

文章编号: 2095-4980(2024)06-0647-11

太赫兹近场通信信道特性研究综述

刘斯琦^{a,b,c}, 林长星^{a,b}, 刘娟^{a,b}, 邓贤进^{a,b}

(中国工程物理研究院 a. 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999, b. 微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200;
c. 研究生院, 北京 100088)

摘要: 为满足不断提高的数据传输需求, 未来的通信技术会向更高的载波频率发展, 基于太赫兹频段的通信可实现高稳定性和高数据速率通信。本文综述了太赫兹近场信道特性及信道建模的研究进展, 介绍了太赫兹频段下对近场信道分析的必要性, 对比了远近场信道的区别; 针对太赫兹近场通信信道, 介绍了球面波前建模与基于电磁波理论的模型; 结合信道建模技术与近场信道特点, 介绍了可用于近场信道建模的方法论; 最后对太赫兹近场信道特性研究进行了总结并对未来发展方向进行了展望。

关键词: 太赫兹通信; 近场通信; 信道特性; 信道建模

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024110

A review on the characteristics of terahertz near field communication channels

LIU Siqu^{a,b,c}, LIN Changxing^{a,b}, LIU Juan^{a,b}, DENG Xianjin^{a,b}

(a. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
b. Microsystems and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;
c. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: The evolution of future communication technologies towards higher carrier frequencies is inevitable to meet the escalating demands for data transmission rates. The terahertz (THz) spectrum emerges as a critical enabler for communication systems characterized by high stability and rapid data transfer rates. This paper reviews research progress on terahertz near-field channel characteristics and channel modeling. Firstly, the necessity of near-field channel analysis in the terahertz frequency band is introduced, the difference between near and far field channels is compared, and the spherical wavefront modeling and the model based on electromagnetic wave theory are introduced. Secondly, combining the channel modeling technology and the characteristics of the near-field channel, the methodology that can be used in near-field channel modeling is presented. Finally, the paper encapsulates the findings on terahertz near-field channel characteristics and offers insights into potential future research.

Keywords: terahertz communication; near-field communication; channel characteristic; channel modeling

随着万物智联、元宇宙、6G 等概念的提出, 无线网络用户数量及网络传输速率需求急剧增加。根据 Cisco 于 2020 年发布的 2018—2023 年思科年度网络报告白皮书 (Cisco Annual Internet Report White Paper) 对全球网络性能的预测^[1], 到 2023 年, 全球固定带宽速度将达到 110.4 Mbps, 平均移动网络连接速度将达到 13.2 Mbps, 平均 5G 连接速度将达到 575 Mbps。此外, 2022 年 6 月发布的爱立信移动报告 (Ericsson Mobility Report) 中, 预计全球移动数据总流量将在未来 5 年内达到每月 282 EB^[2]。巨大的数据流量需求将给现有网络通信设备带来巨大挑战, 传统微波通信难以满足新兴产业的需求, 且传统微波频段已达到极限利用, 现阶段全球数据传输速率已达瓶颈。为此, 需要更高频段的载波增加信道带宽, 提供更高的传输容量。

太赫兹 (THz) 频段作为高频通信的候选频段, 能很好地应对当前无线通信系统所面临的挑战。首先, 太赫兹频段位于 0.1~10 THz, 是微波波段总带宽的 1 000 倍, 可分为许多通信频段, 提供十分可观的带宽: WRC-19 正式批准了 275~296 GHz、306~313 GHz、318~333 GHz 和 356~450 GHz 共计 137 GHz 带宽资源可无限制地用于固定

和陆地移动业务；WRC-23 COM6/17 号决议为下一代移动通信的发展确定了 102~109.5 GHz、151.5~164 GHz、167~174.8 GHz、209~226 GHz、252~275 GHz 5 个领域。其次，太赫兹波长较短，自由空间衍射较少，指向性更好，可降低不同天线的发射功率和信号干扰。最后，太赫兹波由于在大气中具有较强的衰减，因此在远程很难窃取信号。利用太赫兹信道的内生特性可以实现加密通信，这也是实现物理层安全通信的方向之一^[3]；另外，大带宽带来的扫频量也随之增加，这意味着如果窃取者不知道确定的频率，则很难在宽阔的频谱中找到特定的信号，使太赫兹通信具备更高的安全性。综合当前通信系统的不足与太赫兹频段独特的优势，基于太赫兹频段的通信逐渐引起学术界和工业界的广泛关注，被认为是新一代移动通信的关键技术。

为更好地将太赫兹通信技术用于未来需要高速、低时延的无线通信网络，支持太赫兹通信系统的仿真和开发，需要捕捉太赫兹波的物理特性，了解使用太赫兹波进行通信所存在的问题。太赫兹波的传播特性在通信中被定义为“信道特性”，是设计太赫兹通信系统的基础。无线传播信道定义为从发射机到接收机之间的媒介，信道属性决定了无线通信的最终性能上限以及特定传输方案和收发机架构的性能^[4]，同时也是实现信道表征和度量传输的要求。

太赫兹波波长较短，因此天线尺寸可设计得很小，这有利于超大规模天线阵列(Extremely Large-scale Antenna Array, ELAA)的设计，包括在 6G 中作为关键候选技术的超大规模多输入多输出(Ultra-Massive Multiple-Input-Multiple-Output, UM-MIMO)、可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)等。随着天线数量的增加，基于 Rayleigh 距离的近场范围也随之增加。对于传统微波通信，4G/5G 所引入的 MIMO 技术/大规模 MIMO 所带来的近场效应被研究者们视为可忽略的干扰，但在面向 6G 的 UM-MIMO 技术演进过程中，近场区域扩大了几个数量级，因此近场通信将成为未来太赫兹通信的重要组成部分。另外，由于太赫兹波在大气中的强衰减，更多研究者也考虑将太赫兹波用于中近距离通信场景，如室内通信、航天器内部信息交互、片上通信等。这些都对太赫兹波近场应用提出了需求，使研究者们开始关注太赫兹近场信道特性及相应的信号处理技术。

在此背景下，本文系统性梳理了太赫兹近场通信信道特性及通信技术的研究进展，尽量深入探讨太赫兹波的传播特性，重点关注信道衰落、多径效应以及在近场通信场景下的关键且独特的参数。以实用性为导向，从工程和应用角度出发，深入探讨太赫兹波在不同近场下的应用，旨在揭示太赫兹近场信道的关键特性，探索其在近场通信中的行为。通过总结现有研究成果，提出现阶段太赫兹近场通信面临的挑战和可行的建议，为研究者更好地设计和优化太赫兹近场通信系统提供参考。

