	缺点	说明
[32-34]	TDD架构：传统无线电架构(超外差、零中频等)	TDD	可直接复用已有架构	存在雷达感知最小距离问题，通信和雷达对收发信机要求不同导致一体化功能实现较为困难	
[35,36]	TDD架构：接收机通信感知链路部分分离	TDD	保持接收机灵敏度，节省ADC	接收机额外增加感知链路，体积、重量增大	接收机天线、射频、大部分中频链路分离，时分复用基带链路
[42]	TDD架构：接收机基于多端口干涉器	TDD	便于估计AOA、简单易实现、低成本、极低功耗、可重配置	接收机灵敏度减小、动态范围有限、雷达探测距离减小	适合毫米波和大规模MIMO(对噪声性能要求宽松)
[23]	IBFD架构	IBFD(接收机可持续接收信号)	通信频谱利用率提升接近2倍、无雷达感知最小距离问题	收发天线互耦、自干扰抑制带来接收机计算资源消耗与硬件复杂度的增大	学术研究与未来产业落地的理想终极方案
[16]	折中架构：接收机通信感知链路完全分离	TDD(接收机中的感知链路可持续接收信号)	避免自干扰、工程易实现、无雷达感知最小距离问题	接收机额外增加感知链路，体积、重量增大	学术研究与目前产业测试的折中过渡方案
[47,48]	高频段架构：接收机混频器前置	TDD	缓解接收机饱和问题、面积与功耗减小、无雷达感知最小距离问题	接收机噪声系数增大、灵敏度减小、雷达探测距离减小	适合毫米波和大规模MIMO(对噪声性能要求宽松)
[49]	高频段架构：接收机LNA选择性旁路	TDD	缓解接收机饱和问题、面积与功耗减小、无雷达感知最小距离问题	接收机噪声系数增大、雷达灵敏度减小、雷达探测距离减小	适合毫米波和大规模MIMO(对噪声性能要求宽松)，发射信号时旁路

(SAW)器件频率固定不可调，为此Liempd等人^[50]提出了一种适用于高度集成可调前端模块(Front-End Module, FEM)的输入3阶交调截取点(Input-referred third order Intercept Point, IIP3)达70 dBm的高线性EBD，如图10所示。该EBD频率可调，支持频率灵活的双工器，减小了前端模块的尺寸与成本。该文并未提供具体的EBD参数优化算法。

天线阻抗的微小变化足以改变自干扰消除性能，为了跟踪天线阻抗变化，需要研究自适应滤波等优化算法，使EBD能够最优化匹配网络的阻抗。Mikhael等人^[51]用Matlab实现了EBD优化算法，但Matlab软件实现的方案实时性较差。Vermeulen等人^[52]首次展示了实时的自动EBD调节硬件实现方案，在美国国家仪器(National Instrument, NI)公司的通用USRP板载Xilinx Kintex 7现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)^[53,54]中的MicroBlaze软核上，用C语言实现了基于粒子群算法的EBD匹配网络阻抗优化方案，该方案由EBD电路板与USRP组成，可对由4个可调电容器组形成的具有超过 4×10^9 种设置的4维阻抗参数空间进行实时最优化，可在1 ms内找到最优解。但是，该方案未应用到通感一体化IBFD架构。文献[23]将文献[52]实现的粒子群EBD匹配网络阻抗优化方案应用于IBFD通感一体化架构，如前文图5中的EBD调谐器所示，频点为Sub-6 GHz、带宽较小、未考虑毫米波等高频段，感知方面只支持

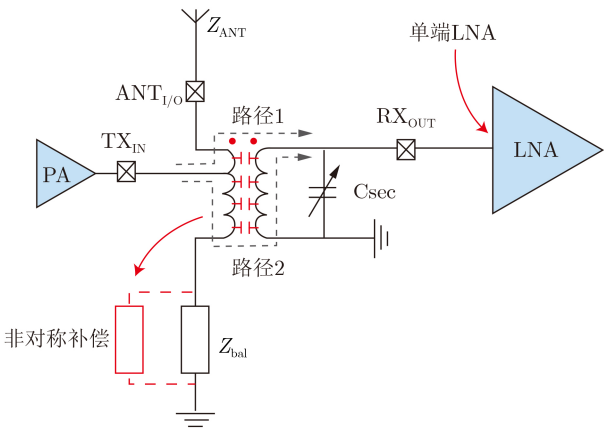


图 10 EBD电气均衡双工器自干扰抵消原理^[50]

测速，不支持测距。文献[43,44]在所实现的IBFD通感一体化架构中用USRP板载FPGA实现了基于抖动线性搜索(Dithered Linear Search, DLS)算法的EBD匹配网络阻抗优化方案。其中文献[43]未进行通感一体化IBFD架构的硬件实现，只是Matlab软件仿真，文献[44]在频点、带宽、测距功能方面存在和文献[23]同样的问题。

2019年，文献[46]在无源IBFD自干扰抑制技术的基础上，设计了有源IBFD自干扰消除算法：针对射频模拟域自干扰消除，设计了基于梯度的学习算法来自适应地估计3个向量调制器的复权重系数(射频域自干扰信号)。使用循环器或EBD增加隔离度，与已有IBFD自干扰消除技术研究的区别在于

能够区分1.5 m以内的直接自干扰(予以消除)与1.5 m之外的目标反射自干扰(予以保留)。在模拟射频自干扰消除器之后,数字基带自干扰消除器进一步针对剩余非线性自干扰进行抑制。与文献[23,44]类似,该文献的频点亦为Sub-6 GHz、带宽较小、未考虑毫米波等高频段。文献[55]提出一种用模拟电路实现的最小均方(Least Mean Square, LMS)自适应滤波器,动态调节向量调制器(Vector Modulator, VM)的权重参数值,以并行实现各分支的幅度与相位控制,产生与发射机直接泄露的自干扰信号相抵消的消除信号,从而在模拟域实现自干扰消除。

(2)数字基带自干扰消除:文献[23]中的DiSIC模块负责在射频模拟域的EBD之后进一步在数字基带域消除自干扰。DiSIC估计需接收的通信信号及其反射副本,将估计的信号从接收信号去除后再与发射信号混频。由FPGA实现的DiSIC模块对多径信道和硬件非理想因素建模来估计拟接收的信号及其反射信号,将其从基带接收信号中减去,进而得到剩余的雷达自干扰信号。对于雷达,需要在FPGA中将剩余的自干扰信号与所发射信号相关(匹配滤波)得到混合信号,对该混合信号抽取、振幅归一化得到窄带多普勒信号,进而根据该信号含有的多普勒频偏得到目标速度。对于通信,解调DiSIC模块估计的有用信号,恢复原始数据。

Hassani等人[56]提出了一种基于自适应滤波器的DiSIC的设计方法并用Matlab软件实现,实时性较差,进而在文献[44]增添哈默斯坦(Hammerstein)模型,并给出DiSIC的FPGA硬件实现方案。该文对物理电路和无线信道的线性和非线性进行建模,其中哈默斯坦模型对自干扰信号的静态非线性建模,自适应线性滤波器跟踪自干扰信号的线性部分。采用LMS优化算法动态更新哈默斯坦模型与自适应滤波器参数。文献[46]针对通感一体化IBFD时域基带数字自干扰消除,采用新颖的自正交学习规则动态估计自适应滤波器的参数,避免了显式的基函数正交化,大大降低了参数估计算法的计算复杂度。文献[45]将文献[55]在Matlab软件中实现的DiSIC算法移植到了FPGA硬件平台,设计实现了通感一体化原型机,在测速的基础上增加测距功能。以上研究存在的主要问题是缺乏对毫米波等高频段自干扰抑制方法的研究。

