

# 6G太赫兹信道测量与建模:进展与挑战

王俊<sup>1</sup>,王承祥<sup>1,2\*</sup>,冯瑞<sup>1</sup>,李俊伶<sup>1,2</sup>

(1. 紫金山实验室,江苏南京 211111;2. 东南大学信息科学与工程学院移动通信全国重点实验室,江苏南京 211189)

**摘要:** 太赫兹通信是第六代(6G)移动通信的关键技术之一,可用带宽巨大,支持超高的传输速率,具有广阔的应用前景。太赫兹信道建模是太赫兹通信系统设计、仿真与优化的基础。太赫兹的信道研究主要分为信道测量、特性分析和信道建模几个方面。本文首先介绍了目前太赫兹信道测量主要使用的时域和频域测量方法,对当前开展的太赫兹信道测量进行总结,包括研究机构、测量场景、测量方法、天线配置与所测量的信道特性。接着,对太赫兹的传播特性进行了总结,包括太赫兹频段电磁波的传播机制、信道的大小尺度特性。然后,分别介绍不同的建模方法及其在太赫兹频段最新的研究进展。最后,针对太赫兹信道研究提出未来研究的挑战。

**关键词:** 6G;太赫兹;信道测量;特性分析;信道建模

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2023YFB2905604);国家自然科学基金(No.62301366)

**中图分类号:** TN928

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2025)06-2118-13

**电子学报 URL:**http://www.ejournal.org.cn

**DOI:**10.12263/DZXB.20240600

## 6G Terahertz Channel Measurements and Modeling: Recent Developments and Future Challenges

WANG Jun<sup>1</sup>, WANG Cheng-xiang<sup>1,2\*</sup>, FENG Rui<sup>1</sup>, LI Jun-ling<sup>1,2</sup>

(1. Purple Mountain Laboratories, Jiangsu, Nanjing, Jiangsu 211111, China;

2. National Mobile Communication Research Laboratory, School of Information Science and Engineering,  
Southeast University, Jiangsu, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Terahertz (THz) communication is one of the key technologies for the sixth generation (6G) of mobile communications, offering enormous bandwidth and supporting ultra-high transmission rates with broad application prospects. THz channel modeling is fundamental to the design, simulation, and optimization of THz communication systems. The research on THz channels mainly encompasses channel measurements, characteristic analysis, and channel modeling. In this paper, firstly, the time-domain and frequency-domain channel measurement methods are introduced. Some recent research activities are also summarized, including research institutions, measurement scenarios, methods, antenna configurations, and measured channel characteristics. Next, the propagation characteristics of THz waves are summarized, including the propagation mechanisms of electromagnetic waves in the THz band, the large- and small-scale parameters of the channel. Finally, prospective directions and challenges are outlined for future research in the THz channel, aiming to enhance the understanding and exploitation of this promising electromagnetic spectrum for 6G and beyond.

**Key words:** 6G; terahertz band; channel measurement; characteristics analysis; channel modeling

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program (No.2023YFB2905604); National Natural Science Foundation of China (No.62301366)

### 1 引言

当前5G移动通信仍处在世界各地部署阶段,但在学术界和工业界已将注意力转移到第六代(The Sixth Generation, 6G)移动通信系统,以满足2030年对

信息和通信技术的未来需求。未来6G将追求更加丰富的业务应用以及极致的性能,需要在探索新型网络架构的基础上,在关键核心技术领域实现突破。在众多关键技术中,太赫兹技术被认为是关键候选技术之一,太

赫兹频段有着许多独特的特性,其频段位于红外光和微波之间,频谱范围为 0.1~10 THz. 太赫兹频段具有高带宽、低能耗和穿透力强的特点,使其成为解决传统无线通信技术所面临挑战的一种潜在解决方案. 它能够实现比微波通信更高的数据传输速率,并且能够穿透一些非导电材料,如纸张、塑料和衣物. 太赫兹频谱资源极为丰富,可提供超过 20 GHz 的连续带宽,实现 100 Gbit/s 甚至 Tbit/s 级传输速率<sup>[1,2]</sup>. 太赫兹通信具有传输速率高、抗干扰能力强和易于实现通信探测一体化等特点,使其在通信领域引起了广泛的兴趣和研究,也被认为是 6G 移动通信的关键技术之一<sup>[3-6]</sup>,将在 6G 无线通信中发挥着巨大作用.

信道理论是通信系统设计和部署的基础,研究无线传播信道特性以及相应的信道模型是 6G 通信系统设计的基础. 不同的信道特性在收发机设计、软件架构和协议等方面都对通信系统的开发至关重要<sup>[7,8]</sup>. 太赫兹通信系统的信道特性与厘米波、毫米波等低频段有显著区别,系统性能主要受信道的特性制约. 因此,研究太赫兹频段的传播特性,建立能准确反映太赫兹通信信道特性的信道模型、研究关键信道统计特性,对于 6G 太赫兹通信系统的研发与应用具有重要指导意义. 然而,当前 3GPP TR38.901<sup>[9]</sup>等标准化信道模型最高只能支持 100 GHz,而低频段的信道特性和信道模型不适用于太赫兹频段.

国内已有一些早期的太赫兹信道相关的综述论文<sup>[10-12]</sup>. 文献[10]提供了截至 2022 年的太赫兹信道测量、信道建模、信道模拟器相关的全面回顾. 在文献[11]中,作者详细讨论了太赫兹信道测量、射线追踪以及随机信道建模. 在文献[12]中,作者总结了太赫兹垂直异构网络方法中的应用,并讨论了信道测量和信道建模方法. 然而,这些论文都没有阐明不同太赫兹场景的传播信道特性. 因此,本文将从信道测量、特性分析、信道建模等方面总结最新的研究工作,具体而言,信道测量包括时域、频域等各种方法,场景包括短距离、室内办公室、室内大厅、城市微小区等等,信道特性包括传播机制、大尺度、小尺度参数等,信道模型包括确定性信道模型、随机信道模型、混合信道模型等,从而使读者对太赫兹信道有一个全面认识.

## 2 太赫兹信道测量

### 2.1 太赫兹信道测量方法

信道测量的本质在于通过向未知信道发送已知信号,并依据接收端(Receiver, Rx)所捕获的信号来逆推并精确量化信道的响应特性. 根据发送和接收信号的特征,太赫兹信道测量可以为时域和频域两大类. 时域信道测量方法包括时域相关法(Time Domain Correlation, TDC)和时域光谱法(Time Domain Spectroscopy, TDS)等. 频域信道测

量方法主要利用矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)进行测试,收发端连接到 VNA 进行 S 参数的测量后再进行数据分析. 除此之外,也可以采用信号发生器生成和频谱仪接收频域信号的方式(Signal Generator and Signal Analyzer, SGSA)组合探测.

#### 2.1.1 时域信道测量方法

时域信道测量的显著优势在于能够直接获取信道冲激响应(Channel Impulse Response, CIR),其常用的发射信号是伪随机二进制序列,也被称为伪噪声(Pseudo-Noise, PN). 在发射端,将设计好的 PN 序列调制至太赫兹频段进行发射. 在接收端,通过已知的 PN 序列,对接收到的信号进行相关性分析,进而提取出信道对信号的具体影响. 根据奈奎斯特采样定理,采样率必须至少是信号带宽的 2 倍,这无疑增加了硬件设备的复杂度和成本,因此,这种方法尤其适用于窄带信道测量. 为克服这一难题,研究者们提出了在相关器输出端或模数转换器输入端增设低通滤波器的方案. 通过滤除高频噪声和无用信号,降低了实际所需的采样率,同时提升了信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR). 面对宽带信道测量中采样率与硬件复杂度之间的冲突,研究者们进一步提出了“滑动相关信道探测器”的概念. 这一探测器巧妙地平衡了测量持续时间和采样率之间的关系,结合了时域信道测量的优势与滑动相关技术的创新理念. 它不仅有效应对了宽带信道测量中的高采样率需求,还降低了硬件复杂度,为太赫兹等宽带通信环境下的信道特性评估提供了高效且经济的解决方案.

