

# 控制与决策

Control and Decision

感知协同移动太赫兹通信：理论、技术与应用

彭木根, 杨闯, 张红杰, 陈捷瑞

引用本文:

彭木根, 杨闯, 张红杰, 等. 感知协同移动太赫兹通信：理论、技术与应用[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 705-720.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1055>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于深度学习的仿生集群运动智能控制

Intelligent control of bionic collective motion based on deep learning

控制与决策. 2021, 36(9): 2195-2202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0071>

#### 一种结合内在动机理论的移动机器人环境认知模型

An environment cognition model combined with intrinsic motivation for mobile robots

控制与决策. 2021, 36(9): 2211-2217 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1744>

#### 基于无线携能通信的传感云系统Sink节点最优能效策略

Optimal energy efficiency optimization strategy for SWIPT-enabled sensor-cloud system

控制与决策. 2021, 36(8): 1929-1938 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1628>

#### 基于图卷积网络的行为识别方法综述

A survey of action recognition methods based on graph convolutional network

控制与决策. 2021, 36(7): 1537-1546 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0514>

#### 基于影响度介数中心性的多智能体牵制控制算法

Multi-agent pinning control algorithm based on betweenness centrality with influence degree

控制与决策. 2021, 36(6): 1442-1448 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1106>

# 感知协同移动太赫兹通信: 理论、技术与应用

彭木根, 杨 闯<sup>†</sup>, 张红杰, 陈捷瑞

(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 移动太赫兹通信将赋能车联网、大容量无线回传、全息通信等未来业务愿景, 为应对移动性和路径损耗带来的链路传输挑战, 必然要发展太赫兹大规模天线阵列通信. 然而, 大规模阵列天线窄波束对准与追踪制约了其移动性. 鉴于此, 总结移动太赫兹通信需求、现状与技术瓶颈, 提出感知协同方案. 首先综述针对瓶颈问题提出的基础理论, 包括感知协同通信性能指标建模、性能均衡建模, 以及时分、频分体制下的感知协同方案; 然后总结感知协同太赫兹移动通信技术, 包括波束赋形、信道估计、信道追踪、用于系统设计的感知协同通信仿真平台; 最后介绍感知协同移动太赫兹通信的应用实验, 分别实现了太赫兹通信系统测距、太赫兹大规模液晶相控阵通信以及感知协同太赫兹大规模液晶相控阵移动通信, 验证了所提出技术的性能增益.

**关键词:** 太赫兹; 感知协同; 移动; 通信

中图分类号: TN92 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1055

引用格式: 彭木根, 杨闯, 张红杰, 等. 感知协同移动太赫兹通信: 理论、技术与应用 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 705-720.

## Sensing assisted mobile terahertz communication: Theory, technology and applications

PENG Mu-gen, YANG Chuang<sup>†</sup>, ZHANG Hong-jie, CHEN Jie-ru

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Mobile terahertz communication will enable future business visions such as internet of vehicles, high-capacity wireless backhaul, and holographic communication. In order to cope with the challenge of link transmission caused by mobility and path loss, it is necessary to develop terahertz large-scale antenna array communication. However, narrow-beam alignment and tracking of large-scale array antennas restrict mobility. The demand, present situation and technical bottleneck of mobile terahertz communication are summarized. Firstly, the basic theory of bottleneck is summarized, including performance index modeling, performance equilibrium modeling, and perceptual cooperation scheme under time-division and frequency division system. After that, the technology of perceptive cooperative terahertz mobile communication is summarized, including beamforming, channel estimation, channel tracking, simulation platform of perceptive cooperative communication for system design. Finally, the application test of sensing cooperative mobile terahertz communication is introduced, and the terahertz communication system ranging, terahertz large-scale liquid crystal phased array communication and sensing cooperative large-scale liquid crystal phased array mobile communication are respectively realized, and the performance gain of the proposed technology is verified.

**Keywords:** terahertz; sensing assisted; mobile; communication

## 0 引言

无线移动通信系统的发展以 10 年为一个节点, 不断向高频段和大带宽演进<sup>[1]</sup>. 根据 Edholm 定律预测, 在 2030 年之前即可实现逼近有线传输速率的 Tbit/s 量级的无线通信<sup>[2]</sup>. 第 5 代移动通信系统 (the

fifth generation of mobile communication system, 5G) 引入的 26 GHz、60 GHz 等毫米波频段已难以满足如此巨容量的需求<sup>[3]</sup>, 国内外工业、学术和标准组织已经开始研究第 6 代移动通信系统 (6G)<sup>[4]</sup>. 太赫兹频段 (0.1~10 THz) 介于微波与红外之间, 凭借其

收稿日期: 2024-09-03; 录用日期: 2024-11-07.

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (L223007); 国家重点研发计划项目 (2021YFB2900200).

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: chuanyang@bupt.edu.cn.

超大带宽优势成为 6G 的重要候选频段之一<sup>[5]</sup>。同时,太赫兹通信得益于其高速率传输和抗干扰等特点,成为 6G 典型移动场景高可靠低时延通信的潜在候选技术<sup>[6]</sup>。

本文首先从 6G 典型移动场景的需求和现状出发,阐述未来移动太赫兹通信的必要性;然后对移动太赫兹通信信号处理方面的挑战进行概述,并说明感知协同在移动太赫兹通信中的必要性;接着从感知协同移动太赫兹通信理论、技术和应用 3 个角度对基于大规模天线阵列 (multiple-input multiple-output, MIMO) 的感知协同的移动太赫兹通信进行全面分析;最后对现有研究进行总结,并对未来可能的发展进行展望。

## 1 移动太赫兹通信需求与现状

### 1.1 高速率大带宽需求

移动通信的发展与频谱的合理规划密切相关,目前中国三大运营商经营着 4G、5G 等多代通信系统同存的复杂网络,但目前移动通信上、下行链路带宽仅为 10 ~ 100 MHz<sup>[7]</sup>。据设想,6G 无线技术会整合物联网 (internet of things, IoT) 以覆盖全息通信、车联网、卫星通信等多场景,同时满足低时延高速率大带宽需求,这需要 GHz 甚至更高量级带宽的支撑<sup>[8]</sup>。2023 年世界无线电通信大会 (WRC-2023) 发布的最终文件考虑到了 GHz 量级带宽 102 ~ 109.5 GHz、151.5 ~ 164 GHz 和 167 ~ 174.8 GHz 等太赫兹频段的业务保护<sup>[9]</sup>,这与 6G 无线通信的需求相对应<sup>[10]</sup>。与此同时,国际电信联盟 (ITU) 网络 2030 和中国 IMT-2030(6G) 推进组等组织于近期发布了多份白皮书,建议未来无线系统的工作频段将从目前的微波和毫米波转移到太赫兹 (THz) 频段,以满足高数据速率和带宽要求<sup>[11]</sup>。

### 1.2 移动场景中的指标和技术需求

中国通信标准化协会 2021 年发布的《太赫兹通信应用场景研究》明确太赫兹移动场景包括地面移动通信、空间通信和天-地通信。

地面典型移动通信场景包括车联网和无人驾驶等<sup>[12]</sup>。太赫兹蜂窝网的接入节点覆盖范围达 10 ~ 15 m,能为诸多运动场景的移动用户提供大规模高清直播和 3D 全息通信业务<sup>[13]</sup>。太赫兹车联网不仅需满足高速率低时延,还需满足大覆盖范围 (大于 100 m)、抗移动性干扰以及多用户信息共享,在车-车 (vehicle to vehicle, V2V) 场景中,距离相近的车辆之间可通过基于感知协同的太赫兹链路进行环境信息的共享<sup>[14]</sup>,通过感知协同建立周围环境的 3D 虚拟视

图,能有效避免车联网中意外事故的发生。文献表明,自动驾驶汽车以接近 1 Tbit/s 的数据速率生成感知数据并生成约 1 TB 每行程的数据量<sup>[15]</sup>,如此高速率的数据通信需要太赫兹频段进行支撑。

空间通信受到互联网和宽带通信的影响,高通量卫星通信已成为空间通信发展的趋势<sup>[16]</sup>,而太赫兹通信得益于其高数据速率、高安全性和抗干扰能力强的优势,在大气吸收衰减少的星间通信中脱颖而出<sup>[17]</sup>。低轨卫星星座通信的特点为低时延、宽频带高吞吐量以及全球广域覆盖<sup>[18]</sup>,低轨卫星之间距离可达几千米到几十千米不等,且运动速度达 km/s 量级,为支持不断移动的卫星之间的稳定通信链路,需要太赫兹天线的高增益补偿以及灵活的波束转向<sup>[19]</sup>。0.3 ~ 30 THz 的波段在传输 100 km 后波束直径变为 0.22 ~ 1.22 m 左右,与应用在空间通信中的光通信相比,太赫兹通信的对准精度要求更低<sup>[20]</sup>,且通信速率有从几百 Gbit/s 向 Tbit/s 发展的趋势<sup>[21]</sup>。

天-地 (air-earth) 通信主要是无人机 (UAV) 和高空平台 (HAP) 与地面基站和移动用户进行通信,涉及民用和军事通信,其覆盖要求大于 100 m,传输速率达 10 ~ 100 Gbit/s。无人机和高空平台凭借其部署的灵活性和移动性,具有视距信道、高移动性以及低成本组网的优势<sup>[22]</sup>。在未来 6G 移动通信网络中,由于太赫兹通信技术和大规模 MIMO 技术的应用,在人员高密度、数据高流量情况下,可以通过临时部署 UAVs 和 HAPs,从而分担地面基站压力,确保用户体验<sup>[23]</sup>。在军事领域,UAVs 和 HAPs 可以在现代战争中代替人类进行一系列危险任务的进行,并通过太赫兹的高速率大容量和高隐蔽强抗干扰能力将高清无损视频实时回传控制中心,更好地分析战局、协助作战<sup>[24]</sup>。

与低频段不同,太赫兹在提供巨大带宽的同时也受到高路径损耗的影响<sup>[25]</sup>,能够实现极高天线增益的 MIMO 技术成为对抗太赫兹传播损耗的关键技术。无论是地面移动通信场景中的车联网,还是空间通信场景中的高速移动卫星间的超远距离传输,或是天-地通信场景中的 UAVs 组网搭建,都需要高增益灵活定向的阵列天线的支撑。通过大规模 MIMO 技术与感知协同技术能最大程度地增加无线传输容量和传输范围,并提高链路稳定性<sup>[11]</sup>。

### 1.3 移动太赫兹 MIMO 通信发展现状

针对移动太赫兹 MIMO 通信技术与核心器件,国内外研究机构发布了一系列研究计划,并取得了一定进展。

国内在“十二五”“十三五”和“十四五”国家重

点研发计划中都对太赫兹频段的相应技术和硬件的研发进行了重点支持和布局,推动了相关领域的快速发展.2023年6月,国际电信联盟无线通信部门(ITU-R)完成了由我国工业和信息化部组建的国际移动通信(IMT)6G推进组起草的全球6G愿景框架建议书<sup>[26]</sup>,建议书中提到了未来6G太赫兹频段在移动场景中的应用,需满足500~1000 km/h的流动性需求,并实现厘米级的定位精度.我国在太赫兹移动通信的布局以及关键技术和硬件上已经有了阶段性的成果.