2.3 低PAPR波形与高性能PA设计

为了解决前文所述非恒包络波形高PAPR带来的PA效率低下问题,已有研究多从低PAPR波形设计(包括恒包络波形设计等)与高性能PA设计两个方面着手解决。

首先,在低PAPR通感一体化波形设计领域,一方面,文献[25,26]等针对OFDM波形进行了恒包络设计,2022年,文献[57]在功率和PAPR约束下利用通信和雷达性能度量的加权目标函数实现了低PAPR MIMO-OFDM通感一体化波形设计。另一方面,针对LFM通感一体化波形的恒包络设计,2017年,McCormick等人[28,29]分别从理论分析与仿真、硬件实现与实验验证角度论述在天线远场实现相同时频雷达、通信信号的MIMO空分发射方法。在最小化发射功率的同时,将雷达和通信信号分别发射至指定方向。该方法以雷达功能为中心,在雷达基础上附加通信功能。雷达采用上变频LFM波形,通信成形采用矩形或平方根升余弦滚降滤波器。该文提出的方法是一种两阶段迭代的交替式投影算法,实质是一种凸优化问题的逼近求解方法(即逼近指定的恒包络参考波形)。该方法以空间旁瓣的增加(一部分功率的损失)换取在高功率雷达系统中能够被物理实现的,具有恒振幅、低PAPR的波形(目标方向所发射雷达信号功率效率的提升),其副作用是所产生空间旁瓣时域波束(非发射方向)与雷达、通信主瓣波束不相关,未保留通信信号结构,因此在某一时刻只能实现特定方向的通信,无法做到全向通信,且通信速率较低,只有1 Mbit/s。

其次,在高性能PA设计方面,需尽量使PA在保持高输出功率的同时具备高线性度。模拟预失真、数字预失真、功率回退等是被较多使用的PA线性化技术[58]。国外方面,2018年,文献[59]基于模拟预失真技术设计了一款70 GHz含预失真电路的固态PA芯片。2019年,文献[60]设计了一款面向毫米波频段的宽带线性化驱动放大器,其每个输出的幅度相位单独可调。2020年,文献[61]采用40 nm工艺,设计了一款100 GHz具有高线性度的PA芯片。2022年,文献[62]提出基于数字预失真的PA架构,旨在减轻5G无线发射机中的IQ调制器缺陷和PA非线性失真。国内方面,2022年,我国南方科技大学相关团队[63]采用40 nm工艺,并将线性化电路内置于PA芯片。2022年,天津大学马凯学教授团队[64]就5/6G PA芯片,提出一种高回退效率的新型PA芯片拓扑,融合了高速、宽带的自适应偏置电路和非线性补偿电路,减小了芯片面积和信号损耗,采用55 nm工艺在紧凑的尺寸下实现了较高的线性输出功率与效率。此外,我国电子科技大学、东南大学等团队[58,65]也在高性能PA方面做出了相应研究。

2.4 器件高精度建模

为了实现高性能毫米波等高频段通感一体化系

统, 需要对电路进行准确建模。高精度器件模型是对高频电路进行准确建模, 进而设计高性能毫米波通感电路的基础^[30,66]。

首先, 在无源器件建模方面, 文献[67]提出了基于S参数测试的传统片上传输线模型参数提取方法, 在包含毫米波频段的45 MHz~20 GHz范围对该方法进行实测验证。其次, 在晶体管等有源器件建模方面, 集成电路专用仿真程序(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, SPICE)模型已经迭代发展到了以金属氧化物半导体场效应晶体管模型11(Metal-Oxide-Semiconductor field effect transistor model 11, MOS11)为代表的第4代晶体管模型^[66]。近年业界学者们持续关注晶体管器件体效应、短沟道等寄生效应和高阶效应。2022年, 文献[68]研究了场效应晶体管毫米波集总元件小信号等效电路模型, 对场效应晶体管小信号寄生和电路元件参数提取进行分析, 提出了一种基于特征函数解析迭代的场效应晶体管集总元件小信号等效电路模型参数提取方法, 所提取的元件参数值具有更高的精确度。最后, 在低温模型建模方面, 同样在2022年, 文献[69]对射频金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)进行了298~6K低温建模, 研究了器件S参数特性并搭建小信号模型, 该模型在包含毫米波频段的0.25~40 GHz范围具有较好的精确度。

文献[66]介绍了通感一体化系统毫米波器件建模的研究进展, 并指出目前该领域研究存在的问题为新型器件工作机理不清晰, 性能表征不准确。随着通感一体化技术的发展, 以及低温半导体应用需求的增加, 下一步需要开展新型低温片上器件模型建模的研究, 以建立高精度度的高频段、宽频带、宽温域片上通感一体化器件模型。

2.5 通感硬件系统性验证

在解决通感一体化硬件设计关键问题的基础上, 还需对其进行硬件系统性验证。近年国内外对于通感一体化系统性硬件验证或演示平台已有一定研究进展。

(1)基础感知: 国外方面, 2006年, 美国军工生产厂商Northrop Grumman公司完成了相控阵雷达传输通信数据的一体化系统验证, 并在2019年实现了雷达高速率通信功能^[27]。2009~2012年, 文献[70~72]研究并硬件验证了OFDM雷达通信一体化系统, 可以在24 GHz对多辆汽车进行测距测速。在通感一体化波形的空分复用方面, 2017年, 美国堪萨斯大学的McCormick等人^[29]在室内暗室使

用文献[73]提出的软件无线电(Software Defined Radio, SDR)平台在3.5 GHz验证了LFM空分复用通信雷达多功能一体化波形, 这也是雷达通信一体化波形首次得到硬件技术验证^[24]。2019年, Ravenscroft等人^[74]对3.55 GHz串联跳频(Tandem-Hopped)频分复用雷达通信一体化系统进行实验评估, 在雷达发射FM信号的频谱中构造陷波(notch), 然后将基于OFDM的承载有信息的子载波放置在陷波位置。2019年, 比利时鲁汶大学Sofie Pollin团队^[45,56]升级了前文所述文献[23]的IBFD一体化系统, 其中文献[45]设计实现了通感一体化原型机并支持测速和测距功能。2019年, 文献[46]论述天线共享式IBFD通感一体化基站的设计实现。2021年, 美国德克萨斯大学奥斯汀分校的Kumari等人^[75]提出了一种全数字单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)通信雷达一体化技术的低硬件复杂度毫米波概念验证平台, 工作频点73 GHz, 带宽2 GHz, 实现了单站全双工雷达与双站单工通信。2021年, 文献[76]使用蜂窝5G NR OFDM波形, 在28 GHz, 400 MHz带宽对室内走廊环境进行SLAM地图构建, 验证了5G OFDM等通信波形在雷达感知与地图构建中的可行性, 并没有实现通感一体化系统。

除了OFDM和LFM波形, 在非正交多载波方面, 2019年, 文献[77]使用多台是德(Keysight)公司的仪表验证了24 GHz雷达通信一体化系统的广义频分复用(Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)非正交多载波波形, 信号带宽113.92 MHz。雷达探测目标是2块30×22 cm左右大小的铜板, 距离1.5~3.7 m。支持的距离分辨率为1.316 m, 速度分辨率为2.171 m/s, 最大探测距离为337 m, 最大速度为1424 m/s。

国内方面, 在学术界, 2020~2021年北京邮电大学团队^[78-80]初步搭建了使用相控阵天线与喇叭天线的28 GHz 5G通感一体化实验系统。2022年, 文献[81]演示了所开发的OFDM毫米波通感一体化验证平台, 支持视频通信传输和距离、角度、速度的基础感知。此外, 文献[81,82]也实现了类似的通感一体化系统。2022年, Xu等人^[83]设计了基于OFDM的2.4 GHz多用户MIMO SDR测试平台, 可以对进入房间的人员进行计数。在组网验证方面, 2022年, 北京邮电大学团队^[84,85]对之前文献[78-80]实现的通感一体化系统进行升级, 将场景由单个一体化设备拓展为多个一体化设备。引入计算功能, 设计并演示了多车(多一体化设备)融合的通感算一体化系统网络级平台。提出了一种基于加权平均精度的感知

数据融合算法,通过共享来自两个基于时分的通感一体化设备的感知数据来提高目标定位性能。与单车感知方案相比,所提出的感知算法大幅降低了目标定位误差。在SAR成像方面,2019年,中科院空天院梁兴东团队^[86,87]首次展示了通感一体化的高分辨率SAR成像系统的实验结果,进行了飞行实测实验。2022年,该团队在文献^[88]中进一步验证了SAR成像功能。

