

面向低空无人机的通感一体化关键技术及原型验证研究

赵川斌^{1,2}, 张腾宇¹, 冯源¹, 罗东琦¹, 高飞飞¹

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 中国电信股份有限公司四川分公司, 四川 成都 610031)

摘要: 通感一体化 6G 关键技术可借助蜂窝网, 实现低空无人机高可靠、低时延、大带宽、广覆盖的通信, 并对黑飞、乱飞的非合作无人机进行检测、追踪、识别等。首先, 分析了单基站感知无人机的关键技术。然后, 提出了多基站协同以及融合视觉的多模态无人机感知技术, 在此基础上, 讨论了多基站组网的波束优化和资源管理方案。最后, 研发了通感一体化硬件原型验证平台, 在保持通信服务的同时有效验证了对无人机的追踪以及对飞鸟的识别。

关键词: 通感一体化; 动态目标感知; 多基站协同; 多模态感知

中图分类号: TN915.08

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00486

Key technologies and prototype validation research of integrated sensing and communications for low altitude UAV

ZHAO Chuanbin^{1,2}, ZHANG Tengyu¹, FENG Yuan¹, LUO Dongqi¹, GAO Feifei¹

1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. China Telecom Corporation Sichuan Branch, Chengdu 610031, China

Abstract: With the help of base station cellular networking, the integrated sensing and communications (ISAC) key technologies for 6G can communicate with low-altitude unmanned aerial vehicle (UAV) in a wide range of reliable low-time delay and large bandwidth, and detect, track and identify non-cooperative UAV. Firstly, the key technologies for single base station sensing UAV were analyzed. Then, based on the advantages of cellular base station networking, the key technologies of multi-mode accurate sensing UAV with multi-base station collaboration and vision fusion wireless were proposed. The beam optimization and resource management of multi-base station networking were studied. Finally, an ISAC hardware prototype platform was developed, which could perform UAV tracking and bird identification while maintaining communication services.

Key words: integrated sensing and communications, dynamic target sensing, multi-base station collaboration, multi-modal sensing

0 引言

近年来低空经济蓬勃发展, 无人机规模应用必须满足两大前提: 1) 无人机大范围作业需要低时延

的飞行控制通信和大容量的业务通信, 因此需构建面向低空航线的低空通信网; 2) 低空规模化商用必须安全监管黑飞、乱飞的无人机, 因此需构建面向低空航线和重要区域的低空感知网。而 6G 系统中

收稿日期: 2025-02-11; 修回日期: 2025-03-07

专题: 第二十七届中国科协年会“6G 技术创新与未来产业发展”

通信作者: 高飞飞, feifeigao@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62341107); 四川省重点研发项目 (No. 2025YFHZ0022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62341107), The Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2025YFHZ0022)

的通感一体化 (ISAC, integrated sensing and communications) 技术能够在保障合作目标通信的同时, 对空间动态目标进行有效感知, 因此该技术势必在低空经济等垂直场景中发挥巨大应用潜力。特别是, 由于通感一体化技术具有重新定义无线网络、重新部署空口技术、重新塑造业务生态能力, 可实现对非合作的“低、慢、小”无人机的感知识别、轨迹追踪等。面向低空无人机的通感一体化场景如图 1 所示。

电信国际标准化组织第三代合作伙伴计划 (3GPP, 3rd Generation Partnership Project) 已经对通感一体化的各类场景 (如无人机识别、轨迹跟踪、入侵检测等) 用例和潜在需求开展了研究^[1], 例如, 3GPP 将进行无人机对基站的连接和识别、无人机远程指挥和控制、远程信息处理、鉴权、执行和监管等操作^[2], 将对相关的通信架构和参数要求进行讨论和规范^[3]。随着低空经济的高速发展, 通感一体化技术的落地应用需求已经非常迫切, 各企业等均加快了在低空通感一体化领域的技术研究和场景测试。

1 研究综述

物理世界中静态环境和动态物体造成的反射、散射等规律决定了电磁波的传递方向, 而物体的电磁系数又决定了电磁波反射、散射之后的振幅和相位, 因此, 无线电磁波不仅能用来通信, 还可以用来感知物理世界的各种参数信息。例如, 在进行信息传递的同时, 可通过分析无线电磁波的直射、反

射、散射等特性, 对目标或环境进行测距、测速、测角、成像、检测、识别、环境重构等。本文首先对通感一体化技术中的动态目标感知、多模态动态目标感知以及低空通感组网关键技术方面研究的文献成果梳理如下。

1.1 基站对低空无人机的动态目标感知

目前大多数研究文献主要采用单基站通感一体化框架, 并对动态目标进行检测与定位。文献[4]提出了基于毫米波大规模多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 系统的通感一体化框架, 通过压缩采样理论并优化波束成形架构提高了动态目标感知的角度分辨率, 在减少导频开销的同时保证了通信和感知的性能。文献[5]较早地提出并仿真验证了一种基于正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 信号的动态目标距离和径向速度估计方法, 然而该方法严重受限于网格分辨率导致其参数估计精度不高。文献[6]利用码分复用增益在一定程度上缓解了网格分辨率的限制, 提高了参数估计精度。文献[7]研究了结合可重构智能表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 的通感一体化系统, 并提出了一种同时进行波束训练与目标感知的方案, 以此区分来自 RIS 和目标的回波, 在此基础上, 进一步设计了低复杂度的定位与阵列方向估计方法, 实现了 ISAC 系统的波束对齐。