国外为研究移动太赫兹MIMO通信中的太赫兹微电子技术及推进太赫兹技术、标准化的进程,联合了多个国家组织、知名高校以及军事部门进行了合作.美国空军研究实验室(AFRL)于2020年7月发布了“频率可调太赫兹超宽带机载网络”项目技术报告<sup>[27]</sup>,提出太赫兹机间高速移动通信的超高增益天线指标(大于26 dBi)和极窄波束指标(约10°),以高增益高指向性确保通信链路稳定.此外,2022年11月,ITU-R为推进关键技术和标准化进程,发布了“275~450 GHz频段陆地服务应用技术与操作手册”<sup>[28]</sup>,文件指出此频段能支持大型室外公共场所的移动上传下载、服务端的高速连接、室内拓展现实(extended reality, XR)等对移动性不高的6G场景中的近距离移动通信系统,报告中同时对相应场景下的技术需求和性能指标进行了罗列.太赫兹硬件方面,美国国防高级研究计划局(DARPA)在2023年1月宣布开启的“联合大学微电子学项目”中包含了有关140/240/340 GHz太赫兹高功率高效发射机的研究<sup>[29]</sup>,其中发射天线功率 $\geq 20$  dBm,功放能效大于20%,波束赋形扫描范围 $\pm 10^\circ$ .2024年3月,欧洲电信标准协会(ETSI)的行业规范组(ISG)发布的“太赫兹技术”报告中对100 GHz~1 THz的频率范围进行了全面概述<sup>[30]</sup>,重点进行了太赫兹频段的监管现状和不同业务和场景之间共存挑战的介绍.

#### 1.4 移动太赫兹通信产业应用

得益于太赫兹波束赋形和波束追踪等技术的快速发展以及硬件加工工艺的不断改进,近年来,移动太赫兹通信已逐渐应用于车联网、物联网和智能工业制造等多个领域,并取得了一定进展.

在车联网场景中,由于车辆-车辆(V2V)和车辆-基础设施(V2I)涉及自动驾驶决策、实时路况信息和娱乐服务等多种需求,在通信过程中需要处理海量数据传输.太赫兹通信凭借其超大带宽和超高传

输速率(可达数百Gbit/s),能够支持车联网中的高清视频流传输、3D环境感知数据共享以及车载传感器数据的实时交互<sup>[15]</sup>.在高速移动场景下,通过利用太赫兹波段的定向窄波束赋形和快速波束追踪等技术,可有效克服多普勒效应带来的信道衰落问题,保证通信链路的稳定性和可靠性<sup>[31]</sup>.其次,通过部署太赫兹通信网络,并结合人工智能和边缘计算技术,已实现低延迟和高精度车辆编队控制及协同感知,从而在有效提升道路通行效率的同时为车联网中的关键控制信息传输提供可靠保障<sup>[32]</sup>.

另一方面,工业控制场景下的移动太赫兹通信主要应用于工业互联网(IIoT)和智能制造环境,其通信距离需求通常为10~100 m,传输速率需求达数百Gbit/s.太赫兹通信技术凭借其超大带宽和超低时延特性,能够支持工业现场数以万计的传感器节点实时数据采集和控制指令传输.针对工业机器人控制领域中机器臂高速运动导致的频繁链路中断问题<sup>[33]</sup>,通过采用基于智能反射面的智能波束分配和THz通信技术大幅提高了通信区域覆盖率,实现工业场景中生产单元的不间断通信.其次,对于工业中机器检测与维护领域,现有技术通过采用太赫兹感知通信一体化技术和检测手段,利用多传感器网络的准确感知能力,对生产过程中的各动态操作单元进行实时监控,有效保证了工业设备的正常运行,推动工业5.0时代更快实现<sup>[34]</sup>.

## 2 移动太赫兹MIMO通信信号处理挑战

尽管基于大规模MIMO技术的太赫兹通信在移动场景下有众多潜在优势,但其在太赫兹通信系统中也面临着众多挑战<sup>[35]</sup>.移动太赫兹MIMO通信信号处理方面的挑战主要包含以下4个方面:宽带色散制约着太赫兹的带宽提升,大规模MIMO近场效应制约信道估计准确信道状态信息(CSI)的获取<sup>[36]</sup>,混合预编码移相器低bit导致的波束展宽会使得波束增益降低以及移动场景中太赫兹大规模MIMO窄波束链路易中断使信道追踪成为难题<sup>[37]</sup>.具体可以从宽带波束赋形、信道估计、硬件损伤误差和信道追踪进行分析.

### 2.1 宽带波束赋形

太赫兹MIMO中天线数量庞大,为解决完全连接的结构将导致难以承受的硬件成本和功耗的问题,业内提出了模拟和数字混合结构,该结构大大减少了射频链的数量,并满足了物联网中多用户通信的需求<sup>[38]</sup>.采用宽带混合预编码的太赫兹大规模MIMO技术被认为是补偿6G移动场景中高路径损

耗的关键技术之一<sup>[39]</sup>. 然而, 宽带混合预编码中由模拟波束形成器导致的波束分裂使得不同子载波的波束指向不同的方向, 使得用户到基站的信道状态存在部分丢失的情况<sup>[40]</sup>. 因此, 开发合适的波束赋形算法以解决波束分裂难题成为太赫兹宽带波束赋形的研究重点.

## 2.2 信道估计

在宽带移动太赫兹大规模 MIMO 通信系统中, 远场和近场区域总是作为混合场区域共存<sup>[41]</sup>. 然而, 由于太赫兹频段的射频链有限, 天线规模较大, 加之太赫兹通信的高频特性使得信道传播环境复杂多变, 信道估计面临的困难更加显著, 需要大量的导频开销支撑具有严重压缩信号的高维信道<sup>[42]</sup>. 因此, 在用户位置信息未知的情况下, 通过较低的导频开销在宽带混合场区域准确恢复信道成为一项极具挑战性的任务<sup>[43]</sup>.

## 2.3 硬件损伤误差

为利用混合预编码的优点, 近年来众多科研机构 and 高校团队对混合预编码的架构和优化算法进行研究, 提出了基于正交匹配追踪 (OMP)、交替最小化和奇异值分解等优化算法, 但这些方案都需基于高/无限分辨率. 在太赫兹通信系统中随着分辨率的提高, 相控阵移相器的功耗急剧增大<sup>[44]</sup>, 且支持高分辨率的相控阵移相器制造非常困难. 而基于 OMP 和奇异值分解 (SVD) 直接通过量化由无限分辨率导出的支持中低分辨率的模拟预编码矩阵的方法会使得其正交性遭到破坏, 引入误差. 因此, 开发适用于太赫兹大规模 MIMO 中低分辨率移相器的信号处理技术以减轻低分辨率相控阵移相器引起的性能下降至关重要.

## 2.4 信道追踪

为弥补太赫兹频段的高损耗缺陷, 太赫兹大规模 MIMO 技术能够通过波束形成来提高通信中的定向功率, 但波束成形技术会使得太赫兹波束比其他情况下的太赫兹波束窄得多<sup>[40]</sup>. 在移动场景中, 由于终端位置会产生移动, 窄波束的频繁调整导致信道追踪方法能根据初始化阶段建立的先验信息显著提高精度并减少计算开销<sup>[45]</sup>. 考虑到太赫兹动态环境下精度和计算时间的要求, 信道追踪已经成为解锁太赫兹大规模 MIMO 通信巨大频谱资源的关键技术<sup>[46]</sup>. 感知协同太赫兹多天线移动通信有望突破上述挑战<sup>[47]</sup>, 以通信信号感知终端运动信息, 指导通信信号处理, 提高处理精度和效率, 支持移动下宽带信号窄波束移动通信. 下面从感知协同移动太赫兹

基础理论、关键技术、应用实验, 依次综述研究现状.

## 3 感知协同移动太赫兹通信理论

构建移动场景太赫兹频段下的通信感知信息理论框架, 探索通信感知性能上界及性能关系是进行感知协同移动太赫兹通信研究的理论前提. 本节将分析感知协同移动太赫兹通信的性能指标建模, 阐述通信与感知间的性能均衡, 并对频分与时分体制下的感知协同移动太赫兹通信进展进行介绍.

### 3.1 感知协同性能指标建模

传统通信性能指标与感知性能指标在物理意义和量纲上通常并不一致, 从而为量化二者间的性能关系带来困难. 近年来, 通信感知一体化研究尝试构建一体化指标以联合表征通信和感知的性能, 其中典型通信感知一体化性能指标如表 1 所示<sup>[39]</sup>. 根据指标构建的类型, 可以将指标分为以下 4 类:

1) 面向感知的指标: 典型指标如“界”指标与“度”指标等. 基于统计理论的克拉美劳界 (CRB) 给出了感知参数无偏估计的方差下界, 是最广为认知的“界”指标; 相应地, 通信 CRB 则被定义为接收信息比特的方差, 从而得到通信的“界”指标. 另一方面, 作为 MIMO 感知 (或 MIMO 雷达) 理论的奠基石之一<sup>[48]</sup>, 感知自由度 (DoF) 表征预编码矩阵与信道矩阵的向量积的秩, 而通信 DoF 被定义为高信噪比下 MIMO 通信可达速率与单天线通信香农容量比值<sup>[49]</sup>.

2) 面向通信的指标: 典型指标如表征单位时间获取信息量的“率”指标等. 与通信香农容量对应, 最初的感知“率”指标是感知互信息 (MI), 表征单位时间内感知获取信道的条件互信息. 更进一步地, 美国亚利桑那州立大学的 Bliss 实验室基于率失真理论, 提出了感知估计速率 (ER), 用以量化感知精度的有效性<sup>[50]</sup>. 另外, 面向多目标探测性能, 相关研究提出雷达容量指标以同时表征测距、测角、测速的分辨率.

3) 面向信号的指标: 典型指标如“比”指标等. 与常见的信噪比 (SNR) 类似, 杂音噪声比 (CNR) 指标给出了杂音雷达的性能表征形式, 而状态噪声比 (StNR) 指标则被用于表征节点高机动场景下的感知性能. 除此以外, 主瓣旁瓣比与峰均功率比则分别考量了功率分布的空域与时域特性, 被用于表征感知波束赋形与正交频分多址 (OFDM) 通信系统的性能.