除了基于蜂窝或雷达无线电信号的感知,在WiFi信号感知方面,从更广泛的角度看,已有的基于WiFi接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)、信道状态信息(Channel State Information, CSI)的WiFi室内定位技术将信号特征与事先测得的指纹特征数据库相匹配,从而估计用户位置,该技术也可被囊括在雷达通信一体化领域中^[24]。此外,WiFi路由器还可直接处理人体反射或散射的回波,感知人体动作引起的微小信道状态变化,进而识别人的行为^[24]。文献^[89–91]在国际上首次提出基于菲涅尔区的WiFi无线感知理论并进行硬件验证。香港科技大学、深圳大学等高校和科研机构也做出了相关的研究与硬件技术验证工作^[92]。在产业界,中国移动研究院与华为^[93]、中国联通与中兴通讯、Vivo公司移动通信实验室、上海诺基亚贝尔、中关村泛联院等研究机构在5G、5G-A、6G的车联网、无人机、呼吸监测等场景进行了通感一体化硬件技术验证,部分厂商的验证情况见表3。

(2)大规模MIMO:与传统单天线或小规模MIMO阵列天线相比,对成百上千的空间分布式阵列天线的输出信号进行合理有效的合并是大规模MIMO面临的主要挑战,同时也为其雷达应用提供了较大机会^[94]。稠密的空间分布式阵列天线可以为雷达定位带来性能增益,在Sub-6 GHz低频段,无需大带宽信号,通过对空间分布式阵列天线(MIMO信道)进行相关处理,使用窄带宽信号也可获得高定位精度。

受到近期分布式(无小区)大规模MIMO通信系统研究工作的启发,2022年,Sakhnini等人^[94]首次使用5G大规模MIMO OFDM通信实验平台设计验证了大规模MIMO近场相关雷达。雷达和通信功能时分复用,在4发64收均匀线性阵列天线的短距离近场区域,使用低频段窄带宽OFDM信号,即可对移动物体实现厘米级高精度定位,且通信容量损失较小。主要贡献是提出了基于信道状态信息的信号处理模型与匹配滤波近似集合,用CRLB和相关模糊函数评估系统性能,局限性在于只是探究了感知功能在未来集成到大规模MIMO通信系统中的技术可行性,没有进行通信功能与性能测试,并且为了

便于处理,所用广泛分布(非稠密分布)阵列天线结构没有充分利用大规模MIMO天线阵列提供的空间分集,其天线结构和感知性能有待优化。同年,Sakhnini等人^[95]进一步研究了所设计系统雷达感知的鲁棒性。

(3)太赫兹与光频段:在大规模MIMO高频段硬件验证方面,2022年,华为公司与英国沃达丰公司在文献^[96]探究太赫兹感知功能在未来集成到大规模MIMO通信系统中的技术可行性,对金属柠檬芯进行3D成像的分辨率为4 mm。该文硬件实现并验证了便携式设备上的毫米级高分辨率太赫兹成像。同年浙江大学的余显斌等人^[14]设计实现了一种准太赫兹(0.1~10 THz为太赫兹频段^[12])通感一体化系统。华为公司在2022年演示了智能医院场景下的光无线通信感知多功能系统,通过红外光信号对小车进行厘米级定位,并可感知人的心跳、呼吸,识别手势。

综合考虑国内外学术界、企业界的成果,表3选取10种代表性通感一体化硬件验证平台进行归纳,指出各验证平台的特点或局限性,表3中的“—”符号表示文献未提供相关信息。结合前文和表3可以看出,硬件验证过的波形包括LFM, OFDM, GFDM等,频段覆盖Sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段,带宽包括MHz级别普通带宽、100 MHz以上和GHz级别大带宽,天线技术涉及单输入单输出(Single Input Single Output, SISO), SIMO, MIMO、大规模MIMO,功能、场景囊括室内外的测距、测速、测角、SLAM 2D地图构建、毫米级视觉不可见物体3D成像、呼吸监测、心跳监测、车辆与无人机感知、飞机机载对地SAR成像等。需要指出的是,综合性感知功能和复杂场景的一体化系统验证仍然较为缺乏,且存在一定局限性。比如已有文献的雷达SLAM地图构建、大规模MIMO定位的功能只是初步验证了传统通信波形用于雷达感知的可行性,并未真正实现通感一体化系统。

3 未来展望

以上硬件平台多基于商用仪表或SDR设备,如信号发生器、USRP等,一般需配合电脑上的Matlab或LabVIEW等软件,少见射频与基带完全或大部自主开发的通感一体化硬件验证平台和原型机,通感一体化硬件设计未来仍需面对一些开放性问题。

3.1 硬件缺陷对感知精度的影响

在通感一体化系统中,获取精确的感知测量信息尤为重要,而硬件的缺陷(非理想因素)会显著影

表3 通感一体化部分代表性硬件验证平台

文献	频点、带宽	波形	感知验证情况	通信验证情况	特点或局限性
[46]	2.4 GHz, 40 MHz	OFDM	5G BS端下行链路室外静止无人机测距(距离40 m), 室外多车辆测距、测速(距离50~110 m, 速度12 m/s、 ± 9 m/s)。	—	IBFD架构, 自干扰消除方法设计
[70,71]	24 GHz, 93.1 MHz	OFDM	室外实际路况多车辆测距(100 m以内)、测速(-5 m/s, -12 m/s)。	—	面向车联网、自动驾驶场景
[29]	3.5 GHz, 10 MHz	LFM	模糊函数性能较好。	比特率1 Mbit/s, 定向通信, 给出QPSK星座图(误码率较好)	雷达通信一体化波形首次得到硬件技术验证 ^[24]
[75]	73 GHz, 2 GHz	OFDM	毫米波室内外静止目标测距(4 m内)、测角、不支持测速。	单工通信	毫米波高频段, 受制于SIMO机械模拟的慢速, 只能对静止目标测距、测角
[94,95]	3.5 GHz, 18 MHz	OFDM	使用NI公司5G大规模MIMO实验平台验证近场室内移动物体厘米级定位。	—	只是初步探究感知功能在未来集成到大规模MIMO通信系统中的技术可行性, 没有进行通信功能与性能测试
[78,81,85]	28 GHz, 800 MHz	OFDM	通感算一体化: 5G毫米波室内多车协同定位, 测距0.9 m, 精度0.044 m。	2.8 Gbit/s	面向车联网、自动驾驶场景的多站协同感知; TDD架构
[81]	27.5 GHz	OFDM	车辆测距、测速、测角。	视频传输	面向车联网、自动驾驶场景的单站感知
[86,87]	5.4 GHz, 560 MHz	STC-OFDM-Chirp	固定翼飞机机载8 km高空对地SAR成像, 分辨率0.3 m $\times$ 0.3 m。	传输图像, 误码率较高(未加信道编码)	时空域多维度多波束一体化波形调制; 固定翼飞机SAR成像
[93]	26 GHz, 100 MHz	CP-OFDM	室外5G基站车辆、无人机感知: 测距500 m以上; 车辆测速精度小于0.1 km/h(车速30 km/h)、测角精度小于0.2°。	—	基于5G现网的通感一体化验证
[96]	140 GHz, 8 GHz	OFDM, FMCW	大规模MIMO太赫兹毫米级可见物体3维成像。	—	只是初步探究太赫兹感知集成到大规模MIMO通信的可行性

响感知测量精度^[97]。由于硬件的缺陷, 不同的收发机之间会存在频域上的频率偏移和时域上的定时同步误差或时钟偏差。这种时频域上的非理想同步(同步偏差)是影响感知性能的主要硬件缺陷之一, 伴随相位噪声、载波频率偏移、取样频率偏移、采样抖动、符号定时偏移等问题, 严重降低感知性能, 造成测距模糊, 以及测速准确性的降低。与对时频域同步要求相对较低的传统通信系统不同, 通感一体化的感知性能对时频域同步要求更高, 特别是对于对感知精度要求较高的未来通感一体化系统。例如, 6G通感一体化系统的定位精度将达到亚厘米级, 此时即使是0.1 ns的微小定时同步误差也会造成若干厘米的定位误差。因此, 未来的通感一体化软硬件设计必须考虑到这些硬件缺陷带来的问题。