另一种时域探测器使用时域脉冲,具备巨大的可扩展带宽,其显著优势在于其巨大的可扩展带宽和极高的信道捕获速度<sup>[10]</sup>. 此类探测器采用周期远大于信道最大时延的超短持续时间脉冲来进行信号传输. 然而,这种探测器也存在一定的局限性,主要问题在于较低的输出功率,这限制了其测量距离. 通过在发射端(Transmitter, Tx)和接收端使用适当的透镜可以部分缓解低输出功率的问题. 因此,这种探测器更适合用于研究太赫兹波段材料的反射、衍射和散射特性.

#### 2.1.2 频域信道测量方法

除了基于时域的信道探测器之外,还有通过频域的信道探测方法. 通常基于矢量网络分析仪来连接收发两端天线,经过空口传输后获得收发之间的 S 参数,从而获得被测信道的频率响应. 这种测量方法易于设计、测量带宽大、校准简单. 然而,它也有一些缺点,如输出功率低、噪声系数高、扫频通常较慢. 在太赫兹信道探测中,输出功率低、噪声系数高可以通过使用适当的放大器来解决. 但随着频率升高,加工放大器的难度越来越大. 扫频较慢意味着基于 VNA 的探测器不适合高度动态的测量场地. 商用 VNA 支持的最高频率约为

110 GHz, 不满足太赫兹波段的信道测量. 因此, 通常在 Tx 和 Rx 端添加上下变频模块, 将信号分别上变频和下变频到合适的中频. 由于两端的信号处理都位于同一仪器内, 测量距离也会受到连接端口到 Tx 和 Rx 模块的电缆损耗限制. 文献[13]中的一个最新解决方案是使用光纤代替电缆将本振信号连接到 Rx 侧的频率扩展器的同轴电缆链路, 可以提高接收端的功率.

此外, 为了避免收发之间长距离的电缆连接, 可以通过信号源生成一定带宽的探测信号, 并通过变频模块调整至太赫兹频段经天线发射, 接收端通过频谱仪

来接收并分析信道的频域特性, 这种方法结构简单, 通常更适合窄带信道测量. 然而, 在没有适当的校准来补偿系统响应影响的情况下, 这种系统更容易导致错误的测量结果.

## 2.2 太赫兹信道测量现状

太赫兹频段的信道测量在早前期受限于太赫兹器件和信道的原因, 测量较少. 但随着器件水平的不断发展和对太赫兹频谱需求的不断增加, 国内外研究机构都开展了大量的太赫兹信道测量. 本节总结了近几年主要的太赫兹信道测量及相关参数, 见表 1.

表 1 太赫兹信道测量汇总

测量场景	文献	测量系统	频率, 带宽/GHz	天线配置	测量的信道特性
材料测量	[15]	TDS	300,10	光电天线+透镜	反射系数、漫散射
材料测量	[16]	VNA	215~225、280~290,10	喇叭天线	材料 RCS 雷达散射截面
阻挡场景	[17]	VNA	220~325,105	喇叭天线	阻挡损耗
桌面短距离	[18]	VNA	310,20	喇叭	路径损耗、时延功率谱、时域自相关函数
桌面通信	[39]	VNA	310、350、390,19	喇叭	路径损耗、散射分布
桌面通信	[40]	VNA	240~300,60	喇叭	传输函数、时延功率谱
桌面通信	[19]	VNA	500~750	对角喇叭	路径损耗、时延功率谱
桌面通信	[41]	VNA	300,14	喇叭天线	路径损耗
室内	[42]	TDC	140,4	喇叭天线	路径损耗、穿透损耗
室内	[14]	TDC	140,1	喇叭天线	反射、散射损耗、路径损耗、反射系数
室内	[43]	SGSA	350/650,单频点	喇叭天线	路径损耗、反射损耗、角度功率谱
室内办公室	[20]	TDC	1 421	喇叭天线	簇数量、子径数量、时延、角度、路径损耗
室内走廊	[25]	SGSA	300,8	喇叭天线	阻挡损耗、时延功率谱
L型走廊	[24]	VNA	306~321,15	喇叭天线	路径损耗、时延角度功率谱
会议室	[44]	TDC	190,7.5	喇叭天线	路径损耗、多径数、时延扩展、角度扩展
实验室	[45]	VNA	100(35),300,(110)	喇叭天线	时延角度功率谱
会议室	[27]	VNA	140(13)、220(8)	喇叭	路径损耗
办公室	[46]	VNA	125~155、235~265、270~300,30	喇叭天线	路径损耗、角度功率谱
会议室	[47]	VNA	140,13	喇叭	路径损耗、时延功率谱、角度功率谱、多径数、K因子
办公室	[21]	VNA	140,13	喇叭	路径损耗、时延功率谱、角度功率谱、时延扩展、角度扩展、多径数、K因子
会议室	[22]	VNA	140,13	喇叭	路径损耗、反射损耗、时延功率谱、角度功率谱
办公室	[48]	VNA	140,13	喇叭	路径损耗
室内通信	[26]	VNA	275~325,50	2x2 虚拟天线阵	路径损耗、多径数、时延功率谱、角度功率谱、时延扩展、角度扩展
室内大厅	[28]	VNA	215~225,10	喇叭天线	时延角度功率谱、空间一致性、时延扩展
室内,教室、走廊	[49]	VNA	219~224,5	喇叭天线	路径损耗、时延扩展、角度扩展、K因子
演讲室	[50]	VNA	300~310,10	喇叭天线	路径损耗
室内:会议室、办公室	[23]	VNA	201~209,8	喇叭天线	路径损耗、时延功率谱、角度功率谱、反射损耗、多径数、角度功率谱、簇内角度扩展
飞机内部	[51]	TDC	300,8	喇叭天线	穿透损耗
数据中心	[52]	TDC	300,8	喇叭天线	路径损耗、时延扩展、角度扩展

续表

测量场景	文献	测量系统	频率,带宽/GHz	天线配置	测量的信道特性
数据中心	[30]	VNA	300~312,12	4×4 虚拟天线阵	阴影衰落、信道冲激响应、多普勒功率谱密度、自相关函数
数据中心	[28]	VNA	300~320,20	喇叭天线+透镜	路径损耗、多径数、时延功率谱、角度功率谱、时延扩展、角度扩展、阻挡径
数据中心	[53]	VNA	300~312,12	喇叭天线+透镜	路径损耗、时延功率谱、相干带宽
工厂	[54]	TDC	142,1	喇叭天线	路径损耗、时延扩展、角度扩展
车联网	[31]	TDC	300,8	喇叭天线	路径损耗、人/车阻挡效应、时延功率谱、时延扩展、角度功率谱、角度扩展
车厢内	[32]	TDC	300,8	喇叭天线	路径损耗、阴影衰落、时延扩展、Rician $K$ 因子、到达/离开的方位角/仰角扩展、交叉极化比
火车到设备	[33]	TDC	300,8	喇叭天线	$K$ 因子、时延功率谱、时延扩展、多径数
购物商场	[55]	VNA	140,7.5	喇叭天线	路径损耗、时延功率谱、角度功率谱、多径数
城市微小区	[34]	TDC	142,1	喇叭天线	路径损耗、簇数、子径数、时延功率谱、角度功率谱
城市微小区	[35]	TDC	142,1	喇叭天线	路径损耗、角度功率谱、时延扩展、角度扩展
室外	[56]	TDC	300,2	喇叭天线、波导天线	路径损耗、时延扩展、角度扩展
城区	[37]	VNA	145~146,1	喇叭天线	时延功率谱、角度功率谱
城区	[38]	VNA	145~146,1	喇叭天线	路径损耗、时延功率谱、角度功率谱、时延扩展
城区	[13]	VNA	140~141,1	喇叭天线	路径损耗、时延功率谱、角度功率谱、 $K$ 因子
城区微蜂窝	[36]	TDC	142,1	喇叭天线	路径损耗、时延功率谱、 $K$ 因子、多径数
城区微蜂窝	[57]	TDC	159,5	喇叭天线	路径损耗、时延功率谱