4) 一体化指标: 为了实现通信感知性能的最优折中, 一种常见的方法是最大化感知估计速率与通

表1 现有通信感知一体化性能指标<sup>[39]</sup>

感知		通信		
类型	面向感知的“界”指标与“度”指标			
指标	感知克拉美劳界	感知自由度 <sup>[3]</sup>	通信克拉美劳界	通信自由度 <sup>[1]</sup>
表达式	$CRB_{\theta} = -E_x^{-1} \left[ \frac{\partial^2 p(y x; \theta)}{\partial \theta^T \partial \theta} \right]$	$d_{\text{sen}} = \text{rank}(F \cdot H)$	$CRB_x = -E_x^{-1} \left[ \frac{\partial^2 p(y x; \theta)}{\partial x^2} \right]$	$d_{\text{com}} = \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{R_{\text{ach}}}{C_{N=1}}$
应用	参数估计	成像与估计	与感知克拉美劳界对应	与感知自由度对应
<hr/>				
类型	面向通信的“率”指标(bps)			
指标	互信息	估计速率 <sup>[4]</sup>	雷达容量 <sup>[2]</sup>	香农容量
表达式	$MI = \frac{1}{2T} \log_2(1 + \text{SNR})$	$ER_{\theta} = \frac{1}{2T} \log_2(1 + C_{\theta}^T CRB_{\theta}^{-1} C_{\theta})$	$C_R = \frac{1}{T} \log_2 \left( \frac{2\pi k R_{\text{max}}}{T \Delta R \Delta \theta \Delta f_d} \right)$	$C = \sum_{n=1}^N B_n \log_2(1 + \text{SNR}_n)$
应用	与香农容量对应	参数估计	目标探测	MIMO通信
<hr/>				
类型	面向信号的“比”指标(dB)			
指标	杂音噪声比	状态噪声比 <sup>[2]</sup>	主瓣旁瓣比	峰均功率比
表达式	$\text{CNR} = \frac{P_{\text{clutter}}}{\sigma_m^2}$	$\text{StNR} = \frac{ S_{k+1 k} }{ S_{k+1 k} - S_{k+1} }$	$\text{PSLR} = \frac{ S_{\text{peak}} }{ S_{\text{sidelobe}} }$	$\text{PAPR} = \frac{\max  s ^2}{E[ s ^2]}$
应用	杂音雷达	估计与预测	雷达波束赋形	OFDM通信
<hr/>				
类型	一体化指标			
指标	合速率	联合克拉美劳界	联合太赫兹通感一体化指标(有待提出)	
表达式	$R_{\text{sum}} = \beta_1 ER_{\theta} + \beta_2 C$	$CRB_{\text{joint}} = (CRB_{\theta}^{-1} + CRB_x^{-1})^{-1}$	$U = U(C, CRB_{\theta}; \alpha, v, H)$	
应用	性能折中	与合速率对应	考量波束宽度、目标移动、天线增益等	

信香农容量加权求和得到的合速率指标; 与此等效的, 最小化通信 CRB 与感知 CRB 调和求和得到的联合 CRB 则可以构建与最大化合速率对偶的优化问题. 为了进一步增加一体化指标的适用性, 联合的太赫兹通信感知一体化指标应当考量波束宽度、目标移动速度、天线增益等参数.

上述指标可有效表征通信感知一体化系统性能, 但由于缺乏感知协同通信增益的考量, 在表征感知协同移动太赫兹通信的性能时不尽如人意. 太赫兹频段下波束极窄, 在理想对准情况下通信性能可获得极大的性能增益. 然而, 在实际场景中由于太赫兹信道具有高随机性, 信道状态与目标状态参数存在不确定性, 理想对准的系统参数配置难以实现. 因此, 评估感知协同移动太赫兹通信性能需要综合考量不同系统配置参数下的系统性能.

为此, 将性能界理论与感知协同移动太赫兹通信相结合, 提出通感系数指标, 其几何定义为通信感知容量域 (阴影部分) 面积与时分共存下容量域 (直角三角形部分) 面积的比值, 如图 1 所示. 数学表达式为

$$\xi = \frac{\int_0^{R_{\text{max}}} R_{\text{com}}(R_{\text{sen}}) dR_{\text{sen}}}{R_{\text{max}} R_0 / 2} \triangleq 2 + \xi_{\text{增益}} - \xi_{\text{制约}} \quad (1)$$

其中:  $R_0$  为无感知时的通信容量,  $\xi_{\text{增益}}$  为通信感知容量域超出理想共存下容量域 (矩形部分) 的区域面积,  $\xi_{\text{制约}}$  为通信感知容量域较理想共存下容量域不足的区域面积.

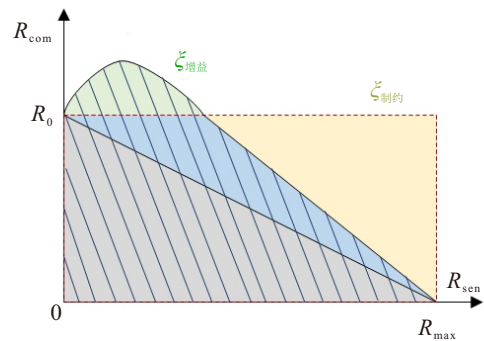


图1 通感系数指标的几何定义<sup>[39]</sup>

通感系数的物理意义在于, 以时分共存 ( $\xi = 1$ ) 与理想共存 ( $\xi = 2$ ) 作为参照, 可评估该通感一体化方案在不同系统参数配置下的综合性能, 量化增益关系与制约关系在通信感知容量域的作用比重, 较对比最大通信速率等指标更具有实践价值. 另外, 若以通信/感知性能为纵坐标, 以系统参数为横坐标, 可以将通感系数的定义推广到通信与感知的等效性能表征, 具体见文献 [37] 中等效对准方差指标与等效

信道容量指标的相关定义。

### 3.2 性能均衡建模

如何最大化利用有限的系统资源,实现通信与感知间的性能均衡,是通信感知一体化信息理论研究的核心问题之一。在低频段通信感知一体化研究中,性能均衡仅包括二者间的性能折中。随着频段的升高,感知协同带来的性能增益愈发显著<sup>[1]</sup>。除了测角协同波束对准以外,太赫兹的波束追踪、波束聚焦还需要测速、测距协同带来的性能增益,以满足节点移动与近场下的场景需求<sup>[5]</sup>。因此在感知协同移动太赫兹通信的性能均衡中,需要同时考量通信感知性能间的折中与增益。根据一体化资源的分配模式,可将感知协同移动太赫兹通信系统分为频分、时分、空分3类,其特性及在通感一体化研究中的常见场景如图2所示。

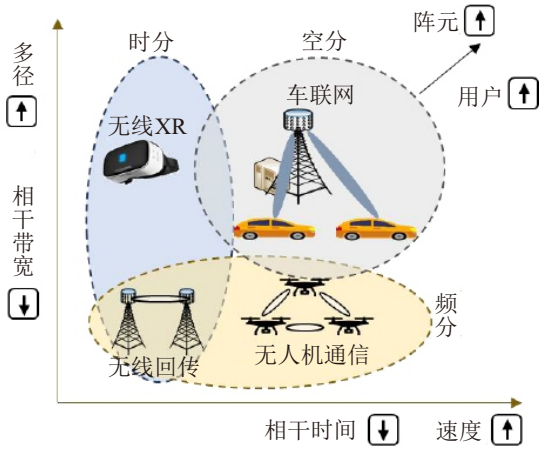


图2 频/时/空分的常见应用场景

1) 频分体制: 最简易的通信感知一体化实现途径常见于早期雷达通信共存领域研究,但在传统频段下因为低频谱效率而被诟病。在太赫兹场景,充足的频谱资源及较弱的多径效应使得频分体制重新获得关注。对于理论性能而言,距离估计 CRB 受带宽资源影响较大,因此频分体制下测距难以满足波束聚焦性能需求,更适用于远场场景的感知协同移动太赫兹通信。

2) 时分体制: 随着同步技术的发展,时分体制的通信感知一体化被广泛应用于无线 XR 等室内场景,但在高移动性场景下的无缝感知仍存在难题,该挑战在波束对准需求更高的太赫兹频段下愈发严峻。对于理论性能而言,速度估计 CRB 受时隙资源影响较大,因此时分体制下测速难以满足波束追踪性能需求,更适用于低移动性场景的感知协同移动太赫兹通信。

3) 空分体制: 近年来天线规模的增加及大规模 MIMO 的发展,使得空分体制下的通信感知一体化

成为了研究热点。在车联网等多用户场景下,空分体制可以通过将天线阵子或波束功率分别分配通信与感知,从而在共享时隙与带宽资源下同时实现二者功能。对于理论性能而言,角度估计 CRB 受空域资源影响较大,因此空分体制下测角难以满足波束对准性能需求,更适用于无需协同的太赫兹通信感知一体化场景。

值得一提的是,在此感知协同移动太赫兹通信仅考虑通信感知均服务于单一节点的单基站单用户场景,空分体制不适配。因此下文仅分别对频分、时分体制的感知协同移动太赫兹通信信息理论相关进展进行详细讨论。

### 3.3 频分体制

通信与感知应分别占据多少带宽资源,从而充分利用频谱资源以发挥太赫兹频段的优势,是频分体制感知协同移动太赫兹通信信息理论的重要研究课题。考虑感知与通信间性能增强与折中关系共存,随着感知精度提升通信容量满足先增后降的趋势,可以通过求解通信感知性能间闭式关系,进而求解极大值以获得最优频资源配置。

为此,提出一个感知协同移动太赫兹通信闭式性能模型<sup>[51]</sup>。通过信息熵的角度分析移动与感知,求解用户节点的移动熵,并将感知视为降低目标移动不确定性的熵减过程,从而构建感知-移动-通信间的性能关系,通过近似推导得到感知数据速率  $R_{\text{sen}}$  与通信数据速率  $R_{\text{com}}$  间的分段闭式性能关系为

$$R_{\text{com}}(R_{\text{sen}}) = \begin{cases} \frac{\beta B}{\ln 2} \cdot \frac{\eta}{w_{\text{eff}}^2/d^2 + 4\sigma_v^2/\chi^2(R_{\text{sen}})}, & 0 \leq R_{\text{sen}} \leq R_{\text{th}}; \\ (1 - \beta)B \log_2 \left( 1 + \frac{d^2 \eta}{w_{\text{eff}}^2} \right), & R_{\text{th}} < R_{\text{sen}} \leq R_{\text{max}}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\beta$  为频分系数(感知带宽占总带宽的比例),  $B$  为系统总带宽,  $\eta$  为信噪比,  $d$  为节点距离,  $w_{\text{eff}}$  为等效波束宽度,  $\sigma_v^2$  为目标移动方差,  $R_{\text{th}}$  为区间转折点,  $R_{\text{max}}$  为最大感知速率。闭式关系近似性能如图3所示。数值结果表明,相比无感知协同场景,频分体