3.2 超大规模MIMO与高频段下的IBFD

通感一体化收发信机的理想解决方案是采用IBFD架构, 并以模拟射频自干扰消除与数字基带自干扰消除技术为辅助, 通信感知完全复用收发链路。未来6G通感一体化将使用毫米波、太赫兹、可见光等高频段, 路径损耗大为增加, 需要使用超大规模MIMO波束赋形技术产生能量辐射更为集中的定向波束。用于低频单天线配置的IBFD技术的研究进展较为顺利, 然而, 由于天线互耦和串扰,

毫米波等高频段的IBFD超大规模MIMO在很大程度上仍然是一个开放的具有挑战的问题^[49,98]。相较于低频单天线和小规模MIMO, 高频超大规模MIMO系统中IBFD带来的收发天线互耦效应更为显著棘手, 需要针对超大规模MIMO通感一体化系统研究专门的IBFD收发机隔离度增大和自干扰消除算法与硬件设计技术。

IBFD通感一体化系统可采用模拟自干扰消除和数字自干扰消除等主动自干扰消除技术, 结合空域自干扰抑制和双工器隔离等被动手段提高收发链路之间的隔离度, 但代价是计算资源消耗和硬件复杂度的增大。现有文献所硬件验证的IBFD通感一体化系统工作频点为传统Sub-6 GHz, 未涉及毫米波等高频段, 且带宽较小(100 MHz以内)。然而, 在毫米波等高频段的大带宽通信和感知应用下, 自干扰消除技术对基带处理的硬件资源消耗将是较大的挑战^[16]。

3.3 无人机载通感一体化硬件设计

面向通感一体化中无人机等体积功耗均受限场景, 有必要研制定制化的通感一体化硬件平台, 进行无人机的小型化、低功耗、低成本设计, 以支持无人机通感一体化SAR成像与无线通信。据笔者所知, 现有文献鲜见通感一体化设备搭载在无人机上的硬件设计案例, 前文所述文献^[46,93]是将无人机

作为被感知的目标而非感知主体,文献[87,88]对通感一体化SAR成像与图像通信进行了飞行验证,通感一体化硬件设备搭载在固定翼飞机上,并非无人机载场景。现有通感一体化硬件验证较为依赖商业SDR和仪表,此类设备由于体积与重量的限制难以搭载在无人机上,而成熟的商业SDR硬件平台没有针对无人机进行定制。首先,对Sub-6 GHz频段支持较好,但不支持毫米波等高频段,且射频频率带宽有限,不支持1 GHz以上大带宽。其次,发射功率较低。通用SDR平台一般用来进行理论算法验证实验,不需要很高的发射功率,影响雷达定位距离。然后,体积、功耗较大,功耗达40 W左右。以上问题导致利用商用SDR平台实现的通感一体化雷达性能在探测距离、分辨率、接收机灵敏度等指标仍存在一定提升空间。综上,有必要研究如何用分立射频和FPGA芯片,自主研制面向无人机等体积功耗受限设施的低成本专用可重构SDR硬件实验平台,满足通感一体化的实际应用需求。

4 结论

通感一体化需要通信和雷达共用无线电频段和硬件。多频段、大带宽、通信感知对硬件的要求不同等特点为通感一体化硬件设计提出更高要求。近年国内外在5G-Advanced, 6G, WiFi等通感一体化的空中接口架构、收发信机架构硬件设计、系统性硬件验证与演示方面已有初步研究成果,但仍然存在一定局限性^[99]。除5G网络外,后5G, 6G等通感一体化硬件验证平台多为链路级而非网络系统级、只考虑通感一体化未融入计算功能,体积功耗成本较大,依赖商用仪表与SDR平台,IBFD自干扰抑制技术尚未充分满足未来超大规模MIMO的要求,有待进一步结合人工智能大模型技术^[100]等。面对未来技术挑战和开放性问题的挑战,需要学术界、产业界共同应对,研究解决方案。为了加速测试优化和产业落地进程,近期在高频段支持、接收机架构、组网架构等方面也期待在技术上进行折中的、实用可行的硬件设计过渡方案,以使通感一体化的美好“理想”早日照进“现实”。

参 考 文 献

- [1] 孟凡军, 邓炳光, 秦启航, 等. 5G NR小区搜索中一种频域相关快速同步算法[J]. 电讯技术, 2023, 63(4): 563–568. doi: [10.20079/j.issn.1001-893x.211224008](https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.211224008).
MENG Fanjun, DENG Bingguang, QIN Qihang, et al. A fast synchronization algorithm based on frequency domain correlation in 5G NR cell search[J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(4): 563–568. doi: [10.20079/j.issn.1001-893x.211224008](https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.211224008).
- [2] 韩松岳, 苗恺, 李勇, 等. 区块链与5G MEC在军事领域的融合应用[J]. 海军航空大学学报, 2022, 37(4): 301–310. doi: [10.7682/j.issn.2097-1427.2022.04.002](https://doi.org/10.7682/j.issn.2097-1427.2022.04.002).
HAN Songyue, MIAO Kai, LI Yong, et al. Integration application of blockchain and 5G MEC in military field[J]. *Journal of Naval Aviation University*, 2022, 37(4): 301–310. doi: [10.7682/j.issn.2097-1427.2022.04.002](https://doi.org/10.7682/j.issn.2097-1427.2022.04.002).
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G network architecture vision and key technology outlook white paper[R]. 2021.
- [4] 胡圣波, 朱满琴, 杨露露, 等. 未来无线通信与大数据、人工智能[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2020, 38(6): 1–10. doi: [10.16614/j.gznuj.zrb.2020.06.001](https://doi.org/10.16614/j.gznuj.zrb.2020.06.001).
HU Shengbo, ZHU Manqin, YANG Lulu, et al. Future wireless communication, big data and AI[J]. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2020, 38(6): 1–10. doi: [10.16614/j.gznuj.zrb.2020.06.001](https://doi.org/10.16614/j.gznuj.zrb.2020.06.001).
- [5] 王朝炜, 王天宇, 刘婷, 等. 6G车联网中基于路侧设备部署优化的机会式数据卸载[J]. 无线电工程, 2022, 52(11): 1895–1900. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2022.11.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2022.11.001).
WANG Chaowei, WANG Tianyu, LIU Ting, et al. Opportunistic data offloading based on RSU deployment optimization in 6G internet of vehicle[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(11): 1895–1900. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2022.11.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2022.11.001).
- [6] 肖沈阳, 金志刚, 苏毅珊, 等. 一种优化的gOMP稀疏OFDM信道估计方法[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5): 149–155. doi: [10.15961/j.jsuese.201601000](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201601000).
XIAO Shenyang, JIN Zhigang, SU Yishan, et al. An optimized gOMP algorithm for sparse OFDM channel estimation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(5): 149–155. doi: [10.15961/j.jsuese.201601000](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.201601000).
- [7] 庞立华, 吴文捷, 张阳, 等. 多小区Massive MIMO系统的分布式导频优化分配[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(2): 354–359. doi: [10.13800/j.cnki.xakjdxsb.2019.0224](https://doi.org/10.13800/j.cnki.xakjdxsb.2019.0224).
PANG Lihua, WU Wenjie, ZHANG Yang, et al. Distributed pilot optimizing assignment in multi-cell Massive MIMO systems[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(2): 354–359. doi: [10.13800/j.cnki.xakjdxsb.2019.0224](https://doi.org/10.13800/j.cnki.xakjdxsb.2019.0224).
- [8] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. Research report on integration of sensing and communication technology[R]. 2021.
- [9] HUANG Yuhong. Challenges and opportunities of sub-6 GHz integrated sensing and communications for 5G-

