

## 太赫兹电波传播及信道特性

弋浩凡<sup>1,2</sup>, 官科<sup>1,3</sup>, 何丹萍<sup>1,3</sup>, 艾渤<sup>1,3</sup>, 赖峥嵘<sup>4</sup>, 钟章队<sup>1,3</sup>

(1. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 2. 北京市高速铁路宽带移动通信工程技术研究中心, 北京 100044;  
3. 智慧高铁系统前沿科学中心, 北京 100044; 4. 广东省新一代通信与网络创新研究院, 广东 广州 510700)

**摘要:** 首先, 综述太赫兹电波相较于低频电波传播的不同特性, 包括气象因素和材料粗糙表面对电磁波的影响。接着, 提出利用射线跟踪技术仅通过有限的信道测量数据校准目标场景中的三维环境模型以及材料电磁参数; 然后, 利用从射线跟踪仿真反演出的参数在类似场景中进行大量仿真, 代替信道测量生成大量真实有效的全维度信道数据; 最后, 提取并分析信道特性, 例如路径损耗、阴影衰落、莱斯 K 因子、均方根时延扩展、角度扩展及多普勒参数。2 个案例研究是从室内桌面通信到室外智能车联网场景, 分别代表了 6G 移动通信从近到远用例的两端, 对于室外场景还额外考虑了不同气象条件下对信道参数的影响, 对太赫兹系统的设计和评估具有重大意义。

**关键词:** 信道特性; 信道测量; 射线跟踪; 太赫兹通信; 电波传播

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022013

## Terahertz wave propagation and channel characterization

YI Haofan<sup>1,2</sup>, GUAN Ke<sup>1,3</sup>, HE Danping<sup>1,3</sup>, AI Bo<sup>1,3</sup>, LAI Zhengrong<sup>4</sup>, ZHONG Zhangdui<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Beijing Engineering Research Center of High-speed Railway Broadband Mobile Communications, Beijing 100044, China

3. Frontiers Science Center for Smart High-speed Railway System, Beijing 100044, China

4. Guangdong Communications and Networks Institute, Guangzhou 510700, China

**Abstract:** Firstly, the different characteristics of terahertz waves compared to lower frequency bands were summarized, including the influence of meteorological factors and rough surfaces of materials on THz waves. Next, it was proposed to use ray-tracing (RT) technology to calibrate the three-dimensional (3D) environment model and electromagnetic parameters of materials in the target scenarios through very limited channel measurement data. Then, the reversed parameters were utilized to perform in a similar but more general scenario, instead of a large amount of channel measurement data. Finally, the channel characteristics were analyzed by extraction of the channel key parameters, such as path loss, shadow fading, Rician K-factor, delay spread, angular spread, and doppler parameters in a mobile scenario. Representing two ends of 6G THz use cases from indoor scenario to outdoor scenario, case studies were made for wireless connections on a desktop and vehicular communications, respectively. As for the outdoor scenario, the influences of meteorological factors were additionally considered. The work is of great significance for the design and evaluation of the THz communication system.

**Keywords:** channel characterization, channel sounding, ray-tracing, THz communication, wave propagation

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-01-06

通信作者: 官科, kguan@bjtu.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2020JBZD005); 国家自然科学基金资助项目 (No.61901029); 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金资助项目 (No.L212029); 轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题基金资助项目 (No.RCS2020ZZ005)

**Foundation Items:** The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2020JBZD005), The National Natural Science Foundation of China (No.61901029), The Beijing Natural Science Foundation (No.L212029), The State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety (No. RCS2020ZZ005)

## 0 引言

随着移动通信系统的发展,人们需要实时连接和占用巨大数据量满足各种在线应用。在这样的背景下,不同的国际组织和机构致力于用行业标准支持无线数据的爆炸,例如第三代合作伙伴计划(3GPP, the 3rd Generation Partnership Project)的长期演进技术(LTE, long term evolution)<sup>[1]</sup>、电气与电子工程师协会(IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers)的IEEE 802.11无线局域网(WLAN, Wireless Local Area Network)<sup>[2]</sup>和IEEE 802.15无线个域网(WPAN, wireless personal area network)<sup>[3]</sup>等。毫米波通信技术(mmWave, millimeter-wave)<sup>[4]</sup>在5G中能够逐步提高系统容量,同时出现了相关先进技术,如多输入多输出(MIMO, multiple-input multiple-output)技术、多点协作(CoMP, coordinated multi-point)技术、载波聚合(CA, carrier aggregation)技术等,可将毫米波通信的速率提升到几个Gbit/s。但由于频率限制,微波和毫米波通信可用带宽有限,没有大于10 GHz带宽的频谱空间可供配置。

6G将以5G移动通信系统为基础,实现从万物互联到万物智能互联的转型。2020年2月,ITU-R WP5D工作组会议上宣布面向2030及6G的研究工作正式启动;3GPP目前对外发布的资料中预计2023—2026年启动6G研究,2026—2028年启动6G标准研究。而早在2018年,中国通信标准化协会(CCSA, China Communications Standards Association)无线通信组前沿无线技术组TC WG6已启动B5G/6G相关立项研究。未来为了缓和5G频谱的瓶颈,实现至少100 Gbit/s的吞吐量,需要探索新的频谱资源。由此,太赫兹(THz, terahertz)频段(0.1~10 THz)作为高速传输的有效频段,成为6G关键技术之一。太赫兹通信频率以下的微波/毫米波通信和以上的可见光通信已被广泛研究;而太赫兹频段恰好在基于振荡器的电子发生方法和基于发射器的光子方法产生的频率之间,被称为“通信系统中射频频谱的最后一块拼图”<sup>[5]</sup>。与红外通信和可见光通信相比,太赫兹频段的电磁波可以穿透烟雾和浮尘,还可以穿透陶瓷、塑料、脂肪等非金属和非极性器件,因此太赫兹通信不易受到障碍物的干扰而中断。与毫米波通信相比,太赫兹频段的电磁波的方向性更好,更不易受到未经授权用

户的窃听,保障安全性。

为在太赫兹频段内实现高效的无线通信网络,支持通信系统的仿真和开发,有效的信道数据是非常重要的,必须建立能够准确、高效表征太赫兹特性的信道模型。理论、测量和仿真一体化是各种信道建模方法的核心<sup>[6]</sup>。据目前的发展而言,太赫兹通信的应用场景主要分为地面通信和卫星通信。IEEE 802.15.TG3d<sup>[7]</sup>作为全球首个太赫兹信道标准明确了地面通信5个场景,包括室外无线回传场景和4个室内典型场景,分别是近距离无线下载站、设备内通信、数据中心内通信和交换式点对点通信。此外,ITU将0.22 THz频段规划用于卫星间通信,在高空、邻近空间以及大气层以外的太空环境,太赫兹将摆脱大气分子吸收衰减,实现卫星间远距离通信。因此,太赫兹无线通信在星地高速通信(低轨)、分布式卫星群、低轨星座、中高轨信息港以及等离子鞘套测控通信等多个场景具有重要的应用前景。但是受限于目前太赫兹器件的约束,卫星通信的太赫兹信道研究尚存在于仿真阶段,但地面的信道测量和信道建模研究已经开展了相对较多的研究。

以大量实测数据为基础的随机信道模型是用数学方法表征信道的随机变化,适用于系统性能的一般性评估和标准化。在Sub-6 GHz频段的3G和4G移动通信时代,在绝大多数场景中进行大量的信道测量没有太大的挑战。因此,很多随机信道模型都是直接建立在从测量数据中提取参数的基础上,例如基于簇的信道标准信道集群3GPP提出的空间信道模型(SCM, spatial channel model)和扩展空间信道模型(SCME, extended SCM)<sup>[8]</sup>、WINNER II<sup>[9]</sup>、WINNER+<sup>[10]</sup>,这些模型也被称为基于测量数据的伪几何模型(MBPGM, measurement-based pseudo-geometric model)。经过测量数据的参数化,MBPGM可以在某些特定的场景中生成信道数据,用于链路级和系统级的仿真。另一种基于几何的随机模型(GBSM, geometry-based stochastic model)<sup>[11]</sup>需要根据测量确定概率分布参数,通过假定的散射几何来实现信道脉冲响应(CIR, channel impulse response)。

随着频率的升高,在毫米波频段进行宽带信道测量更具挑战性。为了补偿路径损耗和获得信道全方位的多径,毫米波信道探测器经常采用具有高增益窄波束的天线进行手动或机械旋转的方法测量

信道,因此并不能捕捉信道的动态变化特性。此外,许多毫米波探测仪的采集时间超过非平稳信道的相干时间,造成只有少部分测量数据能够同时测得时延和角度特性,因此测量数据样本的自由度非常有限,例如,文献[12-13]使用高增益窄波束定向天线测量了少量的二维信道数据,仍需要辅助仿真数据来萃取信道时-空-频多维度信息。在 5G 毫米波时代,以射线跟踪(RT, ray-tracing)技术为基础的确定性信道模型成为扩展稀疏测量数据集和表征毫米波信道的有效解决方案。