1 太赫兹近场通信信道

1.1 太赫兹频段简介

太赫兹频段位于 0.1~10 THz，波长为 3 mm~30 μm ，介于微波波段与远红外光波段之间。太赫兹波段中的长波段与毫米波波段部分重合，短波段与红外光波段部分重合，可认为太赫兹波段处于宏观经典理论向微量子理论、由电子学向光子学过渡的交叉区域。由于在电磁波谱的特殊位置，太赫兹波既具有微波的穿透性和吸收性，又具有光谱分辨特性，具体表现为瞬态性、相干性、穿透性、低能量以及频率选择吸收性等^[5]。

在无线电应用中，了解信道中的传播损耗和衰落情况有助于确定通信系统中各个组件的功率和灵敏度要求，从而精确控制信道余量，实现成本控制。此外，信号在无线信道传播过程中，会遇到色散效应等无法通过单纯增加发射功率就能解决的问题。因此太赫兹信道特性，对太赫兹波在通信、探测、传感、定位等应用领域十分重要，特别是对特定场景下特定频段信道特性的研究。

无线信道中，信号传输过程中会经历大尺度衰落和小尺度衰落，衰落的分类主要根据收发端之间距离与电磁波波长的关系进行划分。大尺度衰落主要来自路径损耗和阴影衰落，小尺度衰落来自多径效应和多普勒效应。相较于微波频段，太赫兹频段具有独特的信道特性。除了自由空间路径损耗外，由于电磁波频率升高，逐渐接近分子振动与转动能级，引起分子的共振吸收，其中主要以氧气分子和水分子对太赫兹波吸收最为剧烈。如图 1 所示，可以看到，在 100 GHz 左右，氧气分子对太赫兹波的吸收十分明显；高于 110 GHz 后，总吸收曲线与水蒸气吸收曲线基本重叠，表明了水分子在太赫兹高频段传输损耗中起主要作用^[6]。此外，水分子不仅产生了吸收衰减，并给电磁信号的传输引入了色散效应^[7]。上述为晴空环境下太赫兹波主要的传输衰减，而在复杂天气环境(如云、雪天气)下，水滴粒子的尺寸分布覆盖太赫兹波长范围，此时会引入较强的散射作用，太赫兹波的传输衰减与降雨率呈正相关关系；而在相同降雨率条件下，降雨衰减随电磁波频率的增加先增大后减小，当频率超过 1 THz 时，越接近 10 THz，衰减越小，此时在降雨天气环境进行无线传输将更具有通信优势^[8]。

由于波长较短，太赫兹波可能通过反射、散射与衍射同周边环境中小尺寸的结构相互作用。特别地，如

对微波波段表现为光滑的物体表面，但对太赫兹波则表现为粗糙表面，显现出不同于低频的反射和散射系数，进而产生较强的漫反射效应。可通过 Rayleigh 判据判断材料表面是否光滑，研究信号所经历的反射和散射对信道的影 响。文献[9]对太赫兹波在粗糙表面上的散射现象进行了通用参数建模，以材料表面的均方根高度和相关长度为重 点，对粗糙特性进行精确建模。文献[10]基于射线追踪法研究不同粗糙度的石膏在室内环境下对太赫兹信道传输产生的影响。模拟结果显示，粗糙表面的反射会导致太赫兹信道硬化。文献[11]采用太赫兹时域光谱技术研究了 50 种建筑材料的光学和反射特性，并根据 Fresnel-Rayleigh 方程和 Kirchhoff 理论提出了 Kirchhoff-Rayleigh 方法，建立了镜面反射和漫反射系数模型。该模型适用于表征粗糙表面的散射，但该方法在解析具有复杂结构材料的散射系数时存在局限性。

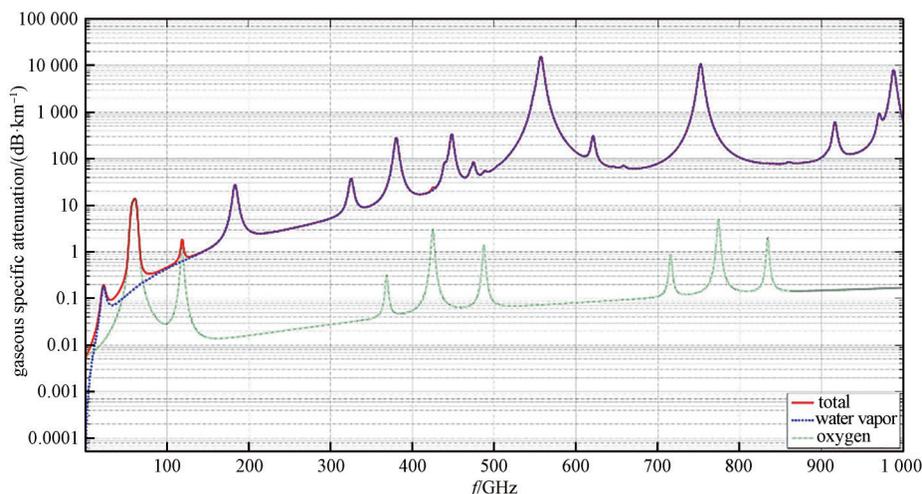


Fig.1 Terahertz wave attenuation caused by atmospheric gases

图1 大气气体引起的太赫兹波衰减

太赫兹波在传输过程中除了会受到反射和散射的作用外，还会遭遇衍射作用。衍射作用会产生不同的波前，导致接收端接收到的综合信号是不同相位的波前叠加。文献[12]基于实际测量和射线追踪，对 60 GHz 和 300 GHz 电磁波在边缘、楔形和圆柱体的衍射进行了研究，并将测量结果与根据刀刃模型和均匀几何衍射理论的模拟结果进行了对比，测量与仿真结果一致性良好。结论表明，房间中几乎所有地方的边缘或楔形衍射都可以忽略，唯一例外情况是在非视距场景下，靠近入射阴影边界的数厘米宽区域内，衍射会明显影响路径损耗和时变信道特性。此外，在研究中还发现，透射对太赫兹波在木质材料或透明介质材料中传输的情况也会产生不可忽视的影响，具体表现为透明介质情况下，透射可以降低衍射对信号的影响。

基于上述太赫兹波独特的传播机理，参照传统微波频段信道建模。目前太赫兹信道建模中，信道特性的表征包括路径损耗、阴影衰落、莱斯 K 因子、功率时延谱(Power Delay Profile, PDP)、均方根时延扩展(Root Mean Square Delay Spread, RMSDS)、角度扩展、交叉极化率(Cross-Polarization Ratio, XPR)、电平通过率(Level Crossing Rate, LCR)等。对于移动信道，还需加入多普勒扩展。不同的信道模型会选择不同的表征方式。