- Advanced and beyond[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2024, 33(2): 323–325. doi: [10.23919/cje.2023.00.251](https://doi.org/10.23919/cje.2023.00.251).
- [10] 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. doi: [10.13190/j.jbupt.2021-081](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2021-081).
- YAN Shi, PENG Mugen, and WANG Wenbo. 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. doi: [10.13190/j.jbupt.2021-081](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2021-081).
- [11] 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](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156632).
- [12] 尉志青, 冯志勇, 李怡恒, 等. 太赫兹通信感知一体化波形: 现状与展望[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 3–10. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022007](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022007).
- WEI Zhiqing, FENG Zhiyong, LI Yiheng, *et al.* Terahertz joint communication and sensing waveform: Status and prospect[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(1): 3–10. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022007](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022007).
- [13] 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](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3113120).
- [14] 余显斌, 吕治东, 李涟漪, 等. 太赫兹感知通信一体化波形设计与信号处理[J]. 通信学报, 2022, 43(2): 76–88. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022015](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022015).
- YU Xianbin, LYU Zhidong, LI Lianyi, *et al.* Waveform design and signal processing for terahertz integrated sensing and communication[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(2): 76–88. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022015](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022015).
- [15] 林粤伟, 王溢, 张奇勋, 等. 面向6G的通信感知一体化车联网研究综述[J]. 信号处理, 2023, 39(6): 963–974. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002).
- LIN Yuewei, WANG Yi, ZHANG Qixun, *et al.* Overview of the research on 6G oriented internet of vehicles for integrated sensing and communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2023, 39(6): 963–974. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002).
- [16] 马忠贵, 李卓, 梁彦鹏. 自动驾驶车联网中通感算融合研究综述与展望[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 137–149. doi: [10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.16.003](https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.16.003).
- MA Zhonggui, LI Zhuo, and LIANG Yanpeng. Overview and prospect of communication-sensing-computing integration for autonomous driving in the Internet of vehicles[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 137–149. doi: [10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.16.003](https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.16.003).
- [17] 刘鑫, 王忠, 秦明星. 多机器人协同SLAM技术研究进展[J]. 计算机工程, 2022, 48(5): 1–10. doi: [10.19678/j.issn.1000-3428.0062504](https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0062504).
- LIU Xin, WANG Zhong, and QIN Mingxing. Research progress of multi-robot collaborative SLAM technology[J]. *Computer Engineering*, 2022, 48(5): 1–10. doi: [10.19678/j.issn.1000-3428.0062504](https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0062504).
- [18] 王红星, 徐婉琳, 张勃阳. 一种基于改进ORB和PROSAC特征点匹配的V-SLAM算法[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2023, 42(1): 152–159. doi: [10.16186/j.cnki.1673-9787.2021040137](https://doi.org/10.16186/j.cnki.1673-9787.2021040137).
- WANG Hongxing, XU Wanlin, and ZHANG Boyang. V-SLAM algorithm based on improved ORB and PROSAC feature point matching[J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2023, 42(1): 152–159. doi: [10.16186/j.cnki.1673-9787.2021040137](https://doi.org/10.16186/j.cnki.1673-9787.2021040137).
- [19] 谭运馨, 黄海风, 赖涛, 等. 基于GPU的长轨SAR实时成像算法[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(6): 1380–1391. doi: [10.16337/j.1004-9037.2023.06.013](https://doi.org/10.16337/j.1004-9037.2023.06.013).
- TAN Yunxin, HUANG Haifeng, LAI Tao, *et al.* GPU-based real-time imaging algorithm for long-track SAR[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2023, 38(6): 1380–1391. doi: [10.16337/j.1004-9037.2023.06.013](https://doi.org/10.16337/j.1004-9037.2023.06.013).
- [20] 刘帅奇, 雷钰, 庞姣, 等. 基于生成对抗网络的SAR图像去噪[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2022, 42(3): 306–313. doi: [10.3969/j.issn.1000-1565.2022.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1565.2022.03.013).
- LIU Shuaiqi, LEI Yu, PANG Jiao, *et al.* SAR image denoising based on generative adversarial networks[J]. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 2022, 42(3): 306–313. doi: [10.3969/j.issn.1000-1565.2022.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1565.2022.03.013).
- [21] 刘光毅, 楼梦婷, 王启星, 等. 面向6G的通信感知一体化架构与关键技术[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 8–16. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.002).
- LIU Guangyi, LOU Mengting, WANG Qixing, *et al.* Towards 6G: Research on integrated sensing and communication architecture and key technology[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(6): 8–16. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.002).
- [22] 叶威, 高树亮. 面向5.5G的通信感知一体化[J]. 信息通信技术, 2021, 15(5): 27–33. doi: [10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.005).
- YE Wei and GAO Shuliang. Integrated sensing and communication towards 5.5G[J]. *Information and Communications Technologies*, 2021, 15(5): 27–33. doi: [10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.005).
- [23] HASSANI S A, PARASHAR K, BOURDOUX A, *et al.* Doppler radar with in-band full duplex radios[C]. IEEE

- INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications, Paris, France, 2019: 1945–1953. doi: [10.1109/INFOCOM.2019.8737408](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737408).
- [24] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467–484. doi: [10.12000/JR20113](https://doi.org/10.12000/JR20113).
- LIU Fan, YUAN Weijie, YUAN Jinhong, *et al.* Radar-communication spectrum sharing and integration: Overview and prospect[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 467–484. doi: [10.12000/JR20113](https://doi.org/10.12000/JR20113).
- [25] 郝跃星. 恒包络OFDM雷达通信一体化关键技术研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2017.
- HAO Yuexing. Research on the key technology of constant envelop OFDM radar-communication integration[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2017.
- [26] 张秋月, 张林让, 谷亚彬, 等. 恒包络OFDM雷达通信一体化信号设计[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 77–84. doi: [10.7652/xjtuxb201906011](https://doi.org/10.7652/xjtuxb201906011).
- ZHANG Qiuyue, ZHANG Linrang, GU Yabin, *et al.* Signal design of communication integration for radars with constant envelope OFDM[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(6): 77–84. doi: [10.7652/xjtuxb201906011](https://doi.org/10.7652/xjtuxb201906011).
- [27] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- XIAO Bo, HUO Kai, and LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- [28] MCCORMICK P M, BLUNT S D, and METCALF J G. Simultaneous radar and communications emissions from a common aperture, part I: Theory[C]. IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, USA, 2017: 1685–1690. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944478](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944478).
- [29] MCCORMICK P M, RAVENSCROFT B, BLUNT S D, *et al.* Simultaneous radar and communication emissions from a common aperture, part II: Experimentation[C]. IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, USA, 2017: 1697–1702. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944480](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944480).
- [30] IMT-2030 (6G) 推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2版. 2022.
- IMT-2030 (6G) Promotion Group. Research report on integrated sensing and communication technology[R]. 2nd ed. 2022.
- [31] BOZORGI F, SEN P, BARRETO A N, *et al.* RF front-end challenges for joint communication and radar sensing[C]. 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications and Sensing, Dresden, Germany, 2021: 1–6. doi: [10.1109/JCS52304.2021.9376387](https://doi.org/10.1109/JCS52304.2021.9376387).
- [32] HAN Liang and WU Ke. Radar and radio data fusion platform for future intelligent transportation system[C]. 7th IEEE European Radar Conference, Paris, France, 2010: 65–68.
- [33] HAN Liang and WU Ke. Emerging advances in transceiver technology fusion of wireless communication and radar sensing systems[C]. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, Melbourne, Australia, 2011: 951–954.
- [34] HAN Liang and WU Ke. Multifunctional transceiver for future intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(7): 1879–1892. doi: [10.1109/TMTT.2011.2138156](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2138156).
- [35] MOGHADDASI J and WU Ke. Improved joint radar-radio (RadCom) transceiver for future intelligent transportation platforms and highly mobile high-speed communication systems[C]. IEEE International Wireless Symposium, Beijing, China, 2013: 1–4. doi: [10.1109/IEEE-IWS.2013.6616796](https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2013.6616796).
- [36] MOGHADDASI J and WU Ke. Multifunctional transceiver for future radar sensing and radio communicating data-fusion platform[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 818–838. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2530979](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2530979).
- [37] ZHANG Hui, LI Lin, and WU Ke. 24GHz software-defined radar system for automotive applications[C]. IEEE European Conference on Wireless Technologies, Munich, Germany, 2007: 138–141. doi: [10.1109/ECWT.2007.4403965](https://doi.org/10.1109/ECWT.2007.4403965).
- [38] HAN Liang and WU Ke. 24-GHz joint radar and radio system capable of time-agile wireless sensing and communication[C]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, USA, 2011: 1–4. doi: [10.1109/MWSYM.2011.5972832](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972832).
- [39] HAN Liang and WU Ke. 24-GHz integrated radio and radar system capable of time-agile wireless communication and sensing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(3): 619–631. doi: [10.1109/TMTT.2011.2179552](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2179552).
- [40] HAN Liang and WU Ke. Joint wireless communication and radar sensing systems—state of the art and future prospects[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2013, 7(11): 876–885. doi: [10.1049/iet-map.2012.0450](https://doi.org/10.1049/iet-map.2012.0450).
- [41] MOGHADDASI J and WU Ke. Unified radar-communication (RadCom) multi-port interferometer transceiver[C]. IEEE European Radar Conference, Nuremberg, Germany, 2013: 479–482.
- [42] MOGHADDASI J and WU Ke. Millimeter-wave multifunction multiport interferometric receiver for future wireless systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave*