尽管上述工作对通感一体化系统的动态目标检测与定位进行了多方面探索, 仍有大量重要问题亟待解决。例如, 基于通信的感知技术相对于雷达的

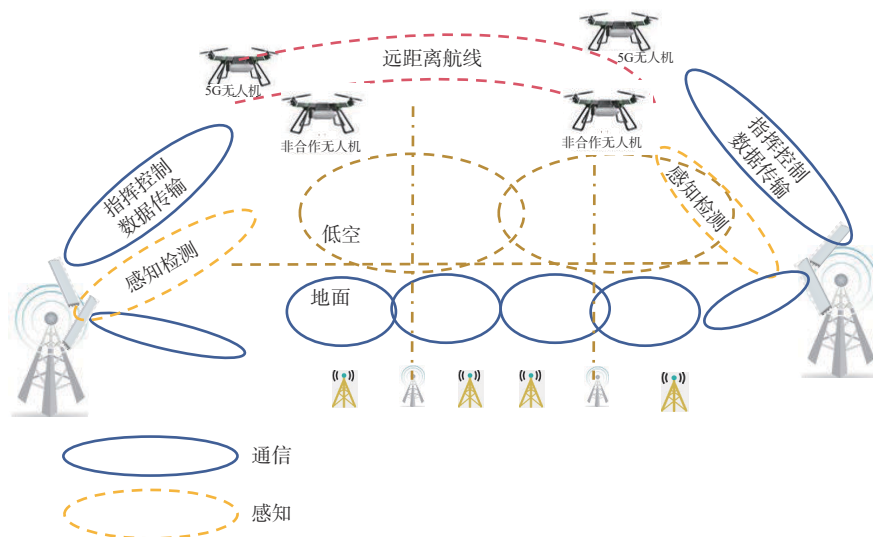


图 1 面向低空无人机的通感一体化场景

优势主要在于可利用已有的多基站完成无缝广域覆盖，相比之下，单通信基站或者单雷达基站的覆盖面积、感知精度均有限。同时，单基站通信发射机和传感接收机之间所需的高度隔离会导致布设成本、设备质量、尺寸和复杂性都大大增加，难以满足实际工程需求。为了避免上述问题，研究者开始着手研究双基站/多基站ISAC技术。文献[8]提出了一种双基站联合目标感知与通信的通用框架，能够同时提取双基站时延和多普勒信息并检测数据符号，进而通过交替进行目标感知和数据检测实现两种功能的互利。文献[9]使用双基站进行了现网实践，其中一个基站作为发射器，另一个作为接收器，实现了单收单发的双基站无人机通信和感知测试，验证了双基站技术对无人机的最大探测距离性能优于单基站技术。另一方面，多基站动态目标感知的研究主要聚焦在多基站协同目标检测、协同感知性能优化等方面。具体而言，文献[10]通过同时利用多点协调联合传输和分布式多输入多输出雷达技术，提出了一种网络化协同通感方案，提升了通信和感知性能，并利用随机几何工具捕捉通感网络中的协同依赖关系。所得结论表明，部署多个通感发射接收机可按照 $\ln(2N)$ 的缩放规律提升整个网络的感知性能，证明了增加合作基站的数量会显著提高感知精度。文献[11]探讨了通过时间-频率-空间-码域多维资源和多节点协作来提高感知精度和扩大覆盖范围的方法，并探讨了相应的挑战与未来趋势，仿真结果表明多节点和多资源协同感知明显优于非协同感知。然而，目前多基站协同感知的研究较少，亟待进一步充分探索。

1.2 多模态动态目标感知

仅基于通信信号的感知往往精度有限，为了完成动态目标高精度识别，低空经济最终必须依赖多模态感知信息。本文主要介绍融合视觉感知和ISAC的多模态动态目标识别，研究场景设定为低空无人机识别和远距离精确感知。事实上，无人机检测和分类技术在计算机视觉领域已取得了丰硕的成果。文献[12]总结了使用计算机视觉方式的无人机检测与识别成果，并在实际场景中进行了充分的测试。文献[13]对基于视觉的无人机检测和跟踪方法进行了综述，收集了无人机监测数据集，并结合视觉图像从多目标、低分辨率、监测质量、场景以及无人机类型方面进行了讨论。文献[14]提出了多模态无

人机检测、分类和3D视觉跟踪方法，包括无人机分类和跟踪、动态点分析、多目标和轨迹跟踪等，并且公开了数据集合方法，验证了多模态算法相对单模态可更加准确地完成对无人机的识别和跟踪。然而，计算机视觉方法存在固有问题。首先，计算机视觉方法难以适配全天候、全场景的无人机检测与识别，例如，其会在背光、暗夜、极端雨雪、大雾等情况下失效；其次，计算机视觉方法探测范围有限，例如，常规1080P立体相机在无人机距离数百米量级时仅能观测到几个像素；最后，计算机视觉方法高度依赖于当前背景色彩纹理差异，当无人机的色彩与背景差异不明显时，计算机视觉方法的性能将大幅度下降。

相比于计算机视觉方法，使用无线信号进行无人机检测与识别则不存在上述问题。无线信号基本不会受天气和光照影响，能够适配全天候全场景；无线信号探测范围广，在百米量级仍能对目标进行有效成像；无线信号射频对色彩纹理不敏感，依赖反射回波强度和相位进行检测和识别。因此，融合视觉和无线通信的多模态感知技术可增强无人机识别的精确性以及无人机检测和分类的稳健性。文献[15]在使用调频连续波雷达(FMCW, frequency modulated continuous wave)测量目标轨迹的同时利用相机对目标进行拍照，并将获取的轨迹和照片分别输入以长短期记忆(LSTM, long short-term memory)网络为核心的时序神经网络和以卷积层为核心的空间神经网络进行特征融合提取，实现了超远距离的无人机检测与识别。文献[16]对雷达获得的距离-多普勒谱和相机获得的图像分别构建了卷积神经网络，以进行检测与识别任务，对于两个卷积神经网络的输出，进一步在结果层设计了多分类逻辑回归方法进行融合，最终获得了多模态检测与识别结果。文献[16]相比于文献[15]更细致地利用了雷达感知的原始数据，并且能够提取无人机特有的时频谱信息，从而达到更好的无人机检测与识别效果。文献[17]使用安装在车辆上的相机进行拍摄，进而利用基于深度学习的3D目标检测技术识别动态目标的位置，再基于3D坐标预测模拟波束成形向量的索引辅助通感波束对齐，以此节约了ISAC系统的反馈开销和波扫时间。文献[18]提出了一种从视觉图像中提取环境语义的新型毫米波波束选择方法，设计了以环境语义为输入的深度神经网络，用以实

现视觉辅助的无线通信,该方法无须通信导频即可在用户和基站处输出最佳波束对。文献[19]提出了一种毫米波大规模 MIMO 系统的视觉辅助多用户波束跟踪框架,该框架利用视觉检测和多目标跟踪算法快速实现了多用户波束跟踪。实验结果表明,波束搜索的准确率接近 90%。文献[20]在前述工作的基础上,实现了第三方相机辅助波束对准方法,并搭建了 410 MHz 带宽的毫米波 OFDM 通信原型,其中 top5 波束精度达到 98% 以上。值得一提的是,该方法将毫米波波束对准时间消耗降低到穷极波束扫描的 1/50 以下。尽管上述工作在视觉和通信的联合设计方面进行了一定程度的探索,但仍存在较多问题。首先,对于视觉联合基站通信信号对无人机直接感知的文献较少,现有研究主要是针对地面目标;其次,已有多模态研究仅在结果层面对多模态数据进行了融合,无法有效捕捉视觉与通信模态之间的关联,会影响融合效果。

1.3 多站通感一体化组网的干扰和资源管理

蜂窝网的通感一体化技术必将面临通信与感知信号之间的相互干扰。因此,合理的资源分配与干扰管理尤为重要。需通过波束优化、资源分配和基站部署等方法来应对通感之间的互相干扰以及用户通信之间的干扰。文献[21]通过优化通信和感知波束的方向来抑制通信用户间的干扰和感知信号对通信的干扰。文献[22]则采用结构化抗干扰方案,通过人为设计感知信号使得用户的接收信号恰好位于正确的符号区间,并分析了宽带 OFDM 通感一体化系统中的干扰机理,设计了数模混合波束成形方案控制干扰。文献[23]研究了在发射和接收阶段均采用数模混合结构的干扰管理策略。文献[24]设计了联合子载波分配和波束成形的算法,用于应对宽带通感系统中的干扰。文献[25]考虑了实际应用中移相器的分辨率限制,并设计了针对低分辨率数模混合结构的干扰管理方法。文献[26]研究了最优天线选择并设计恰当的发射波形,以此实现低功耗的干扰管理。文献[27]考虑了杂波环境下的通感波束成形问题,并采用多个 RIS 抑制来自直射径 (LoS) 和非直射径 (NLoS) 的干扰。文献[28]提出了一种联合优化时隙长度和发射功率的资源分配算法,在消除干扰的同时防止感知目标窃取通信用户的信息。文献[29]联合设计了基站的发射和接收波束成形,有效提升了感知信号的干扰消除效果。文献[30]研

