

文章编号: 2095-4980(2025)03-0214-11

拐角场景太赫兹信道传输及物理层安全特性研究

苏悦^{a,c}, 李达^a, 刘嘉诚^a, 崔家源^a, 孙厚军^{a,b,c}, 马建军^{*a,b,c}

(北京理工大学 a. 集成电路与电子学院; b. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室, 北京 100081;
c. 唐山研究院, 河北 唐山 063099)

摘要: 随着 6G 网络的发展, 深入研究城市环境中太赫兹信道的传播特性对于设计高效、可靠、安全的通信系统至关重要。本文通过理论分析、数值仿真和实验测量相结合的方法, 系统地研究了不同类型建筑拐角(包括锐角、直角、钝角和弧形)对太赫兹信道传输及其物理层安全的影响。实验采用了太赫兹信道测量系统, 在 140 GHz、225 GHz 和 320 GHz 三个频率下进行测量, 并使用数值仿真和刀口衍射模型进行理论分析。研究结果揭示了拐角结构对太赫兹波传播的影响, 包括衍射和反射现象, 以及频率变化对这些现象的影响。该项工作为太赫兹通信系统在城市环境中的部署提供了理论指导。

关键词: 太赫兹信道; 建筑物拐角; 信道衍射; 物理层安全

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024523

Terahertz channel propagation and physical layer security characteristics in corner scenarios

SU Yue^{a,c}, LI Da^a, LIU Jiacheng^a, CUI Jiayuan^a, SUN Houjun^{a,b,c}, MA Jianjun^{*a,b,c}

(a.School of Integrated Circuits and Electronics; b.Beijing Key Laboratory of Millimeter and Terahertz Wave Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; c.Tangshan Research Institute, Beijing Institute of Technology, Tangshan Hebei 063099, China)

Abstract: With the development of 6G networks, in-depth research on the propagation characteristics of terahertz(THz) channels in urban environments is crucial for designing efficient, reliable, and secure communication systems. The impact of different types of building corners (including acute, right, obtuse, and curved angles) on the transmission of THz channels and their physical layer security are systematically investigated through a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and experimental measurement. The experiments are conducted by using a THz channel measurement system at three frequencies: 140 GHz, 225 GHz, and 320 GHz. Theoretical analysis is performed by using numerical simulations and knife-edge diffraction models. The research findings reveal the effects of corner structures on the propagation of THz waves, including diffraction and reflection phenomena, as well as the impact of frequency variations on these phenomena. This work provides theoretical guidance for the deployment of THz communication systems in urban environments.

Keywords: terahertz wireless channel; building corner; diffraction characteristics; physical-layer security

随着无线通信技术的快速发展, 对第六代(6G)移动通信网络的研究已成为学术界和工业界的热点^[1]。作为 6 G 网络的关键使能技术之一, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)辅助的太赫兹通信系统因其潜在的超高速率和灵活性而备受关注^[2-3]。但太赫兹波段特有的传播特性给系统设计带来了诸多挑战^[4-5], 尤其是在复杂的城市环境中, 建筑物结构(特别是建筑物拐角), 对太赫兹信道的传播特性产生了显著影响^[6-7]。这些影响主要体现在信号强度衰减、多径分量产生以及物理层窃听风险增加等方面, 因此, 深入研究和精确建模城市环境中太赫兹

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071046; 62471033)

*通信作者: 马建军 email: jianjun_ma@bit.edu.cn

信道的传播特性,对于设计高效、可靠、安全的通信系统至关重要。

近年来,关于太赫兹信道建模的研究取得了一系列进展。德国布伦瑞克工业大学 Priebe 等^[8]在室内环境下对 300 GHz 信道传播特性进行了深入研究,为反射和散射行为提供了重要见解。这一研究随后被拓展至室外场景,证实了非视线(Non-Line-of-Sight, NLOS)太赫兹信道传输的可行性^[6]。特定结构,如玻璃门、墙面对太赫兹信道的影响也成为研究焦点^[9-10]。在无人机通信领域,虽已有学者从空-地传播和通信挑战的角度进行了分析^[11-12],但这些研究往往忽视了太赫兹频段的独特性质。此外,现有的无人机-地太赫兹信道传输研究多局限于视距(Line of Sight, LOS)情况^[13],未能充分考虑复杂城市环境中的各种传播情况。

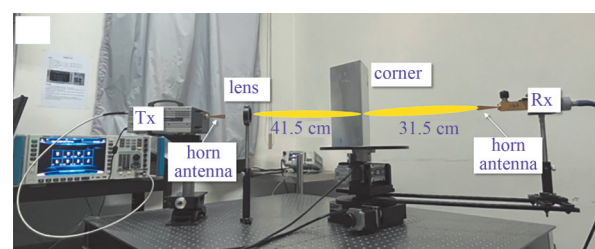
太赫兹通信中衍射效应的重要性已得到广泛认可。在 300 GHz 频段进行的实验测量揭示了太赫兹波在简单障碍物周围的衍射现象^[14]。这项研究的成果随后被扩展至更宽的频带范围(100 GHz~2 THz),涵盖了刀口和狭缝衍射等多种情况^[15]。这些研究为研究太赫兹信道在各种环境中的传播行为提供了必要的实验数据和理论基础。但现有研究主要聚焦于简单几何结构,对于城市环境中复杂的建筑物拐角及其对太赫兹信道的影响尚缺乏深入探讨。这一研究空白不仅限制了对城市场景下太赫兹通信系统性能的准确预测,也阻碍了相关技术在实际应用中的推广。因此,深入研究建筑物拐角对太赫兹信道的影响,不仅具有重要的理论意义,也对未来 6G 网络中 UAV-THz 通信系统的实际部署具有直接的指导作用。

鉴于现有研究的局限性,本文旨在系统性地研究不同类型建筑拐角对太赫兹信道传输及其物理层安全的影响,重点关注拐角的几何特性(如锐角、直角、钝角和弧形)以及不同频率(140 GHz、225 GHz 和 320 GHz)下的传播行为。通过结合理论分析、数值仿真和实验测量,为太赫兹通信系统在城市环境中的部署提供全面的指导。