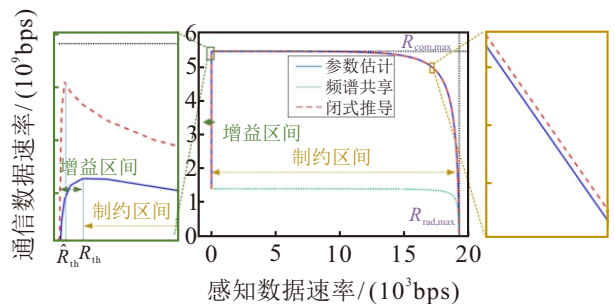


图3 频分下的感知协同移动太赫兹通信性能<sup>[51]</sup>

制下测角协同移动太赫兹通信容量可提升近3倍。同时,当 $\beta = c/(2\eta)^{0.5}\pi\sigma_v B$ 时即可实现最优折中,此时感知数据速率取区间转折点 $1/T_{\text{pri}}$ ,通信数据速率达到最大值,其中 $c$ 为光速, $T_{\text{pri}}$ 为感知间隔。该结论表明频分体制下测角协同移动太赫兹通信下,感知所需带宽恒定为 $\beta B = c/(2\eta)^{0.5}\pi\sigma_v$ 。

### 3.4 时分体制

太赫兹天线相比传统低频段天线波束更窄,对波束对准要求更为严苛。而在时分体制下,一个周期内的时隙被分配给感知与通信,使得其参数估计具有不连续性,因此受目标移动速度影响更为严重,极易导致链路中断。此时,仅测角难以满足移动太赫兹通信的波束对准需求,亟需切向角速度信息以提前预测用户方位变化以实现波束追踪。传统切向角速度估计方法如多基地感知成本较大且同步困难,难以适配太赫兹场景;基于干涉雷达的方法由于太赫兹波束过窄明暗条纹难以判别而失效;卡尔曼滤波方法的切向角速度计算则完全依赖测角性能,无法解决波束对准失效时的校准问题。

为此,考虑利用太赫兹天线的功率分布特性,分析用户切向移动时导致的对准偏差与回波信号幅度间关系,从而反演通过信号幅度的时域衰减估计用户切向角速度,并结合信号中的时延、阵子间相位差、多普勒频偏等参数,实现对移动用户状态的距离 $d$ 、方位角 $\varphi$ 、径向速度 $v$ 、切向角速度 $\omega$ 四维参数联合估计<sup>[52]</sup>。理论推导四维参数估计CRB为

$$\begin{cases} \text{CRB}_d = \frac{3c^2}{\eta B^2 f_0 (\delta_s M)}, \\ \text{CRB}_\varphi = \frac{12}{\pi^2 \eta (N-1)(N+1) \sin^2 \varphi f_0 (\delta_s M)}, \\ \text{CRB}_v = \frac{c^2}{4\pi^2 \eta \Delta^2 f_c^2 [f_2(\delta_s M) - f_1^2(\delta_s M) f_0^{-1}(\delta_s M)]}, \\ \text{CRB}_\omega = \frac{\omega_{\text{eff}}^4}{4\eta \Delta^4 \omega^2 [f_4(\delta_s M) - f_2^2(\delta_s M) f_0^{-1}(\delta_s M)]}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $f_k(M_s) \triangleq \sum_{m=0}^{M_s-1} m^k e^{-\frac{2m^2 \Delta^2 m^2}{w_d^2}}$  ( $k=0,1,2,4$ )为 $k$ 阶求和函数, $\delta_s$ 为时分系数(感知时隙占总时隙的比例), $M$ 为总时隙, $N$ 为天线阵子数, $\Delta$ 为采样间隔, $f_c$ 为中心频率。将感知CRB代入表达式,理论推导可得感知协同通信性能增益满足 $\text{CB} = (\sigma_2^0 + \omega^2 T_{\text{pri}}^2 / 3) / \omega_{\text{eff}}^2$ 。在最优时分系数下,通信性能随用户切向角速度变化如图4所示。

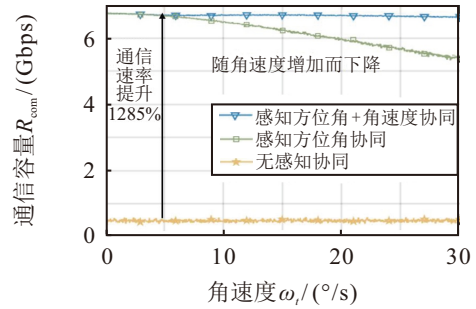


图4 时分体制下的感知协同移动太赫兹通信性能

数值结果显示,当用户切向角速度大于 $5^\circ/\text{s}$ 时,仅角度估计协同方案下的通信容量随切向角速度增加而逐渐下降,而考虑切向角速度估计协同方案下的通信性能则不受用户移动性影响。

## 4 感知协同移动太赫兹通信技术

### 4.1 感知协同太赫兹宽带波束赋形

随着6G通信需求的增长,太赫兹频段因其丰富的频谱资源成为实现超高数据传输速率的关键技术。然而,太赫兹通信的高路径损耗问题限制了其在通信系统中的应用。因此,如何完成宽带条件下的波束赋形成为重要课题。

基于虚拟子阵列,文献[53]提出了一种delayers (TTD)的延迟相位预编码架构,通过虚拟子阵列在整个频段上生成具有均匀分布阵列增益的波束,并在后续过程中引入TTD辅助以实现宽带波束赋形。文献[54]中的方案基于完备信道状态信息(CSI),通过为所有子载波构建公共模拟矩阵来实现太赫兹宽带波束赋形。但上述方案在增加硬件复杂度和成本开销的同时,其算法严重依赖于完备的CSI条件,进而限制了其在通信系统中的应用。

为此,在未获取完备CSI的情况下,考虑通过补充部分CSI的方法完成波束赋形<sup>[40]</sup>。首先,针对光束分裂的角度和频率信息,通过2D感知算法获取接收到的部分分裂波束的频率-角度信息;然后,根据子载波的角频关系对子载波进行角度和频率反演,获得所有的角频信息,并构建信道选择矩阵;最后,建立包含频率和角度信息的完整信道字典。利用构建的信道选择矩阵从字典中检索得到的完整CSI可表述为

$$\tilde{\mathbf{H}}_f = \underbrace{\left[ \tilde{\mathbf{H}}[1], \dots, \tilde{\mathbf{H}}[\tilde{k}_{\min}], \dots, \tilde{\mathbf{H}}[\tilde{k}_{\max}], \dots, \tilde{\mathbf{H}}[K] \right]}_{\text{接收}} \quad (4)$$

其中: $\tilde{\mathbf{H}}[K]$ 为第 $k$ 个子载波信道矩阵, $\tilde{k}_{\min}$ 和 $\tilde{k}_{\max}$ 分别为 $\tilde{k}$ 的最小值和最大值。使用该完备CSI设计更加准确的模拟和数字预编码矩阵,进而单用户频谱

效率表达式为

$$R_{\text{sum}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \log_2 \left( \left| I_{N_t} + \frac{\rho_k}{\sigma_n^2} \times (H_w[k] f_{FF,w} f_{BB,w} [k] f_{BB,u}^H [k] f_{RF,u}^H H_w^H [k]) \right| \right). \quad (5)$$

由式(5)可知,在得到的优秀预编码矩阵的基础上,该方法的频谱效率得到了较大提升.如图5所示,在等信噪比(SNR)条件下,SA-PC方法的频谱效率和能量效率均优于仅基于部分CSI的方法(PC),其性能提升分别为53.3%、37.2%,且接近于基于完整CSI的理想情况.

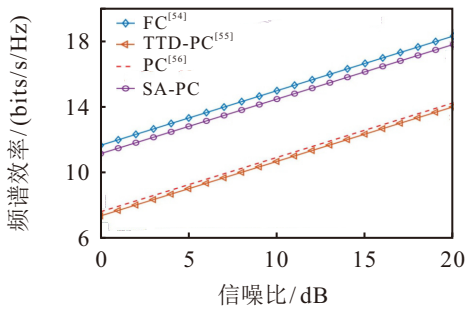


图5 不同信噪比条件下系统频谱效率<sup>[40]</sup>

考虑到多用户接入场景,文献[40]提出了动态射频频链路(DRF)接入方案和动态功率分配(DP)方案,其通过选择最优子信道并进行预编码实现系统效率的提升.如图6所示,在不同信噪比条件下,相较于全射频频链方案,系统在采用DP方案时展现出了更高的频谱效率,并且在采用DRF方案时,频谱效率得到了进一步提升,从而证实了动态访问在多用户场景中的有效性.

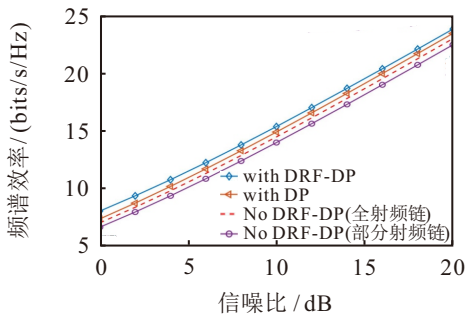


图6 多用户不同信噪比条件下系统频谱效率<sup>[40]</sup>

#### 4.2 感知协同太赫兹近场信道估计

太赫兹频段在无线传输中面临着的一个重大挑战,即高路径损耗.混合架构的大规模天线系统凭借少量射频频链,可以以较低功耗形成高增益窄波束,从而有效补偿高路径损耗,这使其在太赫兹频段得到了广泛应用.因此,如何利用有限射频频链维度的信号恢复出较大天线规模维度的信道,成为太赫兹信道估

计的重要课题.

利用信道稀疏性的信道估计方法由于其高适应性,被广泛认为是解决这一问题的主流方案.基于远近混合场假设,文献[55]利用近场信道在极化域表现出稀疏性的特征,提出了极域SOMP算法.考虑到实际应用中由于带宽增大所引起的波束斜视效应,文献[56]提出了基于连续支持检测的波束空间信道估计方案.相较于文献[57]提出的传统SOMP算法,上述极域SOMP算法性能提升十分有限;另一方面,考虑到真实环境中往往远、近场共存,文献[58]首先利用支持检测算法估计信道中的远场分量,然后由极域OMP估计近场分量,提出了SD-OMP算法.然而,此类方法严重依赖于用户位置的先验信息.