当目标频段由毫米波扩展到太赫兹时,测量数据稀缺的问题更加突出。片上通信<sup>[14]</sup>、室内通信<sup>[15]</sup>到智能车联网通信<sup>[16]</sup>、智能轨道交通<sup>[17]</sup>等各种场景中,各国学者都做出了巨大的努力。对于测量结果,文献[18]对 75~400 GHz 的室内桌面信道进行了测量,证明了随频率升高太赫兹信道变得更加稀疏,且视线线路(LoS, line-of-sight)始终占据主导地位;但测量过程中受到测量使用的射频线长度限制,始终保持发射机(Tx, transmitter)和接收机(Rx, receiver)位置不变,获得的测量数据维度非常有限。文献[19]用金属外壳类比为机箱环境进行了 300 GHz 的测量,由测量结果可以发现路径损耗随收发机高度位置改变而变化。文献[20-21]在数据中心用实测数据验证了他们对信道特性的分析,金属服务器的框架和光滑的立柱等局部散射体可以用于辅助非视距(NLoS, non line-of-sight)类型的链路。

越来越多的新兴通信应用或场景中,如无人机、高速列车、车联网等,不可能同 6 GHz 以下频段建模一样采用信道测量的方法进行信道参数表征或是建模。使用由测量结果校准后的射线跟踪仿真器生成信道冲激响应成为扩展稀疏测量数据集和分析目标信道的替代方案,这种方法也被标准组织所接受。在文献[22]中,室内信道模型就是基于测量验证的射线跟踪仿真进行的,其已被接受为 5G 毫米波标准信道模型。射线跟踪已经成为一种用于分析特定场景的通用技术,其基于麦克斯韦的高频近似方法和几何光学模型模拟电磁波传播,并鉴于太赫兹频段电磁波波长短,其特征也更接近于光的性质,反射、散射和绕射机制近似为几何光学,使射线跟踪技术在太赫兹频段更具有准确性<sup>[23]</sup>。在太赫兹频段,射线跟踪技术已被应用在室内<sup>[24-25]</sup>和轨道交通<sup>[26]</sup>等场景的信道分析中。尽管已经做了大量工作,但是无论是测量数据集、仿真数据集还是

数据的维度信息等,对于未来面向标准化组织的信道建模而言,所收集的数据仍然不足以全维度地表征不同应用场景中的太赫兹信道。

为了指导 6G 太赫兹通信系统的链路级和系统级仿真,射线跟踪技术能够很好地提供与测量结果较一致的信道全维度信息和信道特征参数。在太赫兹频段,传播需要考虑自由空间传播损耗,以及部分电磁波能量在传播过程中所造成的分子吸收衰减和雾、雨、雪等气象粒子色散衰减。文献[27]基于射线跟踪技术和太赫兹独特的电波传播特性,建立了一个完整的、通用的太赫兹多径信道模型。

为了使基于射线跟踪的太赫兹信道模型更加准确,并能够应用于真实通信场景的信道特性分析中,本文做出的主要贡献如下。

1) 由太赫兹的电波传播特性出发,首先,综述了不同气象因素对太赫兹电磁波能量衰减的预测方法,主要包括大气分子吸收衰减,以及雾、雨、雪粒子色散衰减。然后,针对太赫兹电波在粗糙表面发生反散射的研究中,对粗糙表面进行了建模,利用电磁计算方法,分析粗糙表面的相关长度和均方根高度如何影响反散射的能量。最后,将太赫兹区别于毫米波电波的传播特性植入射线跟踪仿真器中。

2) 提出一种利用射线跟踪技术生成 6G 真实太赫兹信道的方法。此方法以高性能射线跟踪为核心,只需要非常有限的信道测量数据来校准仿真器中的三维环境模型的几何和电磁参数,然后进行大规模的射线跟踪仿真,得到大量全维度的信道数据;对关键信道参数进行萃取和拟合,通常采用正态分布函数拟合出目标场景中各个参数的均值和方差,可以为系统设计和评估提供基础。

3) 为演示如何实现该框架提出 2 个案例,由室内短距离桌面无线连接到智能车联网信道,实现太赫兹信道的特征参数化,代表太赫兹通信由室内到室外的 2 个典型场景。特征参数包括路径损耗、阴影衰落、莱斯 K 因子、均方根时延扩展、角度扩展、多普勒频移以及多普勒扩展,对于智能车联网场景,还加入不同气象因素对关键参数的影响。

## 1 太赫兹电波传播特性

### 1.1 气象因素影响

与 100 GHz 以下低频无线通信相比,太赫兹无线信道更容易受到不同气象因素的影响,主要包括

大气气体、云雾、雨、雪等。为满足 6G 空天地一体化全覆盖的要求, 地面通信网络还需要非地面通信网络进行辅助, 尤其是对于室外场景, 如无人机通信、卫星-地面通信、车联网通信等, 这些气象因素的分子吸收和粒子散射作用造成的衰减在太赫兹信道特性分析中不可忽视。

### 1.1.1 大气分子吸收衰减

大气分子吸收衰减是由大气分子对电磁波能量的吸收导致的。大气分子中一部分被激发的分子以一定的频率振动, 与电磁波发生共振, 部分电子进行能级跃迁, 电磁波能量转化为分子的动能<sup>[28]</sup>, 即电磁波的能量发生了损耗。在太赫兹频段主要受氧气和水蒸气的影响, 还受温度、气压、海拔高度的影响。ITU-R P.676-11 建议书<sup>[29]</sup>给出了大气吸收衰减模型, 其适用范围最高可至 1 THz。大气分子吸收衰减的吸收损耗(单位为 dB/km)可表示为

$$\gamma_a(f) = \gamma_o(f) + \gamma_w(f) \quad (1)$$

其中,  $\gamma_o$  是干燥空气条件下的氧气分子的吸收衰减,  $\gamma_w$  是大气中水蒸气分子的特征衰减, 二者的取值均与频率  $f$  相关, 单位为 dB/km。标准大气环境、氧气和水蒸气的大气分子吸收衰减如图 1 所示。由图 1 中曲线重叠的部分可知, 当频率在 100 GHz 以上时, 标准大气环境中总吸收衰减与水蒸气的分子吸收衰减数值相当, 说明在太赫兹频段水蒸气的吸收衰减占据主导地位。大气分子吸收还可以定义重要的传输窗口(如图 1 中  $w_i$  所示)。针对不同的应用选择不同的传输窗口, 例如针对气象遥感, 需要利用敏感的吸收峰从而提升遥感精度; 针对通信系统, 需要应用大气分子吸收衰减较小的传输窗口。

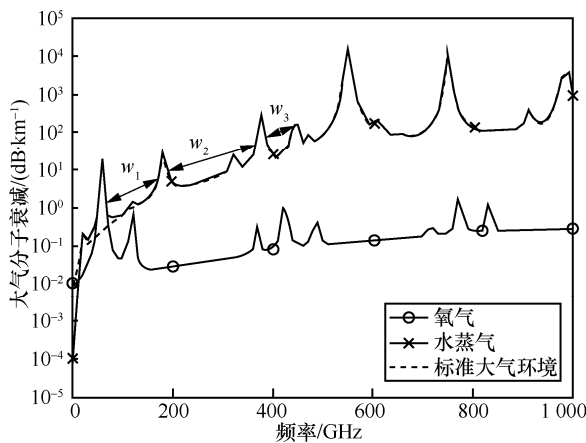


图 1 大气分子吸收衰减

### 1.1.2 粒子散射衰减

当太赫兹通信应用在室外场景时, 不仅需要考虑大气分子吸收, 同时需要考虑实际的通信环境中的雾、雨、雪等气象粒子的散射作用。当太赫兹电磁波在传输过程中遇到悬浮粒子时, 其能量会散射到传播路径之外, 从而造成电波能量的衰减。

雾也被认为是被地面阻挡的云, 与云具有相似的微物理结构, 多出现于山区和海边等水蒸气含量较大的地方。雾的参数表征通常采用其液态水密度、光学能见度以及液滴大小分布。通常, 液态水密度的典型值为: 中雾(能见度约为 300 m)的液态水密度为  $0.05 \text{ g/m}^3$ , 浓雾(能见度约为 50 m)的液态水密度为  $0.5 \text{ g/m}^3$ 。根据 ITU-R P.840-7 建议书<sup>[30]</sup>, 对于云雾这种尺寸较小的粒子, 采用 Rayleigh 近似的方法计算云雾衰减, 即

$$\gamma_{\text{fog}}(f, T) = K_l(f, T)M \quad (2)$$

其中,  $K_l(f, T)$  是液态水比衰减系数;  $M$  是液态水密度;  $f$  是工作频率, 单位为 GHz;  $T$  是液态水的温度, 单位为 K。  $K_l(f, T)$  (单位为  $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1} / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ ) 的表达式为

$$K_l(f, T) = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (4)$$

其中,  $\varepsilon'$  和  $\varepsilon''$  是水的相对介电常数实部和虚部。

太赫兹电磁波在降雨的介质中传播的衰减随降雨的增大而增大。在 ITU-R P.838-3 建议书<sup>[31]</sup>中, 对于给定降水率  $R$  (单位为 mm/h), 无论降雨量大或小, 其降雨造成的衰减都呈指数增加, 该衰减模型(单位为 dB/km)可表示为

$$\gamma_{\text{Rain}} = k(R)^\alpha \quad (5)$$

其中,  $k$  和  $\alpha$  是工作频率为 1 GHz~1 THz 的函数, 二者还受温度、极化方式、高度等参数的影响。对于所有的路径而言, 线性极化和圆极化的  $k$  和  $\alpha$  计算方式为