究了通感一体化系统的功率控制和用户调度问题。然而,大多数文献仅考虑了单基站场景下的干扰管理问题,仅有少量文献考虑了蜂窝网多小区之间的通感干扰管理,例如,文献[31]优化了发射波束并分配目标感知任务到不同基站来进行小区间干扰管理。然而该方法仅采用发射波束方向图和干扰信号功率作为设计目标,难以获得最优的感知信干噪比。综上所述,单基站的覆盖面积、感知精度均有限,因此需要充分发挥移动蜂窝网的多基站优势,设计多基站协同、波束优化、资源管理方案,实现多小区通信和感知的无缝广域覆盖。

2 面向低空无人机的通感一体化关键技术

2.1 单基站低空感知关键技术

单基站低空感知的设计目标是使得单个基站具备实时发现和监测动态目标的能力。具体而言,基站需要定期利用多天线感知波束对划分的感知区域进行扫描,并接收来自动态目标的回波信号。通过对静态环境杂波滤除算法和目标监测算法,基站能够实时检测新出现的目标,并且采用估计算法来获取目标的运动参数,包括目标与基站之间的距离、水平角、俯仰角以及径向速度等。通过将这些运动参数从极坐标系转换到同一个笛卡儿坐标系或地球坐标系,可以准确获取目标的真实位置,为后续目标跟踪方案奠定了参数基础。在此基础上,通过航迹关联技术将不同的目标与其相应的轨迹进行匹配,并根据情况进行航迹管理,如更新航迹、生成新航迹和结束旧航迹。通过对目标运动轨迹的分析,应用交互式多模型算法和非线性滤波算法识别出目标的运动模式,并基于这些模式预测目标的未来位置,从而有效引导多天线波束对已发现的目标进行后续跟踪。

2.2 基于多基站协同的低空目标感知技术

相比于单基站,多基站低空感知可获取协同增益效果。首先,多基站协同可以大幅扩展感知区域,对于大范围监控和跨小区目标追踪尤为重要。其次,多基站协同能够提高感知精度,通过多个视角的回波信号融合,减少单基站可能产生的估计误差。此外,多基站协同能够显著提高感知成功率,提升对快速移动目标的捕获能力,提高在复杂环境中对目标识别与定位的可靠性。

当前,基于多基站的“结果级”协同已经在工

程场景中实践，“信号级”协同算法也被提出。然而“信号级”协同需要计算传输的数据量较大，而“结果级”协同通常采用加权平均等方式，精度不够理想，因此提出一种多基站通感协同特征级目标感知方案，克服现有“信号级”和“结果级”协同感知技术无法兼顾高感知精度、低数据传输和计算量的矛盾，同时解决现有研究缺乏强鲁棒分布式容错设计的难题。

一种多基站通感协同组网以及动态目标感知方案如图2所示，多发射基站发送的感知信号经过目标散射后产生的回波信号将被多接收基站接收，各接收基站利用回波数据压缩方法从原始回波信号中提取目标感知特征，然后将感知特征传输给边缘计算中心，再由边缘计算中心通过感知特征配套的融合算法完成协同感知。其中数据压缩方法的设计直接决定了感知特征的数据量和信息保留程度，间接影响了边缘计算中心配套融合算法设计和感知精度。具体地，可设计基于深度学习的灵活可控的“特征级”多基站协同感知方案，通过构建基于深度学习的特征提取算法与编码网络，对杂波抑制后的各单基站回波信号数据进行感知特征提取。进而，边缘计算中心通过构建基于深度学习的近似重建算法与解码网络，并根据单基站感知特征重建原始回波，再进行信号级高精度融合感知，以此提高多基站协同动态目标感知的容错性和鲁棒性。

2.3 融合视觉的低空目标多模态感知技术

多模态感知技术借助位于基站的各类传感设备感知低空目标位置、目标速度、三维姿态、目标类型等多元物理信息，主要包括通信基站感知、毫米波雷达感知、光学摄像机感知等手段。其中，毫米波雷达感知通过信号处理技术能够获取无人机等低空目标的精准运动信息，且不易受光照条件或恶劣

天气的影响，具有较高的环境鲁棒性；然而，面向低空监测的毫米波雷达部署存在成本高、周期长、难以大范围连续组网等明显缺点。幸运的是，毫米波通信基站能够整合无线通信功能和雷达感知功能，在保留毫米波雷达优势的基础上，具备部署成本低、蜂窝网络天然组网等优势，因此以毫米波通信基站为核心打造低空网络已经成为业内共识。然而，基于无线信号的感知技术只能获得低空目标的点云信息，存在难以识别低空目标类型的客观缺陷。另一方面，光学摄像机能够获取低空目标丰富的图像细节信息，具有良好的识别性能。然而基于光学图像的低空感知方法很容易受环境光照和天气条件的影响，且感知距离较短，甚至由于图像像素分辨率以及视野角度的限制，难以精确估计低空目标的运动信息。本文提出一种通感基站融合视觉信息的多模态低空目标感知技术，充分发挥毫米波通感基站和光学摄像机优势互补的特点，利用毫米波通感基站获取的低空目标点云信息和光学摄像机获取的多视角视觉图像完成目标检测及追踪，并生成多模态感知数据时空融合方法，实现高精度和高适应性的低空感知方案。在现有基站搭配摄像机的部署框架下形成的多模态低空目标感知技术对城市低空无人机的精准识别与成像具有重要意义，可实现更高精度、更细粒度的无人机目标识别与成像。

融合视觉感知和通信基站感知的无人机目标识别与成像方案如图3所示，考虑通感基站的硬件包括两个模块，即视觉处理模块和通感一体化成像处理模块。在视觉处理模块方面，基站挂载的视觉传感器首先获得相关扇区内的视觉图像，经过已有的白平衡、光照补偿、雨雾补偿等算法处理之后，设计深度网络提取图像中对应的多目标特征。提取的特征向量一方面作为视觉模态特征留待后续融合处

