

感知辅助的太赫兹无线通信技术

Sensing-Assisted Terahertz Wireless Communication Technology

胡田钰,李玲香,陈 智,李少谦(电子科技大学,四川 成都 611731)

Hu Tianyu, Li Lingxiang, Chen Zhi, Li Shaoqian (University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

摘 要:

太赫兹无线通信技术因其极高速率与巨大带宽被设想为未来6G的关键技术。有必要对感知辅助的太赫兹通信展开讨论,以缓解太赫兹频段的高路径损耗和分子吸收问题。首先介绍了频谱态势感知、射频感知和太赫兹通信感知一体化3种感知技术。然后,依照不同用户群体分析了感知辅助下的太赫兹无线通信适用场景及用例。进一步地,从3方面讨论了感知辅助的太赫兹通信关键技术和挑战。最后对未来广域通感融合场景下的太赫兹无线通信技术进行了展望。

关键词:

太赫兹通信;频谱态势感知;射频感知;太赫兹通信感知一体化

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2021.12.005

文章编号: 1007-3043(2021)12-0023-05

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Terahertz wireless communication technology is considered to be the key technology of 6G in the future due to its extremely high data rate and huge bandwidth. However, it is necessary to discuss the sensing-assisted terahertz communication to alleviate the problems of high path loss and molecular absorption in the terahertz band. Firstly, three sensing technologies including spectrum situation sensing, radio frequency sensing, and terahertz communication and sensing integration technology are introduced. Moreover, according to different user groups, the application scenarios and use cases of sensing-assisted terahertz wireless communication are analyzed. Furthermore, the key technologies and challenges of sensing-assisted terahertz communication are discussed from three aspects. Finally, the prospect of terahertz wireless communication technology in the future wide-area synaesthesia fusion scenario is carried out.

Keywords:

Terahertz communication; Spectrum situation sensing; Radio frequency sensing; Terahertz communication sensing integration

引用格式: 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.

0 引言

随着智能移动设备的不断普及以及新兴移动宽带应用的快速发展,激增的流量需求与紧缺的频谱资源间的矛盾也变得愈发尖锐。据国际电信联盟的ITU-R M.2370-0报告估计,全球移动用户数量在2030年将达到171亿,而2020年至2030年全球国际移动通信流量将增长10~100倍^[1]。这对于仅能实现Gbit/s的

5G毫米波数据传输而言,几乎将是极限。此时,具备海量频谱资源的太赫兹(THz)频段(0.1~10 THz)跃入了研究人员的视线。不仅国际电信联盟于2019年11月标识了275~450 GHz的新增THz频段,而且国内IMT-2030(6G)推进组太赫兹通信任务组也于2021年9月发布了相应研究报告^[2]。因此,THz无线通信技术被设想为实现下一代通信系统即6G的关键技术之一^[3-4]。

THz通信具备超大带宽、超高速率、极窄波束等特点,能以极强的方向性和安全性来实现Tbit/s的高速数据传输。因此,THz无线通信技术可以用于如沉浸

基金项目: 国家自然科学基金(U21B2014)

收稿日期: 2021-11-05

式全息通信、热点区域通信覆盖、车联网传感数据传输等带宽密集型应用场景^[5-6]。另一方面,得益于远小于厘米波几个数量级的太赫兹波长,THz器件可以实现小型化和便携性。同时,这也使得THz信号具备极高的感知精度和分辨率,且不易受雾、尘或湍流等环境影响。因此,THz无线通信技术还可用于由可穿戴或植入式太赫兹设备构成的纳米健康监测网络^[7],或支持姿态识别、高精度定位等感知业务^[8]。

然而,THz通信存在严重的路径损耗,并且衍射能力较弱(即对阻塞敏感),以至于THz通信信道十分稀疏,覆盖范围有限。另外,THz通信还存在着不可忽略的分子吸收现象(尤其是水蒸气吸收),由此产生的额外信号衰减将THz频段分隔为若干传输窗,并且传输窗的带宽和位置变得与传播距离密切相关,图1展示了100 GHz~1 THz频段的路径损耗^[9-10]。此外,THz通信所使用的极窄定向波束也会进一步加大波束训练和对准的开销,并导致定向组网时难以发现邻居节点,即产生“耳聋效应”。