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2k} \quad (7)$$

其中,  $\theta$  为路径的俯仰角,  $\tau$  为相对于水平方向的极化角度。由 ITU-R P.838-3 建议书<sup>[31]</sup>中可以得到频率相关的  $k_H$ 、 $k_V$  以及  $\alpha_H$ 、 $\alpha_V$  的值。此外, ITU-R

P.837-7 建议书<sup>[32]</sup>提供了全球的降雨参数的年度统计资料,降雨量由数字地图和相应的经纬度信息给出。建议书中给出的  $R_{0.01}$  代表目标区域仅在 0.01% 的时间会超过此降雨量。ITU-R P.530-17 建议书<sup>[33]</sup>进一步给出了根据实际路径长度计算有效路径长度,从而得出由降雨造成的路径损耗为

$$Att_{\text{Rain}} = \gamma_{\text{Rain}} d_{\text{eff}} = \gamma_{\text{Rain}} dr \quad (8)$$

其中,  $d_{\text{eff}}$  是有效路径长度,该距离系数的估计值  $r$  为

$$r = \frac{1}{0.477d^{0.633} R_{0.01}^{0.073\alpha} f^{0.123} - 10.579(1 - e^{-0.024d})} \quad (9)$$

推荐  $r$  的最大值为 2.5,若式(9)的分子小于 0.4,则选择  $r = 2.5$ 。

由于对降雪造成的路径损耗研究较少,ITU-R 没有相关建议书给出预测雪衰的模型。雪花有不同的形状和表面结构,典型的结构有柱状、针状和树枝状,主要由空气、液态水和冰晶构成。由于雪花的尺寸与太赫兹波长相当,文献[34]指出在相同降水率的情况下,降雪造成的衰减是降雨的 3 倍。文献[35]进行了降雪的测量,测量场景中发射机位于屋顶下,接收机在距离发射机 8 m 远的位置接收 50~300 GHz 的电磁波,通过与相同配置下晴天的测量结果进行对比,从而得到降雪条件下的额外衰减值。尽管在太赫兹频段已有一些针对雾、雨雪天气的实验研究,但特别是在可能损害敏感测量设备的不利天气下的信道测量研究太少。射线追踪仿真器可以被视作扩展信道数据库的有效办法,将大气分子吸收以及粒子散射衰减模型植入射线跟踪仿真器中,能够替代恶劣天气下的测量数据,实现不同天气条件下对室外地面无线信道的研究。

## 1.2 粗糙表面反散射特性

在电波传播的多径构成中,除了起主导作用的 LoS 外,为确保通信的稳健性,反射链路也将发挥重要作用。理想光滑表面的镜面反射仍可用经典的菲涅尔反射系数表征。但随着电磁波频率升高,波长变短,原本在低频可被视为光滑的表面在太赫兹频段具有了粗糙特性,在其表面发生的散射会减弱镜面反射方向上的能量。材料表面光滑与否,可通过 Rayleigh 判据判断,即

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (10)$$

其中,  $\theta_i$  为入射角,  $\lambda$  为电磁波的波长。假设材料表面起伏最大高度差为  $h_0$ ,若  $h_0 < h_c$ ,则认为材料表面是光滑的;反之,则认为材料表面是粗糙的。为了评估镜面反射功率由于材料表面粗糙导致的损耗,由散射损耗因子  $\rho_s$  来修正菲涅尔模型<sup>[36]</sup>,即

$$\rho_s = e^{-\frac{g}{2}} \quad (11)$$

其中,

$$g = \left( \frac{4\pi\sigma_h \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \quad (12)$$

其中,  $\sigma_h$  是表面高度的均方值。由式(11)和式(12)可以看出,  $\rho_s$  的大小取决于电磁波波长和入射角,随表面粗糙度增大、频率增大和入射角的增大,损耗因子增大,镜面反射能量衰减增加。文献[37]通过测量 3 种不同粗糙度的材料验证了该模型的准确性。该模型适用于粗糙表面的高度分布满足高斯分布,能够适用于绝大多数常见的材料。

对于高斯分布的粗糙材料表面进行建模,是研究粗糙表面漫散射的第一步。其统计特性主要包括均方根高度  $\sigma_h$  和相关长度  $l$ ,通常采用蒙特卡罗法对其进行建模<sup>[38]</sup>。蒙特卡罗法又称为线性滤波法,其基本思想是在频率用功率谱对其进行滤波,再对结果做傅里叶变换得到粗糙面的高低起伏。由于粗糙表面被认为大量谐波叠加而成,谐波的振幅是独立的高斯随机变量,其方差正比于特定的功率谱密度,常用的各向同性二维高斯粗糙面对应的功率谱为<sup>[38]</sup>

$$S(k_x, k_y) = \sigma_h^2 \frac{l^2}{4\pi} \exp\left(-\frac{k_x^2 l^2 + k_y^2 l^2}{4}\right) \quad (13)$$

其中,  $k_x$  和  $k_y$  分别代表  $x$  轴和  $y$  轴的离散波数,计算式为

$$k_x = \frac{2\pi N_x}{l}, \quad k_y = \frac{2\pi N_y}{l} \quad (14)$$

其中,  $N_x$  和  $N_y$  分别为  $x$  轴和  $y$  轴的等间隔离散点数。图 2 和图 3 分别展示了均方根高度为 0.1 mm 和 0.5 mm,相关距离为 5 mm、10 mm 和 20 mm 的粗糙表面。由图 2 和图 3 中可以清楚地看出,均方根高度决定粗糙面起伏的高度差,相关长度决定粗糙面波动的频率。对于光滑表面而言,  $\sigma_h$  趋于 0,  $l$  趋于无穷大。