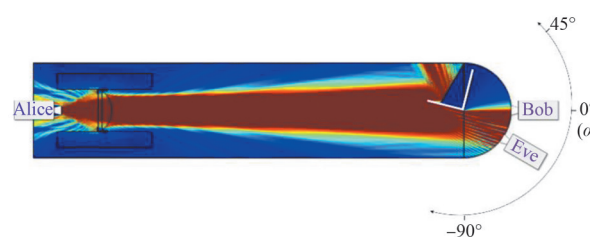
1 实验设置

实验采用未调制的太赫兹信道测量系统,用于高精度测量太赫兹信道在建筑物拐角及各种障碍物周围的传播特性。测量系统的发射端由 Ceyear 1465D 信号发生器(发射功率 0 dBm)、Ceyear 82406B 倍频模块(倍增系数 $\times 12$)以及 HD-1400SGAH25 喇叭天线组成,这些组件依次连接,如图 1(a)所示。信号发生器产生高达 20 GHz 的信号后经倍频模块转换至 110~170 GHz 的频率范围。为进一步增强信号的方向性和增益,在喇叭天线前方放置一个焦距为 10 cm 的聚乙烯透镜。透镜位于天线与被测拐角之间的直线路径上,以确保信号在多个方向上获得足够的功率,从而有助于分析信道的衍射特性。在接收端,使用了与发射端相同的 HD-1400SGAH25 喇叭天线接收传播信号,随后信号被导入 Ceyear 71718 功率传感器进行检测和分析。对于更高频率范围(220~325 GHz)的测量,发射端的倍频模块和天线分别替换为 Ceyear 82406D 倍频器(倍增系数 $\times 18$)和 Ceyear 89901S 喇叭天线。实验过程中,在发射天线(Tx)和接收天线(Rx)之间的视线路径上精确放置一个建筑物拐角模型,模型的位置应确保其边缘与信号波束中心对齐,以模拟实际城市环境中的传播场景,并便于研究不同几何拐角对信道特性的影响。接收天线在绕拐角旋转时,保持与拐角的距离恒定,并通过步进电机以 1° 的角度增量移动,采集不同位置的信号。

为深入研究不同类型的拐角对太赫兹信道的影响,本文采用表面光滑的铝板制作了一系列拐角模型^[16],包括锐角、直角、钝角和弧形角。选择使用金属材料进行研究主要是因为真实建筑物拐角难以获取,且其表面材料特性难以精确表征。而金属模型不仅便于制作和控制,还能提供一个理想化的反射和衍射环境,有助于聚焦几何形状对信道的影响。金属模型与实际建筑物材料的特性存在显著差异,尤其是在信号吸收方面;此外,实际城市环境中的建筑物表面常存在明显的粗糙度,这会导致太赫兹波段的信号产生漫反射,但也有许多建筑物表面相对光滑,表现出镜面反射特性。本文旨在深入研究建筑物拐角几何形状(如锐角、直角、钝角和弧形角)对信道传播的影响,因此未考虑实际建筑物材料的吸收特性;同时选择了理想化的光滑模型。如果在当前模型中加入表面粗糙度因素,可能会增加复杂性,进而影响了对几何形状本身特性进行准确分析和测量的能力。



(a) experimental setup for diffraction measurement



(b) simulation configuration for security eavesdropping analysis

Fig.1 Experimental setup

图1 实验设置

对实验场景进行数值仿真,并将仿真的信道场景设定为如图 1(b)所示的窃听环境。Alice 作为发射端发送重要信息,接收端用户 Bob 作为合法用户接收信息,用户 Eve 作为窃听者试图非法监听信道信息。采用 COMSOL Multiphysics 5.2 进行有限元仿真,结果如图 1(b)所示。波导边界采用完美电导体(Perfect Electric Conductor, PEC),在波导输出处设置有完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)吸收;散射边界用于波导边缘和四周空气边界;端口边界用于波导入射,激发 TE 模式,波束尺寸为 1 mm,该尺寸不会影响信道的实际传输特性,因此对仿真结果的影响可忽略不计。波导宽度和长度为 25 mm,板间距为 0.733 mm;波导槽宽 0.7 mm,长 3 mm,位于波导前端 4 mm 处。距离波导 41.5 cm 处设置为 PEC 的拐角,拐角周围是半径为 70 mm 的半圆截面作为空气边界。采用四面体单元进行几何网格划分,共有 1 641 357 个域单元。使用 gmres 迭代求解器分别在 140 GHz、225 GHz、320 GHz 进行仿真。

2 仿真与实验结果分析

首先聚焦于 140 GHz 的太赫兹信道在城市环境中常见的 90°拐角场景下的传播特性。这个频率代表了未来 6G 通信系统可能使用的频段之一^[17],因此具有重要的实际指导意义。图 2(a)为拐角障碍物对太赫兹信道特性影响的仿真结果。在拐角后方的阴影区域(旋转角 $\alpha > 0^\circ$)可观察到明显的衍射效应。这一现象与文献[17]中关于太赫兹波在材料边界行为的理论预测一致。相比之下,在非遮挡区域(旋转角 $\alpha < 0^\circ$),拐角的存在导致了显著的反射现象,信道功率出现了局部增强,并与文献[18]在城市太赫兹信道传播研究中的发现相吻合。但值得注意的是,这种反射现象也给信道带来了潜在的泄露风险,导致被窃听概率的增加。