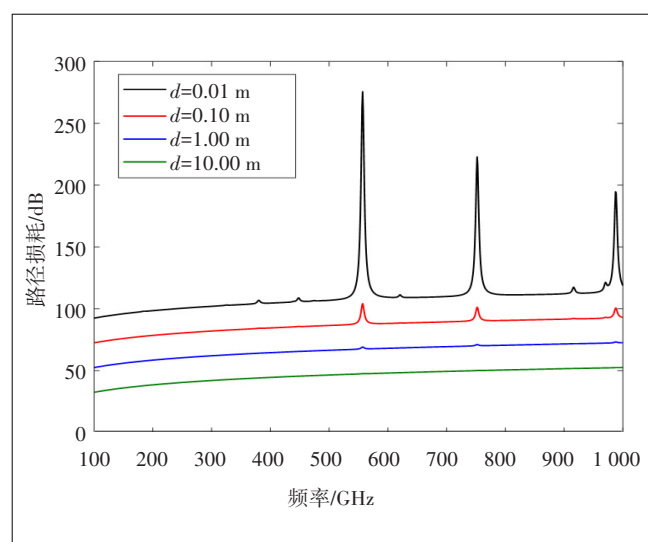


图1 不同距离下路径损耗随频率的变化情况

由于THz通信存在上述不足之处,能提供物理环境信息和电磁频谱信息的感知技术引发了THz通信研究人员的极大兴趣。也就是说,如果THz通信系统能感知(进而估计)获取到当前环境障碍物分布、用户移动性和频谱使用情况等信息,则能将其应用于波束快速对准和跟踪、通信覆盖范围增强、距离自适应调制和智能定向组网等蜂窝网络服务场景,进而改善上述不足。

1 面向太赫兹通信辅助的感知技术

1.1 频谱态势感知

文献[11]指出,频谱态势是指电磁环境的当前状态、综合形势和发展趋势。因此,频谱态势感知旨在通过专用频谱监测网络和移动终端构成的群智感知网络,监测获取目标频段、目标区域的频谱忙闲情况、频谱辐射功率、频谱调制方式以及频谱接入协议等电磁频谱信息,以生成整体、动态、关联、可视的实时广域频谱态势,进而更好地认知电磁频谱空间和支撑无线通信技术^[11]。例如,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)便开展了反映辐射功率的频谱态势项目^[12],如图2所示。

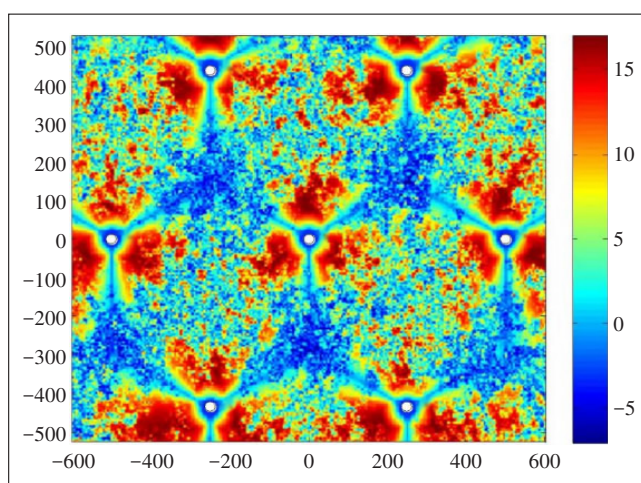


图2 关于频谱辐射功率的频谱态势示意图

频谱态势感知可以被认为是被动式分布式感知(即目标区域的若干感知节点仅被动接收对应电磁信号),且可以用于构建关注频谱特性的数字孪生世界。需要说明的是,所获取的实时广域频谱态势不仅能反映sub-6 GHz、毫米波乃至THz频段的电磁频谱信息,还能从其辐射功率分布上推断出具有一定精度的物理环境信息,进而实现路径规划、障碍物位置/高度推断等应用。

对于频谱态势感知得到的实时广域频谱态势,运营商不仅可以从中反映的热点区域流量使用情况来合理部署THz基站,而且基站还可以根据频谱辐射功率来实现sub-6 GHz控制信令传输/备用传输时的THz通信。进一步地,还可以根据物理环境信息来辅助进行波束训练与跟踪,以及针对THz信道传输窗

特性来实现更为有效的距离自适应调制技术。

1.2 射频感知

射频感知旨在利用主动发送的射频信号(如 sub-6 GHz、毫米波和 THz 信号)和捕获的对应反射、折射、衍射、散射信号来感知物理环境中的各种目标^[13]。进一步地,以信号传播模型和海量感知数据双驱动的方式来估计目标的距离、方位、尺寸、速度、水汽密度等物理量,进而构建实时环境地图。例如,射线追踪软件 wireless insite 可以基于信号传播模型对射频感知过程进行模拟^[14],如图 3 所示。