为此,考虑在未获取用户位置信息的情况下,提出一种基于子阵列的远、近混合场信道估计方案<sup>[43]</sup>.近场信道角域不再稀疏,这是由远场和近场转向向量之间的差异引起的.如果考虑对近场路径使用远场转向向量,则所得到的信道响应与实际响应之间的归一化误差可以描述为

$$\zeta \approx 2 \left[ \left| \sin \frac{kd^2(1-\theta^2)}{4r} p_1^2 \right|, \dots, \left| \sin \frac{kd^2(1-\theta^2)}{4r} p_N^2 \right| \right]^T. \quad (6)$$

其中: $k$ 为波数, $\theta$ 为到达角, $r$ 为路径距离, $N$ 为天线数, $p_n(n=1,2,\dots,N)$ 为天线指数,(a)由二阶泰勒展开式推导所得.由式(6)可知,对于信道中 $k$ 、 $r$ 不变的特定路径,向量 $\zeta$ 将在 $\theta$ 为0、 $p_n$ 取最大值 $\frac{N}{2}$ 时得到其最大值 $\frac{kN^2d^2}{16r}$ .由近场定义可得,若将 $\zeta$ 保持其最大值在 $\pi/16$ 内,则该响应误差可忽略,而减小天线数 $N$ 就是可取方式之一.因此,可以基于部分连接架构,将大规模阵列混合场解耦为各子阵内远场,从而利用远场角域稀疏性取代复杂的极域码本,降低算法复杂度与导频开销.如图7所示,相较于传统信道估计方案,基于子阵列的信道估计算法在太赫兹远近混合场信道场景中具有更低的归一化均方误

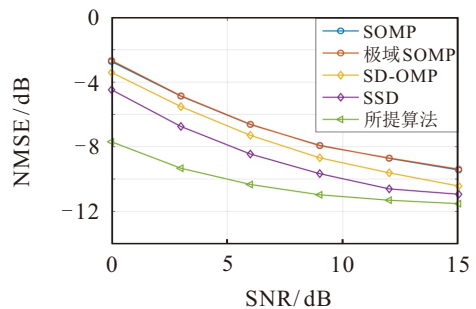


图7 信道估计方案性能对比<sup>[43]</sup>

差,展现出在缺乏用户位置信息情况下良好的估计性能。

### 4.3 感知协同太赫兹波束追踪

太赫兹频段的高路径损耗和窄波束特性使得传统的波束追踪方法在实际应用中面临巨大挑战。感知协同技术通过利用环境信息,可以显著提高波束追踪的精度和效率。在动态场景中,准确的波束追踪对于保持稳定的通信链路至关重要。因此,如何在充分发挥太赫兹频段的优势的同时,完成感知协同下的波束追踪成为重要的研究课题。

目前,信道跟踪研究主要分为两种信道预测方法:统计跟踪方法和确定性跟踪方法。文献[59]基于宽带信道中的角度延迟和空域稀疏脉冲响应,提出压缩感知(CS)和低秩(LR)信道估计方法,分别利用角度域和延迟域的稀疏性实现了低复杂度下的算法快速收敛。文献[60]基于角扩展特征(或称簇特征),提出结构化正交匹配追踪(S-OMP)算法,通过将信道估计问题表述为结构化稀疏信号恢复问题实现了未知角扩展情况下的信道估计。文献[61]基于空间相关性假设,提出近似最大似然算法(AML),通过高复杂度半定规划(SDP)方法实现了对算法的快速收敛。然而,上述方法基于环境先验信息假设,而在太赫兹动态环境下,由于缺少匹配先验信息,这些方法的精度往往会下降。

考虑到上述方法在动态环境下的性能缺陷,学者们提出了一种聚类和估计混合波束追踪方法,即聚类子空间匹配追踪(CSMP)。该方法将THz时变信道分解为簇间和簇内两部分,分别采用确定性和统计性模型进行跟踪。簇间部分使用物理运动变化法则建模,簇内部分则采用Markov演化模型。如果考虑簇间确定性支撑演化模型,则其可以表示为

$$\hat{\Omega}^{(t+1)}(L) = \left[ \frac{r_L^{(t)} + \Delta r_L^{(t)}}{\Delta \lambda}, \frac{\sin(\theta_L^{(t)} + \Delta \theta_L^{(t)})}{\Delta w} \right]. \quad (7)$$

其中: $r_L$ 为基站与用户之间的LoS路径距离, $\theta_L$ 为LoS路径到达角度, $\Delta \lambda$ 和 $\Delta w$ 分别为波长和角度间隔。此外,对于簇内统计支撑演化模型,其概率分布可描述为

$$p(b_i^{(t)}) = p(b_i^{(t)}|d_i^{(t)}, a_i^{(t)})p(d_i^{(t)})p(a_i^{(t)}), \quad (8)$$

其中 $b_i^{(t)}$ 、 $d_i^{(t)}$ 和 $ma_i^{(t)}$ 分别为聚类子空间支持向量、时延和波束到达角支持向量。结合归一化均方误差NMSE表达式

$$NMSE = \frac{\|\hat{h}^{(t)} - h^{(t)}\|^2}{\|h^{(t)}\|^2}, \quad (9)$$

其中 $h^{(t)}$ 和 $\hat{h}^{(t)}$ 分别为真实和估计信道,不难看出,当SNR提高时,CSMP通过混合估计方法获得的簇状CSI更加准确,其相较CoSaMP算法的归一化均方误差(NMSE)降低约89%,在较高SNR条件下实现准波束追踪。

### 4.4 感知协同移动太赫兹通信仿真平台

除了上述性能界理论、近场信道估计、宽带波束赋形与追踪等关键技术,仿真平台作为促进移动太赫兹通信发展和标准化的重要手段,为评估新技术和新应用融入现有实际系统提供了必要的设计方法和工具<sup>[62]</sup>。

近几年来,各大高校与科研机构发布了许多太赫兹通信仿真平台,部分对比如表2所示。其中,链路级仿真平台是连接信道级与系统级平台的纽带,能够对网络中的无线链路进行物理层性能评估,是理论和技术验证的基础。针对现有平台尚且缺乏MIMO移动通信能力以及尚未充分利用感知信息的问题,本文提出一种用于太赫兹MIMO通感一体化系统的综合型链路级仿真平台。该平台考虑了宽带回波、分子吸收效应以及稀疏簇信道等太赫兹特性,采用时分双工(TDD)传输框架(如图8所示)和一体化OFDM/DFT-s-OFDM波形,在感知时段实现用户目标的距离-速度-角度三维参数估计,并基于距离和方位角估计信息完成目标定位,在后一时段的下行通信阶段进一步利用距离/速度估计值和角度/定位信息分别进行时延/多普勒频偏预补偿和太赫兹窄波束对准,实现以太赫兹通信系统为中心的通感一体化和感知协同移动通信。

此外,该平台开发了一个可视化界面便于直观操作与性能分析。如图9所示,界面支持一体化收发

表2 先进太赫兹通信仿真平台对比<sup>[63]</sup>

仿真平台	简介	类型	MIMO	移动性	通感一体化	定位	感知协同
本文团队 <sup>[63]</sup>	基于时分双工传输框架的太赫兹MIMO通感一体化综合型仿真平台	链路级	√	√	√	√	√
TeraSim <sup>[64]</sup>	太赫兹纳米级/宏观级通信网络的仿真平台	系统级	×	×	×	×	×
BUPTCMG-IMT2030THz <sup>[65]</sup>	基于IMT 2030与3GPP TR 38.901标准的太赫兹信道仿真平台	信道级	√	√	×	×	×
SiMoNe <sup>[66]</sup>	基于IEEE 802.15.3d标准工作的太赫兹通信模块化平台	链路级	×	×	×	×	×
TeralSAC <sup>[67]</sup>	140/300 GHz太赫兹单天线系统通感一体化仿真平台	链路级	×	√	√	×	×

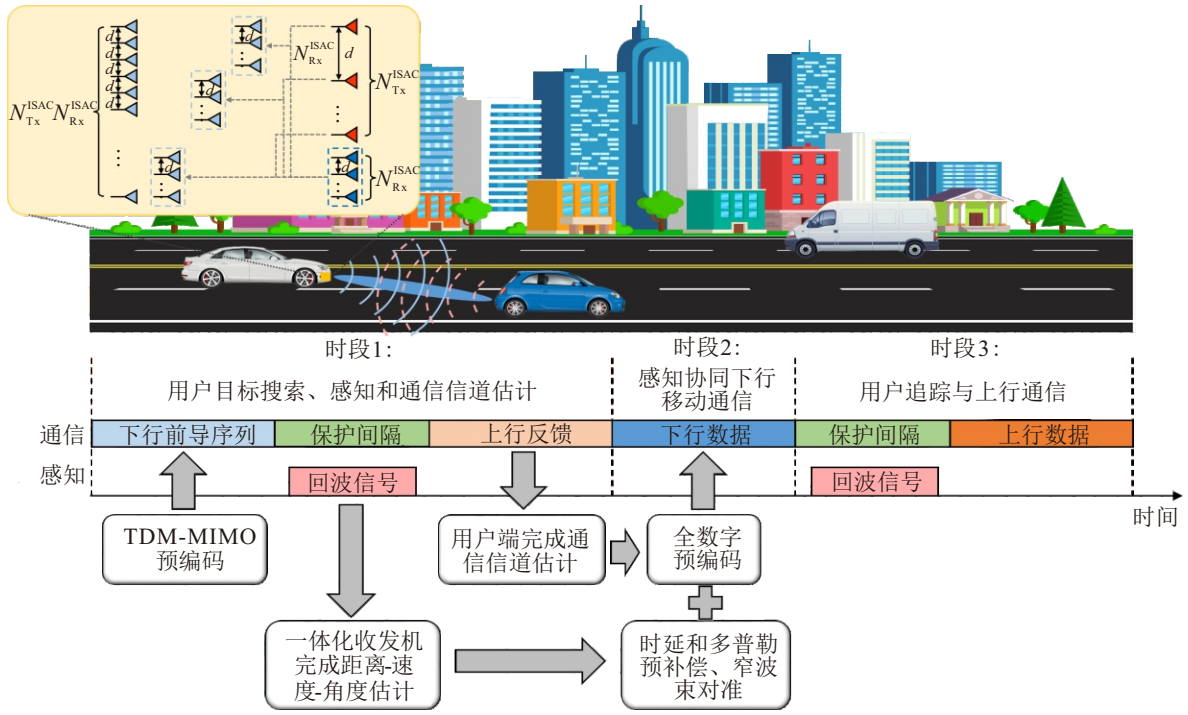


图8 感知协同移动太赫兹通信系统 TDD 传输框架<sup>[63]</sup>

机、用户目标、波形、太赫兹信道和二维恒虚警检测等系统参数的详细配置,能够对距离-速度、距离-角度、二维恒虚警检测谱成像、感知与定位结果、收发端星座图、多径信道时域响应以及感知协同误码率等通信和感知性能指标进行评估验证。