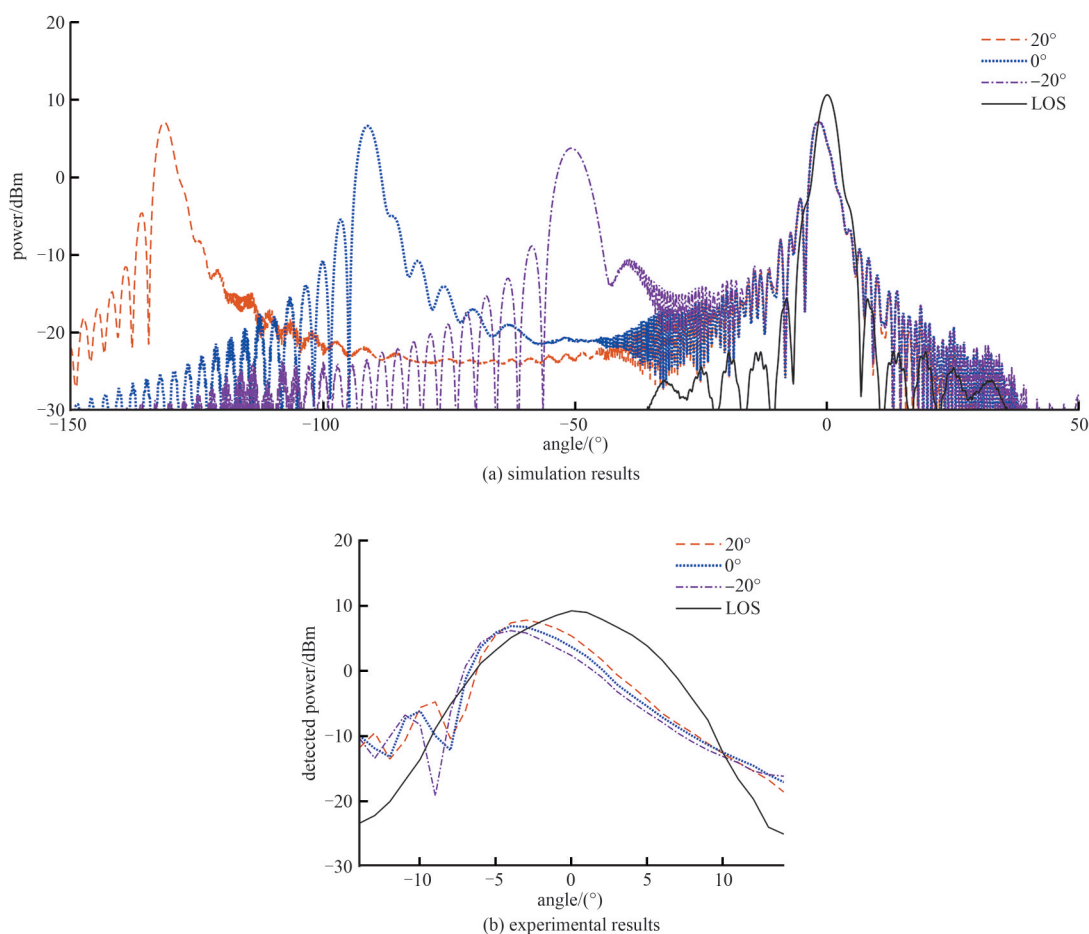


Fig.2 Comparison for a 90° corner with varying rotation angles
图 2 90°拐角在不同旋转角度下的结果对比

此外,从图 2(a)中还发现,拐角结构的旋转对阴影区域的信道衍射特性影响不大。这为无线电波传播研究中广泛使用的刀口衍射模型在拐角场景中的适用性提供了支持,并为简化太赫兹信道在复杂环境中的传播分析提供了理论基础。然而,在反射区域,拐角旋转会导致反射波束角度发生显著变化。这种变化可通过电磁波反射

定律解释，并在文献[19]中得到证明。

为验证仿真结果的准确性，使用图1(a)所示的实验装置进行实际测量。图2(b)展示的实验结果与图2(a)中的仿真预测结果一致，证实了仿真模型的有效性；同时该结果也与Kim等^[20]在太赫兹信道表征研究中的结论相符，进一步增强了本研究的可靠性和普适性。需要指出的是，由于实验装置的限制，本文实验测量中的旋转角度范围相对较小，主要集中在拐角附近的关键区域。尽管如此，这个范围内的测量结果仍提供了足够的信息验证本文的仿真模型。

为更加全面理解拐角的几何形态对太赫兹信道传播的影响，将研究范围扩展到一系列具有代表性的角度。通过仿真实验模拟了太赫兹波在60°、90°、120°以及弧形拐角处的传播情况，结果如图3所示。拐角本身的角度变化对主波束的传播特性影响不大，主波束在不同几何形态的拐角间保持了相对一致的特性。这一发现进一步支持了刀口衍射模型在城市场景太赫兹信道传播中的适用性，对于简化太赫兹通信系统在城市环境中的部署和优化具有重要意义。

从图3中还可以观察到拐角角度的变化对波束的旁瓣特性产生了显著影响：随着拐角角度增大，旁瓣功率也相应增加。这种现象可归因于反射波向更宽角度范围传播，导致能量在空间中的分布更加分散。该结果与文献[21]中关于城市场景中建筑几何形状对太赫兹传播特性影响的研究结果一致。

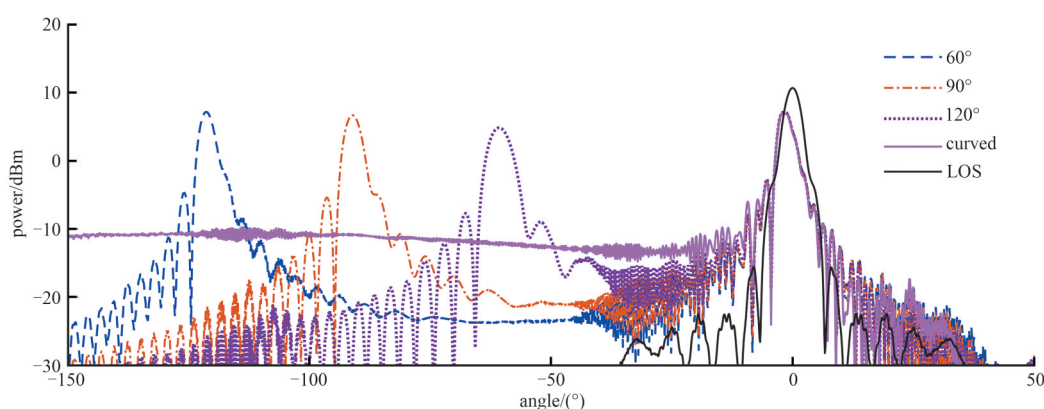


Fig.3 Simulation results for different corner types at 140 GHz operating frequency

图3 140 GHz工作频率下不同拐角类型的仿真结果

增大拐角角度所带来的旁瓣功率增加对城市环境下太赫兹通信系统的设计具有多重意义：一方面，正如文献[22]指出的，这些高功率旁瓣可用于增强NLOS场景的覆盖，对于构建稳健的城市太赫兹通信网络是一个重要考虑因素。这种特性可帮助解决太赫兹通信中的一个主要挑战，即在复杂城市环境中维持可靠的信号覆盖；另一方面，在太赫兹网络规划策略时，这种旁瓣功率的增加也可能导致对密集城市部署的干扰增加^[23]。这种干扰可能会降低网络的整体性能，特别是在高密度部署的场景中。此外，旁瓣功率的增加还可能带来安全性问题。高功率的旁瓣可能导致信号泄露到非预期区域，增加被窃听的风险^[16]。这一点在设计安全敏感的太赫兹通信系统时需特别注意，可能需要采取额外的安全措施。如，天线设计可采用波束成型技术减少旁瓣能量并提高主波束的方向性，从而增强信号传输的稳定性。同时，在具有显著反射效应的拐角区域，天线可配合可重构智能表面技术，动态调控反射路径和波束方向，减少信号泄露，提高物理层安全性。

