

多频段协同通信的新机遇—— 太赫兹通信感知一体化



New Opportunities for Multi-Band Collaborative Communication — Integrated Communications and Sensing at Terahertz Band

胡田钰/HU Tianyu, 李玲香/LI Lingxiang, 陈智/CHEN Zhi

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 中国 成都 611731)
(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications
of UESTC, Chengdu 611731, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202204004

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220722.1709.016.html>

网络出版日期: 2022-07-25

收稿日期: 2022-06-12

摘要: 随着下一代移动通信系统(6G)的不断推进, 太赫兹(THz)通信感知一体化技术将成为多频段协同通信技术的新机遇。THz通信技术对多维度、多粒度感知能力的迫切需求将助力多频段协同技术的新发展。提出面向THz通感一体化的多频段协同技术, 认为可以通过感知协同和通信协同来提升THz通信性能。通过两个典型实例论述了面向THz通感一体化的多频段协同的关键技术和挑战。

关键词: 多频段协同通信; 太赫兹通信感知一体化; 太赫兹通信; 6G

Abstract: With the advancement of the next-generation mobile communication system (6G), the integrated communication and sensing at the terahertz (THz) band can be a new opportunity for the multi-band collaborative communication technology. It is considered that the urgent need for multi-dimensional, multi-granularity, and wide-area sensing information of THz communication and sensing integration technology can facilitate the new development of multi-band collaborative communication technology. Therefore, the multi-band collaboration technology for THz communication and sensing integration is proposed, which can improve the performance of THz communication through sensing collaboration and communication collaboration. In addition, the key technologies and challenges of the multi-band collaboration for THz communication and sensing integration through two typical examples are also presented.

Keywords: multi-band collaborative communication; integrated communication and sensing at THz band; THz communication; 6G

为缓解海量流量需求与紧缺频谱资源之间的尖锐矛盾, 有必要在下一代移动通信系统(6G)中研究并部署基于Sub-6 GHz、毫米波和太赫兹(THz)频段(0.1~10 THz)的全频谱通信。为此, 国际电信联盟(ITU)于2019年世界无线电大会(WRC2019)上为固定和移动业务标识了范围为275~450 GHz的新增频段。然而, 单一频段使用往往存在极大的局限性, 如Sub-6 GHz频段虽然技术十分成熟且已大面积部署, 但无法支持高速率的数据传输应用; 而毫米波和THz频段则难以承担较大覆盖范围内的通信服务, 且其严重的路径损耗和易阻塞性又导致系统复杂性和部署难度大大提高。因此, 我们可以通过多频段的协同来实现高速率、广覆盖、高质量的通信服务, 以满足未来如图1所示场景的沉浸化、智慧化、全域化的业务应用需求^[1]。

自2020年2月ITU在无线电通信部门5D工作组(ITU-

R WP5D)会议上启动面向2030及未来(6G)的研究工作之后, 中国的IMT-2030(6G)推进工作如火如荼地开展。其中, 随着THz通信和通信感知一体化等6G潜在关键技术的不断推进, THz通信感知一体化(简称通感一体化)技术被提出^[2], 以更好地实现智慧城市、全息通信、扩展现实等新兴应用及其相关业务(如人工智能、沉浸式交互和数字孪生等)。THz通感一体化不仅可以基于THz频段的极高频率以Tbit/s速率来实现业务的海量数据传输, 也可以基于THz频段的极大带宽来实现高精度和高分辨率感知。另外, 所获取的物理环境感知信息还可用来辅助THz通感一体化的通信功能, 如THz波束的快速对准和跟踪、智能定向组网等。然而, THz信道所面临的严重的路径传播损耗、较弱的衍射能力(即阻塞敏感性)和不可忽略的分子吸收现象同样使THz通感一体化技术的通信和感知范围受限^[3]。

多频段协同的无线通信往往关注Sub-6 GHz和毫米波频段/THz频段之间的协同, 如带外信息辅助的毫米波信道估

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2014)



▲图1 沉浸化、智慧化、全域化的业务应用需求场景^[1]