设计实验测量是对这一新频谱散射特性研究的最有效方法之一,搭建高精度的测量平台和设计

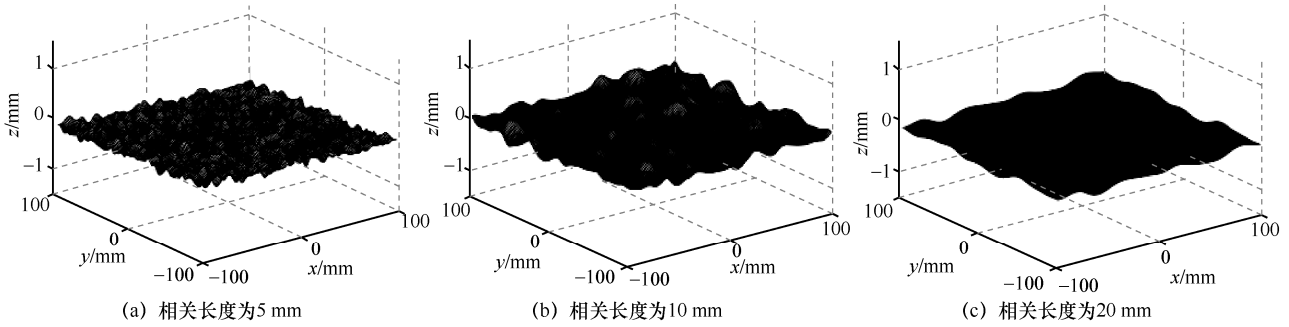


图 2 均方根高度为 0.1 mm 的粗糙表面

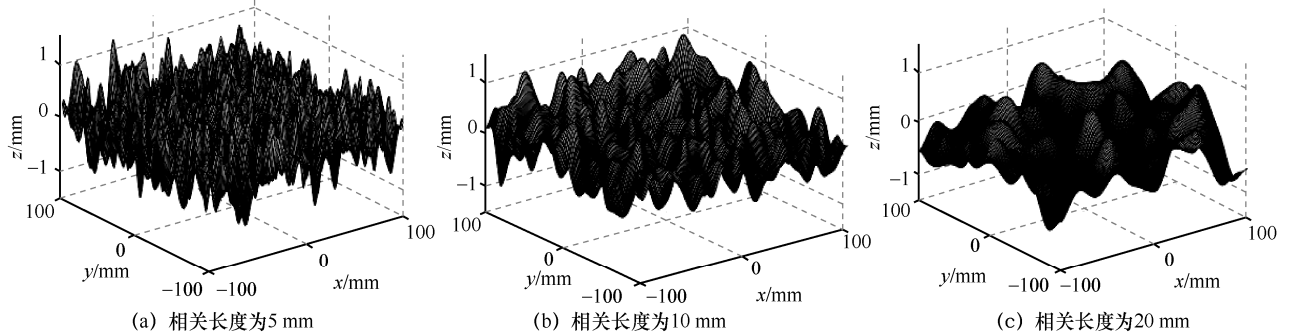


图 3 均方根高度为 0.5 mm 的粗糙表面

巧妙的测量方案，进行严格的误差分析与校正，对于散射特性的研究具有极大的挑战性。而基于电磁计算方法，利用经典电磁理论探索太赫兹频段的散射特性，是替代实验测量的有效方法。综合电磁商业软件，例如美国的 X-Patch、德国与南非合作开发的 FEKO 和德国的 CST 等软件，能够实现复杂表面精确求解。作为积分方程稀疏化的高效方法，快速多极子方法 (MLFMM, multi-level fast multipole method) 是一种多层计算方法，使数值计算方法求解能力获得大大提升。这部分研究利用 FEKO 中的 MLFMM，以理想导体 (PEC, perfect electric conductor) 为例对图 2 和图 3 的粗糙表面进行了仿真。入射波是平面波，以  $45^\circ$  斜入射粗糙表面，由于材料表面的粗糙度不同，散射的能量也不同。均方根高度为 0.1 mm 的粗糙表面散射如图 4 所示，表面的相关距离  $l$  不会影响散射波瓣的形状，能量集中在镜面反射方向。均方根高度为 0.5 mm 的粗糙表面散射如图 5 所示，随着  $l$  由 20 mm 减小到 5 mm，可以观察到散射波瓣逐渐增大，镜面反射方向 ( $-45^\circ$ ) 上的电场强度逐渐减小。对比图 4 和图 5 中曲线的最大值可以看出， $\sigma_h$  为 0.1 mm 时镜面反射方向 ( $-45^\circ$ ) 上的电场强度远大于  $\sigma_h$  为 0.5 mm 时镜面反射方向上的电场强度。但是经过验证，镜

面反射与漫反射能量的叠加与入射能量相同，满足能量守恒定律。

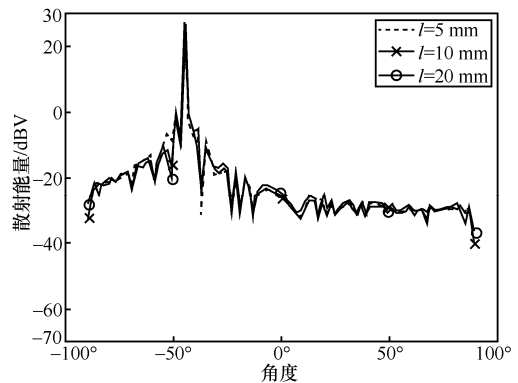


图 4 均方根高度为 0.1 mm 的粗糙表面散射

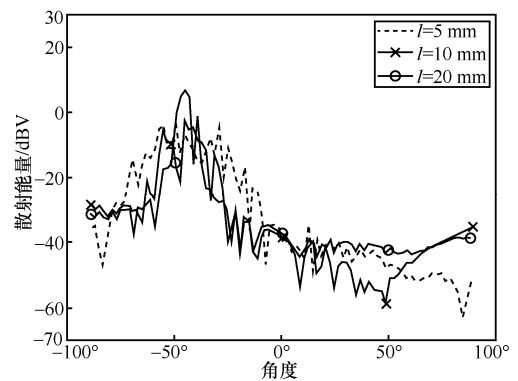


图 5 均方根高度为 0.5 mm 的粗糙表面散射

## 2 太赫兹信道特征分析框架

针对太赫兹信道建模的研究, 本文基于太赫兹电磁波独特的电波传播机理, 在毫米波频段已经多次验证的射线跟踪仿真器中植入其独特的传播特性, 建立具备完备传播机理的射线跟踪仿真平台; 结合信道测量数据, 构建基于射线跟踪仿真的太赫兹信道特性分析方法。该框架主要包括四部分: 有限的信道测量、射线跟踪仿真校准、大量射线跟踪仿真、信道关键参数提取。

### 2.1 有限的信道测量

基本的太赫兹信道测量方法分为利用矢量网络分析仪 (VNA, vector network analyzer) 和信道探测器, 二者的主要区别是测量的域不同。VNA 是在频域依次测量窄带的信道传递函数 (CTF, channel transfer function), 整个通信带宽的 CTF 是所有子窄带 CTF 的集合; 然后进行快速傅里叶逆变换 (IFFT, inverse fast Fourier transform) 得到相应的信道冲激响应 CIR。信道探测器则是直接传递一个超宽带 M 序列, 通过与接收信号进行自相关, 直接得到宽带 CIR。这 2 种测量方法各有利弊<sup>[39]</sup>。例如, 由于采用精确的校准方法, 利用 VNA 进行信道测量的系统噪声低, 每个子窄带的 CTF 精确, 因此能够获得整个带宽精确的 CTF 和 CIR。然而, 这种频域的测量方法往往测量时间长, 无法进行动态测量以捕捉, 因此多普勒效应引起的信道变化无法捕捉。时域的信道探测器可以支持动态信道测量, 理论上可以测量信道的动态变化, 但是由于太赫兹测量带宽大、系统热噪声强, 且由于现阶段的硬件设备限制, 不容易捕捉到有用的多径信息, 因此无论采用哪种方法, 太赫兹信道测量的数据量和自由度都无法与 Sub-6 GHz 信道相比。因此, 需要借助校准后的射线跟踪进行信道数据的扩展。

### 2.2 射线跟踪仿真校准

射线跟踪技术作为一种确定性的信道建模方法, 在 5G 和 6G 通信中日益突出。由于计算复杂度一直是真实场景中进行射线跟踪仿真的瓶颈, 有效的解决方案之一是将射线跟踪仿真器部署在高性能计算 (HPC, high-performance computing) 平台上, 通过并行硬件技术有效地加速计算密集型任务。本文研究以自主研发的基于 HPC 云计算的射线跟踪仿真平台—CloudRT<sup>[40]</sup>为例。

在利用射线跟踪仿真进行大范围的仿真前, 除

了需要将研究的太赫兹区别于低频的特性植入射线跟踪仿真器中, 还需要利用有限的信道测量对其进行校准。根据菲涅尔反射公式和粗糙度信息, 反射径的能量不仅取决于环境的几何信息, 还取决于相对介电常数的实部和虚部 ( $\epsilon'$  和  $\epsilon''$ )。因此, 需要利用最小误差校准的方法, 通过反射路径和射线跟踪仿真的差值对比, 从而反演出材料的相对介电常数。相对介电常数的初始值可以由开放的文献查阅获得 (如金属、橡胶<sup>[41]</sup>、玻璃<sup>[42]</sup>和砖<sup>[37,44]</sup>)。随后, 利用模拟退火算法可对相关材料进行标定。此外, 场景模型的几何特征也需要校准; 否则, 测量和仿真中多径的到达时间 (ToA, time of arrival) 不一致。校准后, 射线跟踪仿真器可以采用更加灵活的天线部署方式; 对于室外场景, 可载入不同天气模块, 探索气象因素对信道的影响。

### 2.3 大量射线跟踪仿真

太赫兹信道探测通常通过定向天线实现, 全局环境的信道测量需要进一步用定向天线的二维扫描机制实现, 往往耗时耗力, 也存在射频线缆损耗大、实际线缆长度不足的问题。因此, 需要使用经过校正的射线跟踪仿真对信道进行更全面的表征, 这样可以有效地提高场景设置及信道的自由度和通用性, 具体表现如下。

- 1) 支持更加灵活的发射机和接收机位置。
- 2) 支持更加灵活的天线极化组合 (垂直极化和水平极化的任意组合)。
- 3) 支持更加灵活的天线耦合方式 (单发单收、多发多收等)。
- 4) 支持更加灵活的环境配置 (与测量相似的环境以及相似的材料)。
- 5) 支持双移动性 (发射机和接收机可移动, 散射体也可移动)。
- 6) 支持室外不同气象条件 (大气、雾、雨、雪)。

通过以上各方面的各种配置进行广泛的射线跟踪仿真, 可以形成 6G 场景中的全维度信道全景图。

### 2.4 信道关键参数提取

基于大量的射线跟踪仿真结果, 能够对获得的信道特性进行综合表征。信道的特性主要包括路径损耗 (PL, path loss)、阴影衰落 (SF, shadow fading)、均方根时延扩展 (RMS DS, root-mean-square delay spread)、莱斯 K 因子 (KF, Rician K-factor)、角度扩展 (AS, angular spread)、交叉极化率 (XPR,

cross-polarization ratio) 等, 对于移动信道还需要提取多普勒频移和多普勒扩展。这些信道参数将采用正态分布进行参数拟合。

### 3 室内桌面短距离太赫兹信道特性

#### 3.1 信道测量

太赫兹通信为设备提供高容量的无线连接。与动态信道相比, 场景内的静态信道测量和信道特性是建模的第一步。典型的室内短距离通信可发生在办公桌上, 实现设备间的高速率信息交互。信道测量设备主要包括两部分<sup>[18]</sup>, 即四端口 VNA 和一对扩频模块, 通过倍频的方式, 实现 295~330 GHz 的电波传播, 测量设置 5 001 个频点, 相应的采样间隔  $\Delta f$  为 7 MHz。在这样的配置下, 相应的时延分辨率为 0.029 ns, 这个值足够小, 可以分辨信道中的多径。此外, 对应的最大时延为 143 ns, 这个值足够大, 可以捕获该测量信道的多径分量。测量收发端采用的天线半功率波束宽度 (HPBW, half-power beamwidth) 约为 10°, 天线增益约为 25 dBi。VNA 配有精准的校准配件和校准方法, 本节测量采用全双端口校准方法: 短路-开路-负载-直通 (SOLT, short-open-reflect-thru) 校准方法, 该方法使用广泛、易于掌握, 适用于大多数应用, 可以提供优异的精度和可重复性。校准用于整个测量系统, 包括波导、扩频模块、电缆, 也包括 VNA 本身。