1.2 太赫兹近场信道特性

1.2.1 太赫兹近场信道与远场信道的对比

目前对太赫兹信道特性研究主要集中在室内场景^[13-15]、城市微蜂窝场景^[16]，这些研究主要在静止状态下进行；移动场景则主要覆盖高铁场景^[17]。针对太赫兹通信，具体的应用聚焦于超大规模 MIMO、RIS 等。这些场景基本可以覆盖人们日常生活中的大部分应用，但对于某些极端条件下的应用，如超远距离无线回传^[18]、近距离设备间通信、超近距离设备内通信^[19]等，目前的研究还比较缺失。与 5G 网络的关键技术大规模 MIMO 相比，与太赫兹通信相结合的 ELAA 技术，由于天线数量急剧增加，阵列的近场区域大幅增加，导致电磁辐射特性发生根本性变化。如图 2 所示，许多未来的太赫兹应用场景将在近场实现。

电磁辐射区基于所使用的电磁波波长，一般可分为感应近场区、辐射近场区和远场区。3 个区域划分的本质区别是离辐射源不同距离下电场与磁场的行为差别，表 1 为不同区域内电磁场性质的区别。在感应近场区，电场方向、磁场方向与电磁波传播方向表现为非正交关系。由于电磁耦合现象，电磁场的角度分布十分复杂，感应性近场的电磁场在时间上相位相差 90°。在某一时刻，电场最大时，磁场最小；反之亦然，其场强与距离的高次

幕成反比。从物理概念上讲, 感应近场区是一个储能场, 其中电场与磁场能量相互转化, 不向外辐射能量。而在远场中, 电磁场特性截然相反, 在位置关系上表现为3个方向互相正交, 且电场与磁场在相位上同步; 电磁波的能量以辐射形式向外传播, 其辐射电磁场在球坐标系下表现为只有 E_θ 与 H_ϕ 分量, 形成线极化辐射波。辐射近场区介于感应近场区与远场区之间, 电磁波性质表现为由感应性近场向远场区的过渡, 因此辐射近场区有时也称为过渡区。在辐射近场区中, 电磁场逐渐脱离天线束缚, 表现出辐射性质, 但仍存在交叉极化电场分量, 使平行于传播方向的平面内的合成电场为椭圆极化波。

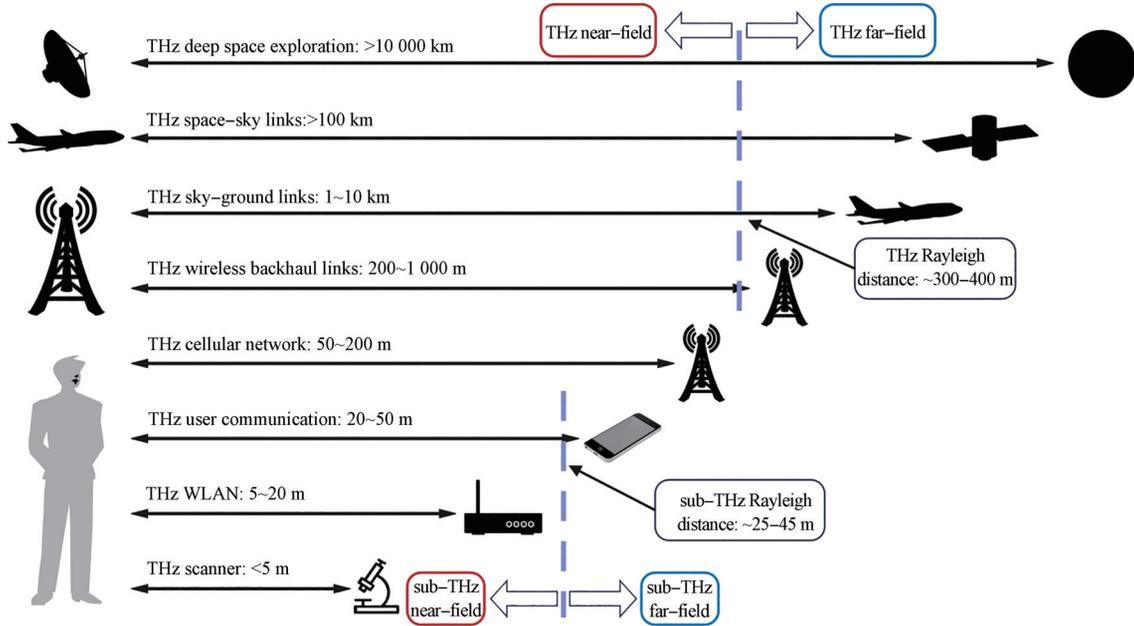


Fig.2 Sub-THz and THz near-field and far-field application scenarios
图2 亚太赫兹与太赫兹近场与远场应用场景

表1 不同区域的电磁场性质

Table1 Properties of electromagnetic fields in different regions

radiating area	wavefront shape	electromagnetic field properties				
		position relation	phase	amplitude	polarization	energy transformation
reactive near-field region	spherical wavefront	non-orthogonality	quadrature-lagging	inverse high power ratio	—	energy storage field
radiating near-field region	spherical wavefront	incomplete orthogonality	incomplete synchronization	higher and lower inverse power ratio	elliptical polarization	radiation field; energy storage field
radiating far-field region	planar wavefront	orthogonality	synchronous	inverse square ratio	linear polarization	radiation field

目前太赫兹通信应用的场景主要集中在辐射近场区和辐射远场区2个区域, 这2个区域的边界由 Rayleigh 距离划分, 也称为 Fraunhofer 距离^[20], Rayleigh 距离正比于阵列孔径的平方和载波频率的乘积。如图3所示, 在 Rayleigh 距离之外区域为辐射远场区, 在远场中, 电磁波可以平面波形式进行近似建模; 而在 Rayleigh 距离之内区域则为辐射近场区, 此时近场辐射占据主导地位, 平面波前模型此时失效, 需更换为球面波形式进行建模。这是因为平面波是球面波在长距离情况下的近似处理。即在远场区域, 平面波的相位可通过 Taylor 展开, 表现为天线指数(Antenna Index)的线性函数进行近似, 处理得到的线性相位形式简洁, 且平面波前只与入射角度有关。这种近似得到的简洁线性相位无法完全揭示球面波的信息, 其省略了部分相位, 导致结果存在相位差异。当收发端距离减小时, 相位差异会增大; 当通信距离小于 Rayleigh 距离时, 最大相位差大于 $\pi/8$ 。这种情况下, 远场平面波近似已失效, 因此需利用近场球面波传播。故在近场区域, 球面波的相位需根据物理几何形状精确推导, 此时得到的球面波相位为天线指数的非线性函数^[21]。

