

## 通信感知一体化原型验证的研究现状与发展趋势

杨杰<sup>1,2</sup>, 黄艺璇<sup>3</sup>, 杜涛<sup>3</sup>, 阙杭<sup>3</sup>, 夏树强<sup>4,5</sup>, 金石<sup>1,3</sup>

- (1. 东南大学移动通信与安全前沿科学中心, 江苏 南京 210096;  
2. 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;  
3. 东南大学移动通信全国重点实验室, 江苏 南京 210096; 4. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518055;  
5. 移动网络和移动通讯多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 针对技术落地面临的实际挑战, 对通信感知一体化原型验证的研究现状和发展趋势进行了阐述和总结。首先, 概括基于单节点的通信感知一体化原型系统在定位、环境制图、成像、波形设计和波束追踪等方面的研究进展和实测性能。接着, 从车联网和物联网场景入手, 分析基于多点协作的通信感知一体化原型系统的实际增益。然后, 聚焦基于跨设备的通信感知一体化原型验证, 总结各传感器的优劣势和实测融合效果。最后, 针对现有原型验证遇到的问题, 指出通信感知一体化系统实现和技术验证的研究趋势。

**关键词:** 通信感知一体化; 原型验证; 定位; 环境制图; 成像; 波形设计; 波束追踪

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023205

## Prototype verification for integrated sensing and communications: current status and development trends

YANG Jie<sup>1,2</sup>, HUANG Yixuan<sup>3</sup>, DU Tao<sup>3</sup>, QUE Hang<sup>3</sup>, XIA Shuqiang<sup>4,5</sup>, JIN Shi<sup>1,3</sup>

1. Frontiers Science Center for Mobile Information Communication and Security, Southeast University, Nanjing 210096, China  
2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China  
3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China  
4. ZTE Corporation, Shenzhen 518055, China  
5. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** Considering the practical challenges faced by the commercialization of integrated sensing and communication (ISAC), the implementation progress and future trends of ISAC were elaborated and summarized. First, the research progress and empirical performance of single node-based ISAC prototype systems were summarized, including positioning, environmental mapping, imaging, waveform design, and beam tracking. Next, the actual gain of multi-nodes cooperation-based ISAC prototype systems in the scenarios of the Internet of vehicles and the Internet of things were analyzed. Then, focusing on cross-sensor-based ISAC prototype systems, the advantages and disadvantages of each kind of sensor and the experimental fusion performance were overviewed. Finally, the future trends in the system implementation and technical validation of ISAC were highlighted, addressing the challenges encountered in existing ISAC prototype systems.

**Keywords:** integrated sensing and communication, prototype verification, localization, environmental mapping, imaging, waveform design, beam tracking

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-10-16

通信作者: 金石, jinshi@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62301156, No.62261160576, No.62341107); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2242022k60004); 东南大学至善青年学者基金资助项目 (No.2242023R40042)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62301156, No.62261160576, No.62341107), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242022k60004), The “Zhishan” Scholars Programs of Southeast University (No.2242023R40042)

## 0 引言

移动通信正在以前所未有的深度和广度融入千行百业，智慧城市和家庭、智能网联汽车、智能制造和工业物联网等新应用场景不仅需要高速度和高可靠的无线连接，还依赖高精度的感知能力<sup>[1]</sup>。因此，在 6G 系统中，感知将成为除通信外新的基础功能。6G 将成为移动通信网络、感知网络和算力网络的融合体，由此可知，通信感知一体化将是 6G 具有变革性的使能技术之一<sup>[2]</sup>。

随着大规模天线阵列与毫米波/太赫兹等高频段的结合，移动通信系统和传统感知系统在工作频段和硬件设计上具有更强的相关性，引发了系统设计范式的转变。通信感知一体化是指在相同的无线和硬件资源下联合设计感知与通信系统的设计范式<sup>[3]</sup>。将通信和感知 2 个功能联合设计，可以有效地利用受限的频谱资源，快速地共享信息，有望形成通信和感知的协同增益。一方面，以较低成本为通用物联网设备和蜂窝基础设施赋予原生感知能力。另一方面，多模态感知数据能够快速地辅助通信策略设计以提高通信性能。

通信感知一体化目前尚处于技术预研阶段，在应用场景、理论极限、算法设计、系统实现等方面仍面临诸多挑战。文献[4]提出了通信感知一体化的几种典型应用场景，包括高精度定位和追踪、同时定位环境制图和成像、人类感官增强、动作识别和表情识别等。文献[5]介绍了与通信感知一体化相关的工业进展和标准化进程。已有研究总结了当前通信感知一体化领域的理论极限研究现状<sup>[6]</sup>和信号处理技术发展情况<sup>[7]</sup>，以及结合超大规模天线阵列和人工智能的通信感知一体化未来技术趋势<sup>[8]</sup>。然而，现有工作尚缺乏针对系统实现的文献综述。

面向通信感知一体化技术落地的需求和挑战，本文对通信感知一体化的系统实现研究现状进行了总结，包括基于单节点、多节点和跨设备的通信感知一体化原型验证介绍和实测结果对比，并展望了未来通信感知一体化原型系统验证方面的研究趋势。

## 1 基于单节点的通信感知一体化原型验证

随着移动通信系统的发展，高频段、大带宽和大规模天线阵列有效提升了通信系统的角度和时延估计性能，使单个基站或者移动用户具备了感知能力。使用较少基站实现感知，可以减少感知对通信基础设施的依赖。目前，基于单站的通信感知一体化技术原型验证已成为研究热点。

### 1.1 定位

通信设施具备定位功能，可以使能基于用户位置的各项服务。定位是指通过提取所接收无线信号中的接收信号强度 (RSS, received signal strength)、到达角 (AOA, angle of arrival)、离开角 (AOD, angle of departure)、到达时间 (TOA, time of arrival) 和到达频率 (FOA, frequency of arrival) 等参数，对环境目标位置进行估计的过程。通信和定位一体化系统实现文献总结如表 1 所示。

