

# 面向6G通信感知一体化的亚太赫兹路径损耗测量与建模研究

王洋<sup>1</sup>, 赵海森<sup>1</sup>, 廖希<sup>1</sup>, 郑相全<sup>2</sup>, 黎川<sup>1</sup>, 陈前斌<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100141)

**摘要:** 针对传统通信信道路径损耗模型无法准确描述和表征感知信道的问题, 开展面向6G通信感知一体化的亚太赫兹路径损耗测量与建模研究。基于雷达散射截面理论, 引入室内材料回波特性的感知信道路径损耗, 构建角度-距离联合的感知信道路径损耗模型。结合基于矢量网络分析仪的亚太赫兹感知信道实测数据, 研究129.5~135 GHz频段内不同角度和距离下的感知信道衰落特性。实验结果表明, 所构建的路径损耗模型能够准确刻画感知信道路径损耗随距离和角度遮挡因子的变化规律。

**关键词:** 通信感知一体化; 路径损耗; 亚太赫兹信道; 信道测量

中图分类号: TN011

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024176

## Research on sub-terahertz path loss measurement and modeling for 6G integrated sensing and communication

WANG Yang<sup>1</sup>, ZHAO Haisen<sup>1</sup>, LIAO Xi<sup>1</sup>, ZHENG Xiangquan<sup>2</sup>, LI Chuan<sup>1</sup>, CHEN Qianbin<sup>1</sup>

1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Science of PLA, Beijing 100141, China

**Abstract:** To address the inadequacy of traditional path loss models in accurately describing and characterizing sensing channels, the research on sub-terahertz path loss measurement and modeling for 6G integrated sensing and communication was conducted. A sensing channel path loss model incorporating the echo characteristics of indoor materials was introduced based on radar cross-section theory and an angle-distance joint path loss model for sensing channels was constructed. Using a sub-terahertz channel measurement platform based on a vector network analyzer, the fading characteristics of sensing channels at different angles and distances were examined. The measurement results indicate that the angle-distance joint path loss model can accurately capture the variation patterns of sensing channel path loss with respect to distance and angular blockage factors.

**Keywords:** integrated sensing and communication, path loss, sub-terahertz channel, channel measurement

### 0 引言

随着物联网的普及, 6G移动蜂窝网络将具备支持不断变化的新业务及未知业务的能力, 这意味

着通信、计算和缓存的深度融合已成为6G发展的关键需求之一<sup>[1]</sup>。太赫兹频段(0.1~10 THz)被全球通信界视为6G通信系统的候选频段之一, 其中

收稿日期: 2024-06-05; 修回日期: 2024-09-09

通信作者: 郑相全, zxqcy99@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62271095, No.62171071); 重庆市自然科学基金资助项目(No.cstc2021jcyj-msxmX0634, No.CSTB2022NSCQ-MSX1125); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(No.KJZD-K202300607); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金资助项目(No.CSTB2022NSCQ-LZX0037)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62271095, No.62171071), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.cstc2021jcyj-msxmX0634, No.CSTB2022NSCQ-MSX1125), The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No.KJZD-K202300607), The Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund Project of Chongqing (No.CSTB2022NSCQ-LZX0037)

100~300 GHz 的亚太赫兹频段拥有数十至数百千兆赫兹的连续大带宽,有望解决当前频谱资源稀缺及系统容量受限问题<sup>[2-3]</sup>。随着电磁波频率的探索深入毫米波和太赫兹频段,通信系统与传统感知系统在频段上产生越来越多的重叠。因此,在同一频谱上同时实现通信与感知功能,避免相互干扰并提升频谱利用率,成为技术与产业发展的优选路径<sup>[4]</sup>。通信感知一体化 (ISAC, integrated sensing and communication) 技术通过时-空-频三域资源复用和硬件设备共享,实现通信系统与感知系统的深度融合与统一。相较于传统通信系统,ISAC 系统增加了感知能力,能够通过接收目标物体反射的无线电波获取目标对象或环境信息,为系统设计提供了一个全新的维度。此外,ISAC 系统还能通过分析回波实现定位、测距、测速、成像和环境重构等多种功能,进一步加深了对物理世界的感知与探索<sup>[5]</sup>。基于此,亚太赫兹 ISAC 已成为 6G 无线通信系统的潜在关键技术之一,展现出广阔的应用前景。例如,在车联网领域,ISAC 可以通过无线通信实现车辆与周边环境的互联,同时利用感知能力检测障碍物、行人及其他潜在危险,从而提高自动驾驶的安全性,这对端到端的响应时间提出了较高的要求。文献[6]研究了车辆边缘网络中基于通信和感知融合的任务卸载问题,并利用其特殊结构提出一种有效的二进制搜索和可行性检查算法,以解决响应时间最小化问题。

路径损耗是链路预算和通信系统设计的基础。由于 ISAC 系统具有独特的功能和架构,它的路径损耗特性与传统通信信道不同,因此深入研究感知信道及其路径损耗模型变得尤为重要。近年来,国内外学者基于实测数据对不同目标通信或感知信道路径损耗进行研究。北京邮电大学张建华团队率先在 28 GHz 典型室内场景下,对视距 (LoS, line-of-sight) 和非视距 (NLoS, non-line-of-sight) 通信信道和感知信道进行测量,重点研究 ISAC 信道中的共享散射体<sup>[7]</sup>。随后,在室外环境下进行 28 GHz 通信感知信道测量,利用金属板研究干扰环境对感知信道的影响,并通过功率比来量化被测目标周围环境的变化<sup>[8]</sup>。研究表明,目标能否被感知取决于目标功率相对于环境多径功率之和的比例。文献[9]聚焦于工业物联网场景,进行了路径损耗特性的测量研究,基于射线追踪仿真,深入分析多金属目标遮挡的小工厂场景下多频段路径损耗特性。