- Theory and Techniques*, 2018, 66(3): 1452–1466. doi: [10.1109/TMTT.2017.2772927](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2772927).
- [43] HASSANI S A, GUEVARA A, PARASHAR K, *et al.* An in-band full-duplex transceiver for simultaneous communication and environmental sensing[C]. IEEE 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2018: 1389–1394. doi: [10.1109/ACSSC.2018.8645165](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2018.8645165).
- [44] HASSANI S A, LAMPU V, PARASHAR K, *et al.* In-band full-duplex radar-communication system[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(1): 1086–1097. doi: [10.1109/JSYST.2020.2992689](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2992689).
- [45] HASSANI S A, VAN LIEMPD B, BOURDOUX A, *et al.* Joint in-band full-duplex communication and radar processing[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(2): 3391–3399. doi: [10.1109/JSYST.2021.3091383](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3091383).
- [46] BARNETO C B, RIIHONEN T, TURUNEN M, *et al.* Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: Challenges, solutions, and measurements[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(10): 4042–4054. doi: [10.1109/TMTT.2019.2930510](https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2930510).
- [47] IOTTI L, KRISHNAMURTHY S, LACAILE G, *et al.* A low-power 70-100-GHz mixer-first RX leveraging frequency-translational feedback[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2020, 55(8): 2043–2054. doi: [10.1109/JSSC.2020.2991541](https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.2991541).
- [48] MOSTAJERAN A, CATHELIN A, and AFSHARI E. A 170-GHz fully integrated single-chip FMCW imaging radar with 3-D imaging capability[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(10): 2721–2734. doi: [10.1109/JSSC.2017.2725963](https://doi.org/10.1109/JSSC.2017.2725963).
- [49] BARNETO C B, TURUNEN M, LIYANAARACHCHI S D, *et al.* High-accuracy radio sensing in 5G new radio networks: Prospects and self-interference challenge[C]. IEEE 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2019: 1159–1163. doi: [10.1109/IEEECONF44664.2019.9048786](https://doi.org/10.1109/IEEECONF44664.2019.9048786).
- [50] VAN LIEMPD B, HERSHBERG B, ARIUMI S, *et al.* A +70-dBm IIP3 electrical-balance duplexer for highly integrated tunable front-ends[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(12): 4274–4286. doi: [10.1109/TMTT.2016.2613039](https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2613039).
- [51] MIKHAEL M, VAN LIEMPD B, CRANINCKX J, *et al.* An in-band full-duplex transceiver prototype with an in-system automated tuning for RF self-interference cancellation[C]. 1st IEEE International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, Akaslompola, Finland, 2014: 110–115. doi: [10.4108/icst.5gu.2014.258118](https://doi.org/10.4108/icst.5gu.2014.258118).
- [52] VERMEULEN T, VAN LIEMPD B, HERSHBERG B, *et al.* Real-time RF self-interference cancellation for in-band full duplex[C]. IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, Stockholm, Sweden, 2015: 275–276. doi: [10.1109/DySPAN.2015.7343915](https://doi.org/10.1109/DySPAN.2015.7343915).
- [53] 徐诚, 郭进阳, 李超, 等. 使用HLS开发FPGA异构加速系统: 问题、优化方法和机遇[J]. 计算机科学与探索, 2023, 17(8): 1729–1748. doi: [10.3778/j.issn.1673-9418.2210102](https://doi.org/10.3778/j.issn.1673-9418.2210102).
- XU Cheng, GUO Jinyang, LI Chao, *et al.* Using HLS to develop FPGA heterogeneous acceleration system: Problems, optimization methods and opportunities[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2023, 17(8): 1729–1748. doi: [10.3778/j.issn.1673-9418.2210102](https://doi.org/10.3778/j.issn.1673-9418.2210102).
- [54] 吴宇航, 何军. 基于FPGA的人体行为识别系统的设计[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2022, 14(3): 331–340. doi: [10.13878/j.cnki.jnuist.2022.03.009](https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.2022.03.009).
- WU Yuhang and HE Jun. Design of human activity recognition system based on FPGA[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition*, 2022, 14(3): 331–340. doi: [10.13878/j.cnki.jnuist.2022.03.009](https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.2022.03.009).
- [55] HUUSARI T, CHOI Y S, LIIKKANEN P, *et al.* Wideband self-adaptive RF cancellation circuit for full-duplex radio: Operating principle and measurements[C]. IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Glasgow, UK, 2015: 1–7. doi: [10.1109/VTCSpring.2015.7146163](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7146163).
- [56] HASSANI S A, VAN LIEMPD B, BOURDOUX A, *et al.* Adaptive filter design for simultaneous in-band full-duplex communication and radar[C]. IEEE 17th European Radar Conference, Utrecht, Netherlands, 2021: 5–8. doi: [10.1109/EuRAD48048.2021.00013](https://doi.org/10.1109/EuRAD48048.2021.00013).
- [57] HU Xiaoyan, MASOUIROS C, LIU Fan, *et al.* Low-PAPR DFRC MIMO-OFDM waveform design for integrated sensing and communications[C]. IEEE International Conference on Communications, Seoul, Republic of Korea, 2022: 1599–1604. doi: [10.1109/ICC45855.2022.9838548](https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838548).
- [58] 任乐. 毫米波宽带混频与固态合成功放及线性化技术研究[D]. [博士学位], 东南大学, 2022. doi: [10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000237](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000237).
- REN Le. Research on techniques of millimeter wave broadband mixing and solid-state power combined amplifier and linearization[D]. [Ph. D. dissertation], Southeast University, 2022. doi: [10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000237](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2022.000237).
- [59] GAVELL M, GRANSTROM G, FAGER C, *et al.* An E-band analog predistorter and power amplifier MMIC chipset[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(1): 31–33. doi: [10.1109/LMWC.2017](https://doi.org/10.1109/LMWC.2017).