在 6 GHz 以下频段，已有研究开发了基于雷达波形的雷达通信双功能 (DFRC, dual-function radar-communication) 系统<sup>[9]</sup>，通过广域索引调制在通信和雷达子系统之间灵活分配天线单元，从而在天线选择中嵌入额外的数据比特增加通信速率。原型系统测试了所提方法的角度分辨能力。然而，基于雷达波形的 DFRC 系统通信吞吐量相对有限，且解码复杂度通常较高。此外，文献[10]考虑分布式多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 系统，利用 Zadoff-Chu 序列进行

表 1 通信和定位一体化系统实现文献总结

文献	工作频段/GHz	工作带宽/MHz	天线配置	波形	工作方式	实测参数	平均定位误差
文献[9]	5.1	80	4 × 1 均匀线阵	啁啾	自发自收	角度	—
文献[10]	2.35	40	BS: 单天线 UE: 矢量信号分析仪	任意	上行定位	TDOA	0.42 m (100 m <sup>2</sup> 暗室)
文献[11]	77	2 000	les[J]. IEEE Internet 单喇叭天线模拟 29 天线)	单载波 Zadoff-Chu	自发自收	距离角度图	—
文献[12]	27.2	400	BS: 16×24 均匀面阵 UE: 2 × 8 均匀面阵	OFDM	下行定位	AOA AOD TOA	24.82 m (10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> 室外)

多径 TOA 估计,并进一步获取到达时间差(TDOA, time difference of arrival)以估计用户位置,在暗室中定位误差为 0.15~0.64 m。然而,分布式 MIMO 系统定位精度对分布式节点同步性能敏感,现有系统假设分布式节点完美同步且用户高度已知。

毫米波通信系统具有大带宽、大规模天线阵列和密集部署等特点,有望在进行高质量通信的同时实现高精度定位功能。然而毫米波路径损耗大,且硬件不理想,在实际环境中的定位性能有待验证。已有研究建立了低复杂度毫米波通信雷达一体化(JCR, joint communication-radar)硬件平台 JCR70<sup>[11]</sup>。该系统利用广义近似消息传递(GAMP, generalized approximate message passing)算法实现信道估计,形成距离-角度图像,从而对多目标进行区分。通过采集室内场景下的实测数据,进行低比特量化处理,验证了 2~4 bit 量化可以实现接近高精度模数转换器(ADC, analog-to-digital converter)的距离-角度图像恢复性能。针对室外场景,已有研究构建了毫米波原型系统,采用正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)波形,实测中考虑时钟同步误差和阵列朝向误差,利用已知用户设备(UE, user equipment)位置和估计的 LOS(line-of-sight)径角度及时延参数,估计基站(BS, base station)三维位置坐标<sup>[12]</sup>。

## 1.2 环境制图

环境制图是指通信系统从接收信号中提取反射或散射径参数,如 RSS、AOA、AOD、TOA 和 FOA 等,估计环境中反射或散射体的位置,并将其映射到无线环境地图中。通信和环境制图一体化系统实现文献总结如表 2 所示。

在收发分离系统架构下,文献[13]研究利用基站发送下行 OFDM 信号,在移动汽车顶端安装接收天线阵列,从接收信号中提取 AOA、AOD 和 TOA 参数,建立上述参数与用户位置、基站位置和环境中的反射或散射体位置的函数关系。室外实测结果表

明, TDOA 参数受无线传输环境变化影响较大,可能导致较差的估计结果;利用实测 AOA、AOD 和模拟往返时间(RTT, round-trip-time)参数能提高定位性能,但对 BS 阵列校准有较高要求,这种高精度校准通信通常不需要,但对定位和环境制图至关重要。总体而言,收发分离系统架构存在的挑战在于阵列校准、同步误差、仰角分辨率有限、波束方向图未知等。

在自发自收系统架构下,文献[14]基于 5G 系统新空口(NR, new radio)OFDM 波形,开发了以 UE 为中心的毫米波通信和环境制图一体化系统,通过将 UE 的喇叭天线按照 2°间隔机械旋转模拟波束扫描过程,UE 通过接收目标反射信号进行距离-角度图估计,并研究不同用户位置处获得距离-角度图的数据关联,分别设计动态和静态环境制图方法。自干扰是自发自收系统架构中面临的主要挑战之一,现有研究大多通过拉大收发天线阵列间距来降低实测系统自干扰的影响,距离实际系统应用仍有较大差距。

## 1.3 同时定位和环境制图

由于无线传输环境复杂多变,复杂多径和干扰使单次测量难以获得精确的环境信息。同时定位和环境制图(SLAM, simultaneously localization and mapping)通过将多个时刻获得的测量值与环境特征进行关联,实现对环境估计的不断修正,以增强环境估计性能,同时能够对用户自身的位置进行追踪。

无线传输环境中具有地标特性的部分可被抽象成环境特征。现有研究考虑光滑墙面等镜面反射表面,将基站相对于墙面的镜像定义为虚拟基站<sup>[15]</sup>。因此,经过墙面一次反射路径可以视为从虚拟基站发射的直射信号。环境特征被抽象成基站和虚拟基站的位置,SLAM 的目标转化成在获得用户位置的同时,对环境中基站和虚拟基站的位置进行估计。在文献[15]介绍的实测验证中,基站和用户均配置超宽带(UWB, ultra-wide-band)芯片,基站接收用户发送的超宽带信号并获取 TOA 参数以实现

表 2

通信和环境制图一体化系统实现文献总结

文献	工作频段/ GHz	工作带宽/ MHz	天线配置	波形	工作方式	实测参数	环境制图精度
文献[13]	27.2	400	BS: 16 × 24 均匀面阵 UE: 2 × 8 均匀面阵	OFDM	下行	AOA、AOD (模拟 RTT)	2 m (10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup> 室外)
文献[14]	28	400	UE: 2 个喇叭天线	OFDM	自发自收	距离角度图	2 m (50 m 长室内走廊)

SLAM。文献[16]利用频率为 2.7 Hz、带宽为 40 MHz 的信道探测器获取 TOA 参数以实现 SLAM。文献[15-16]的实测结果均表明，在室内环境下，利用无线信号实现定位和环境制图误差能达到分米级。