经研究发现,大型金属体不仅不会增加电磁波的损耗,反而由于其强反射性能抵消部分路径损耗。在典型的室内短距离场景(如办公室、走廊、病房和楼梯)中,文献[10]进行了 2.5~2.69 GHz 信道测量,并在传统的临近自由空间参考距离 (CI, close-in free space reference distance) 模型中引入一个表征天线高度和位置变化的遮挡物因子,用于建模路径损耗。研究表明,该模型能够反映环境信息(包括遮挡物和接收天线衰减因素),从而提高传统模型的精确度。为了建立统一的 ISAC 信道模型,文献[11]提出一种将天线孔径和雷达散射截面表征结合的路径损耗模型,仿真结果验证了模型的准确性。文献[12]针对室内场景的路径损耗特性进行研究,建立单频和多频路径损耗模型,并进行 140 GHz 和 220 GHz 的信道测量,测量场景涵盖会议室、办公室和走廊。研究表明,由于波导效应的影响,走廊的路径损耗指数最低,且路径损耗指数随着频率的增加呈正相关,具有明显的频率依赖性。文献[13]模拟体育馆场景下的 28 GHz 信道测量,利用刀口衍射模型探索多人遮挡对信道特性的影响。研究表明,相邻人体的反射与散射提供了更强的信号路径,而刀口散射模型并未充分考虑这一点。文献[14]结合走廊 28 GHz 场景的实测数据得出结论,乘性模型更适用于可重构智能表面 (RIS, reconfigurable intelligence surface) 辅助的路径损耗建模。此外,考虑走廊波导效应,提出一种适用于波导结构场景中 RIS 辅助信道的双坡路径损耗模型,实验结果表明,该模型具有良好的拟合效果。

综上所述,现有研究存在以下不足。首先,路径损耗的研究主要集中于通信链路或人体遮挡链路,虽然会议室、工厂等室内环境被视为 6G 的热点场景,但对室内典型材料的感知信道电波传播规律仍缺乏深入研究;随后,感知信道中收发机接收的电磁波不仅经历自由空间损耗,还受到与感知目标相互作用后的额外损耗,传统路径损耗模型无法充分描述感知信道的衰落特性;最后,现有研究主要关注毫米波频段的感知信道,对亚太赫兹信道特性表征的研究不够深入和全面。

本文旨在构建一个准确且有效的感知信道路径损耗模型。首先,引入感知因子修正传统 CI 模型,并搭建 129.5~135 GHz 的感知信道测量平台,获取以室内典型建筑材料为感知目标的路径损耗实测数

据, 验证路径损耗模型的准确性。在此基础上, 本文进一步引入角度遮挡因子, 以获取不同入射距离与角度下的感知信道路径损耗。通过对角度和距离相关的遮挡因子特性的研究, 构建一个能够准确反映亚太赫兹角度-距离联合感知信道路径损耗模型。

## 1 感知信道路径损耗理论模型

### 1.1 雷达散射截面

感知目标的雷达散射截面 (RCS, radar cross section) 最早在雷达感知领域中被提出, 用于衡量雷达目标对入射电磁波的反射和散射能力, 是一个重要的物理量<sup>[15]</sup>。RCS 定义为目标向接收机方向单位立体角内散射功率与该目标被入射平面波功率密度之比的  $4\pi$  倍<sup>[16]</sup>。根据 RCS 特性对远场飞机和船舶等大型金属目标进行探测和识别, 不同散射对象的 RCS 值通常通过测量经验得出<sup>[17]</sup>。通过分析散射回波信号, 可以获得目标形状、行进路径、物理尺寸、表面粗糙度和电磁特性参数等信息。因此, 获取 RCS 特性对于分析目标的反射和散射特性至关重要。

根据接收机和发射机的相对位置, RCS 模型可分为单站和双站 2 种模式。双站 RCS 模型采用一发一收配置, 由不同的雷达进行发射和接收, 即发射机 (Tx, transmitter) 和接收机 (Rx, receiver) 位于不同位置, 通过测量 Rx 方向的散射电场来表征目标。单站 RCS 模型则使用同一个雷达进行发射和接收, 即 Tx 和 Rx 位于同一位置, 描述 Rx 方向的散射电场。本文主要聚焦单站 RCS 模型, 用于表征感知信道中亚太赫兹波入射感知目标后散射回入射方向的回波, 以研究目标感知信道特性。

单站 RCS 的接收功率返回至 Tx 的反向辐射功率密度表达式为

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (1)$$

其中,  $P_t$  为发射功率,  $G_t$  为 Tx 天线增益,  $d$  为 Tx 与散射体之间的距离。散射体拦截一部分入射功率后向不同方向辐射, 沿 Rx 方向辐射的入射功率记为 RCS, 符号为  $\sigma$ 。Rx 处的功率密度为

$$P_{dR} = \frac{P_t G}{4\pi d^2} \frac{\sigma}{4\pi d^2} \quad (2)$$

给定 Rx 天线孔径  $A_e$ , 则 Rx 的接收功率为

$$P_r = P_{dR} A_e = \frac{P_t G}{4\pi d^2} \frac{\sigma}{4\pi d^2} \frac{G\lambda^2}{4\pi} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 d^4} \quad (3)$$

其中,  $A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$  为天线有效接收面积。在其他参数

恒定时,  $\sigma$  值仅与接收功率  $P_r$  成正比关系, 因此 RCS 定义为

$$\sigma = 4\pi \frac{P_r d^2}{A_e} \frac{4\pi d^2}{P_t G} \quad (4)$$

其中,  $\frac{P_r d^2}{A_e}$  代表单位立体角内目标向接收方向散射功率的物理含义,  $\frac{4\pi d^2}{P_t G}$  代表沿特定方向入射至目标的平面波功率密度。

### 1.2 感知因子修正的路径损耗模型

路径损耗主要描述电磁波在自由空间中随传播距离增加而产生的功率衰减, 通常用路径损耗指数 (PLE, path loss exponent) 来衡量衰减强度。室内外电波传播过程中的路径损耗模型通常基于 Friis 传输理论构建, 并根据特定环境对自由空间损耗模型进行适当修正。在传播信道中, 平均接收功率通常随着对数距离的减小呈线性衰减特性。感知信道中路径损耗定义为

$$PL [dB] = P_T - P_R + G_T + G_R - S^{MEA} \quad (5)$$

其中,  $P_T$  与  $P_R$  分别是收发端发射功率与接收功率,  $G_T$  和  $G_R$  分别是收发天线增益,  $S^{MEA}$  是电磁波与感知目标相互作用时产生的反射、散射和透射等损耗之和。