进一步探讨拐角对不同频率的信道传播的影响。图4(a)和图4(b)为90°拐角的情况，图4(c)和图4(d)为弧形拐角的结果。值得注意的是，相较于高频信道，低频信道在拐角处表现出更为明显的衍射现象。这与衍射的基本原理相符，即随着频率的增加，衍射效应逐渐减弱。这一现象在文献[24–25]对毫米波在城市环境中传播的综合研究中得到进一步的证实。频率与波长的反比关系解释了高频信道受影响程度降低的原因：随着频率升高，波长变小，衍射效应随之减弱。无论是90°拐角还是弧形拐角场景，这种频率依赖行为都普遍存在。这种频率相关性对城市太赫兹通信系统的设计具有深远影响，正如文献[26]所指出的，太赫兹波段中较低频率的强衍射效应可被巧妙地利用来增强NLOS场景下的信号覆盖。这一特性在复杂的城市环境中尤为重要，可以帮助解决建筑物遮挡导致的信号衰减问题。基站在部署过程中可依据这些特性，在存在较多锐角和钝角的区域增加基站密度，减少衍射效应对信号覆盖的影响，并提高城市复杂环境中信号的覆盖范围和可靠性。相反，高频信号由于衍射效应较弱，可能需要采用更先进的波束成型技术或更密集的网络部署策略确保充分的覆盖范围。

频率变化对信号的安全性也会产生重要影响。较低频率的信号由于衍射效应更强，可能会增加信息泄露的

风险，尤其是在城市环境中存在大量反射和散射表面的情况下。相比之下，高频信号虽在传播损耗方面面临更大挑战，但其较弱的衍射特性可有助于减少未授权接收(非法窃听)的可能性，从而增强了通信系统的物理层安全性。

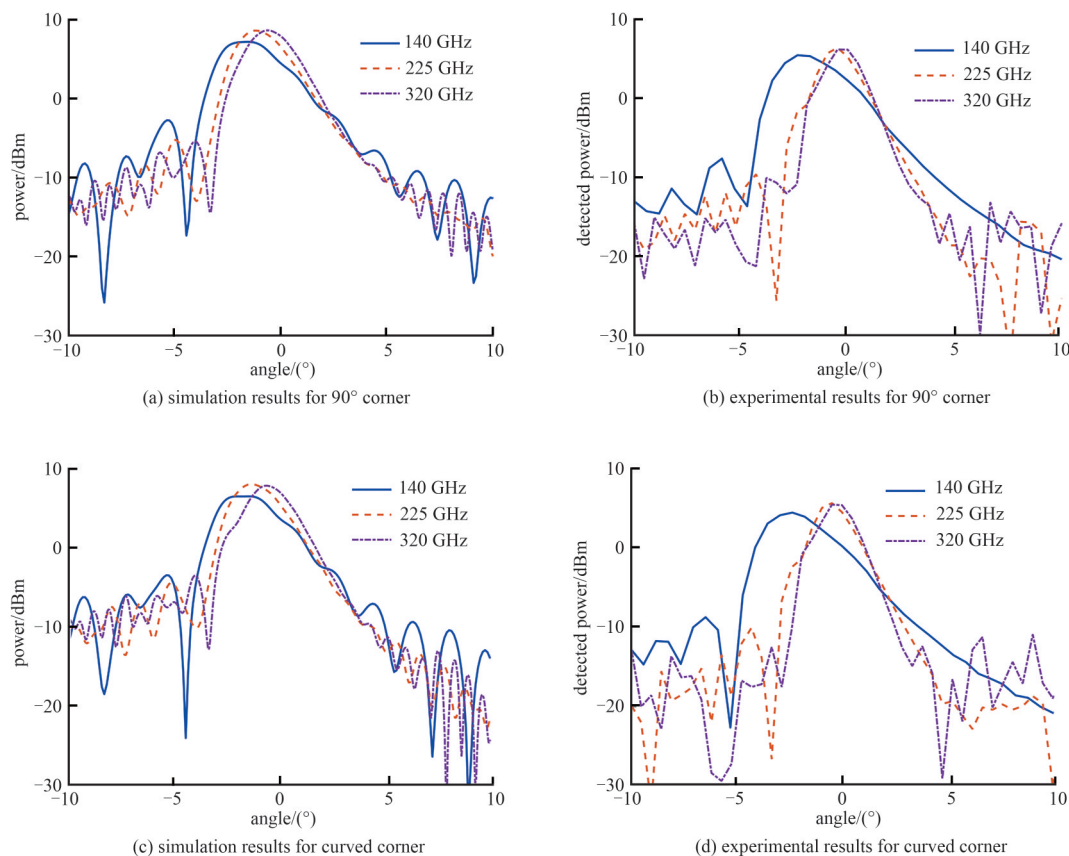


Fig.4 Frequency-dependent simulation and experimental results

图4 频率相关的仿真和实验结果

3 理论计算结果分析

已有多种理论模型用于预测衍射信道的传播特性，主要的模型包括射线追踪法^[27]、全波数值仿真、刀口衍射等简化的解析模型。光线追踪法适用于高频环境，可精确模拟反射和折射，但计算复杂度高；全波数值仿真能提供最精确的结果，但计算资源需求巨大。基于前文的仿真和实验结果，本文选择刀口衍射模型，该模型简单而高效。

刀口衍射模型能够预测由尖锐边缘障碍物引起的信号衰减，可用于评估复杂城市场景中太赫兹波传播情况。刀口衍射模型核心为非涅耳积分，描述了半无限平面引起的衍射图样。刀口衍射引起的主要衰减因子表达式为：

$$G_{\text{dB}} = -20 \lg(|F(v)|) \quad (1)$$

式中 $F(v)$ 为复菲涅耳积分，定义为：

$$F(v) = \frac{1+j}{2} \left[\int_v^{\infty} \exp\left(-j\pi \frac{t^2}{2}\right) dt + \int_{-\infty}^v \exp\left(-j\pi \frac{t^2}{2}\right) dt \right] \quad (2)$$

式中 v 为非涅耳-基尔霍夫衍射参数：

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda \times d_1 \times d_2}} \quad (3)$$

式中： h 为障碍物在视距路径上方的高度； d_1 和 d_2 分别为 Tx 到障碍物和障碍物到 Rx 的距离； λ 为 THz 信号的波长。

图5为由刀口衍射模型推导出的信道传输特性。如图5(a)所示,拐角的存在对波束产生了显著的衰减。有趣的是,尽管拐角位于波束中心,但波束在遇到拐角之前就开始出现衰减,0°时可观察到约6 dB的衰减。拐角之前的衰减可归因为拐角进入到波束的第一菲涅耳区^[28]。基于刀口衍射模型的预测结果(图5(b))与本文之前的仿真和测量结果存在差异。造成这种差异的主要原因是太赫兹波与城市结构相互作用具有多样性,这可从图2(b)的仿真结果得到验证。拐角不仅会引起阻碍和衍射现象,还会导致反射现象。这些反射现象在简单的刀口衍射模型中未被考虑,但其在信道的整体特性中做出了显著贡献,特别是对旁瓣的影响。