根据不同的测量目的,主要分为传播机制、大尺度参数、小尺度参数的测量,传播机制包括直射、反射、散射、衍射等.大尺度参数包括路径损耗、阴影衰落、阻挡等.小尺度参数包括多径时延、角度等信息.根据不同的测量场景,太赫兹信道测量场景主要分为短距离场景、室内场景、室外场景等几大类.

太赫兹的传播机制的研究是太赫兹信道建模的基础.由于太赫兹波频率高,波长短,其传播机制和低频段相比有很大不同,包括反射、散射、透射等机制.文献[14]开展了 140 GHz 的反射、散射等机制的测量,给出了常见建筑材料如墙面、透明玻璃的反射系数.在所测频段,散射功率比反射功率低约 20 dB.散射损耗会随着频率的增加而增加,但损失的大小与材料相关.在 300 GHz 频段,文献[15]也基于频域信道测量系统开展了漫散射机制的测量.测试结果表明,在太赫兹频段,当物体表面的粗糙程度接近太赫兹波长时,会发生明显的漫散射效应,同一入射角对应的出射角度更加分

散,会引起更多的多径.并且频率越高,漫散射效应越明显.文献[16]研究了室内建筑材料对亚太赫兹波的响应机制,分析了不同材料雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)在不同入射角、不同频率、不同表面的对比.结果表明,目标的 RCS 散射功率在测量带宽内对极化和频率没有显著依赖性,对入射角依赖性强,随着入射角的增加而减小.文献[17]基于频域测量方法研究了太赫兹频段不同厚度、大小和形状障碍物对透射损耗的影响.测量结果表明,较大面积、较厚障碍物会增加太赫兹信号的衰减,透射损耗越大,泡沫对信号的衰减最小,金属对太赫兹信号的衰减量最大.

从场景上来说,大多数的太赫兹信道测量都在室内环境开展,但不同的室内环境差异较大,测量距离从小到大主要包括桌面短距离通信、普通办公室场景、走廊、会议室/教室、室内大厅等,也有一些特殊的应用场景,例如数据中心、工业物联网场景等.

对于桌面短距离通信,其通信距离大约为 1 m 以

内,其传播主要以直射径为主.文献[18]通过测量给出了300~320 GHz的桌面通信的路径损耗、阴影衰落、均方根时延扩展等参数特性,发现桌面太赫兹信道中的时延扩展比典型的室内超宽带信道中的要小得多,视距(Line-of-Sight, LoS)和非视距(Non-Line-of-Sight, NLoS)信号幅度都可以用对数正态分布进行拟合.在文献[19]中,作者开展了最高750 GHz桌面通信的信道测量,根据氧和水分子的分子吸收,计算并归一化了大气对信号传播的影响,并给出了该频段的时延功率谱,可以观察到多个时延抽头.

对于室内通信,国内外学者们开展了多种室内场景的信道测量.文献[20]开展了140 GHz的室内信道测量并和毫米波频段进行了对比,并给出了包括LoS和NLoS下的路径损耗、时延功率谱、角度功率谱等信道统计特性数据,测量结果表明在去除自由空间传播损耗的影响后,不同频率的NLoS经在同距离下路径损耗接近,并且簇的数量和每个簇内的子路径数量随着频率的增加而减少.学者对一系列室内场景开展了测量,包括办公室<sup>[21]</sup>、会议室<sup>[22,23]</sup>、走廊<sup>[24]</sup>等场景,相应研究了路径损耗、簇的数量、时延功率谱、时延扩展、角度功率谱密度、角度扩展等特性.测量结果和分析表明,室内场景信道特性表现出明显差异,会议室场景的多径数(均值约6)明显多于走廊(均值约3),走廊场景多径之间的时延差显著高于其他场景.因此,需要针对不同的环境设计其信道参数.文献[25]介绍了使用内部信道测深仪在300 GHz的室内走廊中进行的测量.对高分辨率三维测量数据进行处理,以获得双向角度时延功率谱,以及时延和角功率的分布图,从而表征信道的路径损耗、时延和角扩展.文献[26]开展了275~325 GHz频段2×2虚拟多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)的高精度信道测量,最高达4次反射,平均到达时间和到达角/离开角偏差低于0.2 ns和2°,并根据到达和离开的角度在空间上解析各个射线路径,分析了不同反射阶数的时延、角度分布.针对办公室和会议室场景,文献[27]开展了路径损耗测量,结果表明,220 GHz的路径损耗因子高于140 GHz,进一步验证了路径损耗对频率的正依赖性.文献[28]也开展了220 GHz左右室内信道测量,并分析了莱斯因子、均方根时延扩展和角度扩展,以估计各种室内场景下的多径分量丰富度、时间和角色散.此外,将这些值与3GPP38.901中给出的值进行了比较,结果显示,走廊场景中的办公区域显示出严重的路径损耗,并导致了很高的时间和角度色散.

除了室内场景的办公室、会议室、走廊场景外,太赫兹通信还适用于一些专用场景.针对数据中心场景,文献[29,30]开展了信道测量,研究了各种传播场景,如LoS链路、NLoS链路,以及数据中心场景内常见物体(电缆和服务器机架的网状门)作为障碍物的有障碍视

距(Obstructed-LoS, OLoS)、有障碍非视距(Obstructed NLoS, ONLoS)链路,在上述场景中分析了传播信道参数,如路径损耗和均方根时延扩展.通过对车联网场景的信道测量<sup>[31]</sup>,发现车身对太赫兹波阻挡严重,低太赫兹信号在车联网场景中的特性受收发天线的高度影响大.文献[32,33]分别开展了车厢内部以及火车到设备场景的信道测量,从测量的功率时延分布中提取莱斯因子和均方根时延扩展等信道特性.有学者还开展工业物联网场景的信道测量,结果表明,对于142 GHz的工业LoS和NLoS场景,路径损耗指数(Path Loss Exponent, PLE)分别为1.8和3.1.工厂的非直射PLE高于办公室(PLE=2.8)和城市场景(PLE=2.9)中的值.这表明工厂环境可能对太赫兹信号影响大,尤其是在非直射情况下,机器、工作站和高货架等散射体会造成较大影响.