3GPP TR38.901 给出了单频和多频路径损耗模型, CI 和 FI (FI, floating intercept) 是典型的单频路径损耗模型。

#### 1) CI 模型

CI 模型选择合理的参考距离  $d_0$  作为物理锚点, 并使用最小均方根误差 (MMSE, minimum mean square error) 来拟合实测数据, 从而得到模型的拟合参数。CI 模型表示为

$$PL_{CI}(f, d_{3D}) = 10n \lg\left(\frac{d_{3D}}{d_0}\right) + FSPL(f, d_0) + X_\sigma^{CI} \quad (6)$$

其中,  $d_{3D}$  表示收发天线之间的三维距离; FSPL ( $f, d_0$ ) =  $20 \lg\left(\frac{4\pi d_0 f}{c}\right)$ ,  $f$  为电波频率;  $d_0$  为物理参考距离, 室内  $d_0$  通常取 1 m 或 10 m, 室外  $d_0$  设置为 100 m 或 1 km;  $n$  为路径损耗指数;  $X_\sigma^{CI}$  为阴影衰落, 是一个均值为 0、标准差为  $\sigma^{CI}$  (单位为 dB) 的高斯随机变量。在描述路径损耗随距离变化的规律时, CI 模型仅需一个 PLE 参数。

#### 2) FI 模型

FI 模型<sup>[18]</sup>表示为

$$PL_{FI}(d_{3D}) = \alpha + 10\beta \lg(d_{3D}) + X_{\sigma}^{FI} \quad (7)$$

其中,  $\alpha$  为浮动截距,  $\beta$  为斜率,  $X_{\sigma}^{FI}$  为阴影衰落。与 CI 模型不同, FI 模型没有参考距离。

在感知信道中, 当目标为典型建筑材料时, 电磁波与建筑材料之间的相互作用导致的回波信号会受到材质的物理属性和电磁波特性的共同影响, 这与通信信道的路径损耗特性存在显著差异。这种差异导致传统路径损耗模型无法直接应用于感知信道衰落特性的描述。为了准确表征感知目标的回波损耗, 本文在传统 CI 模型中引入一个与材料 RCS 密切相关的感知因子  $S$ 。图 1 展示了电磁波与感知目标相互作用的传播机理。

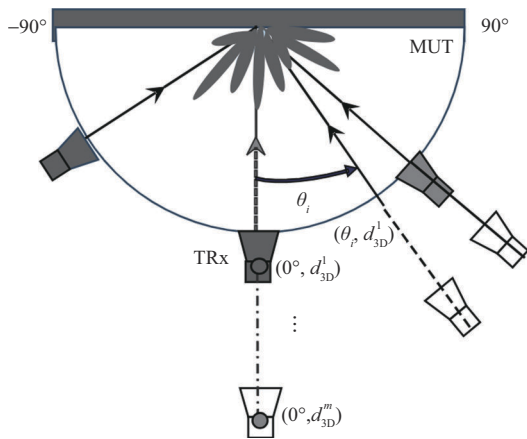


图 1 感知目标的电磁波传播机理

收发机置于被测材料 (MUT, material under test) 前方的不同角度和不同距离, 并用虚线表示。相比于自由空间传播, 电磁波与感知目标的相互作用会产生额外的反射和散射损耗。考虑这一额外损耗, 视距感知信道路径损耗模型建模为

$$PL_{Sensing}(f, d) = FSPL(f, d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) - S + X_{\sigma}^{Sensing} \quad (8)$$

其中, 感知因子  $S = 10 \lg(\sigma)$ ,  $\sigma$  为感知目标的单站 RCS;  $X_{\sigma}^{Sensing}$  表示阴影衰落, 是均值为 0、标准差为  $\sigma^{Sensing}$  (单位为 dB) 的高斯随机变量。

### 1.3 角度-距离联合的感知信道路径损耗模型

室内中近距离感知信道中, 当感知目标为平面物体时, 旋转产生的遮挡因子对感知信道路径损耗特性有显著影响。因此, 本文在式(8)中引入角度遮挡因子, 构建角度-距离联合感知信道路径损耗模型, 表示为

$$PL(f, d, \theta) = PL_{Sensing}(f, d) + F(d, \theta) \quad (9)$$

其中,  $F(d, \theta)$  表示感知目标与 TRx 之间由于角度与距离产生的遮挡因子。根据图 1 中的电磁波传播机理, 对比式(8)与式(9)可知, 相同入射距离  $F(d, \theta)$  与 TRx 垂直入射及不同角度入射的路径损耗相关, 即

$$F(d, \theta) = PL(d, \theta) - PL(d, 0^\circ) \quad (10)$$

其中,  $PL(d, 0^\circ)$  为 TRx 垂直入射 (即  $0^\circ$  入射) 目标的路径损耗值, 单位为 dB;  $\theta$  为入射方向与目标法线的夹角。值得注意的是, 仅通过对遮挡因子进行路径损耗相关的加权, 便可获得不同距离和角度下的路径损耗。因此, 接下来重点研究遮挡因子对感知信道路径损耗造成的影响。

## 2 感知信道路径损耗测量

### 2.1 测量系统

为获取不同室内典型材料的感知信道路径损耗数据, 并验证修正模型的准确性, 本文搭建基于矢量网络分析仪的感知信道频域测量系统。实际测量过程中, 发射端通过矢量网络分析仪、矢量信号发生器及射频前端, 生成一个 129.5~135 GHz 的连续信号; 接收端与发射机并排固定放置, 通过模拟一体化结构来感知并记录目标回波信号。感知目标被放置于发射端与接收端的前方。为确保入射波为平面波, 需将感知目标放置于满足收发天线远场距离的远端。考虑喇叭天线具有较集中的主瓣和较高的天线增益, 因此选择其发射和接收信号。