计和环境感知^[4]、控制面用户面分离架构下的控制信令低频传输和有用数据高频传输^[5]，以及对应的高低频无线协作组网^[6]等。然而，对于面向上述新兴应用和业务的THz通感一体化技术，现有的多频段协同通信技术却难以提供支持。上述业务的超高速通信需求可以通过具备THz频段的多频段协同通信技术来满足，这在一定程度上扩展了其通信覆盖范围和业务支持范围。THz的多频段协同所要求的物理环境感知信息却难由现有多频段协同通信技术来提供，以至于感知覆盖范围和感知信息丰富度受限，且难以对THz通信进行更有效的辅助。因此，基于THz通感一体化对多频段协同通信技术进行研究将会使该技术得到新的发展。通过多频段的感知协同和通信协同来增强THz通感一体化，可以助力数字孪生世界的多维构建和万物智联的发展。

1 多频段协同的无线通信

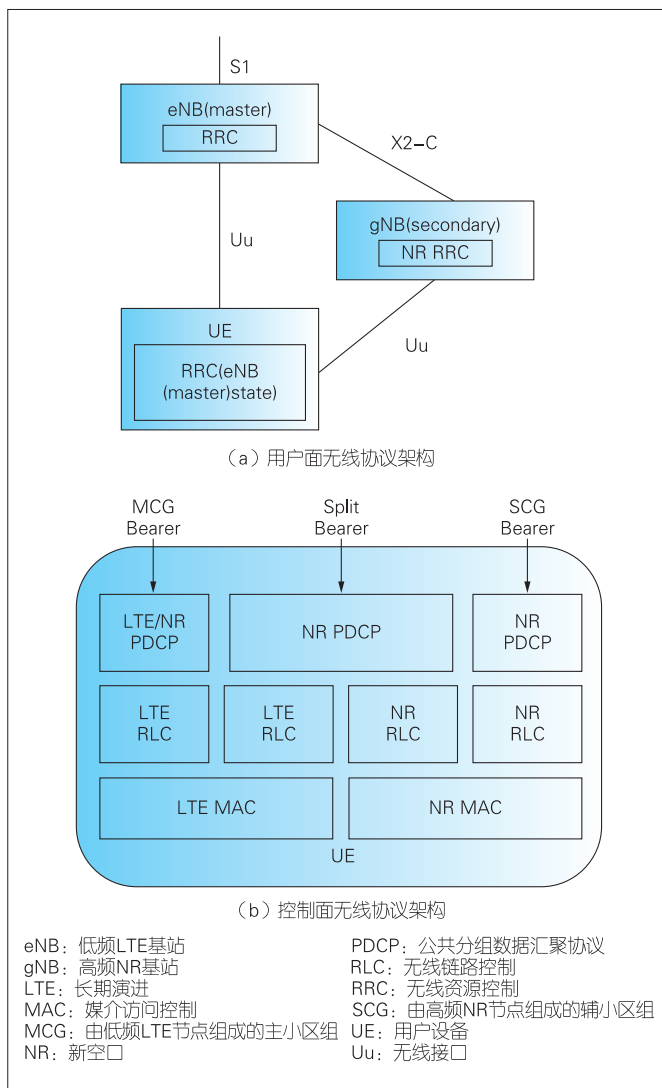
1.1 相关协议及标准

在5G系统中，多频段协作的无线通信主要是通过互通来实现的，由此可以提高总体数据速率，并实现控制面与数据面的分离。具体而言，第3代合作伙伴计划（3GPP）发布的第一个5G新空口（NR）标准（即3GPP release 15）及其后续标准提出，高频NR系统可以与低频NR或低频长期演进（LTE）系统进行互通。因此，互通可以在NR内的载波聚合、具有公共分组数据汇聚协议（PDCP）层的双连接或多连接以及切换等层级上实现。其中，双连接或多连接指的是把一个终端连接到两个或多个小区组的场景^[7]。因此，在5G NR非独立组网架构下，由低频LTE节点（即ng-eNB）组成的主小区组（MCG）负责处理控制面和（可能的）用户面信令的高可靠传输，而由高频NR节点（即gNB）组成的辅小区组（SCG）则负责用户面数据的高速率传输^[7]。3GPP还针对多连接技术发布了对应的技术规范，即TS 37.340^[8]。在该规范中，3GPP不仅给出了多连接技术在用户面和控制面的无线协议架构和网络接口，还给出了与媒介访问