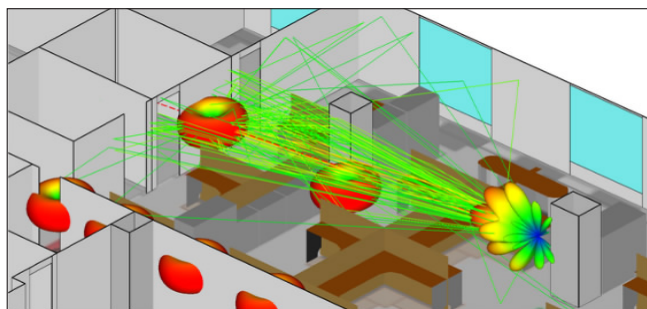


图3 基于射线追踪的射频感知示意图

因此,射频感知可以被认为是主动式感知,且可以被用于构建关注环境特性的数字孪生世界。进一步地,射频感知既可以通过类似于单基地雷达的方式进行集中式环境感知,也可以利用海量物联网设备在若干频段进行分布式环境感知,进而得到不同分辨率不同覆盖范围的多维环境地图。

对于射频感知得到的实时环境地图,THz 通信系统不仅可以避免若干用户移动过程中反复的信道估计,还可以通过远比频谱态势分辨率更高的物理环境信息来提升 THz 波束跟踪精度。进一步地,通过对移动用户姿态/障碍物轨迹的估计,THz 通信系统也可以对波束切换/小区切换进行主动决策以防止 THz 链路中断。此外,依据实时环境地图反映出的水汽密度信息、介电常数信息,还可以有效分析 THz 信道传输特性和估计误差。

1.3 太赫兹通信感知一体化

通信感知一体化是指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,实现通信与感知功能统一设计,进而实现网络整体性能和业务能力的提升^[2]。而本文所关注的 THz 通感一体化则旨在以一体化的高精度感知信息辅助高速率数据传输^[15]。图 4 给出了不同频段通信感知融合情况。从图 4 可以

看出,相比于其他频段,THz 通感一体化还可以基于 THz 器件便携性的优势来更好地满足 6G 个性化通信需求。

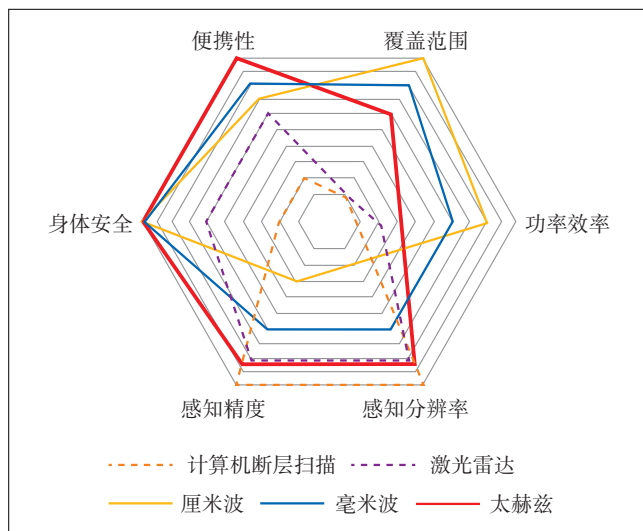


图4 不同频段通信感知融合对比

因此,THz 通感一体化可以被认为是关注一体化特性的主动交互式感知,即感知者通过与感知目标的信息交互来对接收到的 THz 信号进行感知^[15];并且同样可以通过集中式或分布式实现,如 THz 定向组网。同时,相位 MIMO 雷达和波束成形通信技术硬件结构的相似性也使 THz 通感一体化更易实现^[16]。

THz 通感一体化带来的高精度小范围宏观/微观物理环境信息,能避免上述 2 种感知技术辅助 THz 通信时空口交互带来的额外处理和传输,例如通过更低能耗更低时延的姿态识别/目标定位等感知信息来实现波束切换与角度跟踪,有利于实现绿色通信。此外,还可以在无线纳米通信场景下实现纳米机器人或纳米传感器间的健康监测数据传输。

2 感知辅助的太赫兹无线通信应用场景

THz 无线通信系统可以利用上述感知技术获取的电磁频谱信息和物理环境信息来构建具备各自感知特性的数字孪生世界,进而在感知辅助的 THz 无线通信技术的支撑下,服务于智慧生活、产业升级、社会治理等方面应用。因此,本文依照 THz 通信面向的不同用户群体,将感知辅助的 THz 无线通信应用场景分为面向 THz 蜂窝网络的场景和面向消费者/行业/社会的场景,并给出对应用例。