太赫兹也可用于室外的通信.学者开展了142 GHz城市微小区场景的信道测量<sup>[34-36]</sup>,测量距离约120 m,提供了用于LoS和NLoS场景的室外全向和定向路径损耗模型,以及树叶损耗(通过树叶的信号衰减).在142 GHz的观测表明,与28 GHz、73 GHz的均匀分布和较低的莱斯因子相比,具有较窄的扩展空间簇和较高的莱斯因子.文献[37]也开展了145 GHz频段的城区场景信道测量,结果表明该频段在时延域和角度域中存在显著色散.此外,还发现金属覆盖的表面会导致多径的显著增强,意味着在这种类型的环境中,太赫兹通信信道并不总是满足稀疏性.另一城区信道测量表明<sup>[38]</sup>,当前的测量系统和相应的天线的角度观察到了许多场景中丰富的多径,丰富多径的另一个指示是对于LoS和NLoS场景都观察到的相对较大的角扩展.这表明,对于多用户系统,即使在存在大型天线阵列的情况下,用户间干扰仍然是一个重要问题.

### 3 太赫兹信道特性分析

#### 3.1 传播机制

无线通信的传播机制主要包括直射、反射、散射、衍射、透射几种.直射是电磁波在自由空间中沿直线传播的方式.在太赫兹频段,直射路径上的信号衰减最小,因此可以获得较高的信号质量和传输速率,通常用于实现短距离、高带宽的通信和精确的目标定位.然而,直射传播也受到距离和障碍物的影响,当传输距离较远或存在障碍物时,信号质量会下降.

当太赫兹波遇到比其波长大的障碍物时,如金属表面或光滑的建筑表面,会发生反射.反射波的方向、相位和极化可能会发生变化,这取决于障碍物的材料、形状和入射角.当太赫兹波遇到比其波长小或与其相当的障碍物时,如颗粒物、粗糙表面或生物组织,会发生散射.散射波会向各个方向传播,导致信号衰减和相位变化.衍

射是指太赫兹波在遇到障碍物时绕过障碍物继续传播的现象。衍射使得太赫兹波能够传播到障碍物后面的区域,但信号强度会减弱。但是在太赫兹通信中,衍射现象几乎很难发生,衍射所产生的多径可以忽略不计。透射是指太赫兹波穿过物体并能够保持较高的传输功率。透射机制取决于物体的材料、厚度和入射角等因素。在太赫兹频段中,透射机制可以用于实现材料内部结构的无损检测和成像。通过测量透射波的强度和相位变化,可以获取材料的内部结构、缺陷和成分等信息。对于通信信道而言,透射在太赫兹频段几乎不考虑。

### 3.2 大尺度信道特性

太赫兹频段大尺度衰落主要包括路径损耗、阴影衰落、大气吸收等。太赫兹波作为高频电磁波,在自由空间传播时会遵循自由空间路径损耗规律。根据自由空间路径损耗公式,信号的功率随着距离的增加而衰减,衰减率与波长成正比。因此,相比于低频段,太赫兹频段在相同距离下会有更高的路径损耗。为了弥补巨大的路径损耗,通常需要使用高增益定向天线或者大规模天线阵列。阴影衰落是指由于障碍物(如建筑物、山脉等)的阻挡,导致接收端接收到来自发射端的信号功率降低的现象。大气吸收是指太赫兹波在传输过程中,空气中的分子(如氧气和水蒸气)对太赫兹频率的电磁波具有吸收作用,这会导致信号的衰减。大气吸收现象与大气层的水分含量、温度、压强等因素密切相关。ITU P.676-13中研究了无线电波在大气气体中的衰减和相关效应<sup>[58]</sup>,如图1所示。

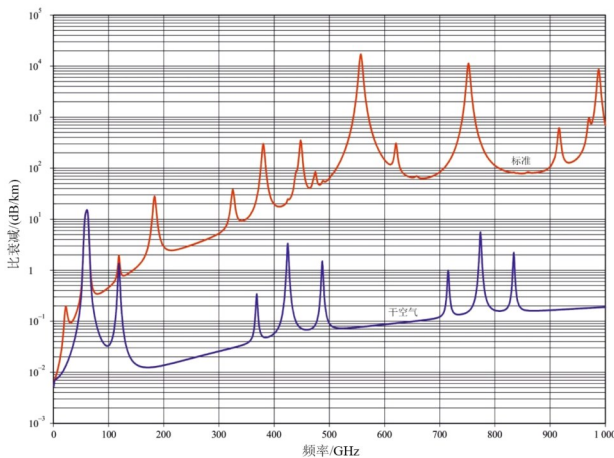


图1 ITU P.676-13中给出的大气气体衰减<sup>[58]</sup>

在特定的太赫兹频段,信号衰减较为显著,如560 GHz、750 GHz频点附近,为了克服大气吸收的影响,可以选择在衰减较小的频段进行通信,通常称为通信窗口,如96 GHz、144 GHz、252 GHz、342 GHz、408 GHz、672 GHz、852 GHz等频点附近,或者采用高功率发射和高效接收设备来补偿信号的衰减。

### 3.3 小尺度信道特性

太赫兹频段路径损耗大,分子吸收明显,导致太赫兹频段的多径数量较少。与低频段相比,太赫兹波更容易受到物体粗表面的细节影响,导致能够有效反射、折射或散射太赫兹波的物体数量相对较少。尽管如此,多径效应仍然存在,可以作为直射径的补充或者在直射径被遮挡时提供有效的传输链路。这意味着,在太赫兹通信场景中,信号往往通过强烈的直射路径或者经过几次反射的主要路径传输,而其他可能的多径相对较弱或可以忽略。如图2所示,文献[26]给出了室内太赫兹信道测量的角度功率谱密度以及对应的反射阶数。可以看到,可检测到的最高反射次数为4次,超过4次反射的多径难以被检测到。因此,在空间角度域,信道会呈现明显的稀疏性。

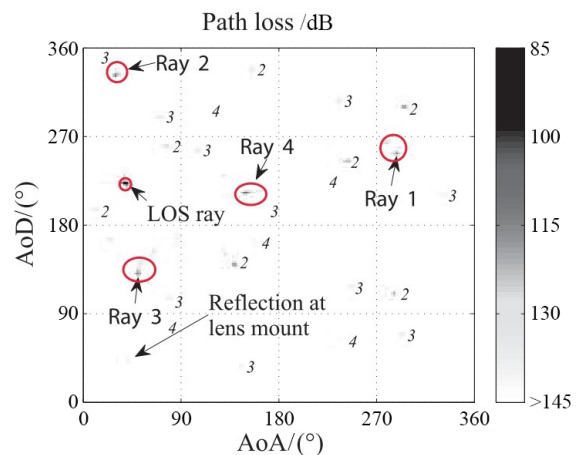


图2 太赫兹室内多径角度功率谱密度及其反射阶数<sup>[26]</sup>

考虑到太赫兹频段通常带宽较大,环境中的微小变化(如表面粗糙度、物体位置变动)在不同频率下对信号传播的影响不同,在带宽内不同的频点上,信道所经历的散射环境并不完全一致,导致信道冲激响应不一致。因此在建模时需要考虑大带宽引起的频域非平稳特性。

## 4 太赫兹信道模型

太赫兹的信道建模主要分为确定性信道模型和随机信道模型。确定性信道模型是使用波传播的电磁理论来确定在三维映射环境中的特定位置处接收的信号功率的模型。尽管确定性模型能够准确预测传播环境的特征,但其计算复杂度高,计算时间长。随机信道模型是使用测量数据来给出传播信道统计描述的信道模型<sup>[59]</sup>。随机信道模型能够在不需要详细环境信息的情况下,提供传播信道的统计特性。这种模型通常基于大量的测量数据,通过统计方法来描述信号在无线环境中的传播特性,因此它无法准确预测特定位置处的信号功率,只能给出统计平均结果。本节总结了近几年具有代表性的太赫兹信道模型及相关参数,如表2所示。