问控制（MAC）层、无线链路控制（RLC）层、无线资源控制（RRC）功能等相关的概述。我们给出了多连接技术在用户面和控制面的无线协议架构，如图2所示。

针对非3GPP接入技术的无线局域网（WLAN），

IEEE 802.11 协议组织提出一种名为“快速会话迁移（FST）”的多频段互操作技术。该技术可以实现传统的Sub-6 GHz频段和毫米波频段之间的三频段Wi-Fi切换，即5 GHz、2.4 GHz和60 GHz之间的Wi-Fi通信切换^[9]。具体而言，该技术可以让会话基于IEEE 802.11ad协议在毫米波信



▲图2 多连接技术在用户面和控制面的无线协议架构

号覆盖范围内进行高速数据传输；而当毫米波信号受到阻碍时，会话又可以被无缝切换至基于 802.11a/b/g/n/ac 协议的 Sub-6 GHz 频段数据传输。文献[10]指出，基于 FST 的多频段协作是通过定义 IEEE 802.11 低频 MAC 层与高频 MAC 层之上的一种接口来实现的，即定义一个用于多频段协作的公共上层 MAC。以高频切换至低频为例，站点可以将毫米波频段 MAC 帧内容转移至 Sub-6 GHz 频段，进而利用 Sub-6 GHz 信道来传输毫米波信道的控制信令和有用数据。

1.2 基于多频段协同的无线通信技术

全球的研究人员对基于多频段协同的无线通信技术展开了大量研究，更为关注 Sub-6 GHz 和毫米波/THz 频段之间的协同方式及其带来的通信性能增益。对于物理层上的多频段协同通信而言，绝大部分研究者将获得的 Sub-6 GHz 信道信息视为带外信息，用以辅助毫米波通信。基于 Sub-6 GHz 信道和毫米波信道的空间相关性，文献[11]对毫米波信道参数进行粗略估计，进而辅助毫米波通信链路的配置。此外，也有研究者基于深度学习来提高 Sub-6 GHz 的带外信息的利用率。如文献[4]不仅证明了存在一个足够大的神经网络可以实现从 Sub-6 GHz 信道到最佳毫米波波束和阻塞状态的预测，还开发了一个深度学习模型，以极高的成功概率预测毫米波阻塞和最佳波束，无需波束训练开销。

针对无线通信系统 MAC 层的多频段协同通信技术，研究者们提出可以基于 sub-6 GHz 信道来发现邻居节点并交换控制信息，进而可以基于毫米波或 THz 信道来检查信道状况和高速传输数据。因此，文献[12]提出了一种由毫米波或 THz 信道回退至 Sub-6 GHz（或微波）信道来返回确认（ACK）信息的 MAC 协议。得益于多频段信道的空间相关性^[1]，文献[5]所提出的 MAC 协议不仅可以基于 Sub-6 GHz 全向射频信号来传输控制信令，还能从中提取出发角、到达角等空间信息，进而实现缓解链路阻塞和避免“耳聋效应”的协议效果。

此外，针对异构网络部署中基于双连接技术的高低频无线协作组网性能，部分研究者已展开研究。其中，数据面除了由宏基站负责维护之外，也可以存在于微小基站中。例如，文献[6]提出了一种由毫米波基站和 Sub-6 GHz 无人机基站组成的异构网络，并对该垂直异构网络在覆盖概率和频谱效率方面的性能进行分析。文献[13]基于 Sub-6 GHz、毫米波和 THz 协作而成的异构网络，提出了一种以用户为中心的动态基站集群设计。而文献[14]提出了一种具有无线回程能力的以 THz 网络为主的异构网络。文献[13]、[14]均对 THz 网

络的传输速率和覆盖范围进行了权衡考虑。

2 6G 赋能的多频段协同

为进一步加快 6G 关键技术的研发，IMT-2030（6G）推进组于 2022 年 4 月成立试验任务组，开展 THz 通信、通感一体化、智能超表面等 6G 潜在关键技术的验证与测试评估工作。正值 6G 概念形成及关键技术储备的关键窗口期，我们有必要结合 6G 潜在关键技术来探讨多频段协同通信技术的发展。