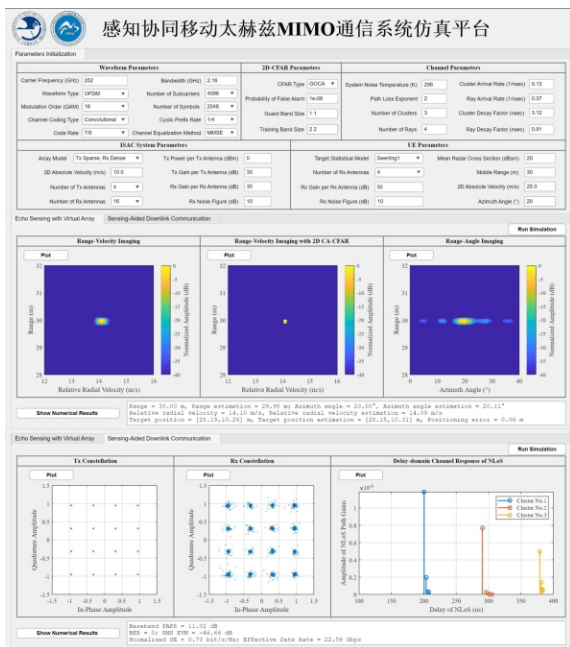


图9 感知协同移动太赫兹通信仿真平台

## 5 感知协同移动太赫兹通信应用实验

### 5.1 太赫兹通信系统测距

为实现太赫兹通信信号对信道中目标进行定位的功能,实验从 OFDM 通信波形测距原理出发,设计 OFDM 移动通信系统测距架构,并搭建太赫兹

OFDM 软硬件测距平台进行原理验证。

OFDM 通信信号测距原理需从感知接收天线所接收的回波信号模型出发,接收端回波信号经过基带数字处理并通过 DFT 解调后,表达式为

$$Y = N e^{j2\pi f_d n T_p} \sum_{i=0}^{N-1} X e^{-j2\pi i \Delta f \frac{2R_0}{c}} e^{j2\pi \frac{k}{N} i}. \quad (10)$$

其中:  $Y$  为接收信号频域矩阵,  $X$  为发射信号频域矩阵,  $N$  为子载波个数,  $f_d$  为多普勒频偏,  $\Delta f$  为子载波间隔,  $R_0$  为发射端到目标的相对距离,  $c$  为光速。

将  $Y$  与  $X$  相除将通信信息去除后,再将所得信道矩阵  $d$  沿子载波方向进行  $N$  点 IFFT, 有

$$R(d) = e^{j2\pi f_d n T_p} \sum_{d=0}^{N-1} e^{-j2\pi i \Delta f \frac{2R_0}{c}} \cdot e^{j2\pi \frac{k}{N} d}. \quad (11)$$

通过计算峰值点对应距离可解析出距离信息。如图 10 所示,实验系统架构基于传统 OFDM 通信系统,太赫兹接收端接收到的通信感知一体化信号在解帧后会进行通信接收和感知定位两部分处理。太赫兹通信系统测距实验的测试环境如图 11 所示。数字基带的发射端和接收端分别与太赫兹发射端和接收端相连接,太赫兹发射端将数字基带生成的基带信号搬移至太赫兹频段并发射;太赫兹接收端会接收反射信号,并下变频至基带,由数字基带进行采样和处理。

实验载波频率为 140 GHz,带宽 1.024 GHz,子载波个数为 64,子载波间隔 1 024/64 MHz。进行单目标 (105 cm) 和多目标 (105 cm 和 165 cm) 测距的

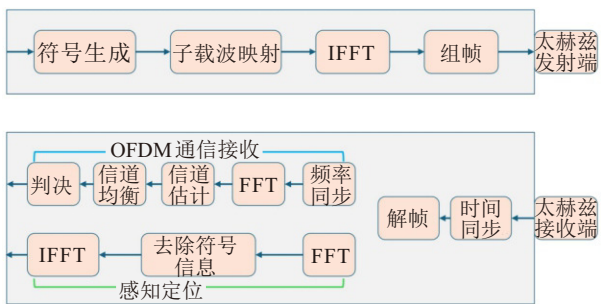


图10 基于 OFDM 通信系统的感知测距系统架构

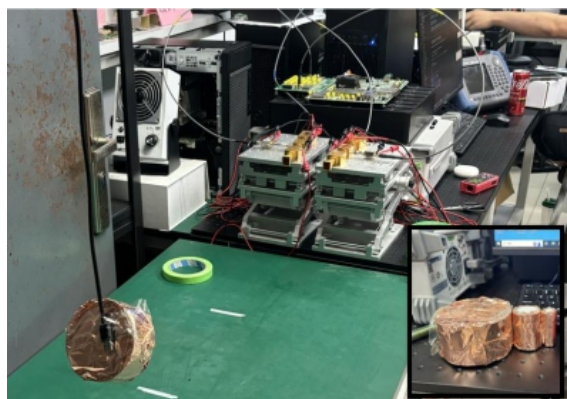


图11 基于 OFDM 通信系统的感知测距实验测试环境

对比实验,并对3种不同大小的圆柱体目标(100 cm)进行测距,采用吊挂方式,以减小杂波影响.最终结果如图12和图13所示.图12为单/多目标的测试结果,图中对应位置出现峰值表明太赫兹 OFDM 通信测距系统具有多目标感知能力,并能在距离图像中较精准地解析出距离信息.图13为相同距离下体积不同的3个物体的测距结果,小体积物体的雷达散射截面(RCS)虽然较小,但是在距离感知图像中相应位置仍有对应峰值.结果表明,实验所采用的太赫

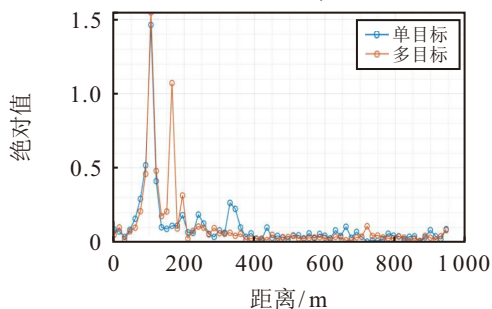


图12 单/多目标测距结果

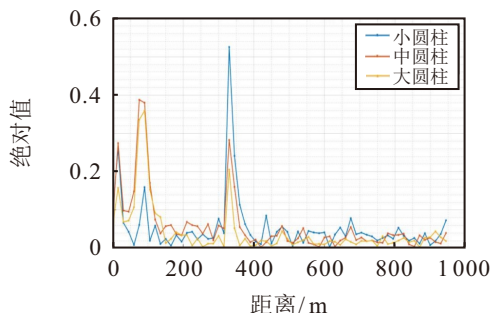


图13 相同距离对不同体积物体测距结果

兹 OFDM 通信信号对体积小于  $10\text{ cm}^3$  不同体积大小的目标物体都具有探测能力.

### 5.2 太赫兹大规模液晶相控阵通信

液晶是一种介电各向异性材料,在外加电场的情况下,液晶分子的排列方向将随电场的大小发生改变,从改变其介电常数,进而调控相位,实现波束赋形.如图14所示,太赫兹大规模液晶相控阵通信测试该系统包含上变频链路、下变频链路、基带FPGA设备、AD/DA模组及测量仪器和  $32 \times 32$  液晶相控阵天线系统,其中液晶相控阵天线系统的通信协议、控制电路和相控阵码本由本团队自主研发,液晶相控阵天线由合肥工业大学研制.



图14 太赫兹大规模液晶相控阵通信测试场景

基于FPGA的16QAM调制信号由基带信号发生单元产生,首先经过太赫兹链路上变频,随后在太赫兹混频器中与本振信号混合,完成调制.信号到达接收端后按照类似方式进行解调,如图14所示.与未采用液晶相控阵通信系统相比,上述液晶相控阵通信系统在  $20^\circ$  方向波束赋形下接收机可实现信号的接收和正确解调,且系统通信速率支持主流高清视频流数据传输,系统性能增益得到明显提升.

### 5.3 视觉感知协同太赫兹相控阵通信

近年来,针对高频窄波束跟踪开销大、通信困难的问题,部分学者在高频窄波束通信方面考虑利用GPS、雷达等感知设备辅助通信,该类方法虽可降低带内资源开销,但精度较为有限.基于相控阵的视觉辅助通信方法逐渐受到关注,该方法有望在克服现有方法局限性的同时,更好地适应动态复杂的通信环境.

如图15所示,感知协同太赫兹通信系统采用5层架构设计,分别为感知层、数据层、运动层、通信链路层和展示层.其中感知层作为系统前端,其通过双目结构相机对目标角度和位置等空间先验信息进行感知,并将感知信息传送至数据层.数据层作为系

统的核心处理单元,包含数据接收、读取、存储、处理和 SDK 调用等功能,以保证信息数据格式和接口协议互相兼容,随后将感知数据传输至后续运动层,实现对波束方向的调控.在通信链路层,由本地振荡器(LO)发出的信号经倍频器放大并在混频器中与基带 OFDM 信号混合,完成信号调制.考虑到太赫兹信号的高路径损耗特性,在发射前通过低噪声放大器对调制信号进行放大,以支持其完成无线空间传输.展示层则通过展示接收端信号对应的星座图等对系统通信性能进行表征.

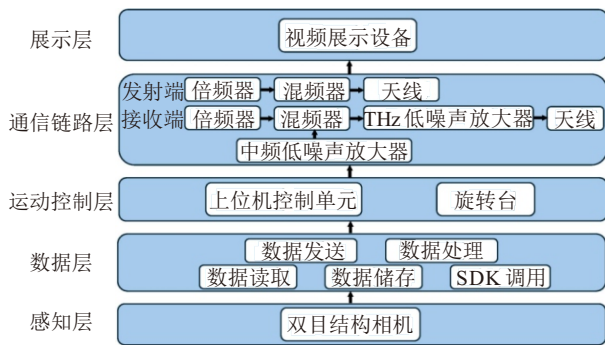


图15 视觉辅助太赫兹通信系统架构

相控阵天线是由移相器和天线单元组成的阵列,其中天线单元按特定的规则排列.这里,规定 $\theta$ 为相控阵与目标之间的角度,则相邻阵列单元的相位差为

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)d \cdot \sin\theta. \quad (12)$$

其中 $d$ 为相邻阵列单元间的间距,一般设置为 $\lambda/2$ .视觉感知模块检测同时对波束指向角和目标角度进行检测,故在接收端移动的情况下,二者角度差便被即时传回相控阵控制模块,引导相控阵纠正角度偏差,完成波束实时追踪,进而实现移动场景下的太赫兹协同通信.

实验设置载波频率为 110 GHz, 带宽为 1.024 GHz, 子载波个数为 64, 子载波间隔 64 MHz. 实验场地大小为  $8\text{ m} \times 5.8\text{ m} \times 2.7\text{ m}$ . 其中, 发射端和接收端分别置于两端, 且水平高度相同, 均为 1.2 m. 接收端以 0.5 m/s 速度沿垂直于发射端方向移动, 具体测量场景和设备布置如图 16 所示.