表 2 典型太赫兹信道模型汇总

文献	建模方法	适用场景	研究的信道特性
[32,33,63,64]	射线追踪	车联网(车厢内、车对车、车对基础设施、基础设施对基础设施、车站内)	路径损耗、阴影衰落、李克因子、均方根延迟扩展、到达/离开的方位角/仰角扩展和交叉极化比
[66]	射线追踪	室内	漫散射特性
[67,68]	射线追踪	大规模 MIMO	时延扩展、相干带宽、角度扩展、信道容量
[71]	几何随机	室内办公室	莱斯因子、反射阶数、角度扩展、时延扩展、簇内角度分布、簇内时延分布、信道容量
[72,73]	几何随机	下载亭	莱斯因子、时延扩展、相干带宽、时延功率谱
[73]	几何随机	超大规模 MIMO、室内	时延功率谱、空时频相关性和多普勒功率谱密度
[74,75]	几何随机	通用	漫散射特性、空时频相关性、时延扩展
[76]	随机信道	城市微小区 MIMO	空间宽带效应、功率时延谱、空时域相关性和多普勒功率谱密度
[80]	波束域信道建模	超大规模 MIMO	波束特性
[22]	混合信道建模	室内	普京损耗、反射损耗、墙面反射、空时域特性、簇内角度、簇内时延、多径相关性
[81]	混合信道建模	通用	角度功率谱、角度扩展、多径功率、时延功率谱、时延扩展
[82]	混合信道建模	数据中心	路径增益、功率角度谱、时延功率谱

#### 4.1 确定性信道建模

在 IEEE 802.15.3d 标准中采用的最流行的确定性信道建模方法被称为射线追踪(Ray Tracing, RT)<sup>[60]</sup>。射线追踪可以以合理的精度用于预测收发之间的信号传播。RT模型基于近似电磁波传播和几何光学的麦克斯韦方程的概念。它使用几何光学理论、几何衍射理论、均匀衍射理论和 Kirchhoff 理论来解释传播信号从光滑表面的反射和从直线表面的衍射。在太赫兹频段, RT可用于模拟室内办公室、数据中心、纳米网络等场景内的无线传播。通过固定间隔发射射线,基于自由空间中的传播进行检测,同时考虑反射、散射以及边缘衍射和簇等影响。射线追踪具体算法主要方法包括:可视化树<sup>[61]</sup>、射线发射法<sup>[62]</sup>、基于图像法、虚拟点近似、点云射线追踪等几种主流方法。可视化树是一个生成多层树状结构的算法,它通过限制最大反射次数来捕捉传播环境中的不同光线,通过回溯从叶子到根部的路径来考虑所有传播的光线,但创建过程可能计算密集。射线发射方法通过发射沿所有可能方位角或仰角组合的射线,跟踪其在反射、衍射等作用下的路径变化。图像方法通过生成所有平面上的源图像作为二次源,并基于反射光线是否可见来计算目的地的衰减,适用于简单环境,但随着反射次数增加,图像源数量呈指数增长。虚拟点近似方法在多天线系统中通过引入虚拟点概念来简化复杂的射线追踪模拟,通过模拟虚拟点之间的射线并提取参数,结合阵列特性估计阵列中每个 Tx-Rx 对之间的信道特性,从而减轻计算负担。为了提高基于 RT方法的准确性,激光扫描环境可以提供更高精度的环境点云数据,然后,数据集可以以更高的处理时间为

代价,获得更好的精度。

当前已经有学者在太赫兹频段不同场景开展了射线追踪建模研究。针对铁路相关场景,学者开展了信道测量和射线追踪仿真,用以表征 300 GHz 频率下的车厢内<sup>[32]</sup>、车对车<sup>[63]</sup>、车对基础设施<sup>[33]</sup>、基础设施间<sup>[64]</sup>以及车站内部<sup>[64]</sup>等场景。团队基于图像法,自研了 CloudRT 射线追踪模拟器,可输出射线类型、反射顺序、到达时间、复振幅、到达角、离开角等一系列信道多径参数,并且可以在多个频率点通过多个子带生成一个快拍的信道冲激响应。在文献[65]中,作者提出了一种基于 Beckmann-Kirchoff 模型的新颖三维 RT 算法,主要用于计算非镜面散射分量,考虑到太赫兹频段显著的漫散射机制,在射线追踪建模时,入射光线在粗糙材料反射后,基于 Beckmann-Kirchoff 模型,分裂成镜面和几条非镜面(色散散射)射线。在文献[66]中,作者利用该射线追踪算法研究了 300 GHz 和 350 GHz 频段下办公室环境中规则散射体引起的散射对 MIMO 信道的影响,通过仿真发现,在 NLoS 场景中,漫散射反而增强了信道容量,可以用于提高空间复用增益。在文献[67]中,作者开发了一个基于射线追踪的三维太赫兹信道模型,该模型分别计算 LoS、反射和散射径,并将其叠加,同时考虑了石墨烯的反射天线阵列响应,从而得到完整的信道冲激响应。在文献[68]中,该团队基于该射线追踪模型,分析了距离变化以及频率变化的对信道的影响,研究发现,随着距离的增加和载波频率的降低,相干带宽会显著降低。

除此之外,还可以通过时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)<sup>[69]</sup>和矩量法(Method of Moments, MoM)等电磁计算方法,通过积分和微分方程分析精确求解麦克斯韦方程组的方法,计算环境中的反

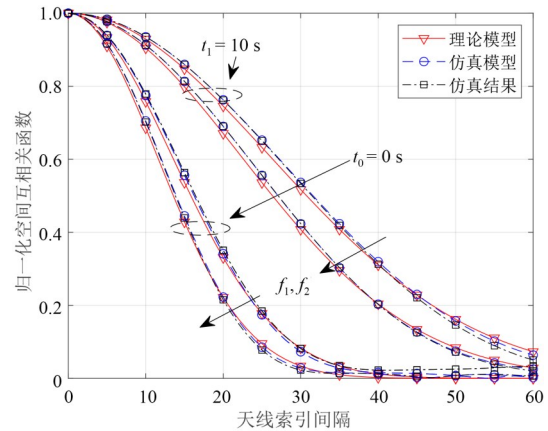
射和散射等传播机制,得到接收端的电磁响应.当提供材料粗糙度、形状等方面的详细参数后,这种方法可以提供电磁场在空间的准确分布,由于求解麦克斯韦方程组的解需要一组按波长间隔的点,这意味着该问题的计算复杂性随着散射体的频率和数量的增加而大幅增加,这限制了该方法所适用的传输环境的尺寸.

#### 4.2 随机信道建模

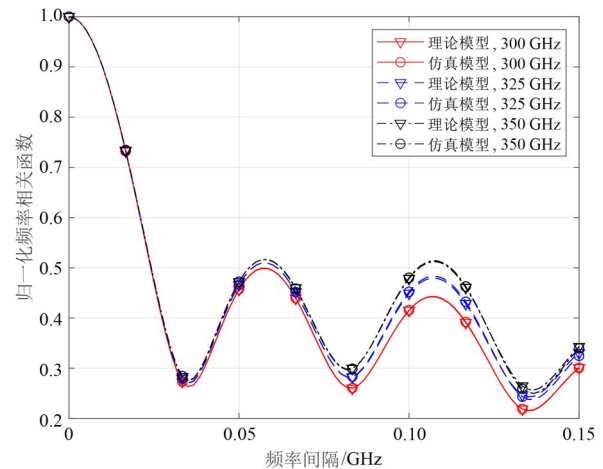
随机信道模型主要包含基于几何的随机信道模型(Geometry-Based Stochastic Model,GBSM)、基于相关的几何随机信道模型(Correlation-Based Stochastic Model,CBSM)以及波束域信道模型(Beam Domain Channel Model,BDCM)<sup>[70]</sup>.CBSM尽管考虑了信道参数之间的相关性,但由于缺乏散射体的具体几何信息,导致其准确度较低,不适合太赫兹频段的建模.