#### 3.2 射线跟踪仿真器校正

按照操作步骤, 需要通过测量结果, 对射线跟踪仿真器进行校正, 并根据明显的反射多径反演出材料的相关电磁参数。在 SketchUp 软件中对测量环境进行了重建; 仿真配置与测量配置保持一致, 同样设置 295~330 GHz 及 5 001 个频点; 仿真中配置的电波传播机制为 LoS 径及最高 6 阶的反射径。将光滑金属光学表面设定为 PEC, 同时将扩频模块的涂漆金属面视为手持移动设备或是笔记本电脑的硬件设计, 需要对其电磁参数进行校准。校准后的涂漆金属面的相对电磁参数为  $\epsilon' = 1.4$  和  $\epsilon'' = 10.71$ ; 虚部值明显小于金属, 可知金属材料涂漆后会直接影响其电磁参数。射线跟踪仿真结果与测量结果对比如图 6 所示。从图 6 可以看出, 射线跟踪仿真结果和测量结果在多径的时延和功率方面都有很好的一致性: 多径的时延平均误差小于 0.1 ns; 功率平均误差小于 0.1 dB。此外, 由射线跟踪仿真

结果可知, 主要的多径是来自扩频模块表面的反射; 由于测量本身天线的 HPBW 仅有 10°, 来自桌面的反射径不能在测量中捕捉到。综上, 校正后的射线跟踪仿真器能够正确复现信道测量, 仿真与测量结果吻合。

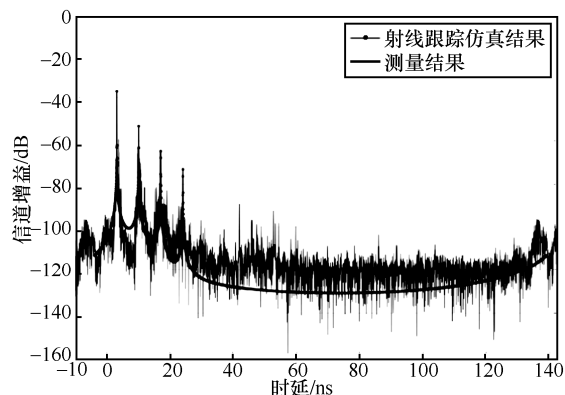


图6 射线跟踪仿真结果与测量结果对比

#### 3.3 广泛的射线跟踪仿真

在实际通信中, 用户会将移动设备摆放在桌面上的不同位置。在 sub-6 GHz 频段, 可以通过大量实测数据获得全面的信道数据, 然而太赫兹的测量非常受限于硬件设备, 可能的替代方法就是借助射线跟踪仿真进行大量仿真, 且收发端放置的位置应具有普适性, 生成丰富的信道冲激响应。在仿真中将采用与测量相同的系统设置, 将发射机设置在桌面的左侧; 为了找出信道每个位置之间的相关性, 将接收机的采样间隔设置为 0.8 mm (小于仿真频段的波长), 通信范围设为 0.2~1.5 m, 摆放位置示意如图 7 所示。此外, 测量中为弥补太赫兹频段的高路径损耗, 天线采用窄波束的高增益天线, 导致不能完全捕捉到环境中的全部多径信息。因此, 利用已校正过的射线跟踪仿真器, 在仿真中采用全向天线可以捕捉环境中的全部多径, 获得全维度的信道信息。

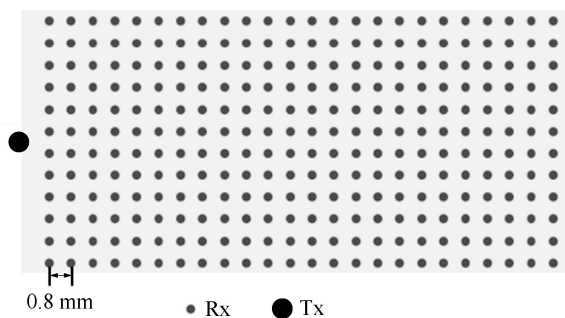


图7 射线跟踪仿真 Tx 与 Rx 位置示意

### 3.4 信道特性分析

基于大量的射线跟踪仿真结果，能够对获得的信道特性进行综合表征。信道的特性主要包括路径损耗、均方根时延扩展、莱斯 K 因子、角度扩展、交叉极化率等。这些信道参数将采用正态分布函数进行拟合。由于该场景定义为室内短距离通信，因此并没有考虑分子吸收衰减以及雾、雨、雪造成的损耗。信道特性将在本节进行讨论。

#### 3.4.1 路径损耗和阴影衰落

在本研究路径损耗中采用 A-B 模型，即

$$PL = A \lg(d) + B + X_{\sigma} \quad (15)$$

其中， $d$  为 Tx 与 Rx 之间的距离； $A$  为拟合曲线斜率， $B$  为截距； $X_{\sigma}$  是阴影衰落，可以表示为均值为 0、标准差为  $\sigma_{SF}$  的高斯分布。射线跟踪仿真结果、拟合结果以及与自由空间损耗对比如图 8 所示。拟合结果的  $A$  值为 18.02， $B$  值为 81.71， $\sigma_{SF}$  值为 5.15 dB；拟合曲线与自由空间损耗曲线几乎重合，但从仿真结果可看出，仿真结果波动较大，这是因为在仿真中用全向天线能够追踪到整个场景中的多径，除设备自身的反射径外，还能捕捉来自桌面本身强烈的反射径，因此在传播过程中有更多的多径叠加。

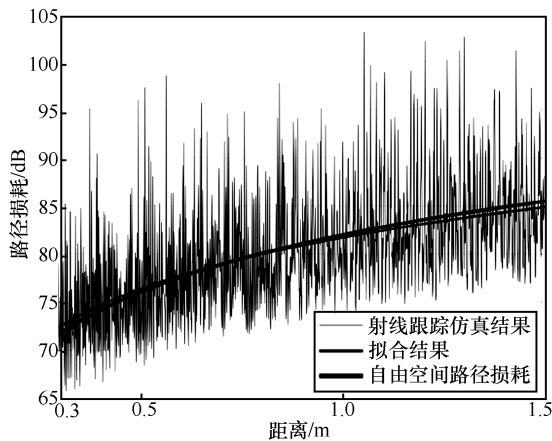


图 8 射线跟踪仿真结果、拟合结果以及与自由空间损耗对比

#### 3.4.2 莱斯 K 因子与均方根时延扩展

莱斯 K 因子从功率角度量化最强径与其他多径功率之和的比值，传统方法是采用矩量方法<sup>[44]</sup>从窄带信道探测结果计算；太赫兹的超宽带信道测量和射线跟踪仿真系统在时域上都有较高时延分辨率，每个快照的莱斯 K 因子可直接由定义得出<sup>[45]</sup>

$$KF = \frac{P_d}{\sum P(i) - P_d} \quad (16)$$

其中， $P(i)$  是传播过程所有多径的能量， $P_d$  是直射径的能量。图 9 是射线跟踪仿真与正态分布拟合结果的对比，其均值为 1.23 dB，均方根为 3.76 dB；近 70% 的莱斯 K 因子大于 0，这说明虽然场景中有来自桌面的强反射径和设备本身的反射径，但直射径在该场景仍占主要地位。这也是太赫兹通信的一个主要特征：相较于低频通信场景，在太赫兹频段，多径的路径损耗要更高于直射径，因此也造成了多径稀疏效应。

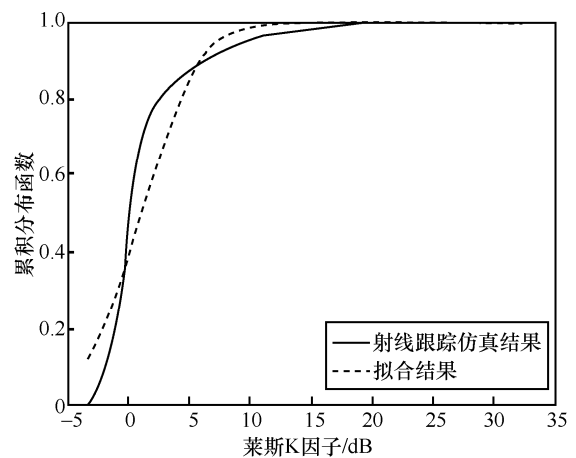


图 9 射线跟踪仿真与正态分布拟合结果的对比

均方根时延扩展是有效量化多径信道功率和时间双重色散效应的关键参数，定义为时延功率谱的第二个中心距的平方根，即<sup>[36]</sup>

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \tau_n^2 P_n}{\sum_{n=1}^N P_n} - \left( \frac{\sum_{n=1}^N \tau_n P_n}{\sum_{n=1}^N P_n} \right)^2} \quad (17)$$