在上述 6G 潜在关键技术中，THz 通信已与现有多频段协同通信技术进行了浅层次的结合，如文献[5]、[12]—[14]所实现的 THz 通信覆盖范围和业务连续性的增强。而对于其他 6G 潜在关键技术，一方面如智能超表面、算力网络等在硬件、计算方面的技术难以与多频段协同通信技术进行结合；另一方面，适用于 Sub-6 GHz 或毫米波通感一体化技术的业务场景对由 THz 频段提供的高精度感知信息或 Tbit/s 速率并无迫切需要（因其一体化后获得的低精度感知信息和 Gbit/s 速率已足够用于辅助定向性不强的 Sub-6 GHz 或毫米波通信）。相反，对于 THz 通感一体化技术而言，其所获得的高精度但小范围感知信息可能无法保证对 THz 通信的有效辅助及对应信号覆盖范围的增强。这不仅仅是 THz 信道的分子吸收、阻塞敏感性和高传播损耗等信道特性造成的，还与 THz 通信过程中的波束分裂现象、近场天线特性等有关^[3]。

因此，在现有 6G 潜在关键技术中，唯有 THz 通感一体化技术可以与多频段协同通信进行深层次结合，即通过 Sub-6 GHz 或毫米波频段提供的低精度、大范围感知信息和通信信令、一体化后 THz 频段提供的高精度、小范围感知信息等多维度、多粒度广域信息来辅助 THz 通信，进而更有效地满足未来人工智能、沉浸式交互和数字孪生等业务的 6G 应用需求。因此，THz 通感一体化可以促进多频段协同通信的新发展，这是多频段协同通信技术的新机遇。

2.1 THz 通感一体化

本文所关注的 THz 通感一体化聚焦于以通信为中心的一体化设计，即通过空口及协议联合设计、时频空资源复用、硬件设备共享等手段，实现以 THz 通信为主、THz 感知为辅的统一设计，进而以一体化的高精度物理感知信息辅助高速率数据传输，提升 THz 通信的整体性能和业务能力^[15]。得益于 THz 频段的超大带宽，THz 通感一体化技术的通信能力适合中近距离下的高速率数据传输场景，但 THz 信道的高传输损耗和分子吸收促使 THz 通感一体化技术采用超大规模天线来获得极窄波束和对应天线增益。高定向性的 THz 通感一体

化信号虽然增加了THz通信链路的建立难度，但一体化的实时高精度感知信息则可以对此进行相应辅助。

THz通感一体化技术中的感知能力聚焦于主动且交互式的无线信号感知。具体而言，首先THz通感一体化设备通过对主动发出的THz信号、感知目标（以用户/基站为代表的）反馈的交互信息、经物理环境（以障碍物为代表的）调制后的THz回波信号进行处理；其次，再以THz波束的高方向性分析信号的直射、反射、散射、透射情况；最后，完成对目标对象和物理环境的定位、测距、测速、成像等功能，实现对周围通信环境的感知探索，并由此辅助THz通感一体化的通信功能。需要说明的是，THz信号不仅可以通过对许多介电材料和非极性物质的良好穿透来实现材料探测等感知功能，还可以基于与低频信号完全不同的散射特性来获取更丰富的环境感知信息^[16]。

2.2 面向太赫兹通信感知一体化的多频段协同

面向THz通感一体化的多频段协同技术主要分为多频段通信协同和多频段感知协同两部分。一方面，多频段通信协同以通信方式进行协同，进而辅助THz通感一体化设备的通信功能。例如，可以通过Sub-6 GHz或毫米波信号传输控制信令的协同来提升THz通信可靠性，或通过Sub-6 GHz或毫米波信号传输大范围内（潜在）基站/用户信息（如基站位置、用户ID等）的协同来丰富感知信息，便于移动THz通感一体化设备的快速链路建立。另一方面，多频段感知协同则以感知方式的协同来辅助THz通信功能。例如，可以通过周期性的Sub-6 GHz或毫米波信号的低精度、大范围环境感知和突发性THz通信需求下的THz高精度、小范围环境感知来实现感知协同。对此，可基于感知信息来预测障碍物移动轨迹、流量使用情况等，进而实现THz通感一体化设备的有效波束管理、小区切换和网络中继节点部署等决策。