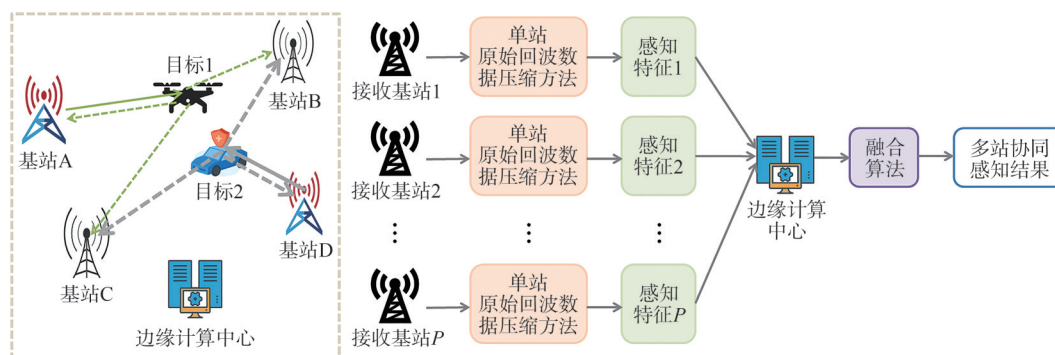


图2 一种多基站通感协同组网以及动态目标感知方案

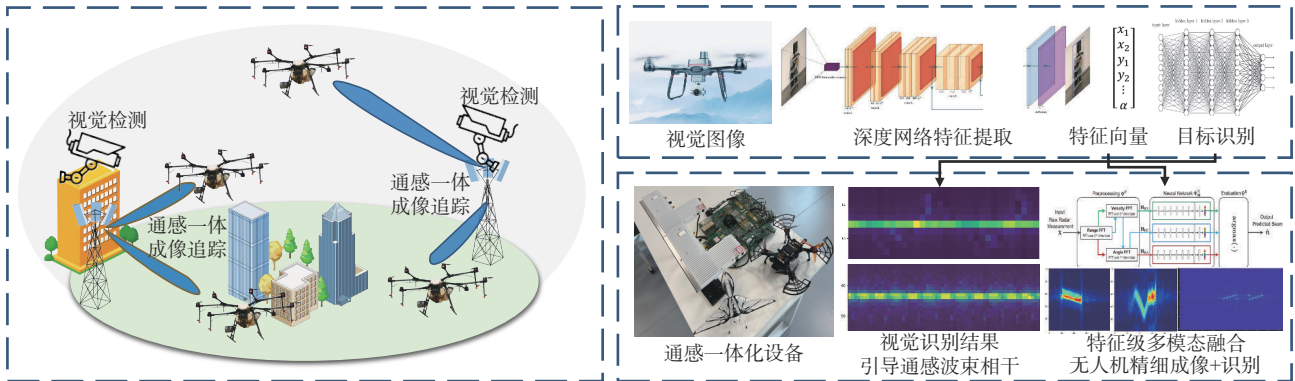


图3 融合视觉感知和通信基站感知的无人机目标识别与成像方案

理；另一方面与多类别逻辑回归模块连接进行目标识别。进而利用目标的位置以及摄像机内参矩阵计算获得高置信度目标相对于基站的角度方位，以此角度方位辅助基站雷达空间波束对准该高置信度目标。

在视觉获得高置信度目标方位之后，引导大规模天线阵列的波束指向目标方向，进行长相干时间的脉冲扫描探测获得回波信号序列，再进行通感一体化成像基带信号处理，从而生成该无人机目标的精细成像点云图。在此基础上，进行点云的滤波处理、构建基于深度卷积神经网络的点云图特征提取算法，并与视觉特征向量融合，从而辅助无人机精细化成像和高精度识别。特别是，本文将在视觉处理模块中设计视觉效果判定系统，在视觉模块完全失效的特殊情况下，上述算法会跳过视觉模块融合步骤直接产生感知效果。

在获取低空目标的点云信息和图像检测分类结果后，拟对这些多模态数据进行有机融合；系统首先根据各传感设备生成的时间戳同步点云信息估计结果和图像检测分类结果，再利用空间校准算法估计出点云三维坐标和图像二维坐标之间的变换矩阵，以此实现多模态数据的空间校准。进一步利用校准变换矩阵将检测出的光学图像目标边界框及其中心坐标投影到点云估计的坐标系中；然后计算目标图像检测框和通感基站点云聚类框之间的重合程度以及二者中心的距离加权和，并与预设阈值进行对比，完成基站点云聚类结果和图像目标检测结果的轨迹关联与融合。

3 基于多维资源分配的通感组网干扰管理

通感一体化的蜂窝网相对于普通雷达的一个优势在于规模组网，其难点之一在于如何通过恰当的

基站部署以及基站协作消除通信信号和感知信号之间的相互干扰。在基站协作方面，已有较为成熟的小区用户干扰消除算法，这些研究表明基站协作能有效降低小区间干扰。此外，不同模式下的多基站协同感知实际上可被分别视为单基站雷达感知和双基站雷达感知，其可行性已被广泛验证。因此，通过基站间协作波束优化或资源分配来实现多小区多基站通感一体化干扰管理是可行的。另一方面，对基站部署的优化主要依赖无线环境的建模。目前，获取环境信息的方法种类丰富，进行站间信道建模时，需要考虑城市环境中的诸多因素，如建筑物、地形和植被等。此外，对干扰数据的分析与建模虽然需要进行综合考虑，但通过整合目前已有的通信基站和雷达基站干扰数据的工作，对干扰源进行统计意义上的建模仍然是可行的。同时，在基站的优化部署设计上可利用分布式或协同式的码本设计。尽管基于最大化通信-感知容量界算法的闭式推导存在挑战，但通过对多基站空间位置的站间通感干扰进行数值优化依然可以提升多基站通感系统的通信速率和感知精度。

3.1 基于多基站部署的干扰消除方案

基站的地理位置和开关状态无疑会对多基站之间的通感干扰产生直接影响，对基站的部署方式和开关状态进行优化，可以抑制通感组网干扰。首先通过各种传感方式（如电子地图、摄像头等）获取特定区域的环境信息，包括建筑和道路的空间位置数据、墙面等遮挡物所在坐标、用户分布情况、同频及异频干扰源分布情况等。对收集获取的信息进行深入分析，完成环境干扰分析和对应的信道建模。进而采用多基站分布式、协同式码本作为底层干扰管理算法来辅助基站部署设计。如果所利用的码本存在理论感知容量界的闭式表达，则可利用优

化算法来最大化通信-感知容量函数，从而获得对应的基站部署设计。而在难以获取闭式表达的情况下，可利用启发式算法或机器学习算法来最小化“通信-感知”的数值干扰函数，从而提高多基站通感系统的整体效率和性能。进一步，设计多基站开关控制策略用以优化通感系统的实时性能指标，节省通感一体化基站的工作能耗。由于基站部署的位置与周围环境相对固定，可以利用当前已部署的多基站空间位置和潜在多用户的范围建立信道模型，以此设计多基站开关策略的算法。考虑服务用户在周围环境相对动态，可以将多基站开关问题建模为强化学习问题，定义状态、行动和奖励函数，再使用强化学习算法（如Q-learning、Deep Q-Network等）来训练智能体，使其学习到最佳的多基站开关策略。在训练过程中，智能体将通过与环境的交互不断调整开关状态，并根据对小区间干扰的抑制效果设置奖励信号，以此更新开关策略，鼓励网络逐步学习优化通感性能指标的行为方式。