测量系统结构如图 2 所示, 发射机通过矢量网络分析仪产生未经调制的连续中频 (IF, intermediate frequency) 信号, 频谱范围为 1.5~7 GHz。矢量信号发生器发送频率为 10.667 GHz 的本振 (LO, local oscillator) 信号至射频前端, 随后通过倍频器将 LO 信号上变频至 128 GHz。同时, IF 信号与倍频信号进行混频, 得到频率范围为 129.5~135 GHz、带宽为 5.5 GHz 的射频信号, 并由发射机发射。电磁波经过 Tx—感知目标—Rx 信道后, 由矢量网络分析仪接收, 随后上传至数据处理计算机。最终, 在数据处理计算机中通过特定的数据处理方法获取信道信息。表 1 为测量系统参数配置。

### 2.2 感知目标

为深入研究感知信道路径损耗特性, 本文选取 4 种典型室内建筑材料作为感知目标, 如图 3 所示, 包括 PVC 塑料板、钢化玻璃、实木和石膏板, 后文将钢化玻璃和 PVC 塑料板分别简称为“玻璃”和

“PVC”。表2列出了被测材料的物理尺寸参数，需要注意的是，为了准确获取感知信道路径损耗，每种感知材料的尺寸必须足够大，以避免在长距离测试时发生绕射传播。每组材料的长宽均采用精度测量误差不超过±0.3 mm的工业卷尺进行测量，每次测量记录5组数据并计算平均值。厚度则使用精度为0.1 mm的游标卡尺进行测量，同样每次测量5组数据并进行平均处理。复介电常数的数据来源于文献[19]。

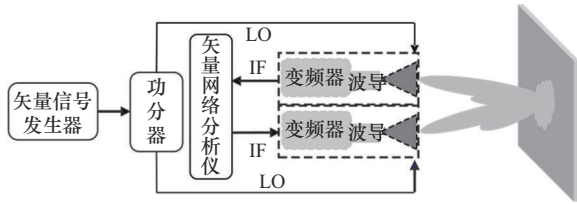


图2 测量系统结构

表1 测量参数配置

| 参数           | 数值              |
|--------------|-----------------|
| 频带/GHz       | 129.504~135.004 |
| 本振频率/GHz     | 10.667          |
| 倍频数          | 12              |
| 中频带宽/kHz     | 10              |
| 扫频点数/个       | 1101            |
| 时延分辨率/ns     | 0.18            |
| 本振最大功率/dBm   | 5               |
| 天线增益/dBi     | 25              |
| 中频频率/GHz     | 1.5~7           |
| 3 dB波束宽度     | E面:9°<br>H面:10° |
| 扫频间隔/MHz     | 5               |
| 最大时延/ns      | 200             |
| 中频最大输入功率/dBm | -10             |

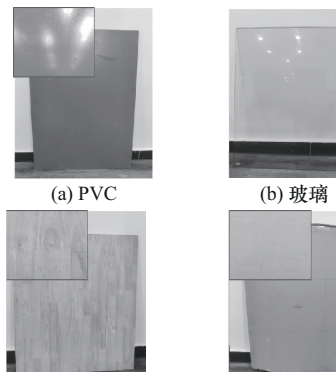


图3 被测材料实物

| 表2 | 被测材料参数 |       |       |       |            |
|----|--------|-------|-------|-------|------------|
|    | 建筑材料   | 长度/cm | 宽度/cm | 厚度/mm | 复介电常数      |
|    | PVC    | 120   | 80    | 10    | 3.49-j0.07 |
|    | 玻璃     | 100   | 100   | 8     | 5.35-j0.25 |
|    | 实木     | 100   | 100   | 15    | 1.70-j0.15 |
|    | 石膏板    | 120   | 80    | 10    | 4.34-j0.08 |

### 2.3 测量部署

本文选取重庆邮电大学综合实验大楼一层作为实验场地，开展2种典型中近距离室内场景的感知信道路径损耗特性测量。由于电波到达收发机的功率与环境中的反射、散射和绕射密切相关，本次测量场景选择较宽阔的大厅，主要建筑材料包括地板瓷砖、玻璃的房间外墙、石灰涂层的墙体和金属外壳的展示台。在测试中，收发端和感知材料被置于场景的正中央，周围没有障碍物，从而极大程度地避免了无关电磁波损耗，确保亚太赫兹回波仅经过感知目标一次反射。

在典型感知信道路径损耗测量场景下，为了获取不同距离和不同感知材料的路径损耗，实际测量部署如图4所示。为消除地面回波对实验结果的影响，感知收发天线被部署在距地面50 cm的支架上，并使其指向同一方向，以模拟感知端检测感知信号的回波过程。感知目标选用不同的室内典型建筑材料，以TRx的位置为原点坐标，感知目标沿LoS方向移动。TRx与感知目标的初始距离为1 m，最大距离为10 m，相邻测量位置间隔0.5 m，共测量19个位置。

为深入研究室内感知信道的路径损耗特性，开展了感知目标在不同角度和不同距离下的测量活动，以获取多维路径损耗。考虑感知信道测量使用平面典型建筑材料，本文将材料在室内短距离感知场景中不同旋转角度产生的遮挡因子纳入考虑，并分析感知距离与感知目标旋转角度对亚太赫兹室内感知信道特性的影响。随后，进行角度-距离联合的路径损耗测量。为避免地面回波对实验结果造成影响，收发天线被并排固定在高度为30 cm的支架上，并水平放置。感知目标垂直放置在角度图的中心线上（角度图铺设在地面上并固定），并在预先设定好的不同距离和角度测量点上进行测量。实际测量部署如图5所示，感知回波主要集中在-25°~25°的范围内，当测量区间超过25°时，回波信号主