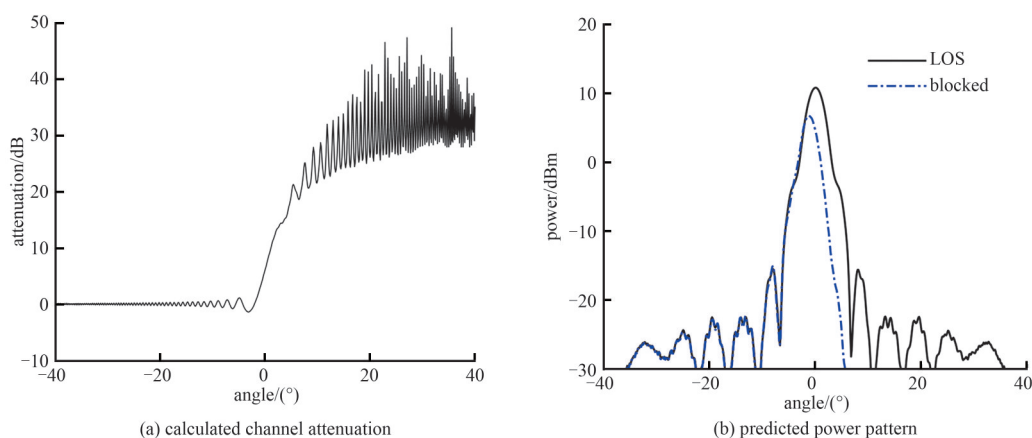


Fig.5 Results of knife-edge diffraction model

图5 刀口衍射模型结果

尽管刀口衍射模型在拐角附近提供了很好的一阶近似太赫兹信道行为,但存在局限性。正如前文中所讨论的,该模型未考虑反射或散射效应,但这些效应在现实世界中的城市环境中非常重要。根据文献[14,29]的建议,为更全面地理解太赫兹波在复杂场景中的传播情况,应考虑使用更复杂的模型容纳这些额外的现象。

4 物理层安全特性分析

随着太赫兹通信技术的不断发展和可能到来的大规模部署,物理层安全成为一个日益重要的研究课题。基于图2和图3的结果,城市环境中的建筑物拐角不仅影响信号传播,还可能对通信安全产生重大影响。反射和散射可能会将信号泄露到非预期区域,增加被窃听的风险。太赫兹波的高频特性(如窄波束)为实现安全通信提供了独特的优势。因此,深入研究太赫兹通信在城市拐角场景下的物理层安全特性,对于设计和部署安全、可靠的太赫兹通信系统至关重要。

假设发射端(Alice)仅发射信号,而不具备检测信道状态信息的能力^[30]。这种假设反映了许多实际通信系统的限制,特别是在复杂的城市环境中。在这种情况下,窃听者(Eve)可能会利用建筑物拐角等结构产生的反射和散射,选择一个有利位置截获通信。为量化这种威胁,采用归一化保密容量(c_s)^[16]参数进行衡量。

$$c_s = \frac{\log(1 + R_{SN,Bob}) - \log(1 + R_{SN,Eve})}{\log(1 + R_{SN,Bob})} \quad (4)$$

式中: $R_{SN,Bob}$ 、 $R_{SN,Eve}$ 分别为Bob和Eve的信噪比。该参数综合考虑了Bob和Eve的接收能力,将它们的绝对功率水平与特定的调制和编码方法联系起来。 c_s 的取值范围为1(Eve无法窃听)~0(Eve和Bob接收到相同信号),甚至可能为负值(Eve接收到的信号比Bob更强)。Eve成功解码信号的能力不仅取决于信号强度,还与调制方案、绝对功率水平以及Eve的接收器性能等因素相关。从信息论的角度看,即使在 $c_s < 0$ 的情况下,在某些条件下仍可能实现安全传输^[31],这种复杂性使为 c_s 定义一个普适的安全阈值变得困难。尽管如此,在实际应用中,通信系统设计通常会努力增大 c_s 的值,以提高链路的整体安全性^[32]。因此本文采用 $c_s = 0.5$ 作为参考阈值,将 $c_s < 0.5$ 的情况视为潜在的窃听风险区域。

基于式(4)得出的计算结果如图6所示。由拐角引起的衍射效应带来的窃听威胁相对较小,但拐角所引起的反射现象会带来显著的安全隐患。这一结果与文献[16]在太赫兹通信系统中的发现一致。在此基础上,本文推测,粗糙的拐角表面可能会加剧窃听威胁。文献[33]的研究支持了这一假设,他们发现表面粗糙度会增加多径分量,从而为潜在的窃听者创造更多机会。这一点在设计城市太赫兹通信系统时需特别考虑,可能需要开发新的表面

处理技术或信号处理方法减轻这种风险^[34]。但在弧形拐角的情况下,存在窃听威胁的可能性较低。这是因为弧形拐角将能量更均匀地分布在各个方向上,有效稀释了任何潜在窃听点的信号强度。此外,计算结果还表明,在太赫兹频段内,频率的变化既未显著减轻窃听威胁,也未改变最易导致窃听威胁的角度。这说明,影响窃听角度的主要因素是拐角本身及其旋转角度,而非信道频率。