此外, 电磁波球面波建模增加了模型的自由度, 此时球面波前不仅与入射角度有关, 也与距离有关。当使用球面波建模时, 可以利用球面波前的额外信息将近场波束聚焦于特定位置, 可将传输信号同时聚焦于角度域和距离域上, 而平面波前只能够在不同的固定距离上旋转相应角度。因此球面波前建模不仅可用于用户定位, 而且发射端能够区分在同一方向不同距离的2个用户的信号, 提升信道容量。由于近场的波束聚焦性更好, 能量

泄露较少，可降低窃听用户的信道容量，在信号保密性上也具有更显著的优势。

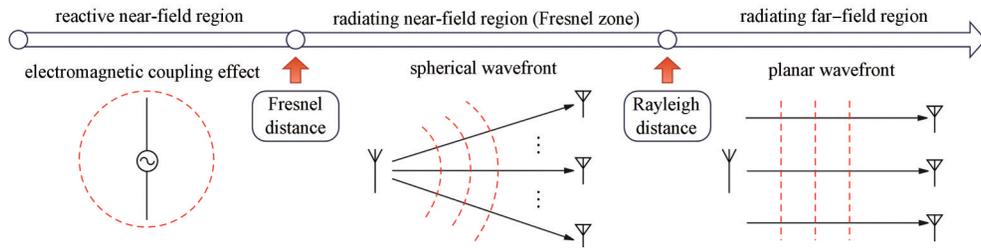


Fig.3 Near field and far field division diagram
图3 近场与远场划分示意图

目前太赫兹信道特性针对远场情况下的研究，关注的建模方式也以平面波建模为主。相较于远场信道特性重点关注太赫兹波对水和氧气的分子吸收敏感性、路径损耗以及阴影效应这种大尺度衰落，近场信道特性更关注小范围内的小尺度衰落，如多径效应、多普勒效应等。对于远场通信，关键是在远距离传输情况下如何让接收端在众多剧烈的干扰中更精准地分辨出微弱的有效信号。换言之，传输功率是目前远场通信急需突破的瓶颈，特别是对于超远距离无线回传这种公里级的信号传输场景。

在近场通信场景中，需要关注的内容不仅包括分子吸收效应以及自由传播衰减，还有相较于远场更加明显的多径效应对信号的影响。特别是在近场信道中，自由传播衰减形式与远场信道中形式不一致。图4(a)为使用喇叭天线在频率为 300 GHz 下、1~5 m 范围内的自由空间路径衰减(Free Space Path Loss, FSPL)测量值与理论值的对比，由于喇叭天线孔径较小，在 1~5 m 范围内电磁波辐射均表现为远场行为，其衰减形式与 Friis 模型十分吻合。图4(b)为相同频率在 0.5~15 cm 情况下的 FSPL，可以看到，在近场中 Friis 公式已失效，相应的拟合曲线接近四阶的形式，其原因可能是在近场范围内，电磁场的衰减项中存在三阶或四阶项。

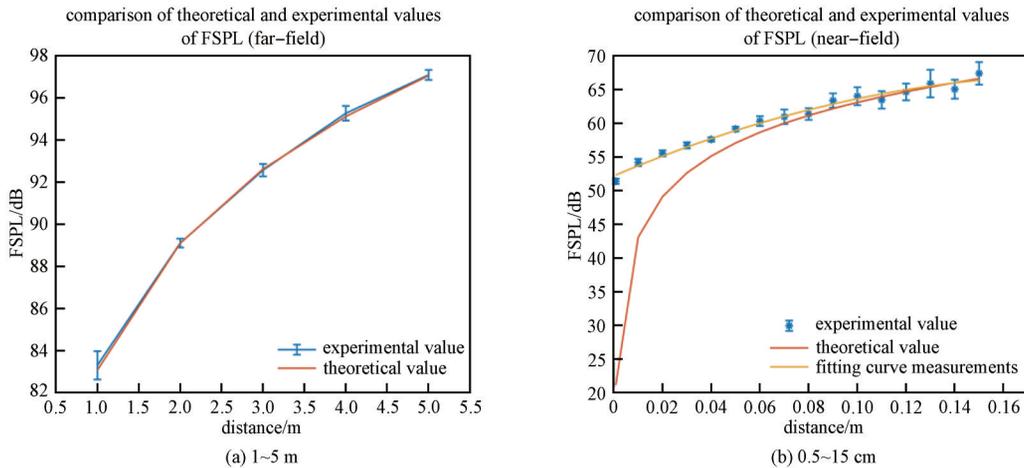


Fig.4 Comparison of FSPL measurements and theoretical calculations within different ranges
图4 不同范围内自由空间路径衰减测量值与理论值对比

在近场通信情况下，多径效应等小尺度效应带来的影响更加显著。相较于一般的室内通信以一阶或二阶反射为主要多径，超近距离下的设备间通信可能会存在三阶及以上的多径效应，会对设备间通信造成巨大影响。如图5所示，在极近距离下，电磁波会在收发端的表面之间形成 Fabry-Perot 腔，产生极为明显的多径效应。对 300 GHz 电磁波在 5 mm 范围内进行测量，结果如图6所示，在接收端会出现接收功率周期性弹跳的行为，其周期接近电磁波半波长，而整体趋势的减小是由于接收端在逐渐远离发射端，导致自由空间路径损耗增加。需要注意的是，多径效应所产生的影响无法通过单纯提高传输功率得到解决，而是需要通过信道均衡等技术进行处理，并且还需同时考虑设备之间的位置、方向和天线配置等因素。

由于太赫兹波长较短，因此天线尺寸可以设计得很小，天线间距离很短。在基于太赫兹 ELAA 的近场通信中，有时还需考虑由于天线之间的耦合效应导致的在有多天线系统与单天线系统下的近场差别，如表2所示。可以看到，由于耦合效应的存在，多天线的近场区域并非是其中每根天线单独近场区域的线性叠加，并且由于多天系统具备了阵列结构，其近场还会受阵列整体几何形状的影响。

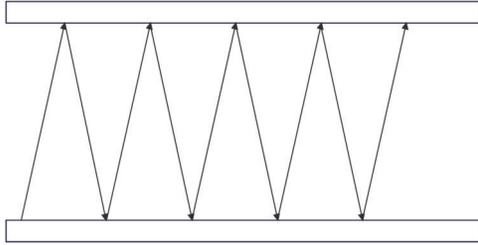


Fig.5 Diagram of the Fabry-Perot cavity
图5 Fabry-Perot腔示意图

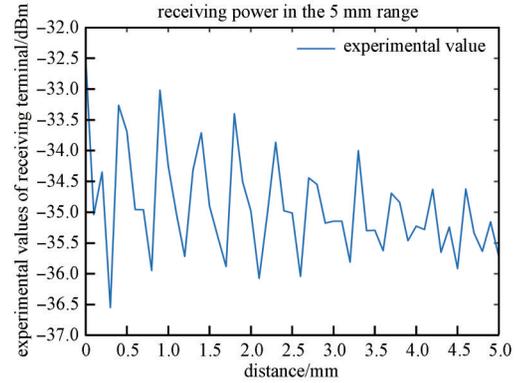


Fig.6 Power bounce behavior in the range of 5 mm
图6 5 mm 范围内接收功率弹跳行为

表2 多天线系统与单天线系统近场性质对比

Table2 Comparison of near-field properties between multi-antenna system and single-antenna system

near-field	multi-antenna system	single-antenna system
range	large (hundreds of meters)	small (centimeters)
complexity of distribution	extremely high	moderate
spatial variation	fast	steady
multipath effect	sparse channel	high-order multipath
influence factor	number of antennas; antenna aperture	antenna aperture
coupling effect	antenna coupling	electromagnetic coupling
beam control	beam focusing	high directional antenna
application scenario	MIMO system	kiosk