2.1 面向太赫兹蜂窝网络的场景

本小节具体讨论了THz基站参数配置、智能资源管理和无线自组网这3个场景用例。首先,针对THz基站参数配置用例,可以依据目标状态/障碍物分布调整THz波束搜索范围,避免基站频繁发送极窄训练波束而造成的过大时频资源开销和过高传输中断概率;也可以依据水汽密度、介电常数等信息调整THz信号调制、编码方式,尽量避免分子吸收对THz通信的影响。

针对智能资源管理用例,可以通过深度强化学习和元学习技术,依据频谱、用户和环境的实时属性、状态,快速实现不同配置下THz和sub-6 GHz频谱资源、网络计算资源、时域空域码域资源的管理、调度及决策,一方面可以提升资源利用效率,另一方面也可以(通过波束切换/小区切换/sub-6 GHz辅助)增强THz通信覆盖范围以及传输可靠性。

最后,针对无线自组网用例,THz通信系统可以依据智能设备、智能机器人、网联车等移动节点的高精度定位信息,一方面避免节点间的碰撞和加快节点的发现,另一方面也可以实现THz波束的快速对准和跟踪,进而实现灵活高效的多址接入、切换、路由等,提升网络性能。

2.2 面向消费者/行业/社会的场景

本小节具体讨论数据亭下载、智慧交通、智能工厂这3个场景用例。首先,针对数据亭下载场景,鉴于数据亭分布在如机场、车站等热点区域,且同时为1个用户或者多个用户在THz频段提供短时超高速率数据下载服务^[2],该场景面临着用户姿态改变后的波束跟踪及对准问题,以及用户数过多造成的通信覆盖增强问题。此时则可引入物理环境感知信息来辅助解决上述问题,如基于姿态识别结果进行波束对准。

针对智慧交通场景,鉴于网联车之间需要基于THz通信来实现海量传感数据传输,该场景不仅面临着波束跟踪及对准问题,还面临着雨雾天气下信道质量恶劣问题。此时则可同时引入电磁频谱信息和物理环境信息来辅助解决上述问题,如在路边合理部署智能反射面进行THz信号中继和增强^[17]。

针对智能工厂场景,鉴于智能设备、智能机器人需要基于THz通信来实现高安全性的机密控制数据传输,该场景面临着THz频段的干扰管理问题和大量THz用户智能组网问题。此时则可引入电磁频谱信息和THz通感一体化下的物理环境信息,以分布式高效的辅助方式来解决上述问题。

3 关键技术与挑战

尽管研究人员已对sub-6 GHz和毫米波频段的感知辅助通信技术进行了充分研究,但鉴于THz频段的独特性,基于频谱态势感知、射频感知和THz通感一体化的THz无线通信技术的实现仍存在着诸多难点。因此,接下来本文将从空口技术、组网设计与硬件架构3方面来分析感知辅助的THz无线通信关键技术及对应挑战。

3.1 空口技术

首先,针对频谱态势感知和射频感知辅助下的THz波形设计技术的研究挑战在于如何将感知到的通信距离、水汽密度、THz频段忙闲情况等信息综合且有偏好地应用于不同通信场景的调制解调中,以避免THz信道的分子吸收特性、距离及频率选择特性的影响。例如,在进行上述应用时可能需要考虑感知精度对高功率效率和频谱效率等通信指标的影响。针对该类挑战,一种可行方案是引入人工智能或数字孪生技术,通过预先的离线训练或模拟的算法预测来得到最优的THz波形。

其次,可以针对THz通感一体化辅助时的THz波形设计技术展开讨论。这其中不仅需要考虑旨在最大化抗干扰和抗衰落性能的通信波形与旨在具备最优自相关特性的感知波形间的较大差异,也需要考虑THz频段的分子吸收、载波频率偏移、高相位噪声等特点,进而才能满足带外能量泄露、多普勒偏移鲁棒性等指标。一种可行方案即是在传统正交频分多址通信波形中引入同步信号块来感知通信环境。

此外,研究人员还面对着THz通感一体化辅助时的THz波束赋形的挑战。一方面,被要求准确指向通信链路方向的通信波束和被要求进行大范围时变扫描的感知波束之间存在着较大差异;另一方面,宽带THz超大规模天线系统中也存在着由于移相器而导致的严重波束偏移现象。这2方面问题都对THz通感一体化下的波束赋形技术提出了更高的要求。

3.2 组网设计

首先,针对频谱态势感知和射频感知辅助下THz组网设计技术的研究挑战一方面在于如何利用THz、毫米波、sub-6 GHz频谱忙闲情况、人群密度等信息来有效预测流量使用情况和合理部署THz基站、无人机、智能反射面等节点;另一方面在于设计考虑THz信道高路径损耗、极强方向性、距离及频率选择特性等特