- 2768519.
- [60] DORVAL R, GRAY R, and KATZ A. A versatile wideband linearizer/driver amplifier for use with multiple millimeter-wave TWTAs[C]. IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications, Orlando, USA, 2019: 1–3. doi: [10.1109/PAWR.2019.8708717](https://doi.org/10.1109/PAWR.2019.8708717).
- [61] CHO G, PARK J, and HONG S. A 25.5-dB peak gain F -band power amplifier with an adaptive built-in linearizer[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(1): 106–108. doi: [10.1109/LMWC.2019.2954217](https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2954217).
- [62] OTHMANI M, BOULEJFEN N, BRIHUEGA A, *et al.* Delta-Sigma modulator-embedded digital predistortion for 5G transmitter linearization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(8): 5558–5571. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3184167](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3184167).
- [63] MOSALAM H, XIAO Wenbo, GUI Xiaoyan, *et al.* A 54–68 GHz power amplifier with improved linearity and efficiency in 40 nm CMOS[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(1): 40–44. doi: [10.1109/TCSII.2021.3084628](https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3084628).
- [64] MA Zonglin, MA Kaixue, WANG Keping, *et al.* A 28GHz compact 3-way transformer-based parallel-series Doherty power amplifier with 20.4%/14.2% PAE at 6-/12-dB power back-off and 25.5dBm PSAT in 55nm bulk CMOS[C]. IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, USA, 2022: 320–322. doi: [10.1109/ISSCC42614.2022.9731564](https://doi.org/10.1109/ISSCC42614.2022.9731564).
- [65] 于飞. 毫米波线性化器研究[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2020. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001942](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001942).
YU Fei. Research of millimeter wave linearizer[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2020. doi: [10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001942](https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2020.001942).
- [66] 张净植, 余益明, 吴韵秋, 等. 硅基毫米波集成电路设计发展现状与挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(1): 68–87. doi: [10.1360/SSI-2023-0334](https://doi.org/10.1360/SSI-2023-0334).
ZHANG Jingzhi, YU Yiming, WU Yunqiu, *et al.* Developments and challenges of mm-Wave integrated circuits on silicon[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2024, 54(1): 68–87. doi: [10.1360/SSI-2023-0334](https://doi.org/10.1360/SSI-2023-0334).
- [67] EISENSTADT W R and EO Y. S-parameter-based IC interconnect transmission line characterization[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1992, 15(4): 483–490. doi: [10.1109/33.159877](https://doi.org/10.1109/33.159877).
- [68] 魏震楠. 毫米波通信的功率放大器芯片及片上器件高精度建模研究[D]. [博士论文], 东南大学, 2022. doi: [10.27014/d.cnki.gdnau.2022.003568](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2022.003568).
WEI Zhennan. Research on power amplifier and high-precision modeling of on-chip devices for millimeter-wave communications[D]. [Ph. D. dissertation], Southeast University, 2022. doi: [10.27014/d.cnki.gdnau.2022.003568](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2022.003568).
- [69] TANG Zhidong, WANG Zewei, GUO Ao, *et al.* Cryogenic CMOS RF device modeling for scalable quantum computer design[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2022, 10: 532–539. doi: [10.1109/JEDS.2022.3186979](https://doi.org/10.1109/JEDS.2022.3186979).
- [70] STURM C, ZWICK T, and WIESBECK W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations[C]. 69th IEEE Vehicular Technology Conference, Barcelona, Spain, 2009: 1–5. doi: [10.1109/VETECS.2009.5073387](https://doi.org/10.1109/VETECS.2009.5073387).
- [71] STURM C and WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236–1259. doi: [10.1109/JPROC.2011.2131110](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2131110).
- [72] BRAUN M, MÜLLER M, FUHR M, *et al.* A USRP-based testbed for OFDM-based radar and communication systems[C]. Proceedings of 22nd Virginia Tech Symposium on Wireless Communications, Blacksburg, USA, 2012: 1–6.
- [73] MEALEY T C and DULY A J. BEEMER: A firmware-tuned, software-defined MIMO radar testbed[C]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ARRAY.2016.7832582](https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832582).
- [74] RAVENSCROFT B, MCCORMICK P M, BLUNT S, *et al.* Experimental assessment of tandem-hopped radar and communications (THoRaCs)[C]. IEEE International Radar Conference, Toulon, France, 2019: 1–6. doi: [10.1109/RADAR41533.2019.171280](https://doi.org/10.1109/RADAR41533.2019.171280).
- [75] KUMARI P, MEZGHANI A, and HEATH R W. JCR70: A low-complexity millimeter-wave proof-of-concept platform for a fully-digital SIMO joint communication-radar[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2021, 2: 218–234. doi: [10.1109/OJVT.2021.3069946](https://doi.org/10.1109/OJVT.2021.3069946).
- [76] BARNETO C B, LIYANAARACHCHI S D, HEINO M, *et al.* Full duplex radio/radar technology: The enabler for advanced joint communication and sensing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(1): 82–88. doi: [10.1109/MWC.001.2000220](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000220).
- [77] SANSON J B, CASTANHEIRA D, GAMEIRO A, *et al.* Non-orthogonal multicarrier waveform for radar with communications systems: 24 GHz GFDM RadCom[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 128694–128705. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2940299](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940299).
- [78] ZHANG Qixun, SUN Huan, WEI Zhiqing, *et al.* Sensing and communication integrated system for autonomous driving vehicles[C]. IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops,

- Toronto, Canada, 2020: 1278–1279. doi: [10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162963](https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162963).
- [79] ZHANG Qixun, LI Zhenhao, GAO Xinye, *et al.* Performance evaluation of radar and communication integrated system for autonomous driving vehicles[C]. IEEE INFOCOM 2021 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops, Vancouver, Canada, 2021: 1–2. doi: [10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484463](https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484463).
- [80] ZHANG Qixun, WANG Xinna, LI Zhenhao, *et al.* Design and performance evaluation of joint sensing and communication integrated system for 5G mmWave enabled CAVs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(6): 1500–1514. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3109666](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3109666).
- [81] Online video[EB/OL]. <https://www.chaspark.com/#/coffeeHours/media/809260877825687552.2023.1>.
- [82] MA Dingyou, SHLEZINGER N, HUANG Tianyao, *et al.* Spatial modulation for joint radar-communications systems: Design, analysis, and hardware prototype[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2283–2298. doi: [10.1109/TVT.2021.3056408](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3056408).
- [83] XU Tongyang, LIU Fan, MASOUIROS C, *et al.* An experimental proof of concept for integrated sensing and communications waveform design[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1643–1655. doi: [10.1109/OJCOMS.2022.3209641](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3209641).
- [84] ZHANG Qixun and GAO Xinye. Joint communication and sensing enabled cooperative perception testbed for connected automated vehicles[C]. IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications Workshops, New York, USA, 2022: 1–2. doi: [10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798074](https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798074).
- [85] ZHANG Qixun, SUN Hongzhuo, GAO Xinye, *et al.* Time-division ISAC enabled connected automated vehicles cooperation algorithm design and performance evaluation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2206–2218. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155506](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155506).
- [86] WANG Jie, LIANG Xingdong, CHEN Longyong, *et al.* Joint wireless communication and high resolution SAR imaging using airborne MIMO radar system[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019: 2511–2514. doi: [10.1109/IGARSS.2019.8897826](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897826).
- [87] WANG Jie, LIANG Xingdong, CHEN Longyong, *et al.* First demonstration of joint wireless communication and high-resolution SAR imaging using airborne MIMO radar system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6619–6632. doi: [10.1109/TGRS.2019.2907561](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2907561).
- [88] WANG Jie, LIANG Xingdong, CHEN Longyong, *et al.* First demonstration of airborne MIMO SAR system for multimodal operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5204113. doi: [10.1109/TGRS.2021.3066478](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3066478).
- [89] 唐家政. 基于数据库划分的改进WLAN室内指纹定位研究[D]. [硕士论文], 南京邮电大学, 2022. doi: [10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000400](https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000400).
- TANG Jiazheng. Research on improved WLAN indoor fingerprint location based on database partition[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022. doi: [10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000400](https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000400).
- [90] 高畅蔓. 基于CSI图像特征的室内定位技术[D]. [硕士论文], 南京邮电大学, 2022. doi: [10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000476](https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000476).
- GAO Changman. CSI indoor location technology based on image features[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022. doi: [10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000476](https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000476).
- [91] LI Yang, WU Dan, ZHANG Jie, *et al.* DiverSense: Maximizing Wi-Fi sensing range leveraging signal diversity[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2022, 6(2): 94. doi: [10.1145/3536393](https://doi.org/10.1145/3536393).
- [92] WANG Guanhua, ZOU Yongpan, ZHOU Zimu, *et al.* We can hear you with Wi-Fi![C]. Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Maui, USA, 2014: 593–604. doi: [10.1145/2639108.2639112](https://doi.org/10.1145/2639108.2639112).
- [93] 徐晓东, 李岩, 叶威, 等. 通信感知一体化应用场景、关键技术和网络架构[J]. *移动通信*, 2022, 46(5): 2–8. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.001).
- XU Xiaodong, LI Yan, YE Wei, *et al.* Application scenarios, key technologies and network architecture of integrated sensing and communication[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(5): 2–8. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.001).
- [94] SAKHNINI A, DE BAST S, GUENACH M, *et al.* Near-field coherent radar sensing using a massive MIMO communication testbed[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(8): 6256–6270. doi: [10.1109/TWC.2022.3148035](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3148035).
- [95] SAKHNINI A, DE BAST S, GUENACH M, *et al.* An experimental evaluation of robust near-field radar localization using a massive MIMO testbed[C]. 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications and Sensing, Seefeld, Austria, 2022: 1–6. doi: [10.1109/JCS54387.2022.9743499](https://doi.org/10.1109/JCS54387.2022.9743499).
- [96] LI Oupeng, HE Jia, ZENG Kun, *et al.* Integrated sensing