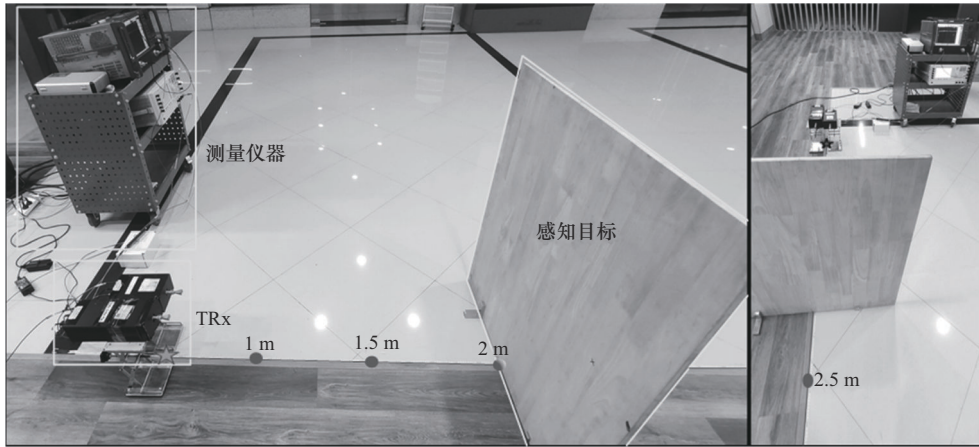


图4 不同距离感知信道测量场景

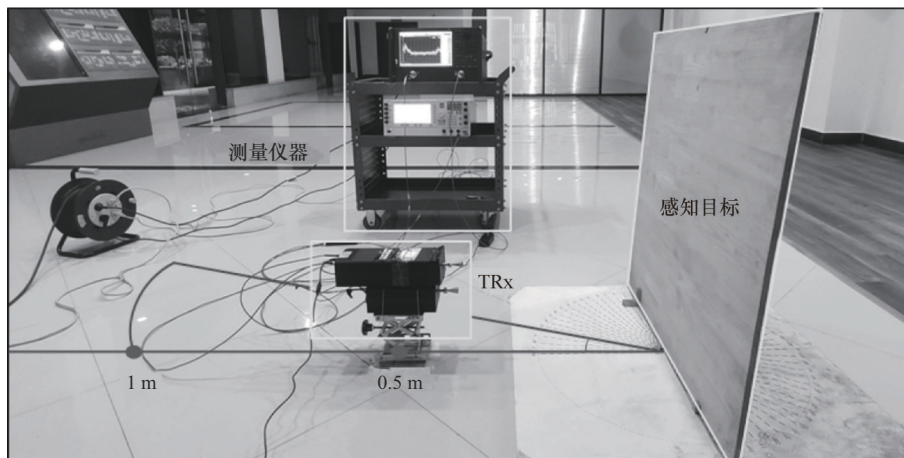


图5 不同角度-距离联合的感知信道测量场景

要由噪声构成。因此，测量角度范围设置为 $-25^\circ \sim 25^\circ$ ，间隔为 $5^\circ$ 。感知目标与TRx的测试距离设为0.5 m、1 m、1.5 m和2 m，并选择玻璃和PVC作为被测材料。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同距离感知信道路径损耗模型分析

图6展示了4种感知目标在129.5~135 GHz频段下的路径损耗情况，表3列出了不同感知材料

下，CI模型、FI模型和感知模型的拟合值。通过分析图6与表3，可以得出以下结论。

1) 与传统通信信道相比，感知信道的平均路径损耗更高。这是因为在感知信道中，收发机接收到的信号不仅经历了与通信信道类似的自由空间损耗，还因与感知目标的相互作用产生反射和散射等附加损耗。

2) 相较于玻璃和PVC，当感知目标为石膏板和实木时，平均路径损耗更高，这是由于两类材料

表3 路径损耗模型拟合参数

| 材料  | CI模型    |      |                           | FI模型     |         |                           | 感知模型 |        |                                       |
|-----|---------|------|---------------------------|----------|---------|---------------------------|------|--------|---------------------------------------|
|     | FSPL/dB | $n$  | $X_\sigma^{CI}/\text{dB}$ | $\alpha$ | $\beta$ | $X_\sigma^{FI}/\text{dB}$ | $n$  | $S$    | $X_\sigma^{\text{Sensing}}/\text{dB}$ |
| 玻璃  | 74.87   | 2.68 | 2.32                      | 79.48    | 2.09    | 1.49                      | 1.81 | -6.79  | 1.72                                  |
| 石膏板 | 74.87   | 3.04 | 4.99                      | 86.50    | 1.56    | 2.19                      | 1.54 | -11.77 | 2.19                                  |
| PVC | 74.87   | 2.48 | 2.26                      | 78.64    | 2.00    | 1.73                      | 1.66 | -6.39  | 2.00                                  |
| 实木  | 74.87   | 3.21 | 4.55                      | 85.34    | 1.88    | 2.08                      | 1.63 | -12.38 | 2.21                                  |