总体来说，面向THz通感一体化的多频段协同旨在通过多频段信号实时获取通信和感知维度上具有粗粒度和细粒度的广域感知信息。其中，粒度的差别在于物理环境感知信息的感知精度和感知分辨率有所不同。需要说明的是，所获取的多维度、多粒度广域感知信息虽然可以直接用于若干有利于THz通信的决策算法，但感知信息的多样性无疑将带来较高的计算复杂度和较低的算法通用性。因此，上述感知信息还可用于构建若干（关于通信设备、障碍物、空气湿度等的）数字孪生体，即实现物理通信环境到虚拟数字环境的深度映射和实时交互^[17]。THz通感一体化设备可基于所构建的数字孪生体来准确估计（潜在）用户/基站和物理环境在下一时隙的状态和属性，进而快速有效地实现Sub-6 GHz、毫

米波和THz频段的频谱资源管理、THz通信链路建立和波束切换/小区切换、THz定向组网中的干扰管理和中继节点部署等决策。

3 多频段协同通信的关键技术与挑战

考虑到多频段感知/通信协同为THz通感一体化带来的额外系统增益和对应的系统复杂度，面向THz通感一体化的多频段协同技术存在着诸多关键技术及对应挑战。对此，本文将结合两个典型实例来进行阐述和分析，其中基于毫米波或Sub-6 GHz的射频感知系统和THz通感一体化系统将协同共站部署。

3.1 基于数字孪生的多频段协同

基于数字孪生的多频段协同旨在通过评估若干数字孪生体的变动信息来为THz通感一体化系统进行合理的多频段感知/通信协同。该实例设定低频射频感知系统和THz通感一体化系统可以分别通过现有数字孪生建模技术，事先得到包含固定物理环境信息和（潜在）基站/用户信息的粗粒度和细粒度的若干数字孪生体^[17]。因此，该实例中的多频段协同方法可被设计为：（1）某时隙下由射频感知系统通过回波/交互信号得到粗粒度的若干数字孪生体；（2）如果数字孪生体与之前存在较大差别（例如障碍物移动、潜在用户激活等），则对其进行更新，并将对应信令传递给THz通感一体化系统；（3）THz通感一体化节点在下一时隙对存在数字孪生体变动的方向进行THz感知，并对相应细粒度数字孪生体进行局部更新，以便于该时间块下基于数字孪生辅助的THz通信。

该实例的首要技术挑战在于如何结合THz通信对数字孪生体的变动情况进行准确建模和评估，进而保证多频段协同对THz通信辅助的有效性。例如，如果THz通感一体化节点长时间在某方向上和用户/基站进行通信，则可以适当忽略其余方向上数字孪生体的变动情况，即降低其余方向上的THz感知频次。如何将低频感知系统和THz通感一体化之间的控制信令融入现有5G NR协议架构同样是一大技术挑战，并且需要尽量减少对现有协议的调整，以便于运营商方面的技术部署。

3.2 基于深度强化学习的多频段协同

基于深度强化学习的多频段协同旨在通过离线/在线训练后的深度强化学习模型来逐步优化面向THz通感一体化系统的多频段感知/通信协同策略。该实例设定低频射频感知系统周期性地对粗粒度感知，而THz通感一体化系统则根

据突发性的通信请求进行细粒度感知。因此,该实例中的多频段协同方法可被设计为:深度强化学习模型在障碍物位置、用户/基站状态、THz通感一体化系统感知状态和通信请求等状态下,对THz感知的开始/结束时刻、用于低频或THz射频感知的带宽等动作进行决策,以实现由障碍物/用户轨迹预测或者波束对准跟踪等行为引出的THz通信性能最优优化这一长期回报。

该实例面临的技术挑战在于如何在5G NR协议架构下,对深度强化学习模型中的回报函数、状态空间和动作空间进行合理建模,以及对实现动作决策和长期回报评估的深度神经网络进行合理设计。此外,训练数据集的有效构建同样是该实例需要应对的一大技术挑战:离线训练时,需要获得大量适配于THz通感一体化场景的模拟通信数据;在线训练时,可能会由于模型失配下的THz通信链路中断而获取极少的实际通信数据。