3.2 多基站通感波束协同优化

目前多数通感一体化系统波束优化研究仅考虑单小区场景，而蜂窝系统多基站场景下的各个小区间也会产生严重干扰，如何进行多基站协作的波束优化，设计恰当的发射信号，从而减免甚至消除小区间和小区内干扰是通感一体化应用的关键。考虑多基站通感一体化场景中每个基站在服务本小区内通信用户的同时也感知小区内的目标。在通信传输方面，用户的干扰由3部分组成：1) 本小区发送给其他用户的下行通信信号，2) 其他小区基站发送的通信信号，3) 其他小区发射的感知信号。在感知方面，基站接收到的干扰由两部分组成：1) 其他基站发射的通信信号被本基站接收形成的干扰，2) 其他基站发射的感知信号被本基站接收形成的干扰。由于目标搜索阶段感知波束功率一般远大于通信波束，目标感知的干扰主要来自其他小区的感知信号。另外，不同于对地覆盖，对空覆盖由于遮挡物较少，跨小区覆盖的强干扰也是需要考虑的因素。

为了减轻感知波束对其他基站的干扰，可采用基于强化学习的多基站感知波束协同扫描策略和主动避让机制。通过定义状态、行为，并构造奖励函数，在训练过程中不断调整基站的感知波束扫描角度，并且利用奖励函数鼓励感知波束在覆盖待扫描区域的同时避免感知波束间的主瓣扇区交叠，以此

降低干扰，并通过优化波束形状进一步控制残余干扰。在优化过程中，可选择受本小区其他用户通信信号、其他小区用户通信信号、所有小区感知信号干扰下的通信用户可达速率作为通信性能指标，并选择发射信号在待扫描方位的功率作为感知性能指标，以及选择其他基站发射的信号被本基站接收的功率作为干扰功率。由于波束优化问题的表达式复杂且为非凸的，可利用Schur补将目标函数转化为单变量标量函数，在约束中额外引入Schur补对应的矩阵不等式。经过变换后的问题一般仍是非凸问题，但若选取波束成形矩阵与自身共轭转置的乘积为优化变量，则经过变换后可被等价为带有秩一约束的凸半正定规划问题。通过半正定松弛等方式可将波束优化问题转化为凸优化问题，最终可尝试证明问题存在秩一的全局最优解，由此求解松弛后的半正定规划问题，最后通过特征值分解获取原波束优化问题的解。

3.3 多基站通感资源分配策略

传统波束优化问题仅能分配空间和功率资源却无法分配带宽资源，而在实际应用中带宽对通信和感知性能均有影响。例如，带宽越大则距离估计精度越高，且通信信道容量越大。因此，需构建多基站协作的资源分配问题，通过低复杂度算法预先设计波束成形矩阵，进而通过联合分配功率和带宽资源来消除小区间干扰。

首先，分别选择恰当的通信和感知性能指标，并分析不同因素对性能指标的影响。例如，可将目标距离和角度感知的克拉美-罗界（CRB, Cramér-Rao bound）作为感知性能指标，用户信道容量作为通信性能指标。在感知方面，基站可通过MUSIC等算法感知目标角度，其CRB由发射功率和归一化感知信道增益确定；基站还可通过匹配滤波技术来估计目标的距离，其CRB由发射功率、带宽以及归一化感知信道增益确定。在多基站场景下，相邻小区基站的相同频带发射信号会干扰本小区用户感知性能，从而降低归一化信道增益、恶化感知性能。在通信方面，用户信道容量由信号带宽、发射功率和归一化通信信道增益确定。同样地，在相同频段内相邻小区的发射信号会对本小区通信用户造成干扰，降低通信信道归一化增益、恶化信道容量。

在多基站协作资源分配算法设计中，由于同时需要感知目标的角度和距离信息，可将角度和距离

的CRB加权作为感知信息性能指标。此外，可用二进制向量来表示每个基站对于不同频带的选择结果，将资源分配建模为再保证总功率以及信道容量的同时最小化加权感知CRB的优化问题。其中，系统的发射功率是连续变量，而频带选择变量是离散变量，因此可采用交替优化方案求解这一优化问题。具体地，首先对于固定的频带选择变量，求解功率分配变量。这一子问题是凸优化问题，可通过内点法高效求解；对于固定的功率分配变量，频带选择变量是取值在0~1的二值变量，优化频带选择变量的子问题是一个NP-hard问题，可通过启发式算法（如遗传算法）进行求解。

4 毫米波通感一体化原型平台验证

本文提出的通感一体化基站无人机跟踪和识别原型验证平台架构如图4所示。具体而言，首先基于现有Xilinx FPGA实现大带宽OFDMA多路复用的数字通信标准基带，从而模拟未来可能的5G毫米波的标准基站-用户高速数据传输过程。该原型进行通感兼顾的帧结构设计：设计优化信噪比（SNR, signal-to-noise ratio）和峰值平均功率比（PAPR, peak to average power ratio）指标从而提升OFDM整体感知性能并保证通信速率。同时，基于底层现场可编程门阵列（FPGA, field-programmable gate array）的高层次综合HLS设计采用FreeRTOS系统级并行优化解决大带宽、高吞吐率、高传输负载、低时延问题，真正实现“存传算一体”。其中，基带链路处理架构包含3个部分：通感一体化发射机、通信接

收机和感知接收机。通信接收机架构中主要实现的是通感一体化发射机的逆过程，即包括FPGA可编程逻辑中的模拟数字信号转换、采样抽取、短训练序列信号检测、定时同步偏差估计与补偿、载波频偏估计与补偿、循环前缀去除、快速傅里叶变换（FFT, fast Fourier transformation）、信道估计与信道均衡、解交织、解卷积、解扰码；以及FPGA处理系统中的介质访问控制（MAC, medium access control）层协议解码，最终将通信信号传输的信息从射频信号和基带信号中恢复成通信符号的形式，完成通信功能。在感知接收机中采用与通信接收机不同的基带信号处理方式，主要区别从FPGA可编程逻辑的接收机短训练序列检测之后开始，在感知接收机中的下一步是将原始数据信息进行负载消除，从而提取通信环境路径传播造成的相位变化，形成单帧感知能力。以单帧感知的结果作为矩阵的行向量，在雷达矩阵的列方向堆叠多帧，构成完整的多帧雷达矩阵。在其多帧的列方向使用快速傅里叶变换对新增维度进行实时数据处理，即可获得单帧感知中的每个目标对应的速度动态感知信息，从而在感知接收机之中获得动态目标的感知信息，包括距离、方位、速度信息，实现完整的动态目标感知。

在通信链路的射频设计方面，射频链路配备26 GHz毫米波均匀线性阵列射频收发组件，同时模拟标准5G以及未来协议中规定的多个射频频点、贴近真实的通信系统发展与基本架构。在底层的标准数字通信链路实现的基础上，根据标准通信协议