1.2.2 太赫兹近场信道模型参数

在太赫兹近场信道建模中，需关注的参数主要为多径效应的相应参数，即振幅、相位、功率时延谱、时延扩展、莱斯K因子等。接下来从时空频3个角度对近场信道表征参数进行介绍。

1) 时延扩展：时延扩展为最后一个可分辨的时延信号与第一个时延信号到达时间的差值，其表征方式主要为功率时延谱和均方根时延扩展。功率时延谱描述信道在时间层面上的扩展，是表征多径衰落效应的重要参数，通过功率时延谱可得到到达时间和时延扩展。将发射机和接收机看作是一个椭圆的2个焦点，由同一椭圆反射的所有路径都具有相同的相对时延。在一个特定的时延，所有接收信号合并形成信道脉冲响应中的一个抽头，每个抽头的平均功率和时延显示为信道脉冲响应。功率时延谱可表示为信道冲激响应的平方。

时延扩展用于描述信号在时域上的展宽程度，主要以均方根时延扩展 τ_{rms} 为表征方式：

$$\tau_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{L-1} P_{\tau}(i)(\tau_i - \bar{\tau})^2}{\sum_{i=1}^{L-1} P_{\tau}(i)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中： $\bar{\tau}$ 为所有路径的平均时延； $P_{\tau}(i)$ 为每条时延路径的功率。文献[22]利用矢量网络分析仪对126~156 GHz频段的功率时延谱进行了测量，文献[23]利用射线追踪法对275~325 GHz频段的功率时延谱建模，具体参数为多径到达角及振幅等。

2) 角度扩展：用于描述信号在空间域上的扩展，来源于多径效应引起的信号到达角度差异。角度扩展使接收信号功率大小与空间位置有关，从而带来空间选择性衰落。一般通过统计测得的多径分量的角度信息来获取角度扩展，采用均方根角度扩展作为表征参数：

$$\theta_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_{\theta}} P_{\theta}(i)(\theta_i - \bar{\theta})^2}{\sum_{i=1}^{N_{\theta}} P_{\theta}(i)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中： $\bar{\theta}$ 为所有路径的平均角度； $P_{\theta}(i)$ 为每条时延路径功率。文献[24]通过测量330~365 GHz桌面场景下的多径信道冲激响应，计算得到该场景下的角度扩展。

3) 频率扩展：用于描述信号在频域上的扩展，来源于收发端之间的相对运动产生的多普勒效应。频率扩展表示信号功率与收发端相对运动速度有关，从而带来时间选择性衰落。随着载波频率的增加，与载波频率成正比的多普勒频移变大，产生更强的多普勒效应。文献[25]提出了一种具有叠加导频的离散傅里叶变换扩展正交时频空系统，提高了对多普勒效应的鲁棒性，并降低太赫兹通感一体化的峰均功率比。

球面波前模型无法准确描述天线或天线阵列近场区域内的电磁场，其通常不考虑非均匀天线辐射方向图、耦合效应、信号极化和对发射仰角的依赖性^[1]，并经常忽略信号源的物理特性。很多近场信道模型也常常忽略接收信号的幅度，而只考虑相位约束，因此直接利用电磁场理论对近场信道建模是更加准确的方法。文献[26]考虑了不同观测表面的天线范式，开发了基于任意终端位置和3种不同电场类型(矢量电场、标量电场和总标量电场)的电磁传播模型的通用近场定位系统，如图7所示。数值结果表明，利用矢量或标量电场，在毫米波或亚太赫兹频段的接收天线近场中可达厘米级精确度，而传统表面天线观测到的总标量电场只能用于基本测距。

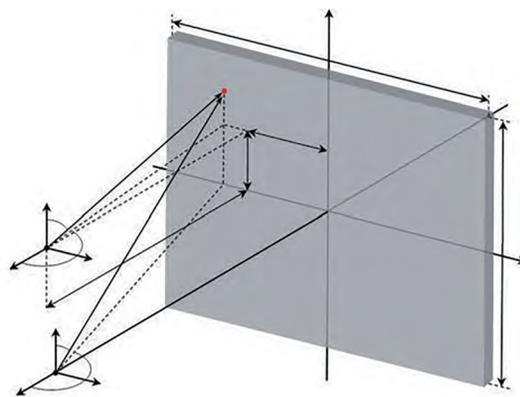


Fig.7 Near field positioning model based on electromagnetic field theory
图7 基于电磁场理论的近场定位模型

文献[26]考虑了不同观测表面的天线范式，开发了基于任意终端位置和3种不同电场类型(矢量电场、标量电场和总标量电场)的电磁传播模型的通用近场定位系统，如图7所示。数值结果表明，利用矢量或标量电场，在毫米波或亚太赫兹频段的接收天线近场中可达厘米级精确度，而传统表面天线观测到的总标量电场只能用于基本测距。

1.3 太赫兹近场信道建模

目前对太赫兹信道建模的方法多采取确定性信道建模、统计性信道建模与混合信道建模3种方式，这3种方法均适用于近场信道建模。确定性信道模型基于电磁波传播理论，准确测量或模拟电磁波的传播，主要方法包括射线追踪法(Ray-Tracing, RT)、有限时域差分法(Finite-Domain Time-Domain, FDTD)。如，文献[27]研究了基于RIS的太赫兹系统近场球面波前传播，根据近场信道模型的二阶Fresnel近似，提出了一种近场信道估计和定位算法，该算法可以获得更高的分辨率精确度。统计性信道建模可以表征更普遍场景下的无线信道特性，主要方法分为基于几何的统计建模及非几何的统计建模。如，可以通过扩展第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)的毫米波模型组合得到近场太赫兹链路的随机信道模型^[28]；文献[29]基于非均匀球面波对模块化超大规模阵列进行建模，分析了模块化超大规模阵列通信的近场信噪比性能。确定性信道建模准确度较高，但计算复杂度高；统计性信道建模计算复杂度较低，但准确性也相应降低。研究者提出结合确定性信道建模和统计性信道建模的混合信道建模方法，在保持一定准确性的同时提高建模的速率和鲁棒性，平衡准确性和计算复杂度。其代表方法有：将射线追踪法与统计性信道建模结合的混合建模方法、将RT和FDTD结合的混合确定性信道建模方法。其原理可以通过仅在整個建模环境的一小部分(即散射体的近场)中应用FDTD，其余部分应用RT，从而在保留精确度的同时缩短计算时间^[30]。文献[31]采用确定性信道建模和随机建模结合的方法，建立了室内太赫兹信道的三维动态混合模型，在350 GHz和650 GHz频率下进行仿真，对比了时延扩展和莱斯K因子参数，验证了模型的有效性。