然而，上述原型系统尚未利用实际无线通信系统实现 SLAM。毫米波通信具有更大的带宽和天线阵列，本质上有助于获取更准确的到达时间和角度，从而为高精度 SLAM 提供了机会。然而，5G NR 受限的时频资源为感知功能可提供的量测非常有限。此外，受硬件系统天线数和相移器比特数的约束，毫米波天线阵列的波束成形角度精度也受到限制。这些都是实现毫米波通信和 SLAM 深度一体化面临的挑战。在不改变收发机架构和 5G NR 帧结构的条件下，已有研究搭建了 28 GHz 毫米波通信系统，复用 5G NR 波束管理过程，获取多径 AOA 和 AOD 参数，实现了纯角度 SLAM 算法<sup>[17-18]</sup>，并首次验证了复用毫米波通信系统实现 SLAM 的可行性。实测结果均表明，在空旷大厅和复杂走廊环境下，定位和环境制图误差能达到分米级。

环境特征对通信和定位均有帮助。当获取基站和虚拟基站位置后，移动用户将波束对准基站和虚拟基站可以降低波束管理开销，多点定位也可以实现。因此，构建包含基站和虚拟基站位置信息的环境地图具有潜在应用价值。

### 1.4 成像

成像是通过接收和处理感兴趣区域的反射信号，以获得该区域内目标散射系数分布的过程，如图 1 所示。将成像功能整合到通信系统中，可以复用通信系统的硬件设备和计算资源，以实现低成本环境感知。

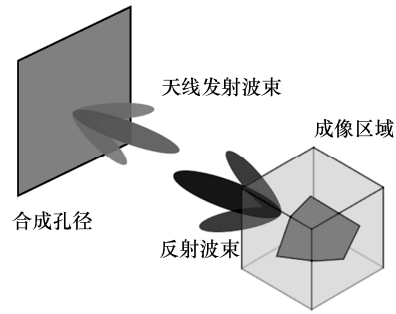


图 1 成像场景

通信和成像一体化系统实现文献总结如表 3 所示。针对非视距 (NLOS, non-line-of-sight) 成像问题，已有研究考虑利用镜面反射径，对直达径受阻的物体进行成像<sup>[19]</sup>，并通过使用 220~300 GHz 的合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 成像原型系统验证了所提同时定位和成像算法。针对近场 3D 成像问题，已有研究在 3~19.5 GHz 频段，利用 25 个反向 Vivaldi 天线构成天线阵列，通过实测验证了所提多天线距离偏移技术可以实现实时 3D 近场成像<sup>[20]</sup>。此外，文献[21]提出使用新型圆柱形阵列天线的毫米波全息成像方案，实测中将目标固定在转台上，利用线性天线阵列通过目标旋转模拟圆柱形阵列天线的扫描，实际系统工作频率为 30~36 GHz<sup>[21]</sup>。由于太赫兹频段具有高精度成像的能力，已有研究搭建了 140 GHz 频段的原型系统<sup>[22]</sup>，用于验证稀疏扫描合成虚拟孔径进行成像的有效性，并对不同波形的成像效果进行对比。进而，文献[23]提出在不改变通信协议的条件下，利用 28 GHz 毫米波通信系统实现 3D 雷达成像，通过融合 OFDM 信号多个载频反射信号的 TOA 测量提高距离分辨率，测距精度达到 15 cm。

随着智能超表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 的发展，RIS 逐渐被认为是下一代移动通

表 3 通信和成像一体化系统实现文献总结

文献	工作频段/ GHz	成像技术	实测效果
文献[19]	220~300	SAR 成像	2D 同时用户定位和反射面成像
文献[20]	3~19.5	SAR 成像	3D 目标散射系数图像
文献[21]	30~36	SAR 成像	3D 目标散射系数图像
文献[22]	140	压缩感知辅助的 SAR 成像	3D 目标散射系数图像
文献[23]	28~29	基于波束成形的雷达测距	3D 测距深度图，测距精度 15 cm
文献[24]	9.2	基于 RIS 的线性逆散射求解	2D 金属贴片成像
文献[25]	3.198	基于 RIS 的线性逆散射求解	2D 空间点云成像

信系统的关键使能技术之一。通过改变 RIS 单元的相移，可以智能地调控无线信号的传输信道，实现信号增强和信道定制等功能。已有研究基于 2 bit 可编程超表面的单传感器和单载频成像系统，对平面金属物体进行成像<sup>[24]</sup>，通过对 2 bit 可编程超表面行和列同时控制，可随机改变可编程超表面的掩模，相比传统单传感器成像方法，可以极大地降低成本和馈电电路的复杂性。此外，文献[25]提出了一种新型的无线感知系统 MetaSketch，通过引入 RIS 实现对无线环境的重新配置，增加无线信号携带信息的多样性，使用压缩感知技术重建了由人和物体在不同空间点反射系数组成的点云图像，并对人和物体进行语义识别和分割，实测系统在室内空间中具有小于 1% 的语义分割平均错误率。

虽然成像技术已有广泛研究，但通信成像一体化实验验证工作仍少有涉及。未来的通信成像一体化研究需要结合通信系统的有限孔径尺寸和有限时频资源进行联合的算法和硬件设计。

### 1.5 波束追踪

环境感知结果可以辅助毫米波的波束管理策略设计，例如移动用户知道基站和虚拟基站的位置，直接将波束指向相应的基站和虚拟基站，基站利用获取的用户位置追踪用户波束方向，从而大幅降低波束管理的开销，场景如图 2 所示。

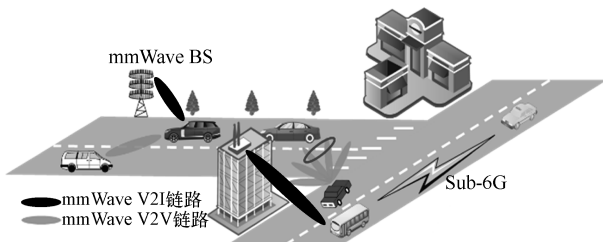


图 2 波束追踪场景

现有研究针对车联网场景中的波束追踪问题，提出了基于车辆行为认知粒子滤波器的波束追踪算法<sup>[26]</sup>，通过估计波束变化率和位置偏航来预测波束空间子集，以减少波束搜索开销，并构建了基于 5G NR 帧结构的 28 GHz 毫米波原型验证平台，该平台采用 OFDM 波形，工作带宽为 800 MHz，采用 64 单元均匀面阵，最小波束宽度为 15°。实验中接收机位置固定，发射机以 1 m/s 做匀速直线运动，收发两端利用毫米波通信技术保障车辆间的低时延和高速率信息共享。实测结果表明，利用感知结果辅助波束追踪实现了 250 ms 的波束对齐时延，优于传统波束追踪算法。