在GBSM中,散射体的位置和特性通过概率分布来描述,然后根据几何关系模拟信号在三维空间中的传播过程.现有的最流行的5G标准3GPP TR38.901最高仅支持100 GHz,无法满足太赫兹频段的建模需求.文献[71]提出了适用于室内办公场景的几何随机信道模型,考虑了大带宽特性,并且首次将多径的时延差建模为指数分布,将角度差建模为高斯分布与指数分布的叠加,并用射线追踪和信道测量数据进行了模型的验证.文献[72]提出了适用于下载亭场景的随机信道模型,对传播路径进行分类,并对每种类型的路径在时间、频率和空间域中的关键信道参数进行建模,给出了多径数、幅度、相位、时延等参数的计算方法.针对超大规模MIMO太赫兹信道,文献[73]用双球模型架构,考虑了纳米材料阵列天线的特性和太赫兹波段的高损耗,基于所提出GBSM,推导并分析了时延功率谱密度、空时频相关函数和多普勒功率谱密度等信道特性.结果表明,天线单元间距和簇数对信道相关性有显著影响,当天线单元间距减小时,相关函数的下降速度变慢,簇的位置也会影响相关函数的下降趋势.文献[74,75]提出了适用于6G太赫兹超大规模MIMO的几何随机信道模型的通用几何随机信道模型,该模型考虑了太赫兹频段的频域非平稳、超大规模MIMO引起的空域非平稳以及用户移动引起的时域非平稳特性.使用该信道模型计算时,首先通过特定的参数分布生成初始时刻、初始天线单元、初始频段的信道参数,接着可对信道参数分别在空时频域进行更新.以发端移动为例,为了保证时域和空间域参数更新时的空间一致性,考虑太赫兹频段的反射和散射特性,在更新时引入发端的虚拟镜像点,将新时刻的位置点通过虚拟镜像点连接收端,并通过几何关系更新角度、散射体位置等信道参数.收端运动同理.然后,根据频域的生灭概率更新频域参数,最后得到完整的信道冲激响应.图3给出了在不同时刻

下不同天线单元信道的空间互相关函数以及不同频点的频率相关函数,验证了空域和频域的非平稳特性.



(a) 太赫兹几何随机信道模型空间相关函数



(b) 太赫兹几何随机信道模型频率相关函数

图3 太赫兹几何随机信道模型空时频相关函数

通过适当调整模型参数,可以将所提出的信道模型简化,以适应太赫兹频段的特定场景.针对城市微小区场景,文献[76]通过建模泊松散射区域下的反射、散射和吸收系数精确预测信道特性.此外,文献[77,78]提出了6G普适信道建模理论和普适信道模型,并对其统计特性进行了全面研究.该普适信道模型针对sub-6 GHz、毫米波、太赫兹等频段在内的全频段,以及卫星、无人机、地面、海洋等在内的全场景信道特性和建模研究,采用统一的建模框架,实现了包含太赫兹信道在内的全频段全场景信道特性的仿真.通过设置簇内子径数、时延扩展、角度扩展等信道参数,可简化为太赫兹信道模型.

考虑到太赫兹频段的空域稀疏性,使用波束域信道模型去刻画信道矩阵时,可大大降低信道矩阵的复杂度,使得其适用于后续传输理论分析.文献[79]提出了适用于毫米波和太赫兹频段的波束域信道模型,并进

一步提出了在时间和频率上具有波束同步的波分多址传输理论,并验证了该方法在典型移动场景中对太赫兹宽带大规模 MIMO 系统的有效性. 随后,针对超大规模 MIMO 引起的球面波特性和该团队通过引入球面波下的导向矢量,推导近场情况下从空间域向波束域的转化矩阵,从而构建了支持超大规模天线阵列的太赫兹波束域信道模型<sup>[80]</sup>,并重点分析了近场效应对波束域信道模型的影响. 在理想远场条件下,每个来波方向的波束可近似成平面波,各波束互不干扰. 图 4 显示了单个散射体在发射端不同水平波束和垂直波束的功率谱,可以看到主波束的部分功率泄漏到与其所在波束附近的其他波束中,可体现出近场球面波对波束域信道模型的影响.

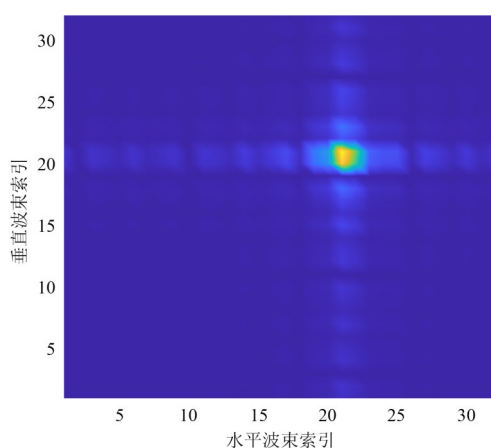


图 4 太赫兹波束域信道模型幅度功率谱

### 4.3 混合信道建模

考虑到确定性建模和随机信道建模各有优势和不足,有学者结合这两种方法的长处,提出了一种混合信道建模的思路. 文献[22]提出了一种将多径聚簇和匹配过程与射线追踪技术相结合的方法来研究太赫兹信号的聚簇和传播,建立了 140 GHz 室内太赫兹信道的射线追踪统计混合信道模型. 和传统的射线追踪相比,所提出的混合模型具有低复杂性,并且不需要环境的详细几何信息. 和几何随机信道模型相比,该模型的准确度更高. 文献[81]提出了一种基于簇核的信道模型框架,通过环境重建、簇核识别、多径参数生成和信道系数生成几个步骤来实现. 利用具有材料信息的三维环境来映射传播路径中具有散射体的簇核,通过基于环境映射的几何和电场计算来识别簇核,并通过角度、功率和时延域的统计特性来计算簇核内的多径分量. 最后提出了一个三级验证结构全面研究信道建模的准确性和复杂性. 针对数据中心场景,作者提出了一种结合射线追踪和太赫兹散射模型的混合信道模型<sup>[82]</sup>,结合了确定性射线追踪信道预测和路径损耗经验模型.

## 5 未来研究挑战

### 5.1 全场景的太赫兹信道测量

太赫兹有望在未来的天地海一体化网络中发挥更重要的作用. 除了本文所提到的场景以外,一些暂时受当前设备精度或其他原因限制的应用场景在未来也可能引入太赫兹频段,如无人机、卫星上通信、地下等场景. 此外,太赫兹技术还可以与其他新兴技术相结合,如智能反射面、全息 MIMO 以及通感一体化等技术. 当这些技术在太赫兹波段使用时,需要首先开展太赫兹的信道测量和特性分析. 由于信道探测器的限制,可探测的最远距离远小于低频段,使得户外的太赫兹信道测量相对较少,现有的信道测量无法覆盖所有的太赫兹通信场景. 当前的太赫兹信道测量主要集中在 500 GHz 以下,支持更高频段的太赫兹信道探测器有待进一步突破.

### 5.2 基于人工智能的预测信道建模

当前的太赫兹信道模型都是基于已知场景、已知频段的非预测信道模型. 考虑到实际情况,在全频段、全场景开展信道测量难以实现,因此需要研究基于人工智能的预测信道建模方法. 通过使用机器学习算法,人工智能可以深入探索信道模型参数和统计特性之间的复杂关系,以发现它们之间的内在联系,并用于预测未来时间和未知频率下的信道特性.