随着人工智能的快速发展，将机器学习技术用于信道建模的新建模方式也逐渐走入研究者的视野中。相较于传统建模方法，基于机器学习的建模方法最大的特征是模型具有预测性^[32]，因此使用机器学习进行信道建模也被称为信道预测。具体而言，传统的信道建模方法是根据特定场景和频率条件下的信道测量数据进行人工统计分析，设计信道模型。由于电磁波在不同场景下传播的建模非常复杂，在传统建模中做出了大量的假设和近似以简化数据处理和建模过程，必然会引入误差，而机器学习理论上可以做到以任意精确度逼近任意函数^[33]。如图8所示，无线信道建模中的许多关键问题可被视为机器学习中的回归、聚类和分类问题^[34]。对于确定性信道建模，可以结合机器学习方法降低模型复杂度和利用确定性模型辅助机器学习的预训练；对于统计性信道建模，利用机器学习可用于实现信道多径分量聚类、跟踪和参数估计；对于场景识别和功率分配等问题，则可以利用机器学习获得相应分类。

对于太赫兹近场信道，其宽带特性是太赫兹频段所赋予的特殊性质，使信道的频率选择性和时变性更加显著，大大增加了建模的复杂度；而由于近场特性所带来的电磁波相位与幅度的非平稳变化，同样增加了建模的复杂度。此外，太赫兹近场信道还需考虑环境影响，所需考虑的参数维度非常高，而机器学习技术能够捕捉信道中的复杂非线性特性和时变特性，从实测数据中进行学习获得自适应能力。此外，机器学习模型经过适当训

练, 可以泛化到更多的应用场景, 同时可通过整合新的数据和特征, 发展自身模型。机器学习算法十分契合太赫兹近场通信信道建模, 可利用信道测量数据集通过机器学习算法训练学习得到信号传播规律, 更智能地构建信道模型, 适应各种场景并达到更好的效果^[35-36]。

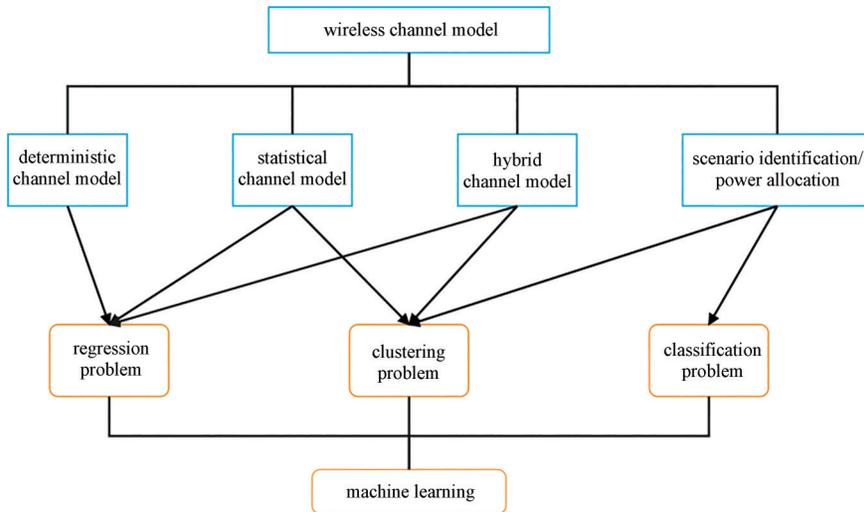


Fig.8 Correspondence between machine learning and wireless channel modeling

图8 机器学习与无线信道建模的对应关系

2 太赫兹近场信道技术面临的挑战与未来发展方向

现有文献中已有不少关于太赫兹近场信道的研究工作, 但许多研究仍处于起步阶段, 如, 研究者在很多频段和通信场景下建立了相关模型, 但建立的模型仅适用于特定频段或某一类场景, 没有形成一个通用的模型标准。其次, 对于近场和远场通信建模的本质区别仍需进行更深刻的认识, 除了球面波前与平面波前的区别之外, 是否还有其他电磁辐射本质的区别。因此, 太赫兹近场信道技术亟需进一步研究。结合现有文献分析, 对于太赫兹近场信道技术更进一步的研究仍面临以下挑战:

1) 信道建模的精确度与复杂性。由于太赫兹频段的信道受多径传播、大气吸收、材料吸收、多径效应等多方面因素的影响, 准确建模变得非常复杂。现有的信道模型难以全面考虑这些影响因素, 在实际应用中性能预测的不确定性较大。现有的建模方法无法全面覆盖太赫兹信道的相应参数, 如球面波前建模缺少对信号极化^[37]、信号源物理特性等因素的考虑。因此未来亟需开展更加细致、多尺度的太赫兹通信信道建模, 深入考虑不同频段、不同环境条件下的信道特性, 并结合先进的数学工具和计算方法, 提高信道建模的适用性, 同时平衡模型的准确度和计算复杂度。根据太赫兹近场信道的独特特性, 使用机器学习进行近场信道建模是未来非常重要的发展方向。

2) 太赫兹波段理论亟待突破。太赫兹波段位于微波波段与可见光波段之间, 介于宏观经典理论与微观量子理论之间。因此无论是基于电磁场论、电动力学等的传统电磁理论还是基于量子力学、波动方程等的量子理论均无法完全揭示太赫兹波的辐射行为, 如太赫兹波在传播过程中出现的远翼效应^[38]、太赫兹波与物体表面漫反射的理论^[39]等。未来可以考虑将宏观电磁学理论与量子力学相结合, 建立太赫兹频段的多物理场相互作用理论框架与数值方法体系, 将电磁理论与经典信息论进行结合, 指导通信系统物理层的设计^[40]。