### 1.6 波形设计

传统的感知信号并不是为通信而设计的，同样，用于通信的信号也不以提供感知功能为目标。通过时分复用、频分复用或空分复用等模式管理通信和感知信号会造成资源浪费。为了实现通信和感知的深度一体化，已有研究聚焦通信感知一体化波形的设计和测试。

通过优化 OFDM 波形中资源块的功能分配，以及子载波的功率分配，权衡通信和感知的性能，如图 3 所示。针对全双工系统，文献[27]通过联合最小化时延和多普勒估计下限来优化 OFDM 波形，并利用 28 GHz 毫米波通信系统，在户外场景下对比未优化和优化的 5G NR 波形，验证了波形优化能为环境地图估计性能带来可观增益。针对多用户场景，已有研究开发了 2.4 GHz 多用户 MIMO 系统，研究了 OFDM 波形优化中通信和感知性能的权衡<sup>[28]</sup>。由于天线数量和带宽大小的限制，该系统尚未实现测距和测角能力。在通信方面，利用测试平台输出误码率（BER, bit error rate）结果；在感知方面，测量系统输出的波束图，验证了对障碍物存在性的检测。实验结果表明，当使用全向辐射波形时，相对于纯通信波形，通信感知一体化波形的 BER 性能下降 2.5 dB，当使用定向辐射波形时 BER 性能损失扩大到 8 dB，此外，通信感知一体化波形以 4 dB 的保护间隔正确检测障碍物的存在性。

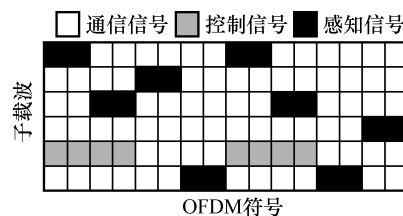


图 3 波形设计场景

综上所述，单一通信节点的感知能力已得到初步验证，包括通信系统实现定位、环境制图和成像等应用。然而，现有原型验证系统研究仍较少考虑实际通信系统帧结构、时频空资源和硬件不理想特性的限制。此外，现有研究中针对感知辅助通信设计进行的原型验证较少，目前仅有少量研究涉及波束追踪和波形设计，感知对通信的辅助有待进一步探索。

## 2 基于多点协作的通信感知一体化原型验证

单节点受工作范围和条件限制，难以实现大范围、高精度的环境感知。利用多个通信节点进

行协作感知,有望在感知精度、收敛速度和鲁棒性等方面获得提升。无线通信网络为多节点协作提供信息共享通道,能够显著增强网络的感知能力。然而,针对资源受限场景,基于网络的通信感知一体化需要设计合理的多节点调度策略,以及低开销的节点间信息交互方案。

## 2.1 车联网

传感器故障和障碍物阻挡等问题导致车辆获得的环境感知结果不可靠,因此自动驾驶汽车之间通过感知数据共享形成高效可靠的合作至关重要,可以提高自动驾驶网络的安全性。

针对车联网场景,如图 4(a)所示,现有研究考虑利用毫米波通信技术实现自动驾驶汽车之间的协作<sup>[29-30]</sup>。文献[29]提出了时分通信和感知一体化(TD-ISAC, time-division integrated sensing and communication)系统,开发了基于 OFDM 波形的 28 GHz 毫米波 TD-ISAC 原型验证平台,工作带宽为 800 MHz。考虑室内实测场景,结果表明,将间隔 5 m 放置的两套 TD-ISAC 系统所得移动目标角度和时延测量数据进行融合,可以降低 18.5% 的目标位置估计误差,同时通信吞吐量保持在 2.2 Gbit/s 以上。文献[30]构建了以基于 5G NR 通信系统为中心的 ISAC 原型验证平台,探索通信与感知子系统的性能折中,其中通信聚合带宽为 800 MHz,感知带宽为 100 MHz。考虑室内实测场景,利用间隔 2.7 m 的两套 ISAC 系统,对以 1 m/s 做圆周运动的目标发射通信信号,并接收来自目标角反射器的回波信号实现感知功能。实测结果表明,通过两套 ISAC 系统协作,定位精度相比单一 ISAC 系统提升 61%,同时能保证 2.8 Gbit/s 的通信吞吐量。

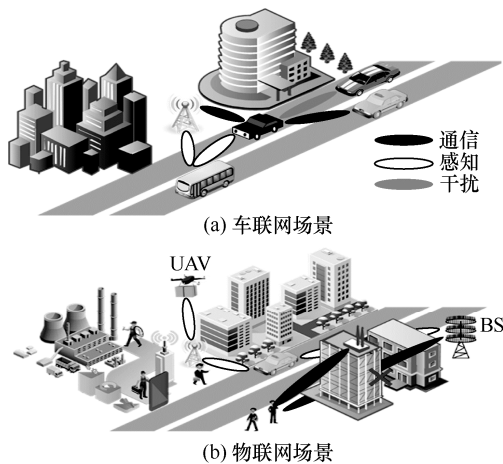


图 4 基于网络的通信感知一体化场景

## 2.2 物联网

在通信基础设施和时频资源受限的物联网场景中,网络定位与导航通过节点间的时空合作,提供缺失的定位信息,在紧急搜救等场景中具有重要应用价值。

针对物联网场景,如图 4(b)所示,已有研究考虑多节点协作 SLAM 策略<sup>[31-32]</sup>。文献[31]设计了节点推断与网络计算策略,结合 UWB 技术开发了 Peregrine 系统,实现 3D 定位与网络计算。在单层和多层的室内场景进行实测,结果表明, Peregrine 系统在 3D 位置估计、网络计算速率及节点优先级分配等方面性能优越,能够在恶劣无线电传播环境下实现可靠定位。文献[32]提出了一种基于多机器人高斯混合模型的建图系统,减小占用网格地图数据量,为通信资源受限设备节省传输和存储开销。考虑室内实测场景,实测结果表明,传输高斯混合模型子地图相比点云地图传输量减少了 98%,通过 2 个机器人协作,相对位姿估计的平均平移和旋转误差分别降低 11% 和 30%。