点的多跳THz通信、智能小区切换、干扰管理算法,通过THz节点定向组网的方式实现THz通信覆盖范围的增强。

而针对THz通感一体化辅助时的THz组网设计技术,研究人员还需要额外考虑通信功能和感知功能自干扰和交叉干扰问题、感知范围不足带来的“耳聋效应”加剧问题、电磁频谱信息不足带来的THz节点部署失衡问题。此时,一方面可以通过传统干扰抑制和消除手段、实时信道波束信息和节点信息来进行较好的波束决策,另一方面则可以考虑THz无线链路与其他频段进行联合组网,但需要对兼容性展开讨论。

3.3 硬件架构

硬件架构部分的挑战主要集中在THz通信感知一体化技术这部分。一方面,THz频段的波长与器件尺度相比拟,各级元件间的耦合不可避免且更趋突出^[14]。强耦合使得寄生参数变大、种类增多,导致器件性能急剧下降、难以预期^[14];另一方面,面向通感一体化的硬件设计需要解决高性能全双工等要求带来的干扰和设备电路设计问题,需要综合考虑高隔离度电路及器件、高性能高精确度的器件与电路模型建模、小型化集成化的收发信机方案的相应设计和实现^[2]。因此,如何整体有机地解决这2方面问题也将成为感知辅助的THz无线通信场景下的一项挑战。

4 结束语

对于“万物智联,数字孪生”的6G总体愿景,感知辅助的THz无线通信技术无疑将成为其中的重要一环。这不仅源于THz频段所提供的极高数据速率和巨大通信带宽,也源于通过万物智联而获取的感知信息及其构建的数字孪生世界所提供的THz通信性能提升。未来研究可以将单一方式的感知技术扩展到多维互通的广域通感融合,进而辅助具备智慧内生、算网一体特征的太赫兹无线通信系统,以满足人民对美好信息生活的追求。

参考文献:

- [1] NAVARRO-ORTIZ J, ROMERO-DIAZ P, SENDRA S, et al. A survey on 5G usage scenarios and traffic models[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(2): 905-929.
- [2] IMT-2030(6G)推进组发布6G白皮书和技术报告,描绘6G未来[EB/OL]. [2021-09-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1711250222863321690&wfr=spider&for=pc>.
- [3] 谢莎,李浩然,李玲香,等.面向6G网络的太赫兹通信技术研究综

- 述[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 36-43.
- [4] CHEN Z, MA X Y, HAN C, et al. Towards intelligent reflecting surface empowered 6G terahertz communications: a survey [J]. China Communications, 2021, 18(5): 93-119.
- [5] DARDARI D, DECARLI N. Holographic communication using intelligent surfaces[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(6): 35-41.
- [6] CHANG B, YAN X, ZHANG L, et al. Joint communication and control for mmWave/THz beam alignment in V2X networks[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal. [2021-09-24]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9608996>.
- [7] YANG K, BI D D, DENG Y S, et al. A comprehensive survey on hybrid communication in context of molecular communication and terahertz communication for body-centric nanonetworks [J]. IEEE transactions on molecular, biological, and multi-scale communications, 2020, 6(2): 107-133.
- [8] 万潇阳,孙耀华,王则予. 6G室内定位技术原理与展望[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 91-104.
- [9] AKYILDIZ I F, JORNET J M, HAN C. Terahertz band: next frontier for wireless communications [J]. Physical Communication, 2014 (12): 16-32.
- [10] 谢莎,李浩然,李玲香,等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 168-186.
- [11] 吴启晖,任敬. 电磁频谱空间认知新范式: 频谱态势[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 625-632.
- [12] 李喆. 美军典型电磁频谱战项目及发展趋势综述[J]. 飞航导弹, 2020(5): 71-74.
- [13] ZHENG T Y, CHEN Z, DING S Y, et al. Enhancing RF sensing with deep learning: a layered approach [J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(2): 70-76.
- [14] Remcom. Wireless InSite [EB/OL]. [2021-11-25]. <https://www.remcom.com/examples/2017/6/22/5g-mmwave-channel-modeling-with-diffuse-scattering-in-an-office-environment>.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] NING B Y, CHEN Z, CHEN W R, et al. Terahertz multi-user massive MIMO with intelligent reflecting surface: beam training and hybrid beamforming [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(2): 1376-1393.

作者简介:

胡田钰,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,副教授,博士,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;陈智,教授,博士,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;李少谦,教授,参与多个国家重大专项与国家科技计划的总体技术工作,并在抗干扰通信、4G/5G/B5G移动通信、宽带集群通信以及太赫兹通信等领域取得了一系列重要突破和创新。