3) 对基于 Rayleigh 距离划分远近场方式的补充。目前对于远场与近场信号的划分方式是基于 Rayleigh 距离的划分方式, 其量化方式是通过相位差进行划分的。对于直接受相位差异影响的通信指标, 如信道估计精确度, Rayleigh 距离可以准确捕获在近场区域应用远场传输方案时这些指标的劣化。相反, 有些指标直接受其他因素的影响, 而不是相位差异, 如, 信道容量由波束成形增益和信道矩阵的秩决定。因此, 经典的 Rayleigh 距离可能无法很好地捕捉这些指标的性能损失。基于 Rayleigh 的划分方式是否适用于太赫兹波段的近场与远场分布仍需讨论^[41]。此外, 太赫兹信号在近场中穿过障碍物传播的现象也值得关注, 之前的研究^[42-44]中都没有强调远场与近场阻塞之间的差异。因此研究者需寻找更合理、更符合太赫兹波段行为的远近场区域划分方式, 以及针对近场中的太赫兹信号穿透损耗对现有划分方式进行相应补充。根据太赫兹近场电磁场分布情况, 可以采取基于场的角度分布以及衰减特性等更加本质的机理进行补充划分。

4) 太赫兹近场通信的波前工程。Huygens-Fresnel 原理表明, 所生成的波束特性完全由辐射孔径处电场的相位和幅度分布定义, 即生成任何光束, 所需要的只是通过特定设计的波前^[45]。由于太赫兹频段的特殊性质, 使用包括毫米波在内的目前最先进技术来实现太赫兹近场通信是不可行的。基于上述问题, 有研究者提出用太赫兹波前工程的愿景来克服这些缺陷^[46]。特别地, 采用特定的波前(如 Bessel 波束或 Airy 波束)比目前最常用的远场波束赋形和近场波束聚焦技术在建立太赫兹链路方面具有更大的优势。具体而言, Bessel 波束在近场中传播可以提升信号的抗阻塞能力, 而 Airy 波束则可以实现太赫兹弯曲通信以避免信号受到阻挡。因此可根据太赫兹波前的独特性质(如轨道角动量特性)设计新型定制的太赫兹近场波前工程, 推动太赫兹近场通信系统的实用化。

3 结语

太赫兹近场信道作为太赫兹近场通信系统的设计基础, 同时具备太赫兹频段与近场信道的独特特点。基于此, 本文归纳了太赫兹近场信道特性, 阐述了太赫兹近场独特的信道特性与信道建模的研究现状, 包括球面波前模型以及基于电磁波理论的近场定位模型, 介绍了在太赫兹近场信道分析中需注意的近场信道表征参数及不同建模方法的优缺点, 并针对太赫兹近场信道的复杂性与非线性引入了机器学习建模算法。最后, 分析了目前太赫兹近场通信信道研究中的问题, 针对现有不足, 提出了太赫兹信道研究的未来发展方向。本文对太赫兹近场通信信道特性的综合梳理, 希望可以为太赫兹近场通信信道研究提供一定借鉴, 鼓励研究者对太赫兹近场信道进行深入研究, 以推动太赫兹通信的发展。

参考文献:

- [1] CISCO U. Cisco annual internet report(2018–2023) white paper[R/OL]. (2020–03–09) <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] ERICSSON S. Ericsson mobility report:5G to top one billion subscriptions in 2022 and 4.4 billion in 2027[EB/OL]. (2022–06–21). <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2022/6/ericsson-mobility-report-5g-to-top-one-billion-subscriptions-in-2022-and-4.4-billion-in-2027>.
- [3] 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.
- [4] HAN Chong, WANG Yiqin, LI Yuanbo, et al. Terahertz wireless channels: a holistic survey on measurement, modeling, and analysis [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022,24(3):1670–1707. doi:10.1109/COMST.2022.3182539.
- [5] YU Jianjun. Broadband terahertz communication technologies[M]. Berlin: Springer, 2021.
- [6] SILES G A, RIERA J M, GARCIA-DEL-PINO P. Atmospheric attenuation in wireless communication systems at millimeter and THz frequencies[wireless corner][J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(1):48–61. doi: 10.1109/MAP.2015.2401796.
- [7] STRECKER K, EKIN S, O'HARA J F. Compensating atmospheric channel dispersion for terahertz wireless communication[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):5816. doi:10.1038/s41598-020-62692-7.
- [8] 曹相春, 郝建红, 赵强, 等. 地空路径太赫兹波雨天衰减特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(8):971–976. (CAO Xiangchun, HAO Jianhong, ZHAO Qiang, et al. Characteristic analysis of rain attenuation for terahertz waves transmission along earth-space paths[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(8):971–976.) doi:10.11805/TKYDA2022188.
- [9] YI Haofan, GUAN Ke, MATHIOPOULOS P T, et al. Full-wave simulation and scattering modeling for terahertz communications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2023,17(4):713–728. doi:10.1109/JSTSP.2023.3285099.
- [10] SHEIKH F, KAISER T. Rough surface analysis for short-range ultra-broadband THz communications[C]// 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston, MA, USA: IEEE, 2018:1543–1544. doi:10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609336.
- [11] TALEB F, HERNANDEZ-CARDOSO G G, CASTRO-CAMUS E, et al. Transmission, reflection, and scattering characterisation 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.
- [12] JACOB M, PRIEBE S, 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.
- [13] WANG Yiqin, LI Yuanbo, CHEN Yi, et al. 0.3 THz channel measurement and analysis in an l-shaped indoor hallway[C]// ICC