现有多节点协作研究中,多节点通过各自获取感知参数或感知结果后,将感知参数/感知结果传输至云端或中心节点处进行融合来形成合作,其中信息共享和融合方法是现有研究的重点,然而,现有的多点协作通信感知一体化原型验证系统大多考虑 2 个节点的协作,尚未考虑动态节点组网以及节点间干扰等问题。

## 3 基于跨设备的通信感知一体化原型验证

随着智能通信设备的发展,基站和终端通常集成多种类型的传感器。不同于第 2 节所讨论的多通信节点的协作,本节将设备类型从通信设备拓展至更广泛的专用传感设备,如惯性传感器、视觉传感器、毫米波雷达、激光雷达光探测和测距(LiDAR, light detection and ranging)等。不同传感器优势互补,通过协作辅助通信感知一体化系统,同时增强感知与通信性能。

### 3.1 单一传感器设备辅助

现有基于跨设备的通信感知一体化原型验证系统大多考虑单一类型传感器对通信系统的辅助,其应用场景主要分为遮挡预测<sup>[33-36]</sup>和波束预测<sup>[37-40]</sup>两类,如图 5 所示。图 5(a)描述了遮挡预测场景,用户与基站分别处于道路两侧,基于传感器的感知结果判断波束传输路径是否被动态遮挡,从而使基

站和用户提前进行接入切换或波束切换，保证可靠的链路通信。图 5(b)描述了波束预测场景，基站位于道路一侧，用户处于移动状态，基于传感器的感知结果对波束方向变化进行预测，从而降低波束追踪开销，提升通信性能。

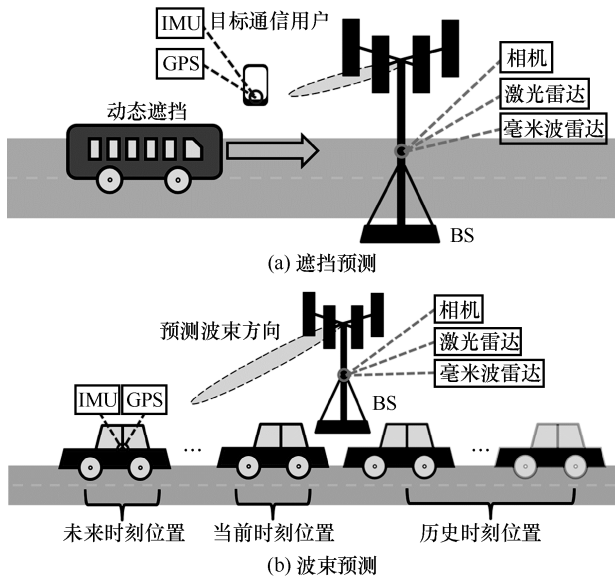


图 5 基于跨设备的通信感知一体化场景

单一传感器设备辅助文献总结如表 4 所示。现有遮挡预测研究考虑基站和用户位置固定，基站和用户之间的 LOS 径可能会被移动物体遮挡<sup>[33-36]</sup>。针对这

一场景，文献[33]通过采集毫米波通信系统接收信号强度，形成预遮挡无线指纹，设计循环神经网络（RNN, recurrent neural network）预测遮挡发生的时间、类型和遮挡物移动方向。通过大量室内和室外实测数据分析，实验结果表明所提算法对 20 ms 内遮挡预测的成功率高于 85%。已有研究进一步考虑引入 LiDAR 的辅助，利用卷积神经网络（CNN, convolutional neural network）处理 LiDAR 点云图，首次实现 LiDAR 辅助的毫米波遮挡预测，1 s 内遮挡预测的成功率相比无 LiDAR 辅助提高 45%<sup>[34]</sup>。文献[35]考虑利用调频连续波（FMCW, frequency modulated continuous wave）雷达测量辅助毫米波通信遮挡预测，利用 CNN 处理雷达图像，实验表明所提算法对 1 s 内遮挡预测的成功率高于 90%。除此之外，文献[36]考虑视觉信息辅助的毫米波通信遮挡预测，实验表明 1 s 内遮挡预测成功率达到 80% 左右。

现有波束预测研究考虑基站固定且用户移动场景，通过分析用户移动状态预测用户和基站之间下一时刻 LOS 径的波束方向<sup>[37-42]</sup>。文献[37]考虑商用全球定位系统（GPS, global positioning system）对波束预测的辅助效果，实验结果表明所提神经网络算法相比穷举算法波束训练开销降低 70%。文献[38]通过实测证明 FMCW 雷达辅助的波束预测算法相

表 4 单一传感器设备辅助文献总结

设备类型	输出数据	特点	文献	实现功能	所提方案	预测效果
毫米波通信系统	毫米波接收信号	与电磁波传输环境高度耦合，但路径损耗高且易受阻挡	文献[33]	阻隔预测	无线指纹提取+RNN	20 ms 内阻隔遮挡预测成功率高于 85%
GPS	目标经纬坐标	室外实现粗略定位，但室内通常失效	文献[37]	波束预测	神经网络	相比穷举算法，波束训练开销降低 70%
相机	RGB 图像	包含丰富环境信息，但易受光线条件影响	文献[36]	阻隔预测	MIRNet+深度神经网络	1 s 内阻隔遮挡预测成功率约为 80%
			文献[40]	波束预测	自编码器网络	相比穷举算法，波束训练开销降低 99%
			文献[41]	波束预测	语义信息提取+神经网络	相比直接使用 RGB 图像，网络参数量降低约 83%
			文献[42]	波束预测	离线预测+在线追踪	相比使用离线方案，波束预测精度提升约 15%
FMCW 雷达	雷达回波信号	检测目标范围广，但易受射频干扰影响	文献[35]	阻隔预测	CNN	1 s 内阻隔遮挡预测成功率高于 90%
			文献[38]	波束预测	深度神经网络	相比穷举算法，波束训练开销降低 93%
LiDAR	激光点云	检测目标精度高，但易受雨雾天气影响	文献[34]	阻隔预测	CNN	1 s 内阻隔遮挡预测成功率相比无 LiDAR 提升 45%
			文献[39]	波束预测	RNN	相比穷举算法，波束训练开销降低 90%