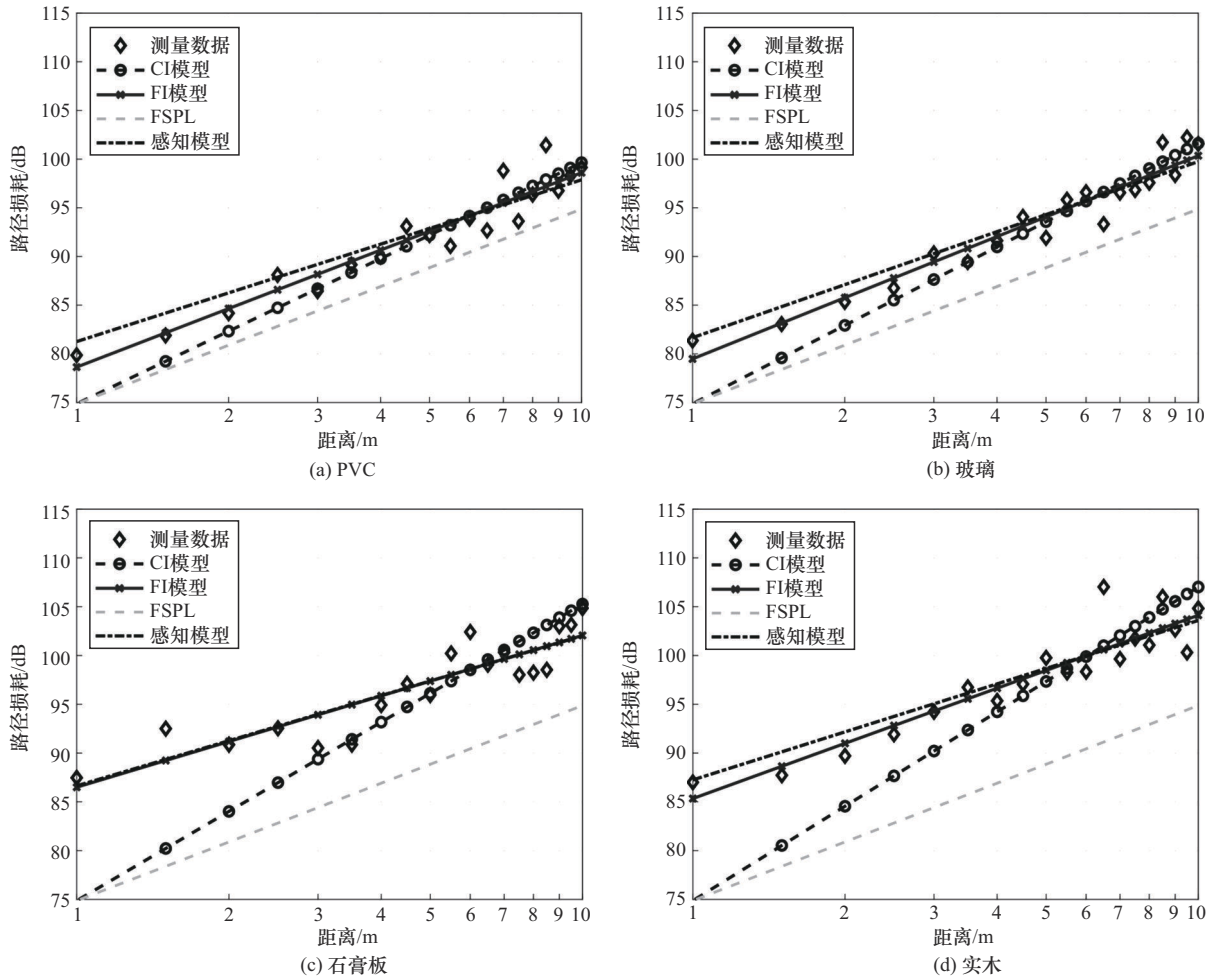


图6 4种室内典型材料路径损耗模型拟合结果

的粗糙度不同。在感知信道路径损耗模型中，较粗糙的材料具有更大的感知因子，这是由于RCS与材料表面的粗糙度呈正相关。

此外，通过观察拟合模型得到以下两点结论。

1) CI模型通过选择合理的参考距离作为锚点，并利用MMSE拟合实测数据，从而得到拟合参数。相比之下，FI模型采用浮动截距的方式，没有使用距离作为锚点，因此可以更灵活地适应不同的测量数据，这使得其拟合效果通常优于CI模型。然而，这种灵活性也意味着FI模型无法如CI模型那样固定地反映环境特性，因此在某些应用场景中可能缺乏实际意义和物理解释。

2) 将感知目标的RCS特性纳入感知信道路径损耗模型具有显著优势。从表3的路径损耗模型拟合结果可以看出，感知信道路径损耗模型的阴影衰落相较于CI模型显著减小。当感知目标为玻璃时， $X_{\sigma}^{Sensing}$  仅为1.72 dB，且所有感知目标的阴

影衰落均小于2.22 dB。同时，不同感知材料的PLE也均约等于自由空间传播下的PLE值。这表明本文构建的感知信道路径损耗模型不仅能反映一定的物理特性，而且拟合效果接近于FI模型，优于传统的CI模型，从而能较好地拟合实际测量值。以上结果表明，在感知信道中，电磁波与感知目标的相互作用损耗显著影响收发机的接收功率，而这种影响的大小与感知目标的RCS值有关。RCS值受多种因素的影响，本文采用亚太赫兹波在1 m处垂直入射于材料的回波功率作为感知因子值。根据RCS的定义，在本文的参数设置下，1 m处的电磁波可视为平面波。感知因子的大小反映了材料的反散射能力，感知因子越大，材料的反散射能力越强，电磁波损耗的能量越少，路径损耗值也越小。这证明了感知目标的感知因子在感知信道中对路径损耗的影响。综上所述，该模型能够准确描述感知信道中电磁波功率的衰落趋

势, 并考虑了感知目标对路径损耗的影响, 具有更完善的物理意义, 为通信感知识别与环境重构奠定了基础。

### 3.2 不同角度-距离联合的感知信道路径损耗模型分析

在完成不同距离和角度下的路径损耗测量后, 本文根据式(10)对测量数据进行处理。图7和图8分别为PVC和玻璃的模型拟合结果, 实验结果表明, 在 $-25^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的角度范围内, 角度遮挡因子与旋转角度之间呈三角函数关系。

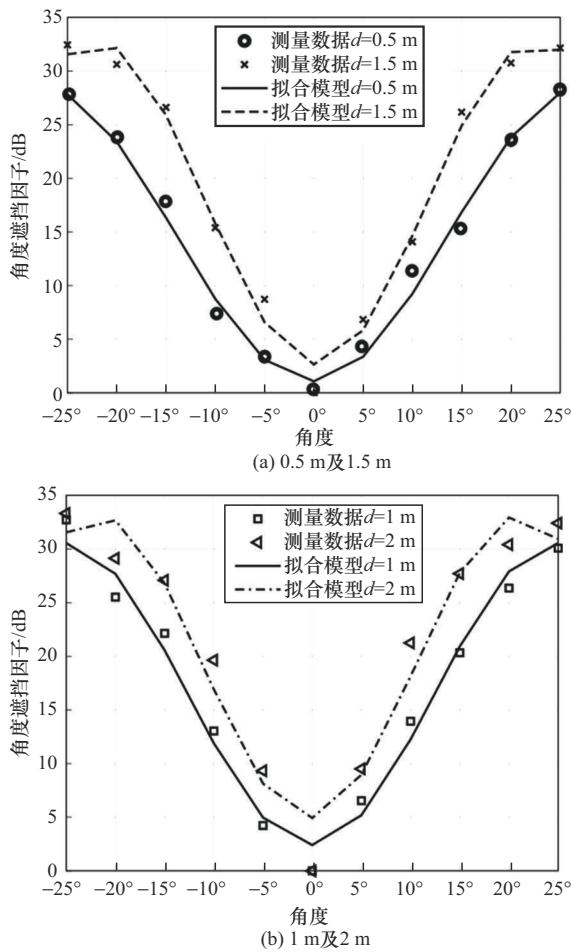


图7 PVC在不同距离下角度遮挡因子模型拟合

本文使用最小二乘法对测量结果进行拟合, 角度遮挡因子的表达式为

$$F(\theta) = a + b \sin(c\theta + d) \quad (11)$$

其中,  $\theta$ 为入射角度, 范围为 $-25^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 均为角度遮挡因子特征参数。根据上述方法, 针对不同的入射距离(即 $d$ 分别为0.5 m、1 m、1.5 m、2 m)逐个进行拟合。表4列出了角度遮挡因子模