- 2022-IEEE International Conference on Communications. Seoul, Republic of Korea: IEEE, 2022: 2870-2875. doi: 10.1109/ICC45855.2022.9838312.
- [14] SERGHIOU D, KHALILY M, JOHNY S, et al. Ultra-Wideband terahertz channel propagation measurements from 500 to 750 GHz[C]// 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies(UCET). Glasgow, UK: IEEE, 2020: 1-4. doi: 10.1109/UCET51115.2020.9205476.
- [15] KHALID N, ABBASI N A, AKAN O B. Statistical characterization and analysis of low-THz communication Channel for 5G Internet of Things[J]. *Nano Communication Networks*, 2019(22):100258. doi:10.1016/j.nancom.2019.100258.
- [16] JIANG Tao, ZHANG Jianhua, TANG Pan, et al. A study of uplink and downlink channel spatial characteristics in an urban micro scenario at 28 GHz[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(4): 488-502. doi: 10.1631/FITEE.2000443.
- [17] GUAN Ke, PENG Bile, HE Danping, et al. Measurement, simulation, and characterization of train-to-infrastructure inside-station channel at the terahertz band[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(3): 291-306. doi: 10.1109/TTHZ.2019.2909975.
- [18] JUNG B K, DREYER N, ECKHARD J M, et al. Simulation and automatic planning of 300 GHz backhaul links[C]// 2019 the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Paris, France: IEEE, 2019: 1-3. doi: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873734.
- [19] FU Jinbang, JUYAL P, ZAJIĆ A. THz Channel characterization of chip-to-chip communication in desktop size metal enclosure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(12): 7550-7560. doi: 10.1109/TAP.2019.2934908.
- [20] 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. doi: 10.1109/MAP.2017.2706648.
- [21] CUI Mingyao, WU Zidong, LU Yu, et al. Near-field MIMO communications for 6G: fundamentals, challenges, potentials, and future directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(1): 40-46. doi: 10.1109/MCOM.004.2200136.
- [22] POMETCU L, D'ERRICO R. Channel model characteristics in D-band for NLOS indoor scenarios[C]// 2019 the 13th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Krakow, Poland: IEEE, 2019: 1-4.
- [23] PRIEBE S, KURNER T. Stochastic modeling of THz indoor radio channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4445-4455. doi: 10.1109/TWC.2013.072313.121581.
- [24] GUAN Ke, YI Haofan, HE Danping, et al. Towards 6G: paradigm of realistic terahertz channel modeling[J]. *China Communications*, 2021, 18(5): 1-18. doi: 10.23919/JCC.2021.05.001.
- [25] WU Yongzhi, HAN Chong, CHEN Zhi. DFT-spread orthogonal time frequency space system with superimposed pilots for terahertz integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 7361-7376. doi: 10.1109/TWC.2023.3250267.
- [26] CHEN Ang, CHEN Li, CHEN Yunfei, et al. Cramér-rao bounds of near-field positioning based on electromagnetic propagation model[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(11): 13808-13825. doi: 10.1109/TVT.2023.3284658.
- [27] PAN Yijin, PAN Cunhua, JIN Shi, et al. RIS-aided near-field localization and channel estimation for the terahertz system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2023, 17(4): 878-892. doi: 10.1109/JSTSP.2023.3285431.
- [28] ETSI. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz(3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14)[R/OL]. [2024-05]. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/14.00.00_60/tr_138901v140000p.pdf.
- [29] LI Xinrui, LU Haiquan, ZENG Yong, et al. Modular extremely large-scale array communication: near-field modelling and performance analysis[J]. *China Communications*, 2023, 20(4): 132-152. doi: 10.23919/JCC.fa.2022-0715.202304.
- [30] WANG Ying, SAFAVI-NAEINI S, CHAUDHURI S K. A hybrid technique based on combining ray tracing and FDTD methods for site-specific modeling of indoor radio wave propagation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(5): 743-754. doi: 10.1109/8.855493.
- [31] ZHANG Yan, ZHAO Lei, HE Zunwen. A 3D hybrid dynamic channel model for indoor THz communications[J]. *China Communications*, 2021, 18(5): 50-65. doi: 10.23919/JCC.2021.05.004.
- [32] HUANG Jie, WANG Chengxiang, BAI Lu, et al. A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems[J]. *IEEE Transactions on Big Data*, 2020, 6(2): 211-222. doi: 10.1109/TBDATA.2018.2884489.
- [33] CYBENKO G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function[J]. *Mathematics of Control Signals and Systems*, 1989, 2(4): 303-314. doi: 10.1007/BF02551274.
- [34] 黄鸿清, 刘为, 伍沛然, 等. 机器学习在无线信道建模中的应用现状与展望[J]. *移动通信*, 2021, 45(4): 95-104. (HUANG Hongqing, LIU Wei, WU Peiran, et al. Application status and prospects of machine learning in wireless channel modeling[J].

- Mobile Communications, 2021,45(4):95–104. doi:10.3969/j.issn.1006–1010.2021.04.016
- [35] ZHANG Jianhua, TANG Pan, YU Li, et al. Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020,21(1):39–61. doi:10.1631/FITEE.1900450.
- [36] HU Zhengdong, LI Yuanbo, HAN Chong. Transformer-based GAN for terahertz spatial-temporal channel modeling and generating[EB/OL]. (2023–06–12). <https://arxiv.org/abs/2306.06902>.
- [37] ZHENG Chenglong, LI Hui, ZANG Huaping, et al. Terahertz polarization detection based on the mode analysis of longitudinally polarized vortices[J]. Optics & Laser Technology, 2024(170):110210. doi:10.1016/j.optlastec.2023.110210.
- [38] ODINTSOVA T A, KOROLEVA A O, SIMONOVA A A, et al. The atmospheric continuum in the "terahertz gap" region(15–700 cm⁻¹): review of experiments at SOLEIL synchrotron and modeling[J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 2022(386):111603. doi:10.1016/j.jms.2022.111603.
- [39] AZPILICUETA L, SCHULTZE A, CELAYA-ECHARRI M, et al. Diffuse-scattering-informed geometric channel modeling for THz wireless communications systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(10): 8226–8238. doi:10.1109/TAP.2023.3307868.
- [40] ZHU Jieao, WAN-ZHONG Chichao, DAI Linglong, et al. Electromagnetic information theory: fundamentals, modeling, applications, and open problems[J/OL]. IEEE Wireless Communications:1–7. doi:10.1109/MWC.019.2200602.
- [41] CUI Mingyao, DAI Linglong. Near-field wideband beamforming for extremely large antenna arrays[EB/OL]. (2023–08–22). <https://arxiv.org/abs/2109.10054>.
- [42] KOKKONIEMI J, LEHTOMÄKI J, PETROV V, et al. Frequency domain penetration loss in the terahertz band[C]// 2016 Global Symposium on Millimeter Waves(GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications. Espoo, Finland: IEEE, 2016:1–4. doi:10.1109/GSMM.2016.7500309.
- [43] WU Yongzhi, KOKKONIEMI J, HAN Chong, 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, 2021,20(3):1472–1486. doi:10.1109/TWC.2020.3033825.
- [44] ECKHARDT J M, PETROV V, MOLTCHANOV D, et al. Channel measurements and modeling for low-terahertz band vehicular communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(6): 1590–1603. doi:10.1109/JSAC.2021.3071843.
- [45] HEADLAND D, MONNAI Y, ABBOTT D, et al. Tutorial: terahertz beamforming, from concepts to realizations[J]. APL Photonics, 2018,3(5):051101. doi:10.1063/1.5011063.
- [46] SINGH A, PETROV V, GUERBOUKHA H, et al. Wavefront engineering: realizing efficient terahertz band communications in 6G and beyond[J/OL]. IEEE Wireless Communications:1–7. doi:10.1109/MWC.019.2200583.

作者简介:

刘斯琦(1997–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹高速通信信道特性、信道建模方法与信号处理算法. email:liusq9703@vip.163.com.

林长星(1986–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹通信、高速通信调制解调技术及FPGA实现技术研究、高速实时信号处理系统设计和嵌入式系统设计.

刘娟(1984–), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向太赫兹通信总体技术与组网通信.

邓贤进(1973–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微波技术、收发信道系统技术、太赫兹通信系统技术研究等.