比穷举算法波束训练开销降低 93%。LiDAR 同样被实验验证能够辅助波束预测, 相比穷举算法波束训练开销降低 90%<sup>[39]</sup>。利用 RGB 相机采集视觉信息, 通过设计自编码器网络, 波束训练开销相比穷举算法降低 99%<sup>[40]</sup>。进而, 文献[41]通过实验验证在波束预测精度和训练开销相似的情况下, 使用语义信息比使用原始 RGB 图像信息的网络参数量降低约 83%。现有研究通过实测表明, 通过离线采集 RGB 图像信息进行波束方向粗估计, 再结合在线阶段估计用户动态信息, 相比仅使用离线阶段波束预测精度提升约 15%<sup>[42]</sup>。

### 3.2 多元传感器设备融合

现有研究考虑的传感器设备包括毫米波通信系统、GPS、相机、毫米波雷达和激光雷达等, 各类型传感器均有受自身特点、应用场景和感知能力限制, 因此需要融合多元传感器提升系统综合感知能力和对通信系统的辅助能力。

针对多元传感器设备融合对感知能力提升验证的研究较多, 包括生命体征检测<sup>[43]</sup>、视频伪造检测<sup>[44]</sup>、人体姿态估计<sup>[45]</sup>、人类活动识别<sup>[46]</sup>、视觉目标追踪<sup>[47]</sup>等多种感知应用。文献[43]提出了一种用于监测生命体征的毫米波雷达和相机融合系统, 利用相机帮助毫米波雷达准确定位感兴趣的物体, 让系统在动态场景中可以始终表现良好。文献[44]提出了一种基于 Wi-Fi 的跨模态视频伪造检测系统, 基于信号传播原理从 Wi-Fi 信号中构建监控区域内物体的波前信息恢复物体轮廓, 再将视频轮廓提取的语义特征向量与从 Wi-Fi 轮廓提取的特征向量进行比较, 来确定视频帧是否被伪造。此外, 有研究通过无线肌电图捕捉肌肉活动模式, 抵消毫米波无线传感高路径损耗带来的姿态估计局限性, 实现支持虚拟现实应用的多模态姿态估计<sup>[45]</sup>。文献[46]基于信道状态信息 (CSI, channel state information) 和 RGB 图像模态, 提出了精确人类活动识别任务的通用多模态融合框架, 利用同步 CSI 和 RGB 图像人类活动数据集, 验证了所提多模式融合设计与单峰方法相比的优势。文献[47]根据手机传感器采集的数据, 包括惯性传感器和精细时间测量, 重建视觉边界框轨迹, 然后将检测到的边界框关联到视频帧中, 实现目标追踪, 在大规模多模态 Vi-Fi 数据集中验证了所提算法的优势。

关于多种传感器信息融合辅助通信的研究逐

渐起步<sup>[48-51]</sup>, 并且大多基于 DeepSense 6G 数据集<sup>[52]</sup>。其中, LiDAR 与相机融合进行遮挡和波束方向预测方案已有研究<sup>[48]</sup>, 首先基于 LiDAR 点云对波束方向进行预测, 进而利用双目相机获取图像信息对波束方向是否被阻隔进行预测, 所提方案相比无传感器辅助的传统通信系统, 在受到遮挡情况下, 系统信噪比能够提升约 10 dB。文献[49]将 LiDAR 点云与毫米波指纹相结合, 通过毫米波指纹特征提取、LiDAR 点云特征提取、数据融合特征提取和预测 4 个网络, 实现遮挡预测功能, 输出遮挡程度和遮挡物移动方向等信息。此外, 将 GPS 二维位置坐标向量与利用 ResNet 提取的图像特征向量直接拼接输入神经网络进行训练<sup>[50]</sup>, 在 2D 实测场景下, 实现优于仅利用图像或 GPS 算法波束预测的性能。进一步加入高度和距离信息, 利用实测数据验证了所提算法在 3D 场景下的有效性<sup>[51]</sup>。

基于多元传感器融合的通信感知一体化原型验证研究尚处于起步阶段, 现有研究大多局限在两种传感器信息的融合上, 融合方式较为原始, 感知辅助通信的应用场景局限在遮挡预测和波束预测两类。

## 4 发展趋势

### 4.1 典型场景

未来通信感知一体化将拓展更广阔的应用场景, 包括高精度定位与追踪、同时定位与环境制图、高分辨率成像、人类感官增强、动作识别和表情识别等, 应用惠及工业、农业、医疗等众多领域。目前, 基于 Wi-Fi 的感知应用原型验证平台相对丰富, 包括机器人避障<sup>[53]</sup>、生命体征监测<sup>[54]</sup>、土壤湿度检测<sup>[55]</sup>、穿墙成像<sup>[56]</sup>等。基于 5G 和 6G 系统的原型验证平台大多聚焦于高精度定位与追踪, 为了促进更多通信感知一体化应用落地, 亟待针对上述典型应用开展更全面的实测试验, 分析和克服其在实际系统设计中面临的挑战。

### 4.2 波形设计

通信和感知在资源与性能上的权衡是未来通信感知一体化波形设计的核心挑战。无论是设计通信常用 OFDM 波形进行感知, 改进雷达常用 FMCW 波形实现通信, 还是设计全新的通信感知一体化波形, 都需经过大量实测试验, 解决实际系统中的诸多问题, 例如收发端的不完美同步、峰均比、频谱效率等问题。

### 4.3 硬件失真

共享通信和感知的硬件可以降低整体成本和功耗, 以及通信和感知信息交互的时延。然而, 通信和感知对硬件的要求差异明显, 基于传统通信系统的硬件架构实现感知功能, 需要深入分析实际硬件失真对感知性能的影响。例如, 采样抖动、低精数量化、时钟漂移、载频偏移、相位噪声、通道不一致性、功放非线性、波束方向图偏差等, 未来需考虑上述硬件失真的影响, 进行充分的实测分析。