其中， $P_n$  和  $\tau_n$  分别表示第  $n$  条多径的功率和时延。利用正态分布能够有效地对整个场景的均方根时延扩展进行数据统计，如图 10 所示。由图 10 可知，其均值为 0.74 ns，均方根为 0.24 ns，这说明在短距离通信中，即使光滑平面上存在强烈的反射径，但由于反射面造成的相对于 LoS 的多径相对时延小，均方根时延扩展值也较小。相对于同频段的其他更加宽阔的场景而言，例如在智能高铁场景中宽阔的火车站内得到的均方根时延扩展值较大，其均值为 6.61 ns<sup>[17]</sup>。

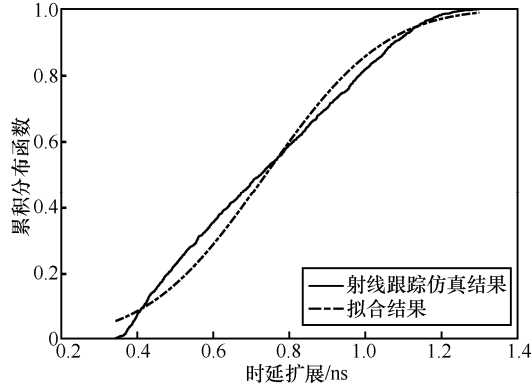


图 10 时延扩展数据统计

### 3.4.3 角度扩展

角度扩展定义 Tx 和 Rx 在三维环境中每条多径的到达角和离开角的分布。每条多径在发射端的离开角和接收端的到达角将在水平面有水平方位角，在垂直面有仰角，因此角度扩展包含 4 个参数：离开水平角度扩展 (ASD, azimuth angular spread of departure)、离开俯仰角度扩展 (ESD, elevation angular spread of departure)、到达水平角度扩展 (ASA, azimuth angular spread of arrival) 和到达俯仰角度扩展 (ESA, elevation angular spread of arrival)，计算式分别为<sup>[46]</sup>

$$\sigma_{AS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\theta_{n,\mu})^2 P_n}{\sum_{n=1}^N P_n}} \quad (18)$$

其中， $\sigma_{AS}$  代表角度扩展， $P_n$  代表第  $n$  条多径的功率和时延； $\theta_{n,\mu}$  定义为

$$\theta_{n,\mu} = \text{mod}(\theta_n - \mu_\theta + \pi, 2\pi) - \pi \quad (19)$$

其中， $\theta_n$  为第  $n$  条射线的相应的俯仰或水平离开或到达角。 $\mu_\theta$  的计算式为

$$\mu_\theta = \frac{\sum_{n=1}^N \theta_n P_n}{\sum_{n=1}^N P_n} \quad (20)$$

图 11 和图 12 分别展示了发射端离开角度扩展和接收端到达角度扩展。水平角度扩展主要是由于接收机摆放的位置遍历整个桌面，并非只沿着中线遍历仿真；当设备相较于发射机位置发生偏移时，来自设备自身的反射径在水平方向上就会发生角度色散。俯仰角度扩展主要是来自桌面的强反射径。如果该场景更具一般性，将办工作布置为木质

桌面而非仿真设置的金属桌面，那么通常不会有如此强烈的反射径。由于在该场景内的材料都为光滑材料，在传播过程中散射不明显，而镜面散射满足入射角和反射角相等，因此发射端的离开角度扩展和接收端的到达角度扩展一致。

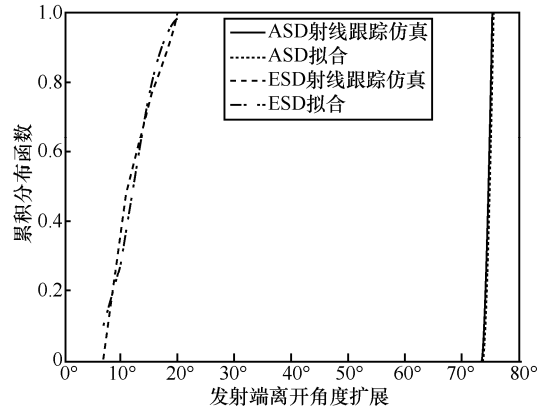


图 11 发射端离开角度扩展

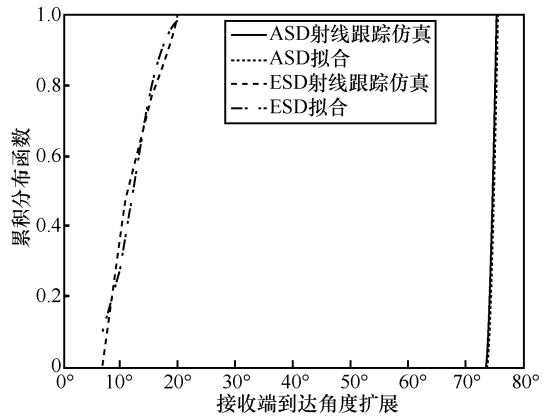


图 12 接收端到达角度扩展

### 3.4.4 交叉极化率

交叉极化率是在给定极化最大辐射方向上的功率与其接收的正交极化波在次方向上的功率比，用于衡量其交叉极化分量的大小，可表示为<sup>[47]</sup>

$$\text{XPR} = 10 \lg \frac{P_{\text{co}}}{P_{\text{cross}}} \quad (21)$$

即接收到的垂直（水平）共极化 ( $P_{\text{co}}$ ) 相对于发送垂直（水平）极化接收水平（垂直）极化的传输 ( $P_{\text{cross}}$ ) 的功率之比。如图 13 所示， $\text{XPR} > 0$ ；这说明去极化效应几乎没有，也说明了该场景主要以直射经为主导。一般来讲，在该场景收发端采用线性极化天线就足够，因此双极化天线在此场景中能够胜任。如果真实场景有更多粗糙材料，去极化效应将加强，则应考虑圆极化天线。

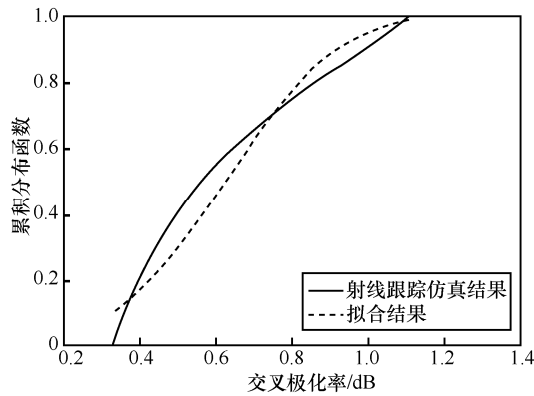


图 13 交叉极化率

### 3.4.5 信道参数总结

综上所述，对室内短距离桌面的信道参数进行分析，每个参数均采用了正态分布函数进行数据统计和参数拟合，如表 1 所示，其中  $\mu$  表示均值， $\sigma$  表示标准差。本文所研究的信道特性可用于支持太赫兹室内短距离通信的链路级和系统级的仿真。

表 1 室内短距离太赫兹信道特性参数

参数	$\mu$	$\sigma$
KF/dB	1.26	3.75
DS/ns	0.74	0.02
ASD	74.66°	0.47°
ESD	12.12°	3.91°
ASA	74.66°	0.47°
ESA	12.12°	3.91°
XPR/dB	8.41	4.34

## 4 高速移动车联网信道特性

随着智能车联网的高数据速率通信业务的需求，汽车本身的硬件技术和无线通信技术将在未来紧密联合在一起，智能交通系统（ITS, intelligent transportation system）在现代交通领域将发挥重要作用。当车辆处于高速移动自动驾驶模式时，必须实时、快速地切换动态信息，其通信链路包括车-车（V2V, vehicle-to-vehicle）、车-地（V2I, vehicle-to-infrastructure）等车路协同通信。高速移动会使空间采样点之间的时间间隔变短，也就是在相同时间信道经历的多径结构会发生剧烈变化，信道将呈现剧烈的快速时变和非平稳特性，传统信道采用的广义平稳非相关散射（WSSUS, wide-sense stationary-uncorrelated scattering）假设不再成立。而

射线跟踪技术对于每一个空间采样点的多径信道都可以确定性地预测，不再使用广义平稳非相关的假设，可以准确表征任意高速移动下的信道特性，例如用低速移动的测量，甚至是静态的测量验证的射线跟踪仿真器，也可以生成高速移动下的信道冲激响应。从结果中进一步提取移动信道特性，例如多普勒扩展等。此外，目前阶段昂贵的太赫兹测量设备并不适用于不利天气条件下进行相关测量。借助于射线跟踪仿真的气象因素模块，可以替代不同天气下的太赫兹室外信道测量结果。