- and communication in 6G a prototype of high resolution THz sensing on portable device[C]. IEEE Joint European Conference on Networks and Communications and 6G Summit, Porto, Portugal, 2021: 544–549. doi: [10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482537](https://doi.org/10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482537).
- [97] TAN D K P, HE Jia, LI Yanchun, *et al.* Integrated sensing and communication in 6G: Motivations, use cases, requirements, challenges and future directions[C]. 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications and Sensing, Dresden, Germany, 2021: 1–6. doi: [10.1109/JCS52304.2021.9376324](https://doi.org/10.1109/JCS52304.2021.9376324).
- [98] 张若愚, 袁伟杰, 崔原豪, 等. 面向6G的大规模MIMO通信感知一体化: 现状与展望[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 17–23. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003).
ZHANG Ruoyu, YUAN Weijie, CUI Yuanhao, *et al.* Integrated sensing and communications with massive MIMO for 6G: Status and prospect[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(6): 17–23. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003).
- [99] 杨杰, 黄艺璇, 杜涛, 等. 通信感知一体化原型验证的研究现状与发展趋势[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 43–54. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2023205](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2023205).
YANG Jie, HUANG Yixuan, DU Tao, *et al.* Prototype verification for integrated sensing and communications: Current status and development trends[J]. *Journal on Communications*, 2023, 44(11): 43–54. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2023205](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2023205).
- [100] 王欢, 王陶冶, 商惠敏, 等. 基于ChatGPT的通用人工智能发展情况及对广东的启示[J]. 自动化与信息工程, 2023, 44(6): 9–14, 28. doi: [10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.002).
WANG Huan, WANG Taoye, SHANG Huimin, *et al.* The development of general artificial intelligence based on ChatGPT and its inspiration for Guangdong[J]. *Automation & Information Engineering*, 2023, 44(6): 9–14, 28. doi: [10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.002).
- 林粤伟: 男, 副教授、硕士生导师、博士, 研究方向为通信感知一体化、B5G/6G无线通信、FPGA嵌入式技术等.
张奇勋: 男, 教授, 研究方向为通信感知一体化等.
尉志青: 男, 副教授, 研究方向为通信感知一体化、无线资源管理与优化等.
李兴旺: 男, 副教授, 研究方向为通信感知一体化、RIS等.
刘 凡: 男, 教授, 研究方向为通信感知一体化等.
范绍师: 男, 副教授, 研究方向为通信感知一体化、无线通信、无线定位等.
王 溢: 男, 博士, 研究方向为通信感知一体化等.
- 责任编辑: 余 蓉

Status and Prospect of Hardware Design on Integrated Sensing and Communication

LIN Yuewei^{①②③} ZHANG Qixun^③ WEI Zhiqing^③ LI Xingwang^④ LIU Fan^⑤
FAN Shaoshuai^② WANG Yi^③

^①(College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

^②(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^③(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^④(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

^⑤(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract:

Objective: The field of cellular mobile communication is advancing toward post-5G (5.5G, Beyond 5G, 5G Advanced) and 6th Generation (6G) standards. This evolution involves a shift from traditional sub-6 GHz operating frequency bands to higher frequency ranges, including millimeter wave (mmWave), terahertz (THz), and even visible light frequencies, which intersect with radar operating bands. Technologies such as Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Multiple Input Multiple Output (MIMO) have gained widespread application in both wireless communication and radar domains. Given the shared characteristics and commonalities in signal processing and operating frequency bands between these two fields, “Integrated

Sensing And Communication (ISAC)” has emerged as a significant research focus in wireless technologies like 5G Advanced (5G-A), 6G, Wireless Fidelity (WiFi), and radar. This development points toward a network perception paradigm that combines communication, sensing, and computing. The “ISAC” concept aims to unify wireless communication systems (including cellular and WiFi) with wireless sensing technologies (such as radar) and even network Artificial Intelligence (AI) computing capabilities into a cohesive framework. By integrating these elements, the physical layer can share frequencies and Radio Frequency (RF) hardware resources, leading to several advantages: spectrum conservation, cost reduction, minimized hardware size and weight, and enhanced communication perception. In this article, the focus of communication perception integration is primarily on radar communication. ISAC necessitates that both communication and sensing utilize the same radio frequency band and hardware resources. The diverse characteristics of multiple frequency bands, along with the varying hardware requirements for communication and sensing, present increased challenges for ISAC hardware design. Effective hardware design for ISAC systems demands a well-considered architecture and device design for RF transceivers. Key considerations include the receiver’s continuous signal sensing, link budget, and noise figure, all of which are sensitive to factors such as system size, weight, power consumption, and cost. A comprehensive review of relevant literature reveals that while studies on overall architecture, waveform design, signal processing, and THz technology exist within the ISAC domain, they often center on theoretical models and software simulation. Hardware design and technical verification methodologies are sporadically addressed across different studies. Although some literature details specific hardware designs and validation approaches, these are limited in number compared to the rich body of theoretical and algorithmic research, indicating a need for more comprehensive and systematic reviews focused specifically on ISAC hardware design.

Methods: This paper summarizes the hardware designs, verification technologies, and systemic hardware verification platforms pertinent to beyond 5G, 6G, and WiFi ISAC systems. Additionally, recent researches on related hardware designs and verification both domestically and internationally are reviewed. The analysis addresses the challenges in hardware design, including the conflicting requirements between communication and sensing systems, In Band Full Duplex (IBFD) Self-Interference Cancellation (SIC), Power Amplifier (PA) efficiency, and the need for more accurate circuit performance modeling.

Results and Discussions: Initially, the design of ISAC transceiver architectures from existing research is summarized and compared. Subsequently, an overview and analysis of current ISAC IBFD self-interference suppression strategies, low Peak to Average Power Ratio (PAPR) waveforms, high-performance PA designs, precise device modeling techniques, and systemic hardware verification platforms are presented. Finally, the paper provides a summary of the findings. Future challenges in ISAC hardware design are discussed, including the effects of hardware defects on sensing accuracy, ultra-large scale MIMO systems, high-frequency IBFD, and ISAC hardware designs for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) applications. The performance metrics of ISAC IBFD architectures are compared, while the various ISAC transceiver architectures are outlined. Representative hardware verification platforms for ISAC systems are presented. The different ISAC transceiver architectures summarized in this paper are illustrated.

Conclusions: In recent years, preliminary research has been conducted on integrated air interface architecture, transceiver hardware design, systematic hardware verification, and demonstration of sensing technologies such as 5G-A, 6G, and WiFi, both domestically and internationally. However, certain limitations persist. Beyond 5G networks, post-5G and 6G ISAC hardware verification platforms primarily operate at the link level rather than at the network system level. This focus on ISAC without the integration of computing functions leads to increased volume and power consumption costs and a reliance on commercial instruments and SDR platforms. Furthermore, the IBFD self-interference suppression technology has yet to fully satisfy the demands of future ultra-large-scale MIMO systems, necessitating further integration with large-scale artificial intelligence model technologies. In light of impending technological challenges and issues of openness, it is crucial for academia and industry to collaborate in addressing these challenges and researching viable solutions. To expedite testing optimization and industrial implementation, practical hardware design transition solutions are required that balance advancements in high-frequency support, receiver architecture, and networking architecture, facilitating the efficient realization of the “ideal” of ISAC.

Key words: 6G; Integrated Sensing And Communication (ISAC); In Band Full Duplex (IBFD); Software defined radio; Radar