型的特征参数值, 并使用均方根误差(RMSE, root mean squared error)量化模型的拟合误差。

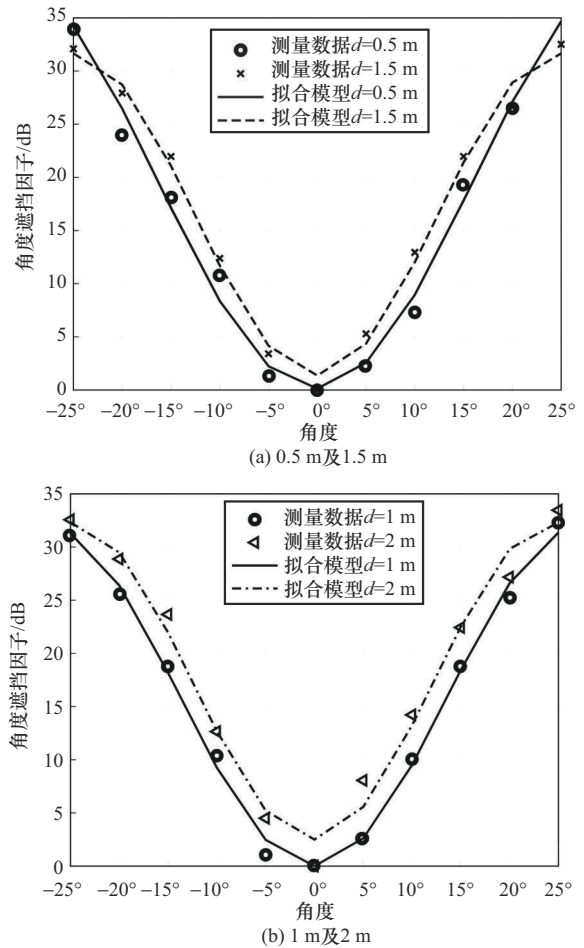


图8 玻璃在不同距离下角度遮挡因子模型拟合

表4 角度遮挡因子相关参数

| 材料  | 距离/m | $a$   | $b$   | $c$    | $d$  | RMSE/dB |
|-----|------|-------|-------|--------|------|---------|
| 玻璃  | 0.5  | 19.64 | 19.51 | -88.97 | 5.57 | 1.71    |
|     | 1.0  | 15.97 | 15.98 | -89.51 | 6.56 | 1.02    |
|     | 1.5  | 16.51 | 15.15 | -89.35 | 7.22 | 1.34    |
|     | 2.0  | 17.41 | 14.92 | -88.88 | 7.26 | 1.91    |
| PVC | 0.5  | 14.81 | 13.74 | -88.91 | 6.50 | 1.39    |
|     | 1.0  | 16.48 | 14.08 | -89.22 | 7.18 | 1.97    |
|     | 1.5  | 17.71 | 15.08 | -92.20 | 8.05 | 1.60    |
|     | 2.0  | 19.02 | 14.11 | -87.50 | 8.39 | 3.10    |

实验结果表明, 在4种入射距离下, 角度遮挡因子与入射角度呈正相关, 即入射角度越大, 角度遮挡因子也越大, 这是因为角度遮挡因子的

值以 0° 入射方向的路径损耗作为标准。在相同入射距离下，材料的平面特性使得 Rx 接收到的亚太赫兹反散射回波功率与入射角度呈正相关。同时，角度遮挡因子随着距离的增大而增大，符合路径损耗衰减规律。对比不同维度的拟合结果发现，模型整体的拟合效果较好。以玻璃作为感知材质时，当入射距离为 1 m 时，拟合误差最小，RMSE 仅为 1.02；而 PVC 在距离为 2 m 时的拟合效果最差，RMSE 为 3.1。为进一步提升模型的通用性，在角度遮挡因子中引入距离变量。根据上述数据拟合结果，完成亚太赫兹角度-距离联合的感知信道路径损耗模型的构建，角度-距离联合的遮挡因子的表达式为

$$F_1(\theta, D) = a_1 + b_1 \exp(c_1 D) \sin(d_1 \theta + e_1) \quad (12)$$

其中， $D$  为入射距离； $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$  和  $e_1$  为角度-距离联合遮挡因子的特征参数。图 9 展示了在感知材料为玻璃和 PVC 时角度-距离联合遮挡因子的拟合结果。表 5 列出了角度-距离联合遮挡因子模型的相关参数，并通过三维模型展示遮挡因子在距离和角度维度下的正相关变化趋势。由图 9 可以看出，模型对 2 种材质的拟合结果较好，玻璃的拟合误差为 2，而 PVC 的拟合误差为 3.6。综上所述，拟合结果表明，亚太赫兹角度-距离联合的感知信道路径损耗模型能够准确表征感知信道中因角度和距离产生的误差，为后续 ISAC 系统设计提供一定的指导。

表 5 角度-距离联合遮挡因子模型的相关参数

| 材料  | $a_1$ | $b_1$ | $c_1$                   | $d_1$  | $e_1$  | RMSE/dB |
|-----|-------|-------|-------------------------|--------|--------|---------|
| 玻璃  | 17.13 | 17.45 | -0.07                   | -6.607 | -90.54 | 1.999   |
| PVC | 16.72 | 13.92 | $-6.273 \times 10^{-9}$ | -7.628 | -90.70 | 3.583   |