### 5.3 全频段全场景的普适信道建模

当前大多太赫兹信道模型只考虑少数多径,与其他频段信道模型架构存在显著差异,无法与其他频段形成统一,难以形成标准化. 通过全面研究 sub-6 GHz、厘米波、毫米波、太赫兹等频段的信道特性,采用统一的数学框架,构建全频段全场景普适信道模型,并通过调整信道模型参数,可以转化为特定频段和场景的信道模型. 全频段全场景信道模型的研究是实现 6G 空地海一体化通信网络的基础.

## 6 结论

本文对太赫兹频段的信道测量、信道特性分析和信道模型的研究进展进行了总结. 在信道测量方面,介绍了太赫兹时域和频域信道测量方法,梳理了各个研究团队所开展的信道测量,对其信道测量场景、信道测量方法、频段、天线配置和信道特性进行了整理. 然后分别从传播机制、大尺度参数、小尺度参数 3 个方面全面总结了太赫兹的信道特性. 接着总结了太赫兹频段的信道模型,分别介绍了确定性信道模型、随机信道模型以及混合信道模型的建模方法和现有建模进展. 最后提出了未来太赫兹信道模型的研究挑战. 当前的太赫兹信道研究仍然有巨大的潜在空间和广阔的应用前景. 期望本文通过综述太赫兹信道测量与建模方面已有的成果,可以为相关领域的研究人员提供参考和帮助.

## 参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, JORNET J M, HAN C. TeraNets: Ultra-broadband communication networks in the terahertz band[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(4): 130-135.
- [2] RIKKINEN K, KYOSTI P, LEINONEN M E, et al. THz radio communication: Link budget analysis toward 6G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(11): 22-27.
- [3] ALSABAH M, NASER M A, MAHMMOD B M, et al. 6G wireless communications networks: A comprehensive survey[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 148191-148243.
- [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] JIANG W, HAN B, HABIBI M A, et al. The road towards 6G: A comprehensive survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 334-366.
- [6] WANG C X, WANG J, HU S M, et al. Key technologies in 6G terahertz wireless communication systems: A survey[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021, 16(4): 27-37.
- [7] WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020, 15(4): 22-32.
- [8] GHAFOR S, BOUJNAH N, REHMANI M H, et al. MAC protocols for terahertz communication: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2236-2282.
- [9] 3GPP TR 38.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[S]. 2018.
- [10] HAN C, WANG Y Q, LI Y B, et al. Terahertz wireless channels: A holistic survey on measurement, modeling, and analysis[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(3): 1670-1707.
- [11] GUAN K, YI H F, HE D P, et al. Towards 6G: Paradigm of realistic terahertz channel modeling[J]. *China Communications*, 2021, 18(5): 1-18.
- [12] TEKBIYIK K, EKTİ A R, KURT G K, et al. A holistic investigation of terahertz propagation and channel modeling toward vertical heterogeneous networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(11): 14-20.
- [13] ABBASI N A, GOMEZ-PONCE J, BURGHAL D, et al. Double-directional channel measurements for urban THz communications on a linear route[C]//2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [14] XING Y C, KANHERE O, JU S H, et al. Indoor wireless channel properties at millimeter wave and sub-terahertz frequencies[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE, 2019: 1-6.
- [15] JANSEN C, PRIEBE S, MOLLER C, et al. Diffuse scattering from rough surfaces in THz communication channels[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(2): 462-472.
- [16] WANG Y, LI C, LIAO X, et al. Propagation characteristics and modeling of monostatic RCS scattering from indoor building material above 215-GHz frequency bands[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(3): 642-646.
- [17] LI H, WANG W M, XU H, et al. THz channel measurement for different obstacles[C]//2022 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Piscataway: IEEE, 2022: 599-603.
- [18] KIM S, ZAJIĆ A G. Statistical characterization of 300-GHz propagation on a desktop[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(8): 3330-3338.
- [19] SERGHIU 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). Piscataway: IEEE, 2020: 1-4.
- [20] JU S H, XING Y C, KANHERE O, et al. Millimeter wave and sub-terahertz spatial statistical channel model for an indoor office building[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(6): 1561-1575.
- [21] CHEN Y, HAN C, YU Z M, et al. 140 GHz channel measurement and characterization in an office room[C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [22] CHEN Y, LI Y B, HAN C, et al. Channel measurement and ray-tracing-statistical hybrid modeling for low-terahertz indoor communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 8163-8176.
- [23] CHEN Y, HAN C, YU Z M, et al. Channel measurement, characterization, and modeling for terahertz indoor communications above 200 GHz[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(6): 6518-6532.
- [24] WANG Y Q, LI Y B, CHEN Y, et al. 0.3 THz channel measurement and analysis in an L-shaped indoor hallway[C]//ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2022: 2870-2875.
- [25] GHOSH A, TAKAHASHI R, KIM M. Double-directional channel characterization of an indoor corridor scenario at 300 GHz[C]//GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2023:

- 1465-1470.
- [26] PRIEBE S, KANNICHT M, JACOB M, et al. Ultra broadband indoor channel measurements and calibrated ray tracing propagation modeling at THz frequencies[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2013, 15(6): 547-558.
- [27] HE J, CHEN Y, WANG Y Q, et al. Channel measurement and path-loss characterization for low-terahertz indoor scenarios[C]//2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [28] ZHOU X R, WANG Y, LIAO X, et al. Channel measurement and temporal-spatial characterization for indoor sub-THz communications[C]//2023 IEEE 11th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE, 2023: 1-2.
- [29] CHENG C L, SANGODOYIN S, ZAJIĆ A. THz cluster-based modeling and propagation characterization in a data center environment[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 56544-56558.
- [30] CHENG C L, SANGODOYIN S, ZAJIĆ A. Terahertz MIMO fading analysis and Doppler modeling in a data center environment[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2020: 1-5.
- [31] 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.
- [32] GUAN K, PENG B L, HE D P, et al. Channel characterization for intra-wagon communication at 60 and 300 GHz bands[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5193-5207.
- [33] GUAN K, PENG B L, HE D P, 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.
- [34] XING Y C, RAPPAPORT T S. Propagation measurements and path loss models for sub-THz in urban microcells[C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [35] XING Y C, RAPPAPORT T S. Millimeter wave and terahertz urban microcell propagation measurements and models[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(12): 3755-3759.
- [36] SHAKYA D, JU S H, KANHERE O, et al. Radio propagation measurements and statistical channel models for outdoor urban microcells in open squares and streets at 142, 73, and 28 GHz[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(4): 3580-3595.
- [37] ABBASI N A, GOMEZ-PONCE J, SHAIKBEPARI S M, et al. Ultra-wideband double directional channel measurements for THz communications in urban environments[C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [38] ABBASI N A, GOMEZ J L, KONDAVETI R, et al. THz band channel measurements and statistical modeling for urban D2D environments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(3): 1466-1479.
- [39] 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.
- [40] ZANTAH Y, ALISSA M, KREUL T, et al. Ultra-wideband multipath channel characterization at 300 GHz[C]//WSA 2020; 24th International ITG Workshop on Smart Antennas. Offenbach: VDE, 2020: 1-5.
- [41] KHALID N, AKAN O B. Experimental throughput analysis of low-THz MIMO communication channel in 5G wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(6): 616-619.
- [42] ZHAO H, WEI L H, JARRAHI M, et al. Propagation measurements for indoor wireless communications at 350/650 GHz[C]//2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [43] 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). Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.
- [44] DUPLICH D, MÜLLER R, SKOBLIKOV S, et al. Characterization of the propagation channel in conference room scenario at 190 GHz[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2020: 1-5.
- [45] LYU Y J, KYOSTI P, FAN W. Sub-THz VNA-based channel sounder structure and channel measurements at 100 and 300 GHz[C]//2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE, 2021: 1-5.
- [46] LOTTI M, CAILLET M, D'ERRICO R. Comparison of indoor channel characteristics for sub-THz bands from 125 GHz to 300 GHz[C]//2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2022: 1-5.