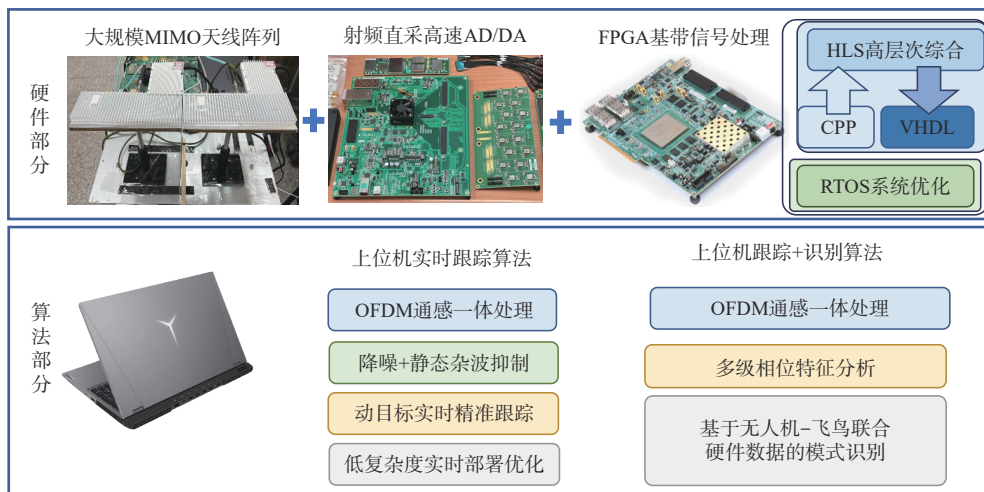


图4 通感一体化基站无人机跟踪和识别原型验证平台架构

扩展数字通信基带功能，在数字通信接收处理链路的基础上增加接收信号的感知数字处理基带。在上层数据处理方面，采用与基站类似的中央处理器（CPU, central processing unit）计算处理核心架构。上层数据处理核心与底层的FPGA数字基带之间通过高速并行总线实现数据的快速传输，从而使得FPGA的通信感知数据能够实时传输至CPU计算核心。在上层数据处理方面，原型验证平台在CPU的计算核心上直接部署上述动态目标感知算法架构。基于数字基带回传的多帧累加雷达矩阵，首先进行杂波抑制去除OFDM感知信号处理过程中的泄漏、旁瓣干扰以及静态杂波干扰。在去除杂波后的雷达矩阵上再进行多载波联合的目标检测，最终实现完整的动态目标感知。

无人机跟踪和识别感知原型验证平台基带技术参数见表1。原型验证平台基于IEEE 802.11N协议进行扩展得到大带宽毫米波对应的帧结构，在保证高速率、低时延、大带宽通信的基础上扩展感知功能，提升服务能力，为现有的通信基站架构实现通感一体化功能升级提供有效参考。基带链路的带宽方面，本文原型验证平台在FPGA中基于ADDA的多相并行采样技术实现带宽扩展，将带宽扩展至单流双相820 MHz，大幅提升通信带宽、通信速率以及感知分辨率。

表1 无人机跟踪和识别感知原型验证平台基带技术参数

| RFSoc基带技术参数 | 取值 |
|------------------------------------|-----------|
| 实测距离分辨率/m | ~0.182 8 |
| 实测速度分辨率/(m·s ⁻¹) | ~0.090 7 |
| 实测角度分辨率 | ~3° |
| 感知距离范围/m | 0~300 |
| 感知速度范围/(m·s ⁻¹) | 0~20 |
| 感知角度范围 | -60°~+60° |
| OFDM基带信号带宽/MHz | 820 |
| OFDM基带信号中心频点/GHz | 3.5 |
| OFDM基带信号子载波数 | 512 |
| OFDM基带信号调制方式 | 16QAM |
| OFDM基带信号相干时间/s | 0.063 64 |
| OFDM实时通信速率/(Gbit·s ⁻¹) | ~1 |

首先，对无人机使用基于多种静态杂波抑制算法以及噪声参数估计算法联合的静态降噪，检测出

目标特征，进而基于无人机飞行特征的无人机目标跟踪算法实现目标跟踪。在无人机和飞鸟辨识上，进一步利用大位宽多相并行设计提升波形相干性能，分析相位多级特征，依据无人机、飞鸟回波特征构建特征图，并提取特征图中信号参数化特征进行算法分析，最后，利用形态特征进行特征向量建构，以多种监督或非监督式方法联合识别。在算法实现上，依据硬件数据采集构建无人机-飞鸟联合数据库；设计无人机-飞鸟的多种感知参数联合似然算法进行目标识别。

对硬件原型验证平台进行了测试，通感一体化无人机感知原型验证实测场景如图5所示。通感一体化无人机感知原型验证结果如图6所示。测试无人机起飞后，可以清晰地识别出角度、位置和速度，试验结果证明，在实验室有杂波干扰的情况下进行“低、慢、小”无人机目标的初步感知和追踪，无人机识别率可超过99%。通感一体化无人机识别原型验证结果如图7所示，图7(c)中可以看到无人机的长方形轮廓以及位于四角的无人机旋翼所造成的残像；在图7(d)中则可以看到正在飞行的鸟类的V字型轮廓，以及振翅在翅尖产生的震动残像；如图7(e)所示，为使用不同的分类算法得到的飞鸟和无人机识别准确率。本文分别选用SVM算法、KNN算法以及随机森林算法对无人机和飞鸟进行识别分类。3种方法的准确率均高于90%。此外，实验还通过主成分分析（PCA, principal component analysis）将数据降至二维，以可视化观察无人机和飞鸟分类的特征情况。如图7(f)所示，橙色的点代表PCA降维之后无人机类别的数据点，完全集中在近乎相同的二维坐标附近，而蓝色点代表的飞鸟数据点则散布在橙色无人机数据点的右侧，表示算法对于无人机和飞鸟特征充分具备稳健的辨识度。

5 结束语

低空经济是通感一体化技术应用的典型场景，其关键技术落地仍需要突破大量实际需求难点。本文基于当前低空经济实际工程应用的需求点，对面向低空无人机的ISAC技术进行了研究和探讨，并提出了多基站协同和融合视觉的多模态无人机感知关键技术。在此基础上研究了多基站的通感波束协同优化和资源管理分配策略，为低空互联网的规模