### 4 结束语

本文基于雷达散射截面原理，引入一种适用于感知信道的路径损耗模型，并对 4 种典型的室内材料在 129.5~135 GHz 频段进行感知信道路径损耗测量。随后，考虑入射角度对模型的影响，在模型中加入角度遮挡因子，从而构建角度-距离联合的感知信道路径损耗模型。实验结果表明，该感知信道路径损耗模型的性能优于传统 CI 模型，并在反映环境的物理特性方面优于 FI 模型，能较好地刻画不同材料和不同距离下感知信道路径损耗的变化规律，体现了该模型的优越性。在模型中加入遮挡因子后，通过对比实测数据发现，该模型能有效表征感知信道因角度-距离变化而产生的遮挡误差。本文的研究成果对理解亚太赫兹感知信道的传播机理以及建立精确的亚太赫兹感知信道模型具有一定参考价值。

### 参考文献:

- [1] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [2] PREMANAND R, MADHUKUMAR A S, SHARMA S, et al. Performance analysis of IRS-assisted terahertz communication system[C]// Proceedings of the 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [3] 李元博, 王依勤, 韩充. 太赫兹无线信道的测量、建模和分析[J]. 信息通信技术与政策, 2022, 48(9): 34-49.
- [4] LI Y B, WANG Y Q, HAN C. A comprehensive survey on terahertz channel measurement, modeling, and analysis[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022, 48(9): 34-49.
- [5] 中国信息通信研究院. 6G 通信感知一体化评估方法研究报告[R]. 2023.
- [6] China Academy of Information and Communications Technology. Evaluation methods research report of 6G integrated sensing and communication[R]. 2023.
- [7] CHENG X, DUAN D L, GAO S J, et al. Integrated sensing and communications (ISAC) for vehicular communication networks (VCN) [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23441-23451.
- [8] QI Y L, ZHOU Y Q, LIU Y F, et al. Traffic-aware task offloading based on convergence of communication and sensing in vehicular edge com-

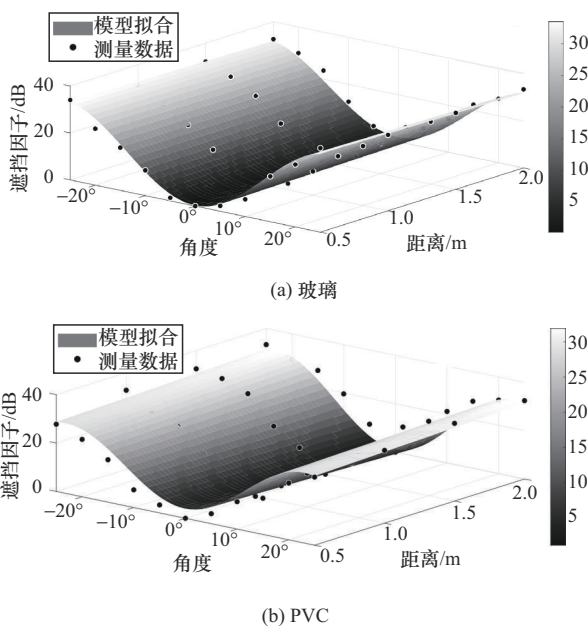


图 9 感知材料为玻璃和 PVC 时角度-距离联合遮挡因子的拟合结果

- puting[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17762-17777.
- [7] WANG J L, ZHANG J H, ZHANG Y X, et al. Empirical analysis of sensing channel characteristics and environment effects at 28 GHz[C]// Proceedings of the 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1323-1328.
- [8] LIU Y M, ZHANG J H, ZHANG Y X, et al. A shared cluster-based stochastic channel model for integrated sensing and communication systems[J]. arxiv Preprint, arxiv:2211.06615, 2022.
- [9] 余雨, 何孙晶, 刘婷婷, 等. 工业物联网场景下复杂信道路径损耗模型研究[J]. 电波科学学报, 2023, 38(3): 528-537.
- YU Y, HE S J, LIU T T, et al. Complex channel path loss model for industrial Internet of things scenarios[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(3): 528-537.
- [10] 余雨. 小蜂窝场景中室内短距离无线信道传播特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- YU Y. Study on propagation characteristics of indoor short-range wireless channel in small cell scene[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [11] LOU J P, LIU R Q, JIANG C X, et al. A unified channel model for both communication and sensing in integrated sensing and communication systems[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [12] HE J, CHEN Y, WANG Y Q, et al. Channel measurement and path-loss characterization for low-terahertz indoor scenarios[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [13] ISLAM M N, SUBRAMANIAN S, PARTYKA A, et al. Coverage and capacity of 28 GHz band in indoor stadiums[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [14] LI Y, ZHANG J H, TANG P, et al. Path loss modeling for the RIS-assisted channel in a corridor scenario in mmWave bands[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1478-1483.
- [15] 黄培康, 殷红成, 许小剑等. 雷达散射特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- HUANG P K, YIN H C, XU X J, et al. Radar scattering characterization[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.
- [16] JU S H, ALI S S H, JAVED M A, et al. Scattering mechanisms and modeling for terahertz wireless communications[C]//Proceedings of the ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [17] TICETE. An overview of radar cross section measurement techniques[C]// Proceedings of the 6th IEEE Conference Record, Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2002: 344-346.
- [18] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (TR 38.901, V17.0.0)[S]. 2022.
- [19] WANG Y, LIU Y, LIAO X, et al. Complex permittivity extraction of building materials from transmission/reflection measurements at sub-THz band[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1934-1939.

## [作者简介]



王洋 (1986-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为 6G 移动通信、毫米波太赫兹信道测量与建模、涡旋电磁波、智能反射面。



赵海森 (2000-), 男, 四川广元人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为太赫兹通信感知一体化。



廖希 (1988-), 女, 四川绵阳人, 博士, 重庆邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为 6G 毫米波太赫兹通信感知、6G 涡旋电磁波通信、散射反射通信。



郑相全 (1972-), 男, 四川内江人, 博士, 军事科学院高级工程师, 主要研究方向为无线通信。



黎川 (1999-), 男, 江西抚州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为 6G 毫米波太赫兹通信感知、散射反射通信。



陈前斌 (1967-), 男, 四川营山人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为通信网理论与技术、无线通信、多媒体信息传输与处理。