- [47] YU Z M, CHEN Y, WANG G J, et al. Wideband channel measurements and temporal-spatial analysis for terahertz indoor communications[C]//2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.
- [48] ABBASI N A, HARIHARAN A, NAIR A M, et al. Channel measurements and path loss modeling for indoor THz communication[C]//2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2020: 1-5.
- [49] CHEN X R, LIAO X, WANG Y, et al. Channel measurements and large-scale fading characterization for indoor THz communications[C]//GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE, 2023: 1483-1488.
- [50] ZANTAH Y, SHEIKH F, ABBAS A A, et al. Channel measurements in lecture room environment at 300 GHz[C]//2019 Second International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS). Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [51] ECKHARDT J M, DOEKER T, KURNER T. Indoor-to-outdoor path loss measurements in an aircraft for terahertz communications[C]//2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). Piscataway: IEEE, 2020: 1-5.
- [52] ECKHARDT J M, DOEKER T, REY S, et al. Measurements in a real data centre at 300 GHz and recent results[C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [53] CHENG C L, ZAJIĆ A. Characterization of propagation phenomena relevant for 300 GHz wireless data center links[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 1074-1087.
- [54] JU S H, XING Y C, KANHERE O, et al. Sub-terahertz channel measurements and characterization in a factory building[C]//ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2022: 2882-2887.
- [55] NGUYEN S L H, JÄRVELÄINEN J, KARTTUNEN A, et al. Comparing radio propagation channels between 28 and 140 GHz bands in a shopping mall[C]//12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London: IET, 2018: 1-5.
- [56] UNDI F, SCHULTZE A, KEUSGEN W, et al. Angle-resolved THz channel measurements at 300 GHz in an outdoor environment[C]//2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE, 2021: 1-7.
- [57] LEE J, PARK J J, KIM K W, et al. 159-GHz propagation measurement and analysis in urban microcellular environment for 6G[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(2): 277-281.
- [58] ITU-R P.676-13. Attenuation by atmospheric gases and related effects[S]. 2022.
- [59] SERGHIU D, KHALILY M, BROWN T W C, et al. Terahertz channel propagation phenomena, measurement techniques and modeling for 6G wireless communication applications: A survey, open challenges and future research directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(4): 1957-1996.
- [60] HE D P, AI B, GUAN K, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: A tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 10-27.
- [61] SAADANE R R, WAHBI M. UWB indoor radio propagation modelling in presence of human body shadowing using ray tracing technique[J]. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, 2012, 4(2): 132-143.
- [62] AZPILICUETA L, SCHULTZE A, CELAYA-ECHARRI M, et al. TeraHertz vs microwaves ray-launching model in a 0.45 THz indoor wireless scenario[C]//2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2023: 1-2.
- [63] GUAN K, PENG B L, HE D P, et al. Channel sounding and ray tracing for train-to-train communications at the THz band[C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [64] GUAN K, HE D P, AI B, et al. Channel characterization and capacity analysis for THz communication enabled smart rail mobility[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 4065-4080.
- [65] SHEIKH F, LESSY D, KAISER T. A novel ray-tracing algorithm for non-specular diffuse scattered rays at terahertz frequencies[C]//2018 First International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS). Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.
- [66] SHEIKH F, GAO Y, KAISER T. A study of diffuse scattering in massive MIMO channels at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 997-1008.
- [67] HAN C, AKYILDIZ I F. Three-dimensional end-to-end modeling and analysis for graphene-enabled terahertz band communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5626-5634.
- [68] HAN C, BICEN A, 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.
- [69] ZHAO Y, HAO Y, PARINI C. FDTD characterization of UWB indoor radio channel including frequency dependent antenna directivities[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6: 191-194.
- [70] FENG R, WANG C X, HUANG J, et al. Classification and comparison of massive MIMO propagation channel models[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23452-23471.
- [71] PRIEBE S, KURNER T. Stochastic modeling of THz indoor radio channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9): 4445-4455.
- [72] HE D P, GUAN K, FRICKE A, et al. Stochastic channel modeling for kiosk applications in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(5): 502-513.
- [73] YUAN Y, HE R S, AI B, et al. A 3D geometry-based THz channel model for 6G ultra massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 2251-2266.
- [74] WANG J, WANG C X, HUANG J, et al. A novel 3D non-stationary GBSM for 6G THz ultra-massive MIMO wireless systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(12): 12312-12324.
- [75] WANG J, WANG C X, HUANG J, et al. A general 3D space-time-frequency non-stationary THz channel model for 6G ultra-massive MIMO wireless communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(6): 1576-1589.
- [76] DAS S, SEN D, VITERBO E, et al. Ambit-process-based spatial-wideband MIMO channel model for sub-THz urban microcellular communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(1): 559-574.
- [77] WANG C X, LV Z, GAO X Q, et al. Pervasive wireless channel modeling theory and applications to 6G GBSMs for all frequency bands and all scenarios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(9): 9159-9173.
- [78] WANG C X, LV Z, CHEN Y F, et al. A complete study of space-time-frequency statistical properties of the 6G pervasive channel model[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(12): 7273-7287.
- [79] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for millimeter-wave/terahertz massive MIMO transmission with per-beam synchronization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7): 1550-1563.
- [80] WANG J, WANG C X, HUANG J, et al. A novel THz massive MIMO beam domain channel model for 6G wireless communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(8): 9704-9719.
- [81] YU L, ZHANG Y X, ZHANG J H, et al. Implementation framework and validation of cluster-nuclei based channel model using environmental mapping for 6G communication systems[J]. China Communications, 2022, 19(4): 1-13.
- [82] ECKHARDT J M, DOEKER T, KÜRNER T. Hybrid channel model for low terahertz links in a data center[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 4731-4745.

## 作者简介



**王 俊 男**, 1994年出生于江苏省南通市。现为紫金山实验室普适通信研究中心博士后。主要研究方向为毫米波太赫兹信道建模、通感一体化信道测量与建模。

E-mail: wangjun@pmlabs.com.cn



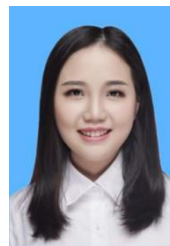
**王承祥 男**, 1975年出生于山东省潍坊市。现为东南大学首席教授、信息科学与工程学院院长、移动通信全国重点实验室副主任、紫金山实验室教授。主要研究方向为无线信道测量与建模、6G智能网络架构与关键技术、电磁信息论等。

E-mail: chxwang@seu.edu.cn



**冯 瑞 女**, 1988年出生于山东省济宁市。现为紫金山实验室副研究员, 博士。主要研究方向为无线信道多径参数提取算法、(超)大规模MIMO信道建模理论研究、波束域信道建模。

E-mail: fengrui@pmlabs.com.cn



**李俊伶 女**, 1991年出生于四川省内江市。现为东南大学信息科学与工程学院副研究员, 博士。主要研究方向为数字孪生在线信道建模、基于AI的预测信道建模。

E-mail: junlingli@seu.edu.cn