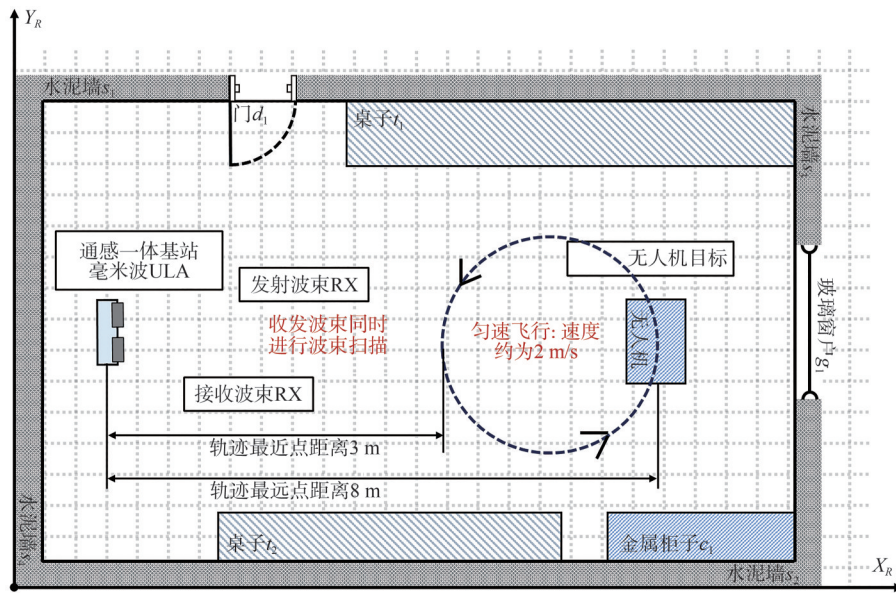


图5 通感一体化无人机感知原型验证实测场景

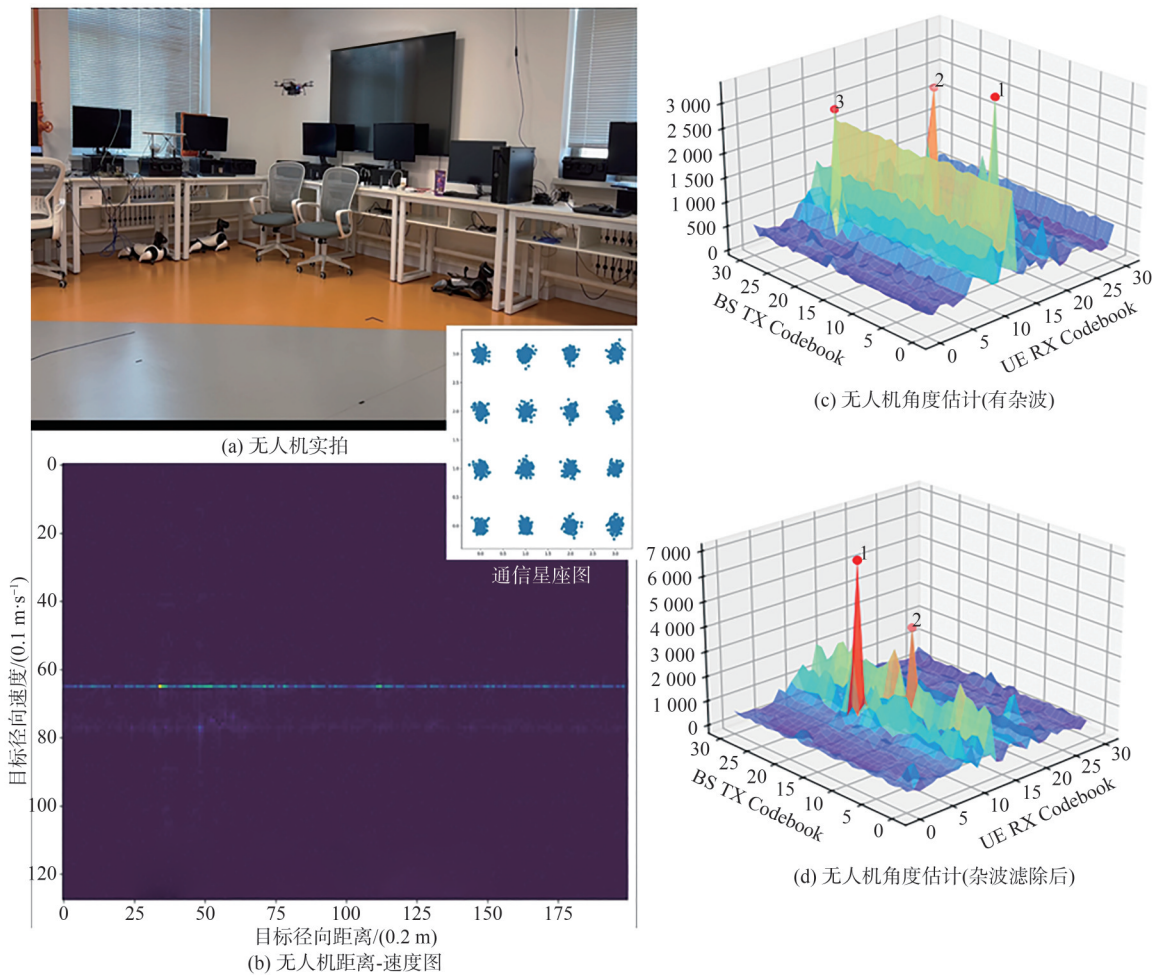


图6 通感一体化无人机感知原型验证结果

组网提供了重要思路。最后，开发了ISAC硬件原型平台，进行了单基站无人机检测、追踪和飞鸟识

别实测。通感一体化基站已经成为低空智联网的一部分，更是新一代信息化基础设施的重要组成部分

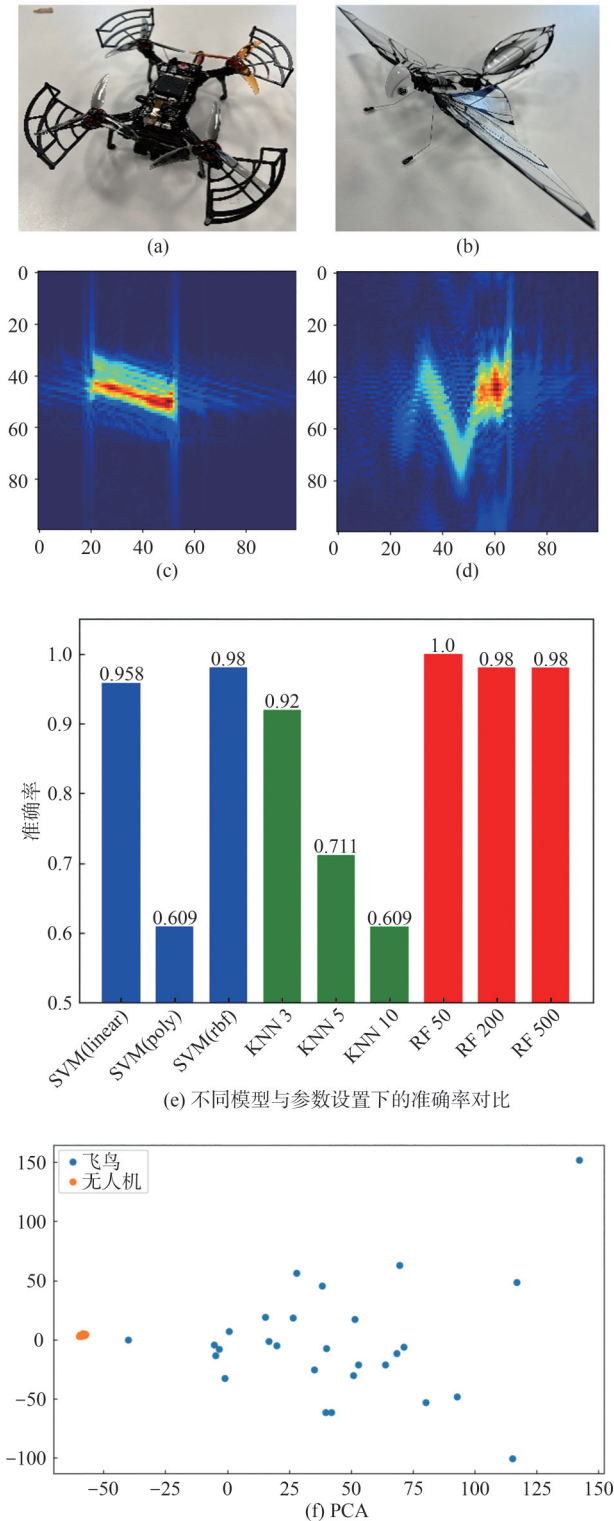


图7 通感一体化无人机识别原型验证结果

分，开展ISAC关键技术和工程应用研究不仅于通信信息行业的可持续发展具有重要意义，为我国发展新质生产力、实现智能化转型起到重要支撑作用。

参考文献：

- [1] 3GPP. Feasibility study on integrated sensing and communication (Release 19): TR 22.837 V19.2.1[S]. 2024.
- [2] 3GPP. Uncrewed aerial system (UAS) support in 3GPP; Stage 1 (Release 19): TS 22.125 V19.1.0[S]. 2023.
- [3] 3GPP. Support of uncrewed aerial systems (UAS) connectivity, identification and tracking; Stage 2 (Release 18): TS 23.256 V18.2.0[S]. 2023.
- [4] GAO Z, WAN Z W, ZHENG D Z, et al. Integrated sensing and communication with mmWave massive MIMO: a compressed sampling perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(3): 1745-1762.
- [5] STURM C, 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.
- [6] CHEN X, FENG Z Y, WEI Z Q, et al. Code-division OFDM joint communication and sensing system for 6G machine-type communication[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12093-12105.
- [7] CHEN K J, QI C H, DOBRE O A, et al. Simultaneous beam training and target sensing in ISAC systems with RIS[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(4): 2696-2710.
- [8] ZHAO N, CHANG Q, SHEN X, et al. A joint target sensing and communication scheme in bistatic networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1416-1420.
- [9] LIU R Q, JIAN M N, CHEN D W, et al. Integrated sensing and communication based outdoor multi-target detection, tracking, and localization in practical 5G networks[J]. Intelligent and Converged Networks, 2023, 4(3): 261-272.
- [10] MENG K T, MASOUIROS C. Cooperative sensing and communication for ISAC networks: performance analysis and optimization[C]// Proceedings of the 2024 IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 446-450.
- [11] WEI Z Q, LIU H T, FENG Z Y, et al. Deep cooperation in ISAC system: resource, node and infrastructure perspectives[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2024, 7(6): 118-125.
- [12] CHEN C L, ZHENG Z Y, XU T Y, et al. YOLO-based UAV technology: a review of the research and its applications[J]. Drones, 2023, 7(3): 190.
- [13] WANG B S, LI Q, MAO Q C, et al. A survey on vision-based anti unmanned aerial vehicles methods[J]. Drones, 2024, 8(9): 518.
- [14] DENG T, ZHOU Y, WU W, et al. Multi-modal UAV detection, classification and tracking algorithm-technical report for CVPR 2024 UG2 challenge[C]//Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2024.
- [15] MEHTA V, DADBOUD F, BOLIC M, et al. A deep learning ap-

- proach for drone detection and classification using radar and camera sensor fusion[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [16] LEE H, HAN S, BYEON J I, et al. CNN-based UAV detection and classification using sensor fusion[J]. IEEE Access, 2023, 11: 68791-68808.
- [17] XU W H, GAO F F, TAO X M, et al. Computer vision aided mmWave beam alignment in V2X communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(4): 2699-2714.