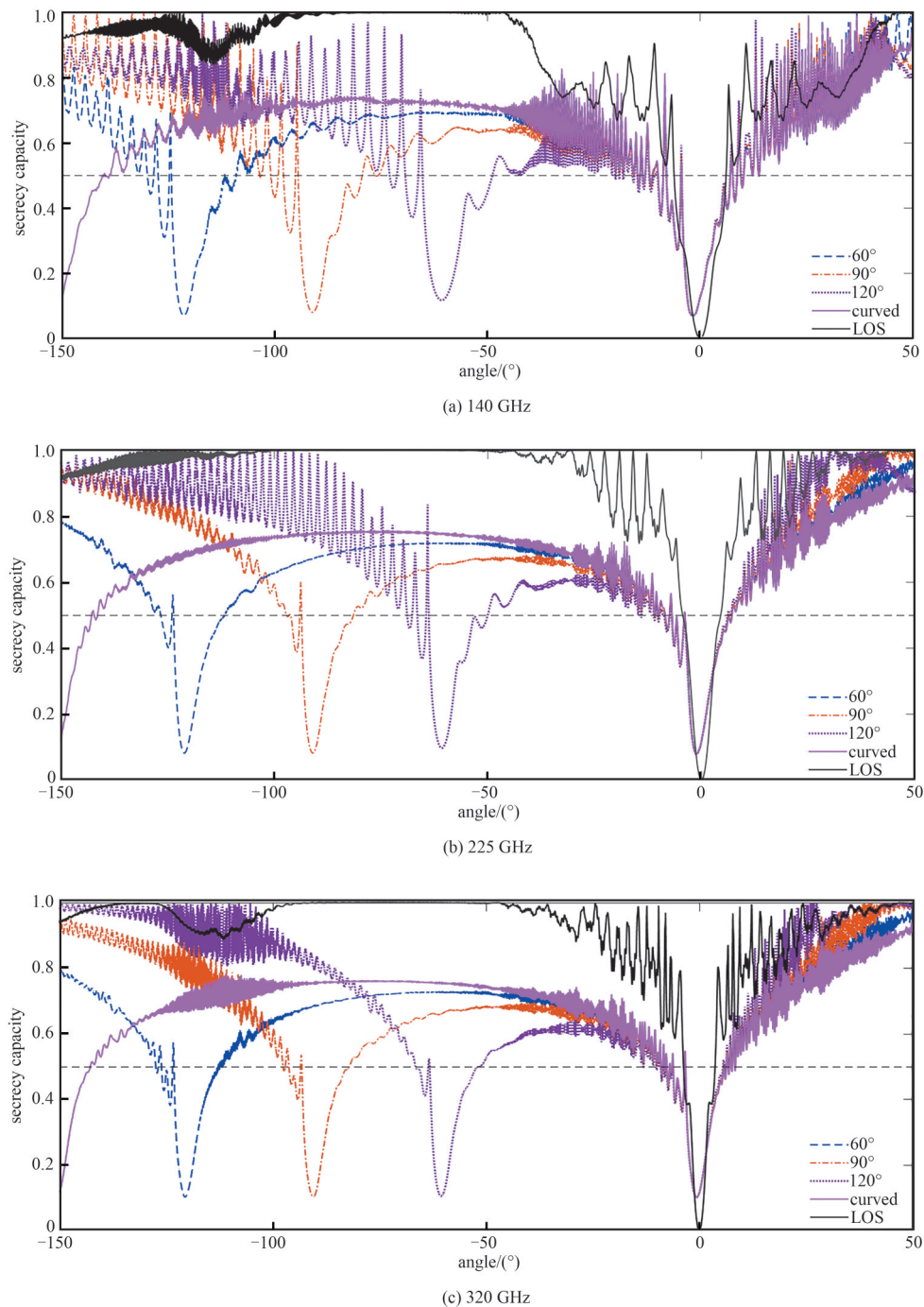


Fig.6 Secrecy performance analysis for a 90° corner with different rotation angles at different frequencies

图6 不同工作频率下90°拐角不同旋转角度的保密性能分析

图7为幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK)和16阶正交幅度调制(16 Quadrature Amplitude Modulation, QAM)2种调制方案下太赫兹信道的预测误码率(Bit Error Rate, BER)性能。ASK由于其对信号振幅变化的高度敏感性,特别适合评估信道强度波动对通信质量的影响。这一特性在太赫兹通信中尤为重要,因为太赫兹信道易

受到障碍物遮挡和反射的影响，导致信号强度显著变化。16-QAM通过同时调制信号的振幅和相位传输数据，提供了更高的频谱效率和对信号完整性更全面的评估。在太赫兹频段，相位噪声和频率偏移可能成为限制通信性能的重要因素^[35]。

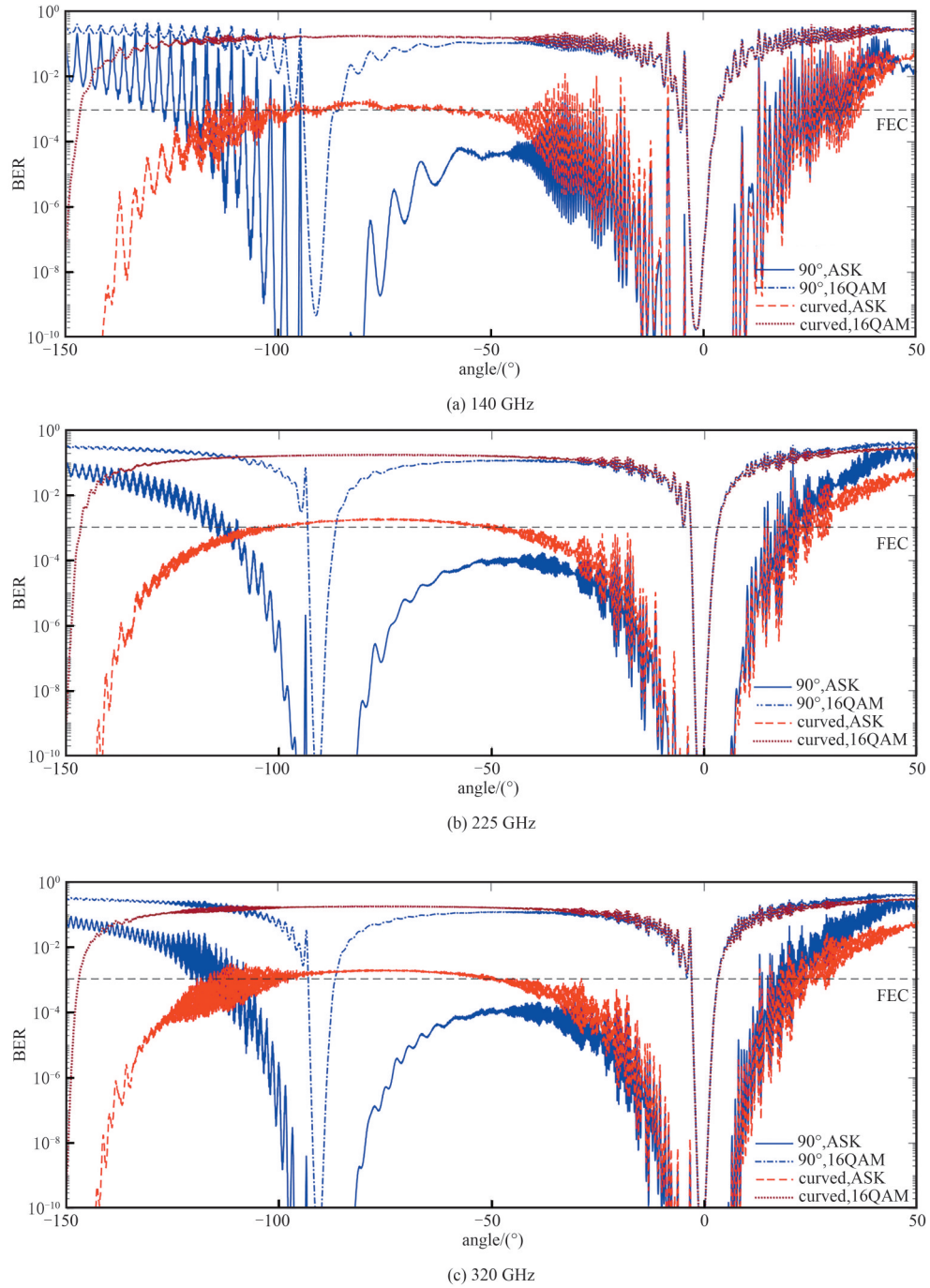


Fig.7 Predicted BER performance under various modulation schemes at different frequencies