### 4.1 前期测量及射线跟踪校正工作

本文前期工作<sup>[26,48]</sup>详细论述了对于车联网场景进行的信道测量实验。该实验是利用能够支持 300 ~ 308 GHz 测量的超宽带（UWB, ultra-wideband）信道探测器，对开阔的铁路测试中心进行了两次相关的太赫兹信道测量，场景内主要包括车体、灯柱、路面等主要结构体，有金属、玻璃和砖等主要材料。如第 2 节的步骤所述，利用测量数据校正射线跟踪仿真器中结构体的材料电磁参数以及几何信息。第一次测量中探测到的多径和 RT 追踪到的多径平均误差 0.74 dB，时延平均误差为 0.19 ns，也就是距离上仅相差 6 cm。在第二次测量中，测量多径与射线跟踪仿真得到的多径功率平均误差仅为 0.4 dB。除此之外，场景中相关材料的电磁参数也能够通过反演得到，如表 2 所示<sup>[48]</sup>，用于下一步骤中利用射线跟踪技术进行大范围仿真。其中， $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  分别代表相关材料相对介电常数的实部和虚部， $S$  和  $\alpha$  分别代表材料的散射因子和粗糙等效因子<sup>[49]</sup>。此外，从测量和仿真追踪到的多径来波方向可知，金属车体是主要反射体，也证明了车体在后续太赫兹信道中是具有较大影响的结构体。

表 2 RT 仿真中不同材料的电磁参数

材料名称	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$S$	$\alpha$
金属	1.000	$1.0 \times 10^7$	0	0
砖块	3.026	0.159	0.001 5	40
玻璃	6.760	0.442	0.003 0	9

### 4.2 车-地通信场景射线跟踪仿真

校正过的射线跟踪仿真器能够进一步支持更加灵活的环境配置，例如与测量相似的环境以及相似的材料。本节将考虑城市场景中的车联网信道仿真；此外，结合 1.1 节的内容，分析不同气象条件下对信道特性的影响。仿真所考虑的三维场景是基于

OpenStreetMap 构建的, 选取四车道的城市场景作为目标; 发射机设置在 5 m 高的红绿灯旁, 接收机搭载在一辆高为 3 m 的公交车上, 仿真场景及收发机位置示意如图 14 所示。仿真频率为 300~308 GHz, 频点为 3 201 个, 与测量设置系统参数保持一致。为了使仿真结果不受天线方向图的影响, 获得纯粹的电波传播信道, 在仿真中设置发射端和接收端都是发射功率和天线增益均为 0 的全向垂直极化天线。

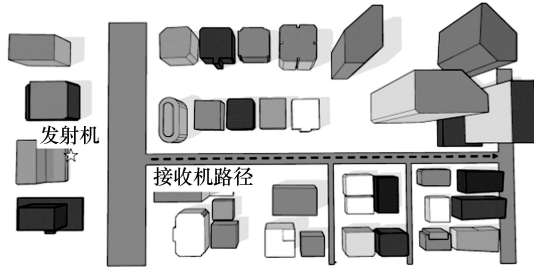


图 14 仿真场景及收发机位置示意

本文 1.1 节中强调了在太赫兹频段, 大气分子和雾、雨、雪粒子造成太赫兹电波衰减, 因此本文采用以下步骤将这些因素造成的衰减加入仿真结果中。

不考虑气象因素影响, 任意一个快照的 CIR 可以表示为

$$h(\tau) = \sum_{n=1}^N E_n e^{j\varphi} \delta(\tau - \tau_n) \quad (22)$$

其中,  $n$  为射线(多径)的索引,  $N$  为快照中多径的总数,  $E_n$ 、 $\varphi_n$  和  $\tau_n$  分别为射线电场的幅度、相位和时延。相应地, 不受气象因素影响的第  $n$  条多径的功率为

$$P_n = 20 \lg |E_n e^{j\varphi_n}| \quad (23)$$

然后, 在第  $n$  条射线加上由 1.1 节内容相对应的气象衰减  $A_n$ 。那么, 包含气象因素在内的 CIR 表示为

$$h_A(\tau) = \sum_{n=1}^N 10^{\frac{P_n - A_n}{20}} e^{j\varphi} \delta(\tau - \tau_n) \quad (24)$$

据此, CIR 就可以进一步对含有不同气象因素的信道特性进行分析。在 300 GHz 频段, 大气气体、雾、雨和雪造成的衰减分别为 5.2 dB/km、7.26 dB/km、21.42 dB/km (对应的降水量  $R_{0.01} = 83.50$  mm/h) 和 350 dB/km。

### 4.3 信道特性分析

#### 4.3.1 关键信道参数

基于大量的 RT 仿真结果和类似于第 3 节的信

道关键参数提取方法, 加上不同气象因素引起的衰减, 对于车联网中车-地通信信道关键参数的提取数据在表 3 中列出, 主要包括路径损耗、阴影衰落、莱斯 K 因子、时延扩展和 4 个角度扩展。其中, 路径损耗相关的参数 ( $A$ 、 $B$  和  $\sigma_{SF}$ ) 参考式(15); 其余信道参数均以均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  拟合正态分布给出, 例如  $\mu_{KF}$  和  $\sigma_{KF}$  分别代表整个仿真场景萃取出的莱斯 K 因子的均值和方差。以往的研究通常只考虑了不同气象环境下的接收功率, 而本文研究强调了不同气象因子对每个信道参数的影响。这里提供的仿真数据是针对“不同气象条件如何影响地面太赫兹信道性能”这一问题展开的。区别于相对静态的信道特性, 快速移动通信的关键参数多普勒频移和扩展在后文中详细给出。

#### 4.3.2 多普勒频移与多普勒扩展

对于车-地通信的车载通信场景, 具有移动接收机, 根据多维度、全面、大量的仿真结果可以分析其多普勒效应产生的特性。由于射线跟踪仿真器提供每个快照的每条射线的全维度信息, 因此可以根据定义直接计算每条射线的多普勒频移

$$f_d(n) = -f_c \frac{\overline{v_{Rx} k(n)}}{c} \quad (25)$$

其中,  $f_c$  是中心频率;  $\overline{v_{Rx}}$  是 Rx 的速度;  $\overline{k(n)}$  是第  $n$  条射线由 Tx 出发, 由散射点或反射点指向 Rx 方向的单位矢量;  $c$  是光速。

表 3 包含天气影响因素的关键信道参数

参数	RT	大气	雾	雨	雪
$A$	20.44	25.82	27.11	42.01	215.40
$B$	80.36	68.94	68.13	42.75	-288.92
$\sigma_{SF}$	4.24	5.06	10.42	4.70	4.14
$\mu_{KF}/dB$	5.25	5.33	5.44	5.96	6.84
$\sigma_{KF}/dB$	6.33	6.02	5.59	5.72	6.13
$\mu_{DS}/ns$	9.67	9.57	9.44	9.08	5.95
$\sigma_{DS}/ns$	13.77	13.44	13.03	11.90	5.53
$\mu_{ASA}$	56.78°	56.39°	55.89°	54.41°	36.42°
$\sigma_{ASA}$	64.81°	64.43°	63.95°	62.66°	44.06°
$\mu_{ASD}$	40.11°	40.09°	40.07°	39.99°	38.99°
$\sigma_{ASD}$	5.16°	5.15°	5.14°	5.12°	5.03°
$\mu_{ESA}$	0.57°	0.56°	0.56°	0.56°	0.56°
$\sigma_{ESA}$	0.85°	0.85°	0.85°	0.85°	0.85°
$\mu_{ESD}$	0.37°	0.37°	0.37°	0.37°	0.36°
$\sigma_{ESD}$	0.56°	0.56°	0.56°	0.55°	0.55°

类似于 RMS 时延扩展与相干信道的直接关系, RMS 多普勒扩展与信道的相干时间相关, 表示信道在时间上的变化率, 利用多普勒频移功率谱第二个中心距的平方根进行表征, 即

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N f_d(n)^2 P(n)}{\sum_{n=1}^N P(n)} - \left( \frac{\sum_{n=1}^N f_d(n) P(n)}{\sum_{n=1}^N P(n)} \right)^2} \quad (26)$$

其中,  $P(n)$  表示第  $n$  条多径的功率。表 4 列出了整个场景的最大、平均和最小多普勒频移, 多普勒频移用  $\mu_v$  表示, 由于多普勒频移与功率衰减无关, 因此不受气象因素影响。同时, 表 4 列出了不同气象条件下整个场景的最大、平均和最小 RMS 多普勒扩展, 多普勒扩展用  $\sigma_v$  表示。如果 300 GHz 车联网系统采用正交频分复用技术, 子载波间距应该大于多普勒扩展的最大值 7.07 kHz。值得注意的是, 多普勒频移均值为 16.52 kHz, 已经超过了当前 5G 设备的多普勒频移校准的能力, 因此在进行车联网太赫兹通信系统设计时需要仔细考虑此参数。

表 4 多普勒频移与多普勒扩展

参数	$\mu_v/\text{kHz}$	$\sigma_v/\text{kHz}$				
		RT	大气	雾	雨	雪
最大值	16.88	7.07	7.01	7.00	6.82	4.04
均值	16.52	0.45	0.45	0.44	0.41	0.18
最小值	10.05	$2.11 \times 10^{-5}$	$2.11 \times 10^{-5}$	$2.11 \times 10^{-5}$	$2.10 \times 10^{-5}$	$2.03 \times 10^{-5}$