- [18] WEN F Y, XU W H, GAO F F, et al. Vision aided environment semantics extraction and its application in mmWave beam selection[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(7): 1894-1898.
- [19] LI K H, ZHOU B G, GUO J J, et al. Vision-aided multi-user beam tracking for mmWave massive MIMO system: prototyping and experimental results[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [20] ZHANG T Y, WANG, Y C, OUYANG M, et al. An RFSoc prototype for third-party camera aided mmWave communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(4): 2769-2785.
- [21] LIU X, HUANG T Y, LIU Y M, et al. Transmit beamforming with fixed covariance for integrated MIMO radar and multiuser communications[C]//Proceedings of the ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 8732-8736.
- [22] LIU R, LI M, LIU Q, et al. Dual-functional radar-communication waveform design: a symbol-level precoding approach[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1316-1331.
- [23] CHENG Z Y, HE Z S, LIAO B. Hybrid beamforming design for OFDM dual-function radar-communication system[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1455-1467.
- [24] NGUYEN N T, SHLEZINGER N, ELDAR Y C, et al. Multiuser MIMO wideband joint communications and sensing system with subcarrier allocation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2023, 71: 2997-3013.
- [25] CHEN J C. Hybrid beamforming with discrete phase shifters for millimeter-wave massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 7604-7608.
- [26] VALIULAH I, MASOUCOS C, SALEM A, et al. Antenna selection for energy-efficient dual-functional radar-communication systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(4): 741-745.
- [27] WEI T, WU L L, MISHRA K V, et al. Multi-IRS-aided Doppler-tolerant wideband DFRC system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(11): 6561-6577.
- [28] XU D F, YU X H, NG D W K, et al. Robust and secure resource allocation for ISAC systems: a novel optimization framework for variable-length snapshots[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(12): 8196-8214.
- [29] ZHAO N, WANG Y L, ZHANG Z B, et al. Joint transmit and receive beamforming design for integrated sensing and communication[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(3): 662-666.
- [30] CAO Y, YU Q Y. Joint resource allocation for user-centric cell-free integrated sensing and communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(9): 2338-2342.
- [31] HUANG N, DONG H Y, DOU C L, et al. Edge intelligence oriented integrated sensing and communication: a multi-cell cooperative approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8810-8824.

[作者简介]

赵川斌, 清华大学自动化系博士生, 中国电信股份有限公司四川分公司高级工程师, 主要研究方向为无线通感一体化、多模态人工智能感知、移动边缘计算。

张腾宇, 清华大学自动化系博士生, 主要研究方向为无线通信、通感一体化、通信硬件系统设计、雷达硬件系统设计等。

冯源, 清华大学自动化系硕士生, 主要研究方向为智能通信、通感一体化、阵列信号处理等。

罗东琦, 清华大学自动化系在站博士后, 主要研究方向为通感一体化和基于深度学习的信号处理算法。

高飞飞, 清华大学自动化系教授、博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 电气电子工程师学会会士, 主要研究方向为智能无线通信、通感一体化、太赫兹通信、具身智能等。