实验主要分为 4 部分进行: 1) 首先针对静态条件下的通信链路性能进行测试, 结果表明系统通信速率达到一般视频流数据传输要求, 实现静态条件下 2 K 高清视频传输; 2) 对配备  $32 \times 32$  相控阵天线的系统进行移动场景验证, 结果显示在中低速移动条件下系统可保持较小的波束对准误差; 3) 改变室内测量环境光线条件, 结果表明感知系统在不同光照条件下均实现了 25 FPS 帧率实时目标检测与追

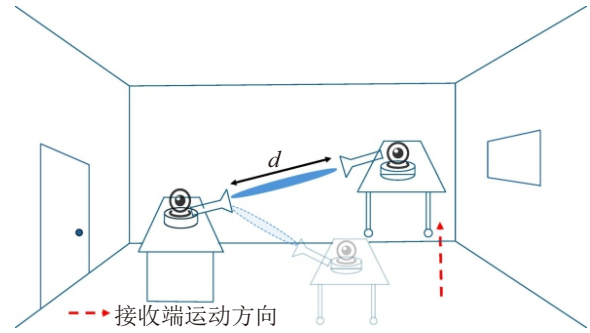


图16 感知协同移动通信功能实验测量环境

踪, 满足一般视觉辅助移动目标追踪要求; 4) 为评估移动场景下感知协同通信系统的性能, 对接收端移动过程中不同时刻信号进行采样, 得到运动时刻 1 s、2 s 和 3 s 对应的误码率如表 3 所示. 结果表明, 该系统在中低速移动场景下均可实现信号的正确接收和解调, 且相较于无视觉辅助的传统通信装置, 系统误码率显著降低. 此外, 模拟了终端追踪移动目标的典型场景. 实验结果表明, 在  $0 \sim 3\text{ m}$  通信距离范围内, 系统可在中低速移动条件下实现目标的稳定追踪和信号的可靠传输. 然而, 在高速移动场景下系统表现出较大的波束追踪延迟. 因此, 后续研究将重点针对系统在高速移动条件下的延迟特性与稳定性进行深入验证, 为实现移动场景下太赫兹相控阵实时通信提供重支撑.

表3 运动过程不同时刻系统误码率

取样时刻/s	误码率
1	0
2	$3.659 \times 10^{-5}$
3	$1.463 \times 10^{-4}$
无视觉协同	$1.086 \times 10^{-1}$

## 6 总结与展望

移动通信作为太赫兹赋能未来业务场景的核心瓶颈之一, 成为业内研究难点. 通信系统感知终端移动特征, 具有突破移动瓶颈的潜力. 通信感知一体化基础信息理论证实了基于感知协同的移动太赫兹通信的潜力, 并指导波束赋形、追踪、信道估计设计, 从技术层面进一步验证了感知协同的性能增益. 此外, 业内所设计的感知协同移动太赫兹通信仿真平台能够对基础理论、关键技术、硬件系统设计提供指导. 研究团队还进一步搭建了太赫兹通信感知一体化硬件系统, 实现了感知协同移动通信.

然而, 现有太赫兹移动通信理论和技术在特定场景下仍存在一定的局限性, 其主要表现如下:

1) 传统基础信息理论主要针对全向天线和平面

波传播特征建模,与太赫兹窄波束传输的基本特性存在显著差异,特别是在移动场景下,传统理论难以精确刻画太赫兹波束扫描、追踪等动态特性.针对这一问题,亟需建立面向窄波束传输的信息理论框架,系统分析太赫兹波束回波特征与通信性能的耦合关系,进一步完善太赫兹感知-通信一体化的理论基础.

2) 由于载波频率较传统通信系统显著提升,终端移动所产生的多普勒频偏较微波、毫米波更为显著,导致信道特性快速时变、平稳性严重退化.因此亟需发展适应高速移动场景的信道估计与均衡技术,以增强系统对多普勒效应的抗干扰能力.其次,现有支持太赫兹移动通信的大规模液晶相控阵天线系统存在较高的响应时延,严重制约了波束追踪的实时性能.通过开发新型快速响应的相控阵架构,有望支撑未来太赫兹移动通信系统的实际部署需求.

3) 针对无人机集群和智慧车辆等未来应用领域,亟需设计低复杂度的分布式波束管理策略,通过智能化波束管理和分配,实现多移动节点间的协同通信与干扰控制,从而充分发挥太赫兹移动通信的应用潜力,进一步推动感知协同太赫兹移动通信技术在未来智慧物联场景中的应用.

#### 参考文献 (References)

- [1] 王健, 杨闯, 闫宁宁. 面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 340-348.  
(Wang J, Yang C, Yan N N. Study on digital twin channel for the B5G and 6G communication[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(3): 340-348.)
- [2] Kürner T, Priebe S. Towards THz communications-status in research, standardization and regulation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(1): 53-62.
- [3] 石涵琛, 杨闯, 彭木根. 6G 太赫兹通信: 架构、技术与挑战[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(3): 395-412.  
(Shi H C, Yang C, Peng M G. Terahertz communication for 6G: Architectures, technologies and challenges[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2024, 39(3): 395-412.)
- [4] Wang C X, You X H, Gao X Q, et al. On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(2): 905-974.
- [5] 杨闯, 刘子乐, 石涵琛, 等. 太赫兹多天线移动通信性能界理论[J]. *无线电通信技术*, 2023, 49(6): 987-996.  
(Yang C, Liu Z L, Shi H C, et al. Theory of performance bounds of terahertz MIMO mobile communications[J]. *Radio Communications Technology*, 2023, 49(6): 987-996.)
- [6] 刘利平, 暴桐, 辛雨, 等. 太赫兹频段高速移动场景参考信号方案研究[J]. *电信科学*, 2024, 40(8): 34-41.  
(Liu L P, Bao T, Xin Y, et al. Research on reference signal scheme for high-mobility scenarios in the Terahertz frequency band[J]. *Telecommunications Science*, 2024, 40(8): 34-41.)
- [7] 乔雅莉, 丁远. 三大运营商频谱演进之路[J]. *通信电源技术*, 2019, 36(11): 130-132.  
(Qiao Y L, Ding Y. Way of spectrum evolution of three major operators[J]. *Telecom Power Technology*, 2019, 36(11): 130-132.)
- [8] Nguyen D C, Ding M, Pathirana P N, et al. 6G Internet of Things: A comprehensive survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(1): 359-383.
- [9] Bogdan M. World radiocommunication conference 2023(WRC-23) final acts[EB/OL]. [2024-8-19]. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.16-2024-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.16-2024-PDF-E.pdf).
- [10] 彭木根, 杨闯, 周天航. 室内单载波太赫兹无线信号传播及覆盖性能分析[J]. *通信学报*, 2022, 43(1): 24-33.  
(Peng M G, Yang C, Zhou T H. Analysis of propagation and coverage performance of indoor single-carrier radio signals in the terahertz bands[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(1): 24-33.)
- [11] 彭木根, 刘喜庆, 刘子乐, 等. 6G 通信感知一体化理论与技术[J]. *控制与决策*, 2023, 38(1): 22-38.  
(Peng M G, Liu X Q, Liu Z L, et al. Principles and techniques in communication and sensing integrated 6G systems[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(1): 22-38.)
- [12] 周天航, 杨闯, 刘子乐, 等. 太赫兹无线组网: 原理、现状与挑战[J]. *电信科学*, 2021, 37(6): 33-44.  
(Zhou T H, Yang C, Liu Z L, et al. Terahertz wireless networking: Principles, status and challenges[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(6): 33-44.)
- [13] 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室. 面向超视距感知的感知通信一体化智能车联系统[EB/OL]. (2020-03-26)[2024-09-03]. <http://www.citnet.cn/index.php?c=index&a=show&catid=132&id=1476>.
- [14] SAS Institute. Are you ready for your connected car?[EB/OL]. (2022-06-18) [2024-09-01]. [https://www.sas.com/en\\_au/insights/articles/big-data/the-internet-of-things-and-connected-cars.html](https://www.sas.com/en_au/insights/articles/big-data/the-internet-of-things-and-connected-cars.html).
- [15] Noor-A-Rahim M, Liu Z L, Lee H, et al. 6G for vehicle-to-everything(V2X) communications: Enabling technologies, challenges, and opportunities[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(6): 712-734.
- [16] 张新刚, 赵东升, 胡鹏展, 等. 基于差分进化算法的高通量卫星多波束天线优化设计[J]. *电波科学学报*, DOI: 10.12265/j.cjors.2023311.  
(Zhang X G, Zhao D S, Hu P Z, et al. Optimized design

- of high throughput satellite antenna based on differential evolution algorithm[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, DOI: [10.12265/j.cjors.2023311](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023311).)
- [17] 杨晋生, 苑露露. 基于 Lambertian 模型的星间太赫兹通信信道特性分析[J]. *信号处理*, 2022, 38(2): 232-240. (Yang J S, Yuan L L. Analysis of channel characteristics for inter-satellite terahertz communication based on lambertian model[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(2): 232-240.)
- [18] Muhammad Saqlain. 太赫兹地球-卫星通信链路的信道特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. (Muhammad S. Study on channel characteristics of terahertz earth-satellite communication link[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.)
- [19] Song L Z, Zhang T, Lai J X, et al. A 180-GHz to 220-GHz wideband transmitarray with wide-angle beam steering for intersatellite communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(1): 950-955.
- [20] Ding Y M, Shi X, Gao S, et al. Analysis of tracking-pointing error and platform vibration effect in inter-satellite terahertz communication system[C]. 2017 Chinese Automation Congress. Jinan, 2017: 430-434.
- [21] 宋瑞良, 李捷. 太赫兹技术在低轨星间通信中的应用与分析[J]. *无线电通信技术*, 2020, 46(5): 571-576. (Song R L, Li J. Application and analysis of terahertz technology in LEO inter-satellite communication[J]. *Radio Communications Technology*, 2020, 46(5): 571-576.)
- [22] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向 6G 的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781-789. (Chen X Y, Sheng M, Li B, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781-789.)
- [23] Elayan H, Amin O, Shihada B, et al. Terahertz band: The last piece of RF spectrum puzzle for communication systems[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 1-32.
- [24] 王铮. 空天地海一体化军事应急通信应用研究[J]. *电脑知识与技术*, 2023, 19(14): 69-72. (Wang Z. Research on the application of air, space and sea integrated military emergency communication[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2023, 19(14): 69-72.)
- [25] 邓明康, 杨闯, 石涵琛. 基于 OFDM 的太赫兹通感一体化波形设计与性能分析[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024, 22(6): 671-678. (Deng M K, Yang C, Shi H C. Design and performance analysis of terahertz integrated sensing and communication waveform based on OFDM[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024, 22(6): 671-678.)
- [26] ITU-R WP5D. Draft new recommendation ITU-RM framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[EB/OL]. (2023-06-19) [2024-07-22]. <https://www.itu.int/md/meetingdoc.asp?lang=en&parent=R19-WP5D-230612-TD-0905>.
- [27] AFRI-RI-RS-TR-2020-097. "Enabling frequency-agile ultra-broadband airborne networks in the THz band" final technical report[EB/OL]. (2020-07-23) [2024-07-22]. <https://apps.Dtic.mil/sti/pdfs/AD1101233.pdf>.
- [28] Report ITU-RM 2417-1. Technical and operational characteristics of land-mobile service applications in the frequency range 275-450 GHz[EB/OL]. (2022-11-09) [2024-07-22]. <https://www.itu.int/pub/R-REPM.2417-1-2022>.
- [29] Center for Converged TeraHertz Communications and Sensing. High-power and high-efficiency transmitters[EB/OL]. (2018-05-17) [2024-07-22]. <https://comsenter.engr.ucsb.edu/research/themes/integrated-circuits/high-power-and-high-efficiency-transmitters>.
- [30] ETSI GR THz 002 V1.1. 1. TeraHertz technology (THz); identification of frequency bands of interest for THz communication systems[EB/OL]. (2024-03-06) [2024-07-22]. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gr/THz/001\\_099/002/01.01.01\\_60/gr\\_thz002v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/THz/001_099/002/01.01.01_60/gr_thz002v010101p.pdf).
- [31] Mumtaz S, Jornet J M, Aulin J, et al. Terahertz communication for vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5617-5625.
- [32] Sareddeen H, Saeed N, Al-Naffouri T Y, et al. Next generation terahertz communications: A rendezvous of sensing, imaging, and localization[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(5): 69-75.
- [33] Rahim M, Kaddoum G, Do T N. Joint devices and IRSs association for terahertz communications in industrial IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2024, 8(1): 375-390.
- [34] Zugno T, Samara L, Boban M, et al. Terahertz communications for industrial manufacturing: A use case analysis[C]. 2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. Munich, 2023: 136-141.
- [35] Saqib N U, Haroon M S, Lee H Y, et al. THz communications: A key enabler for future cellular networks[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 117474-117493.
- [36] Selvan K T, Janaswamy R. Fraunhofer and Fresnel Distances: Unified derivation for aperture antennas[J].