## 5 结束语

本文提出了一种基于射线跟踪技术的信道特征分析的方法, 即使在缺乏广泛的信道测深测量的情况下, 也能实现接近 6G 的真实太赫兹信道数据, 由此进行信道特性分析。射线跟踪技术是将各种准确的传播机理等效为射线, 主要传播机理包括直射、反射、散射、绕射和透射, 在仿真中对这些射线进行跟踪和预测。因此, 本文首先针对太赫兹这一新频谱的电波传播新特性进行了详细介绍, 准确的电波传播模型是射线跟踪仿真的基础: 由于太赫兹电波能量会受到大气分子吸收, 以及雾、雨和雪的粒子散射效应造成的功率衰减的影响, 本文在射线跟踪技术中加入了气象预测模块; 由于太赫兹波长短, 原本在低频被认为光滑的平面在太赫兹频段不再光滑, 因此对太赫兹电波传播的反散射特性进

行了分析。接着, 本文提出了利用少量信道测量数据校正射线跟踪仿真器的方法; 同时, 利用射线跟踪仿真器反演出相关材料参数, 再进行大量的射线跟踪仿真获得真实、有效的信道数据; 对这些信道数据进行关键信道参数萃取, 并对目标场景信道特性进行分析。本文提出的 2 个案例研究是从室内桌面通信场景到室外智能车联网场景, 分别代表了 6G 移动通信从短距离到远距离用例的两端, 对于室外场景还额外考虑了不同气象条件下对信道参数的影响, 包括路径损耗、阴影衰落、均方根时延扩展、莱斯 K 因子、角度扩展、交叉极化率等, 对于移动信道还需要提取多普勒频移和多普勒扩展。这些信道关键参数对太赫兹系统的设计和评估具有重大意义。

基于射线跟踪的确定性信道建模方法, 可以获得全面且精细的信道空、时、频、极化信息, 该模型具有天然的“空间一致性”, 对场景建模要求高有一定的计算复杂度, 但可以准确地表征信道的复杂多径。本文团队具有完全自主知识产权的射线跟踪仿真器并搭载在高性能计算平台上, 公网接入能够实现远程操作, 在保证建模精度的前提下使计算时间大大缩短, 同时打破欧美商业软件对该技术长期的垄断地位。未来的工作将继续以电波传播理论、信道测量和高性能射线跟踪为主要手段, 发掘以机理模型为基础的太赫兹频段高精度信道建模方法, 服务于太赫兹通信系统的设计、评估和部署。

## 参考文献:

- [1] GHOSH A, RATASUK R, MONDAL B, et al. LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology [J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 10-22.
- [2] CROW B P, WIDJAJA I, KIM J G, et al. IEEE 802.11 wireless local area networks[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(9): 116-126.
- [3] BAYKAS T, SUM C S, LAN Z, et al. IEEE 802.15.3c: the first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 114-121.
- [4] 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.
- [5] ELAYAN H, AMIN O, SHIHADA B, et al. Terahertz band: the last piece of RF spectrum puzzle for communication systems[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 1-32.
- [6] GUAN K, AI B, PENG B L, et al. Towards realistic high-speed train

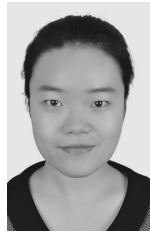
- channels at 5G millimeter-wave band—part I: paradigm, significance analysis, and scenario reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(10): 9112-9128.
- [7] FRICKE A, REY S, PENG B, et al. TG3d channel modelling document (CMD)[S]. IEEE, 2016.
- [8] NARANDZIC M, SCHNEIDER C, THOMA R, et al. Comparison of SCM, SCME, and WINNER channel models[C]//*Proceedings of 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 413-417.
- [9] MEINIL J, KYSTI P, JMS T, et al. WINNER II channel models[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [10] BIAN J, SUN J, WANG C X, et al. A WINNER+ based 3-D non-stationary wideband MIMO channel model[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1755-1767.
- [11] CHENG X, YAO Q, WEN M W, et al. Wideband channel modeling and intercarrier interference cancellation for vehicle-to-vehicle communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(9): 434-448.
- [12] HUR S, CHO Y J, KIM T, et al. Wideband spatial channel model in an urban cellular environment at 28 GHz[C]//*2015 9th European Conference on Antennas and Propagation*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [13] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [14] YI C, CHONG H. Channel modeling and characterization for wireless networks-on-chip communications in the millimeter wave and terahertz bands[J]. *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, 2019, 5(1): 30-43.
- [15] WU Y Z, 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*, 2021, 20(3): 1472-1486.
- [16] YI C, CHONG H. Time-varying channel modeling for low-terahertz urban vehicle-to-infrastructure communications[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [17] 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.
- [18] YI H F, GUAN K, HE D P, et al. Terahertz channel measurement and characterization on a desktop from 75 to 400 GHz[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 756-761.
- [19] FU J B, JUYAL P, ZAJIC 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.
- [20] CHENG C L, SANGODOYIN S, ZAJIC A. THz cluster-based modeling and propagation characterization in a data center environment[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 56544-56558.
- [21] CHENG C L, ZAJIC 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.
- [22] HUR S, BAEK S, KIM B, et al. Proposal on millimeter-wave channel modeling for 5G cellular system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 10(3): 454-469.
- [23] CHONG H, YI C. Propagation modeling for wireless communications in the terahertz band[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(6): 96-101.
- [24] 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.
- [25] YU Z M, CHEN Y, WANG G J, et al. Wideband channel measurements and temporal-spatial analysis for terahertz indoor communications[C]//*Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] RECOMMENDATION ITU-R P. 676-11. Attenuation by atmospheric gases[R]. International Telecommunications Union, 2016.
- [30] RECOMMENDATION ITU-R P. 840-7. Attenuation due to clouds and fog[R]. International Telecommunications Union, 2017.
- [31] RECOMMENDATION ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods [R]. International Telecommunications Union, 2005.
- [32] RECOMMENDATION ITU-R P.837-7. Characteristics of precipitation for propagation modelling[R]. International Telecommunications Union, 2017.
- [33] RECOMMENDATION ITU-R P.530-17. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems[R]. International Telecommunications Union, 2017.
- [34] NOROUZIARI F, MARCHETTI E, HOARE E, et al. Low-THz wave snow attenuation[C]//*Proceedings of 2018 International Conference on Radar*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [35] MA J J, ADELBERG J, SHRESTHA R, et al. The effect of snow on a terahertz wireless data link[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2018, 39(6): 505-508.
- [36] RAPPAPORT T S. *Wireless communications-principles and practice*[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.
- [37] PIESIEWICZ R, JANSEN C, MITTLEMAN D, et al. Scattering analysis for the modeling of THz communication systems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 3002-3009.
- [38] 郭立新, 王蕊, 吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M].

北京: 科学出版社, 2010.

GUO L, WANG R, WU Z. Basic theory and method of random rough surface scattering [M]. Beijing: Science Press, 2010.

- [39] PENG B L, GUAN K, KUTER A, et al. Channel modeling and system concepts for future terahertz communications: getting ready for advances beyond 5G[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(2): 136-143.
- [40] 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.
- [41] ITU-R P. 1238-10-2019. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz[R]. International Telecommunications Union, 2019.
- [42] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Terahertz characterisation of building materials[J]. Electronics Letters, 2005, 41(18): 1002.
- [43] PIESIEWICZ R, JANSEN C, WIETZKE S, et al. Properties of building and plastic materials in the THz range[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 28(5): 363-371.
- [44] ZHOU T, TAO C, SALOUS S, et al. Channel characterization in high-speed railway station environments at 1.89 GHz[J]. Radio Science, 2015, 50(11): 1176-1186.
- [45] BERNADO L, ZEMEN T, TUFVESSON F, et al. Time- and frequency-varying  $K$ -factor of non-stationary vehicular channels for safety-relevant scenarios[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 1007-1017.
- [46] 3GPP. Spatial channel model for multiple-input multiple-output (MIMO) simulations[S]. 3GPP, TR25.996 (V6.1.0), 2003.
- [47] 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.
- [48] YI H F, GUAN K, HE D P, 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.
- [49] DEGLI-ESPOSTI V, FUSCHINI F, VITUCCI E M, et al. Measurement and modelling of scattering from buildings[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(1): 143-153.

### [作者简介]



弋浩凡 (1993- ), 女, 陕西咸阳人, 北京交通大学博士生, 主要研究方向为太赫兹电波传播机制与太赫兹信道建模。



官科 (1983- ), 男, 云南昆明人, 博士, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电波传播与无线信道测量、仿真与建模, 毫米波与太赫兹通信技术, 高性能射线跟踪仿真技术与平台。



何丹萍 (1985- ), 女, 广西鹿寨人, 博士, 北京交通大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为射线跟踪技术、毫米波与太赫兹信道研究、通感一体化等。

艾渤 (1974- ), 男, 陕西西安人, 博士, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信与轨道交通专用移动通信。

赖峥嵘 (1971- ), 男, 四川南充人, 广东省新一代通信与网络创新研究院研发总工、无线 6G 中心研究主任, 主要研究方向为 6G 热点候选技术、太赫兹通信、6G 愿景和网络。

钟章队 (1962- ), 男, 湖南衡阳人, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信系统与专用移动通信。