### 4.4 网络协同感知

通过移动通信网络支持多节点协作感知, 多节点涵盖传统基站、移动终端、RIS<sup>[57]</sup>、无人机<sup>[58]</sup>等多元形态。多节点通过网络分享感知结果, 通过协作加速环境感知结果收敛, 增强感知性能。此外, 单一传感器对整体环境信息的感知能力有限, 需进一步加入视觉传感器、惯性传感器和激光雷达等外部设备的辅助, 减少测量的不确定性。因此, 需要构建多节点协作和跨设备辅助的通信感知一体化原型验证平台, 揭示网络协同感知设计带来的实际增益。

### 4.5 感知辅助通信

现有研究大多将感知作为一项额外服务引入传统通信系统中, 未来需要进一步研究如何利用感知信息提升通信性能。例如, 在毫米波等更高通信频段, 随着传播信道确定性和可预测性的提升, 感知信息在提高波束对准效率、增强信道估计准确度、降低通信导频开销等方面将发挥更大作用, 亟须开展相关实测试验工作, 针对实际通信环境设计感知辅助策略, 揭示感知辅助增益。

### 4.6 原型验证智能化

未来通信感知一体化系统实现研究应考虑与人工智能的深度融合, 在数据采集、数据清洗、数据融合、波形优化、失真校准、通信感知资源分配和协同等各环节融入智能算法, 结合在线学习策略, 根据实际传输和感知性能自适应地调整一体化方案, 实时调节网络参数, 以应对动态变化的实际无线传输环境。

## 5 结束语

本文面向通信感知一体化技术落地将面临的实际挑战, 全面阐述和总结了通信感知一体化系统实现和未来发展趋势。首先, 概括了基于单节点的通信感知一体化原型验证系统在定位、环境制图、

成像、波形设计和波束追踪等方面的研究进展和性能表现。接着, 从车联网和物联网场景入手, 分析了基于网络的通信感知一体化原型系统的实际增益。然后, 聚焦基于跨设备的通信感知一体化原型验证, 总结了各传感器的优势劣势和融合效果。最后, 针对现有系统遇到的问题和挑战, 指出了通信感知一体化系统实现和技术验证的研究趋势。

### 参考文献:

- [1] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 前沿关键技术研究报告[R]. 2022.  
IMT-2030 (6G) Propulsion Group. 6G frontier key technology research report[R]. 2022.
- [2] 童文, 朱佩英. 6G 无线通信新征程: 跨越人联 物联 迈向万物智联[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.  
TONG W, ZHU P Y. 6G the next horizon: from connected people and things to connected intelligence[J]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [3] CUI Y H, LIU F, JING X J, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: applications, trends, and challenges[J]. IEEE Network, 2021, 35(5): 158-167.
- [4] PIN T D K, HE J, LI Y C, et al. Integrated sensing and communication in 6G: motivations, use cases, requirements, challenges and future directions[C]//Proceedings of 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [5] LIU F, CUI Y H, 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.
- [6] LIU A, HUANG Z, LI M, et al. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 994-1034.
- [7] ZHANG J A, LIU F, 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.
- [8] YANG J, XU J, LI X, et al. Integrated communication and localization in millimeter-wave systems[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(4): 457-470.
- [9] MA D Y, SHLEZINGER N, HUANG T Y, 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.
- [10] KESKIN M F, SEZGIN I C, BAO H, et al. Localization with distributed MIMO using a high-speed sigma-delta-over-fiber testbed[J]. IEEE

- Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(7): 923-926.
- [11] KUMARI P, MEZGHANI A, 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.
- [12] GE Y, CHEN H, JIANG F, et al. Experimental validation of single base station 5G mmWave positioning: initial findings[C]//Proceedings of 25th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-8.
- [13] GE Y, KHOSRAVI H, JIANG F, et al. Experimental validation of single BS 5G mmWave positioning and mapping for intelligent transport[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2303.11995, 2023.
- [14] BARNETO C B, RASTORGUEVA-FOI E, KESKIN M F, et al. Millimeter-wave mobile sensing and environment mapping: models, algorithms and validation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 3900-3916.
- [15] LEITINGER E, MEYER F, HLAWATSCH F, et al. A belief propagation algorithm for multipath-based SLAM[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(12): 5613-5629.
- [16] LI X H, LEITINGER E, OSKARSSON M, et al. Massive MIMO-based localization and mapping exploiting phase information of multipath components[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(9): 4254-4267.
- [17] YANG J, WEN C K, YANG X, et al. Multi-domain cooperative SLAM: the enabler for integrated sensing and communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 40-49.
- [18] YANG J, WEN C K, XU J, et al. Angle-based SLAM on 5G mmWave systems: design, implementation, and measurement[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(20): 17755-17771.
- [19] ALADSANI M, ALKHATEEB A, TRICHOPOULOS G C. Leveraging mmWave imaging and communications for simultaneous localization and mapping[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2019: 4539-4543.
- [20] ZHUGE X D, YAROVYOY A G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2012, 21(6): 3026-3033.
- [21] GAO J K, DENG B, QIN Y L, et al. An efficient algorithm for MIMO cylindrical millimeter-wave holographic 3-D imaging[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(11): 5065-5074.
- [22] LI O P, HE J, ZENG K, et al. Integrated sensing and communication in 6G A prototype of high resolution THz sensing on portable device[C]//Proceedings of Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit. Piscataway: IEEE Press, 2021: 544-549.
- [23] GUAN J F, PAIDIMARRI A, VALDES-GARCIA A, et al. 3-D imaging using millimeter-wave 5G signal reflections[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(6): 2936-2948.
- [24] LI Y B, LI L L, XU B B, et al. Transmission-type 2-bit programmable metasurface for single-sensor and single-frequency microwave imaging[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23731.
- [25] HU J Z, ZHANG H L, BIAN K G, et al. MetaSketch: wireless semantic segmentation by reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 5916-5929.
- [26] ZHANG Q X, JI K J, FENG Z Y, et al. Vehicle behavior-cognition-based particle-filter-enabled mmWave beam tracking for connected automated vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(21): 21292-21304.
- [27] LIYANAARACHCHI S D, RIIHONEN T, BARNETO C B, et al. Optimized waveforms for 5G-6G communication with sensing: theory, simulations and experiments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 8301-8315.
- [28] XU T Y, LIU F, 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.
- [29] ZHANG Q X, SUN H Z, GAO X Y, 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.
- [30] JI K J, ZHANG Q X, WEI Z Q, et al. Networking based ISAC hardware testbed and performance evaluation[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 76-82.
- [31] TEAGUE B, LIU Z Y, MEYER F, et al. Network localization and navigation with scalable inference and efficient operation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(6): 2072-2087.
- [32] DONG H L, YU J C, XU Y F, et al. MR-GMMapping: communication efficient multi-robot mapping system via Gaussian mixture model[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 3294-3301.
- [33] WU S Y, ALRABEIAH M, CHAKRABARTI C, et al. Blockage prediction using wireless signatures: deep learning enables real-world demonstration[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, 3: 776-796.
- [34] WU S Y, CHAKRABARTI C, ALKHATEEB A. LiDAR-aided mobile blockage prediction in real-world millimeter wave systems[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2631-2636.