- [IEEE Antennas and Propagation Magazine](#), 2017, 59(4): 12-15.
- [37] 刘子乐, 杨闯, 彭木根. 太赫兹感知协同移动通信方法及性能评估范式[J]. [移动通信](#), 2024, 48(3): 107-113. (Liu Z L, Yang C, Peng M G. Performance evaluation of terahertz sensing-assisted mobile communication method[J]. [Mobile Communications](#), 2024, 48(3): 107-113.)
- [38] Sareddeen H, Alouini M S, Al-Naffouri T Y. An overview of signal processing techniques for terahertz communications[J]. [Proceedings of the IEEE](#), 2021, 109(10): 1628-1665.
- [39] Liu Z L, Yang C, Peng M G. Integrated sensing and communications in terahertz systems: A theoretical perspective[J]. [IEEE Network](#), 2024, 38(3): 194-201.
- [40] Wang Y, Yang C, Ren Z Y, et al. Sensing-aided hybrid precoding for efficient terahertz wideband communications in multiuser high-data-rate IoT[J]. [IEEE Internet of Things Journal](#), 2024, 11(5): 8253-8267.
- [41] Han C, Chen Y H, Yan L F, et al. Cross far- and near-field wireless communications in terahertz ultra-large antenna array systems[J]. [IEEE Wireless Communications](#), 2024, 31(3): 148-154.
- [42] Yan L F, Han C, Yuan J H. A dynamic array-of-subarrays architecture and hybrid precoding algorithms for terahertz wireless communications[J]. [IEEE Journal on Selected Areas in Communications](#), 2020, 38(9): 2041-2056.
- [43] Sun Y R, Yang C, Peng M G. Subarray-based hybrid-field channel estimation for terahertz wideband UM-MIMO systems without prior location knowledge[J]. [IEEE Transactions on Vehicular Technology](#), 2024, 73(5): 7363-7367.
- [44] Rasilainen K, Phan T D, Berg M, et al. Hardware aspects of sub-THz antennas and reconfigurable intelligent surfaces for 6G communications[J]. [IEEE Journal on Selected Areas in Communications](#), 2023, 41(8): 2530-2546.
- [45] Fan Y H, Yang C, Sun Y R, et al. Hybrid channel tracking for THz massive MIMO communication systems in dynamic environments[J]. TechRxiv, DOI: [10.36227/techrxiv.171173443.37553701/v1](#).
- [46] Petrov V, Moltchanov D, Koucheryavy Y, et al. Capacity and outage of terahertz communications with user micro-mobility and beam misalignment[J]. [IEEE Transactions on Vehicular Technology](#), 2020, 69(6): 6822-6827.
- [47] 范玉衡, 杨闯, 彭木根. 感知协同太赫兹多天线移动通信: 原理、现状与展望[J]. [移动通信](#), 2023, 47(3): 84-91. (Fan Y H, Yang C, Peng M G. Sensing-aided terahertz MIMO mobile communication: Principle, status and prospect[J]. [Mobile Communications](#), 2023, 47(3): 84-91.)
- [48] Liu F, Cui Y H, Masouros 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.
- [49] Mehrotra N, Sabharwal A. On the degrees of freedom region for simultaneous imaging & uplink communication[J]. [IEEE Journal on Selected Areas in Communications](#), 2022, 40(6): 1768-1779.
- [50] Chiriyath A R, Paul B, Bliss D W. Radar-communications convergence: Coexistence, cooperation, and co-design[J]. [IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking](#), 2017, 3(1): 1-12.
- [51] Liu Z L, Yang C, Sun Y R, et al. Closed-form model for performance analysis of THz joint radar-communication systems[J]. [IEEE Transactions on Wireless Communications](#), 2023, 22(12): 8694-8706.
- [52] Liu Z L, Yang C, Peng M G. Terahertz sensing-assisted communications: A performance framework with angular velocity estimation[C]. 2023 IEEE Globecom Workshops. Kuala Lumpur, 2023: 979-984.
- [53] Gao F F, Wang B L, Xing C W, et al. Wideband beamforming for hybrid massive MIMO terahertz communications[J]. [IEEE Journal on Selected Areas in Communications](#), 2021, 39(6): 1725-1740.
- [54] Chen Y, Xiong Y F, Chen D, et al. Hybrid precoding for WideBand millimeter wave MIMO systems in the face of beam squint[J]. [IEEE Transactions on Wireless Communications](#), 2021, 20(3): 1847-1860.
- [55] Cui M, Dai L. Channel estimation for extremely large-scale MIMO: Far-Field or Near-Field?[J]. [IEEE Transactions on Communications](#), 2022, 70(4): 2663-2677.
- [56] Gao X, Dai L, Zhou S, et al. Wideband beamspace channel estimation for millimeter-wave MIMO systems relying on lens antenna arrays[J]. [IEEE Transactions on Signal Processing](#), 2019, 67(18): 4809-4824.
- [57] Rodríguez-Fernández J, González-Prelcic N, Venugopal K, et al. Frequency-domain compressive channel estimation for frequency-selective hybrid millimeter wave MIMO systems[J]. [IEEE Transactions on Wireless Communications](#), 2018, 17(5): 2946-2960.
- [58] Hu Z T, Chen C Y, Jin Y, et al. Hybrid-field channel estimation for extremely large-scale massive MIMO system[J]. [IEEE Communications Letters](#), 2023, 27(1):

- 303-307.
- [59] Brighente A, Cerutti M, Nicoli M, et al. Estimation of wideband dynamic mmWave and THz channels for 5G systems and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(9): 2026-2040.
- [60] You Y, Zhang L, Yang M H, et al. Structured OMP for IRS-assisted mmwave channel estimation by exploiting angular spread[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 4444-4448.
- [61] Haghghatshoar S, Caire G. Low-complexity massive MIMO subspace estimation and tracking from low-dimensional projections[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(7): 1832-1844.
- [62] Lee J, Gil G T, Lee Y H. Channel estimation via orthogonal matching pursuit for hybrid MIMO systems in millimeter wave communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(6): 2370-2386.
- [63] Shi H C, Yang C, Peng M G. Comprehensive link-level simulator for terahertz MIMO integrated sensing and communication systems with TDD framework[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(11): 16932-16947.
- [64] Hossain Z, Xia Q, Jornet J M. TeraSim: An ns-3 extension to simulate Terahertz-band communication networks[J]. *Nano Communication Networks*, 2018, 17: 36-44.
- [65] Tarboush S, Srieddeen H, Chen H, et al. TeraMIMO: A channel simulator for wideband ultra-massive MIMO terahertz communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(12): 12325-12341.
- [66] Eckhardt J M, Herold C, Jung B K, et al. Modular link level simulator for the physical layer of beyond 5G wireless communication systems[J]. *Radio Science*, 2022, 57(2): 1-15.
- [67] Han C, Wu Y Z, Chen Z, et al. THz ISAC: A physical-

layer perspective of terahertz integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(2): 102-108.

### 作者简介

彭木根 (1978-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 5G/6G 无线组网、物联网、人工智能在无线网络中的应用, E-mail: [pmg@bupt.edu.cn](mailto:pmg@bupt.edu.cn);

杨闯 (1992-), 男, 特聘副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为 6G 太赫兹通信感知一体化理论与技术, E-mail: [chuangyang@bupt.edu.cn](mailto:chuangyang@bupt.edu.cn);

张红杰 (1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为太赫兹 MIMO 预编码技术, E-mail: [yidaZhang@bupt.edu.cn](mailto:yidaZhang@bupt.edu.cn);

陈捷瑞 (2002-), 男, 博士生, 主要研究方向为太赫兹通信感知一体化硬件设计, E-mail: [1325427481@qq.com](mailto:1325427481@qq.com).

### 科研团队简介

彭木根教授团队主要研究领域包括计算无线通信、无线网络信息理论、协同通信、无线网络自组织、云无线接入网理论和技术、TD-SCDMA 及增强演进系统的传输和组网增强技术 (5G), 并在国际顶级期刊和会议发表论文 200 余篇, 其中 SCI 论文 60 余篇, 荣获 2018 年 Heinrich Hertz 论文奖; 获得国家发明专利 70 余项, 授权专利 50 余项; 提交标准技术文稿 30 余篇, 出版学术专著和译著 10 余部. 此外, 团队承担包括国家自然科学基金重点项目和优秀青年基金项目等多项国家级重点研究项目, 荣获高等学校科学研究优秀成果奖 (科学技术) 技术发明奖一等奖、中国通信学会科技进步奖二等奖各 1 次, 北京青年优秀科技论文奖二等奖 2 次. 团队已培养百余名硕博研究生, 10 余人荣获国际学术会议最佳学生论文奖、全国博士生学术年会优秀论文等奖项.

团队负责人彭木根教授是 IEEE、中国通信学会和英国工程技术学会会士, 国家优秀青年科学基金获得者, 国家杰出青年科学基金获得者, 入选国家“万人计划”青年拔尖人才及国家“万人计划”领军人才. 同时, 担任 IEEE Communications Magazine、IEEE Access、IEEE Internet of Things Journal 编辑/副编辑委员会成员. 连续多年被评为科睿唯安 ESI 全球高被引科学家、爱思唯尔中国高被引学者, 获 IEEE 通信学会海因里希赫兹奖、IEEE 通信学会亚太区杰出青年学者奖等.