4 结束语

为满足未来人工智能、沉浸式交互和数字孪生等业务的6G应用需求,THz通感一体化为多频段协同通信技术的发展带来了新的机遇。面向THz通信感知一体化,多频段协同技术所带来的多维度、多粒度广域感知信息将有效支撑THz通信能力的广域拓展,助力6G“万物智联、数字孪生”愿景的实现。

致谢

本文在撰写过程中得到电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室李少谦教授的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] IMT-推进组. IMT-2030(6G)推进组正式发布《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书 [J]. 互联网天地, 2021(6): 8-9
- [2] 李玲香, 谢郁馨, 陈智, 等. 面向6G的太赫兹通信感知一体化 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 698-705
- [3] CHEN Z, MA X Y, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications [J]. China communications, 2019, 16(2): 1-35. DOI: 10.12676/j.cc.2019.02.001
- [4] ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Deep learning for mmWave beam and blockage prediction using sub-6 GHz channels [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(9): 5504-5518. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3003670
- [5] ZHANG X F, HAN C, WANG X D. Dual-radio-assisted (DRA) MAC protocols for distributed terahertz networks [J]. IEEE open journal of vehicular technology, 2020, 2: 111-124. DOI: 10.1109/OJVT.2021.3049969
- [6] 赵存茁. 毫米波通信若干场景中的关键算法研究与性能分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020
- [7] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 5G NR: the next generation wireless access technology [M]. USA: Academic Press, 2020

- [8] 3GPP. Multi-connectivity, stage 2:3GPP TS 37.340 [S]. 2021
- [9] MOHAMED E M, NASSEF A M. Novel fast session transfer decision-making algorithm using fuzzy logic for Wi-Fi/WiGig wireless local area networks [J]. IET communications, 2020, 14(21): 3917-3926. DOI: 10.1049/iet-com.2020.0470
- [10] 邓莹莹. IEEE 802.11ax MAC协议优化设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018
- [11] GONZALEZ-PRELCIC N, ALI A, VA V, et al. Millimeter-wave communication with out-of-band information [J]. IEEE communications magazine, 2017, 55(12): 140-146. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700207
- [12] CACCIAPUOTI A S, SANKHE K, CALEFFI M, et al. Beyond 5G: THz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(6): 110-115. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700924
- [13] HUMADI K M, TRIGUI I, ZZHU W P, et al. User-centric cluster design and analysis for hybrid sub-6GHz-mmwave-THz dense networks [EB/OL]. [2022-06-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9763439>
- [14] RAJA A A, JAMSHED M A, PERVAIZ H, et al. Performance analysis of UAV-assisted backhaul solutions in THz enabled hybrid heterogeneous network [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops. IEEE, 2020: 628-633. DOI: 10.1109/INFOCOMWKSHP550562.2020.9163026
- [15] 胡田钰, 李玲香, 陈智, 等. 感知辅助的太赫兹无线通信技术 [J]. 邮电设计技术, 2021, (12): 23-27. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2021.12.005
- [16] JU S H, SHAH S H A, JAVED M A, et al. Scattering mechanisms and modeling for terahertz wireless communications [C]//Proceedings of ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2019: 1-7. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761205
- [17] WU Y W, ZHANG K, ZHANG Y. Digital twin networks: a survey [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(18): 13789-13804. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3079510

作者简介



胡田钰, 电子科技大学在读博士研究生; 主要研究方向为太赫兹通信感知一体化技术。



李玲香, 电子科技大学副教授、硕士生导师, 国家级科技创新团队核心成员; 主要研究方向为太赫兹通信、通信感知一体化、无线通信安全技术; 现主持国家自然科学基金青年项目1项; 近5年来发表论文10余篇。



陈智, 电子科技大学教授、博士生导师; 主要研究方向为无线与移动通信、无线通信网络、通信抗干扰技术; 2014年入选四川省杰出青年学术带头人, 2016年担任公安部通信标准化技术委员会委员, 2018年担任太赫兹技术教育部重点实验室副主任, 2019年担任中国6G推进组太赫兹通信技术任务组召集人; 发表论文100余篇, 撰写学术专著3部, 获得授权国家发明专利50余项。