- [35] DEMIRHAN U, ALKHATEEB A. Radar aided proactive blockage prediction in real-world millimeter wave systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4547-4552.
- [36] CHARAN G, ALKHATEEB A. Computer vision aided blockage prediction in real-world millimeter wave deployments[C]//Proceedings of IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1711-1716.
- [37] MORAIS J, BEHBOODI A, PEZESHKI H, et al. Position aided beam prediction in the real world: how useful GPS locations actually are[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2205.09054, 2022.
- [38] DEMIRHAN U, ALKHATEEB A. Radar aided 6G beam prediction: deep learning algorithms and real-world demonstration[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2655-2660.
- [39] JIANG S F, CHARAN G, ALKHATEEB A. LiDAR aided future beam prediction in real-world millimeter wave V2I communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(2): 212-216.
- [40] JIANG S F, ALKHATEEB A. Computer vision aided beam tracking in a real-world millimeter wave deployment[C]//Proceedings of IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2023: 142-147.
- [41] IMRAN S, CHARAN G, ALKHATEEB A. Environment semantic aided communication: a real world demonstration for beam prediction[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2302.06736, 2023.
- [42] ZHANG Q X, ZHANG X Q, YANG C. Camera-sensing-assisted fast mmWave beam tracking for connected automated vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(20): 20630-20639.
- [43] WANG Y Q, WANG Z Q, ZHANG J A, et al. Vital sign monitoring in dynamic environment via mmWave radar and camera fusion[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, PP(99): 1-17.
- [44] FANG X Y, LIU J W, CHEN Y K, et al. Nowhere to hide: detecting live video forgery via vision-WiFi silhouette correspondence[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-10.
- [45] BHAT N N, SAMERI J, STRUYE J, et al. Multi-modal pose estimation in XR applications leveraging integrated sensing and communication[C]//Proceedings of the 1st ACM Workshop on Mobile Immersive Computing, Networking, and Systems. New York: ACM Press, 2023: 261-267.
- [46] ZHOU F J, ZHU G X, LI X Y, et al. Towards pervasive sensing: a multimodal approach via CSI and RGB image modalities fusion[C]//Proceedings of the 3rd ACM MobiCom Workshop on Integrated Sensing and Communications Systems. New York: ACM Press, 2023: 25-30.
- [47] CUI Y H, NIE J L, YU T K, et al. Sensing-assisted communication beamforming based on multi-modal feature extraction for high-reliable IoV[C]//Proceedings of the 3rd ACM MobiCom Workshop on Integrated Sensing and Communications Systems. New York: ACM Press, 2023: 19-24.
- [48] ZHANG T Y, LIU J, GAO F F. Vision aided beam tracking and frequency handoff for mmWave communications[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-2.
- [49] WU S Y, CHAKRABARTI C, ALKHATEEB A. Proactively predicting dynamic 6G link blockages using LiDAR and In-band signatures[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2023, 4: 392-412.
- [50] CHARAN G, OSMAN T, HREDZAK A, et al. Vision-position multi-modal beam prediction using real millimeter wave datasets[C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2727-2731.
- [51] CHARAN G, HREDZAK A, STODDARD C, et al. Towards real-world 6G drone communication: position and camera aided beam prediction[C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2023: 2951-2956.
- [52] ALKHATEEB A, CHARAN G, OSMAN T, et al. DeepSense 6G: a large-scale real-world multi-modal sensing and communication dataset[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2211.09769, 2022.
- [53] YUE S C, HE H, CAO P, et al. CornerRadar: RF-based indoor localization around corners[C]//Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. New York: ACM Press, 2022: 1-24.
- [54] LI X Y, CUI Y H, ZHANG J A, et al. Integrated human activity sensing and communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 90-96.
- [55] CHANG Z X, ZHANG F S, XIONG J, et al. Sensor-free soil moisture sensing using LoRa signals[C]//Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. New York: ACM Press, 2022: 1-27.
- [56] LI S J, LIU Z P, ZHANG Y, et al. WiBorder: precise Wi-Fi based boundary sensing via through-wall discrimination[C]//Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. New York: ACM Press, 2020: 1-30.
- [57] KEYKHOSRAVI K, DENIS B, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Leveraging RIS-enabled smart signal propagation for solving infeasible localization problems[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2204.11538, 2022.
- [58] CUI Y P, FENG Z Y, ZHANG Q X, et al. Toward trusted and swift UAV communication: ISAC-enabled dual identity mapping[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 58-66.

[作者简介]



杨杰 (1993- )，女，安徽六安人，博士，东南大学讲师、硕士生导师，主要研究方向为移动通信、智能感知、通信感知一体化等。



阚杭 (1997- )，男，江苏南通人，东南大学博士生，主要研究方向为毫米波通信、通信感知一体化技术等。



黄艺璇 (1999- )，男，河南驻马店人，东南大学博士生，主要研究方向为通信感知一体化、可重构智能超表面等。



夏树强 (1976- )，男，河南鹤壁人，中兴通讯股份有限公司正高级工程师，主要研究方向为载波聚合、低时延高可靠、通信感知一体化的关键算法设计和标准预研等。



杜涛 (1995- )，男，江苏句容人，东南大学博士生，主要研究方向为通信感知一体化、大规模 MIMO 天线校准技术等。



金石 (1974- )，男，安徽黄山人，博士，东南大学教授、博士生导师，主要研究方向为 5G/B5G 移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术、机器学习与大数据处理在移动通信中的应用等。