图7 在不同工作频率下不同调制方案的预测BER性能

2种调制方案在太赫兹信道下的BER为：

$$R_{\text{BE, ASK}} = Q\left(\sqrt{2R_{\text{SN}}}\right) \quad (5)$$

$$R_{\text{BE, 16-QAM}} = \frac{4}{\sqrt{M}} \times Q\left(\sqrt{\frac{3R_{\text{SN}}}{M-1}}\right) \quad (6)$$

式中: Q 为高斯随机变量超过特定值的概率; M 为调制阶数。

从图 7 中可以看出, ASK 调制在 BER 性能和角度范围扩展能力方面表现出显著优势。这主要得益于 ASK 对相位噪声的鲁棒性, 高载波频率使太赫兹系统更易受相位波动影响^[22]。但从安全角度看, ASK 的这些优势也可能成为潜在的漏洞: 更宽的角度范围会增加潜在窃听的机会, 特别是在太赫兹波段这种高度方向性的通信中^[36]。为在保持 ASK 调制优势的同时增强安全性, 可采取人工噪声技术有效降低窃听者的信道质量^[37]、可重构智能表面波束控制^[34,38]等方法。

5 结论

本文针对 6G 通信网络中无人机辅助太赫兹通信系统在城市环境下的传播特性展开研究, 特别关注了建筑物拐角对信道传播和物理层安全的影响。采用了理论分析、数值仿真和实验测量相结合的方法, 使用了包括 Ceyear 1465D 信号发生器、倍频模块和喇叭天线在内的高精确度测量系统, 在 140 GHz、225 GHz 和 320 GHz 频段进行了实验。研究发现, 拐角的几何特性对太赫兹波的传播有显著影响: 拐角会导致明显的衍射和反射现象; 随着拐角角度增大, 旁瓣功率相应增加; 频率升高导致衍射效应减弱; 特别是, 拐角结构的旋转对阴影区域的信道特性影响不大, 证实了刀口衍射模型的适用性, 但刀口衍射模型在预测复杂反射和散射现象方面存在局限性, 这凸显了开发更全面模型的必要性; 在物理层安全方面, 拐角引起的反射会增加信号泄露风险, 而弧形拐角带来的窃听威胁低很多。

该项研究通过揭示建筑物拐角对信道特性的影响, 为优化太赫兹通信网络的覆盖范围和性能提供了依据。同时, 对物理层安全特性的分析为设计更安全的太赫兹通信系统提供了新的思路。本研究也揭示了现有理论模型在描述复杂城市环境中太赫兹波传播行为时的局限性, 为未来研究指明了方向。

参考文献:

- [1] 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 Hanchen, YANG Chuang, PENG Mugen. Terahertz communication for 6G: architectures, technologies and challenges[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024, 39(3): 395–412.) doi:10.12265/j.cjors.2023130.
- [2] MAHDI AZARI M, SOLANKI S, CHATZINOTAS S, et al. THz-empowered UAVs in 6G: opportunities, challenges, and trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60(5): 24–30. doi:10.1109/MCOM.001.2100889.
- [3] 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. (XIE Sha, LI Haoran, LI Lingxiang, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168–186.) doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2020107.
- [4] YI Haofan, GUAN Ke, HE Danping, et al. Characterization for the vehicle-to-infrastructure channel in urban and highway scenarios at the terahertz band[J]. IEEE Access, 2019(7): 166984–166996. doi:10.1109/ACCESS.2019.2953890.
- [5] 吴振东, 马建军, 张玉萍, 等. 太赫兹通信物理层安全技术发展研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(3): 301–310. (WU Zhendong, MA Jianjun, ZHANG Yuping, et al. Development of physical layer security communication in terahertz band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(3): 301–310.) doi:10.11805/TKYDA2022052.
- [6] MA J J, SHRESTHA R, MITTLEMAN L. Invited article: channel performance for indoor and outdoor terahertz wireless links[J]. APL Photonics, 2018, 3(5): 051601. doi:10.1063/1.5014037.
- [7] 刘斯琦, 林长星, 刘娟, 等. 太赫兹近场通信信道特性研究综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(6): 647–657. (LIU Siqi, LIN Changxing, LIU Juan, et al. A review on the characteristics of terahertz near field communication channels[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(6): 647–657.) doi:10.11805/TKYDA2024110.
- [8] PRIEBE S, JASTROW C, JACOB M, et al. Channel and propagation measurements at 300 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(5): 1688–1698. doi:10.1109/TAP.2011.2122294.
- [9] LI Da, LIU Wenbo, WEI Menghan, et al. Experimental and theoretical exploration of terahertz channel performance through glass doors[J]. Nano Communication Networks, 2024(39): 100496. doi:10.1016/j.nancom.2024.100496.
- [10] TALEB F, HERNANDEZ-CARDOSO G G, CASTRO-CAMUS E, et al. Transmission, reflection, and scattering characterization of building materials for indoor THz communications[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2023, 13(5): 421–430. doi:10.1109/TTHZ.2023.3281773.
- [11] KHAWAJA W, GUVENC D, MATOLAK D W, et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2361–2391. doi:10.1109/COMST.2019.2915069.
- [12] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J, et al. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE

- Communications Magazine, 2016,54(5):36–42. doi:10.1109/MCOM.2016.7470933.
- [13] LI Da, LI Pei'an, ZHAO Jiabiao, et al. Ground-to-UAV sub-terahertz channel measurement and modeling[J]. Optics Express, 2024,32(18):32482–32494. doi:10.1364/OE.534369.
- [14] JACOB M, PRIEBE R, DICKHOFF R, et al. Diffraction in mm and sub-mm wave indoor propagation channels[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(3):833–844. doi:10.1109/TMTT.2011.2178859.
- [15] KOKKONIEMI J, RINTANEN P, LEHTOMAKI J, et al. Diffraction effects in terahertz band—measurements and analysis[C]// IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM). Washington, DC, USA: IEEE, 2016: 1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2016.7841734.
- [16] MA J, SHRESTHA R, ADELBERG J, et al. Security and eavesdropping in terahertz wireless links[J]. Nature, 2018(563):89–93. doi:10.1038/s41586-018-0609-x.
- [17] XING Y C, RAPPAPORT T S. Propagation measurement system and approach at 140 GHz—moving to 6G and above 100 GHz[C]// 2018 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM). Abu Dhabi, UAE: IEEE, 2018: 1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2018.8647921.
- [18] HAN C, BICEN A O, AKYILDIZ I F. Multi-ray channel modeling and wideband characterization for wireless communications in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015,14(5):2402–2412. doi:10.1109/TWC.2014.2386335.
- [19] JU S H, ALI S S H, JAVED M A, et al. Scattering mechanisms and modeling for terahertz wireless communications[C]// 2019 IEEE International Conference on Communications(ICC). Shanghai, China: IEEE, 2019: 1–7. doi:10.1109/ICC.2019.8761205.
- [20] WU Y, KOKKONIEMI J, HAN C, et al. Interference and coverage analysis for terahertz networks with indoor blockage effects and line-of-sight access point association[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020,20(3):1472–1486. doi:10.1109/TWC.2020.3033825.
- [21] PRIEBE S, JACOB M, KÜRNER T. The impact of antenna directivities on THz indoor channel characteristics[C]// 2012 the 6th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Prague, Czech Republic: IEEE, 2012: 478–482. doi:10.1109/EuCAP.2012.6205849.
- [22] MOLDOVAN A, RUDER M A, AKYILDIZ I, et al. LOS and NLOS channel modeling for terahertz wireless communication with scattered rays[C]// IEEE Globecom Workshops. Austin, TX, USA: IEEE, 2014: 388–392. doi:10.1109/GLOCOMW.2014.7063462.
- [23] PETROV V, MOLTCHANOV D, KOUCHERYAVY Y, et al. Interference and SINR in dense terahertz networks[C]// Presented at the IEEE 82nd Vehicular Technology Conference. Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 1–5. doi:10.1109/VTCFall.2015.7390991.
- [24] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work![J]. IEEE Access, 2013(1):335–349. doi:10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [25] KÜRNER T S, PRIEBE S. Towards THz communications—status in research, standardization and regulation[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2014(35):53–62. doi:10.1007/s10762-013-0014-3.
- [26] TEKBIYIK K, EKTİ RIZA A. Terahertz band communication systems: challenges, novelties and standardization efforts[J]. Physical Communication, 2019,35(7):2–27. doi:10.1016/j.phycom.2019.04.014.
- [27] CUI Jiayuan, LI Da, ZHAO Jiabiao. Terahertz channel modeling based on surface sensing characteristics[J]. Nano Communication Networks, 2024(42):100533. doi:10.1016/j.nancom.2024.100533.
- [28] RAPPAPORT T S. Wireless communication and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019(7):78729–78757. doi:10.1109/ACCESS.2019.2921522.
- [29] HANEDA K, JÄRVELÄINEN J, KARTTUNEN A, et al. A statistical spatio-temporal radio channel model for large indoor environments at 60 and 70 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(6):2694–2704. doi:10.1109/TAP.2015.2412147.
- [30] WU Y P, KHISTI A, XIAO C S. A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018,36(4):679–695. doi:10.1109/JSAC.2018.2825560.
- [31] CSISZÁR I, KORNER J. Broadcast channels with confidential messages[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1978,24(3):339–348. doi:10.1109/TIT.1978.1055892.
- [32] JU Ying, WANG Huiming, ZHENG Tongxing, et al. Safeguarding millimeter wave communications against randomly located eavesdroppers[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2018,17(4):2675–2689. doi:10.1109/TWC.2018.2800747.
- [33] LI Pei'an, WANG Jianchen, ZHAO Liangbin, et al. Scattering and eavesdropping in terahertz wireless link by wavy surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(4):3590–3597. doi:10.1109/TAP.2023.3241333.
- [34] WU Qingqing, ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless

- network[J]. IEEE Communications Magazine, 2019,58(1):106–112. doi:10.1109/MCOM.001.1900107.
- [35] LIU Guohao, HE Xiangkun, ZHAO Jiabiao, et al. Impact of snowfall on terahertz channel performance: measurement and modeling insights[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2024,14(5):691–698. doi:10.1109/TTHZ.2024.3417319.
- [36] FURQAN H M, HAMAMREH J M, ARSLAN H. Enhancing physical layer security of OFDM systems using channel shortening[C]// 2017 IEEE the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications(PIMRC). Montreal, QC, Canada:IEEE, 2017:1–5. doi:10.1109/PIMRC.2017.8292335.
- [37] WANG Qian, CHEN Zhi, MEI Weidong, et al. Improving physical layer security using UAV-enabled mobile relaying[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017,6(3):310–313. doi:10.1109/LWC.2017.2680449.
- [38] 卢汉成, 王亚正, 赵丹, 等. 智能反射表面辅助的无线通信系统的物理层安全综述[J]. 通信学报, 2022,43(2):171–184. (LU Hancheng, WANG Yazheng, ZHAO Dan, et al. Survey of physical layer security of intelligent reflecting surface-assisted wireless communication systems[J]. Journal on Communications, 2022,43(2):171–184.) doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2022025.

作者简介:

苏悦(2001–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为面向 6G 的无线信道测量与动态智能建模、AI 增强无线通信物理层安全与防窃听, email:3220231902@bit.edu.cn.

李达(1999–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为面向 6G 的无线信道测量与动态智能建模.

刘嘉诚(1999–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波/太赫兹通信感知融合理论与方法、AI 驱动无线信道智能感知与自适应识别.

崔家源(2000–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为面向 6G 的无线信道测量与动态智能建模.

孙厚军(1968–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波/毫米波电路与系统.

马建军(1986–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波/太赫兹通信感知融合理论与方法、AI 驱动无线信道智能感知与自适应识别、太赫兹气象雷达标定与多尺度精准建模、面向 6G 的无线信道测量与动态智能建模、AI 增强无线通信物理层安全与防窃听.

(上接第 201 页)

- [17] ZHOU Xu, YANG Chuang, JIANG Zhiwei, et al. Joint communication and sensing channel measurement at 81 GHz for indoor environment[C]// 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Beijing, China:IEEE, 2024. doi:10.1109/ICMMT61774.2024.10672171.

作者简介:

周旭(2000–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹通感一体化信道测量与建模, email:zx2000@bupt.edu.cn.

杨闯(1992–), 男, 博士, 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.

刘子乐(1996–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信感知一体化信息理论.

彭木根(1978–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络.