

# 面向通信感知一体化的室内太赫兹信道反射与透射特性研究

廖希<sup>1</sup>, 林长溪<sup>1</sup>, 郑相全<sup>2</sup>, 王洋<sup>1</sup>, 林峰<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:** 明确室内太赫兹 (THz) 波反射与透射特性对于构建太赫兹通信感知一体化 (ISAC) 信道模型至关重要。利用基于矢量网络分析仪的测量平台对 7 种室内材料在 130~134 GHz 频段开展了测量活动, 分析了太赫兹信道反射与透射特性的频率依赖性 & 入射角依赖性, 与 282~290 GHz 频段测量结果对比, 揭示了 2 个频段内反射损耗特性。采用量子粒子群优化算法提取材料电磁参数, 提出了一种频率-入射角联合的反射系数模型。结果表明, 该模型能够准确刻画反射系数随频率与入射角的变化规律。研究成果补充了 130~134 GHz 频段材料传播系数数据库, 丰富了电磁参数数据集, 建立了反射系数模型, 为太赫兹 ISAC 系统检测、识别、环境重构等功能提供了数据基础及模型参考。

**关键词:** 太赫兹通信; 通信感知一体化; 传播系数; 复介电常数

中图分类号: TN011

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024168

## Research on indoor THz channel reflection and transmission characteristics for integrated sensing and communication

LIAO Xi<sup>1</sup>, LIN Changxi<sup>1</sup>, ZHENG Xiangquan<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, LIN Feng<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:** The indoor terahertz (THz) wave reflection and transmission characteristics were clarified as essential for the construction of an integrated channel model for terahertz integrated sensing and communication (ISAC). Measurement campaigns were carried out on seven indoor materials at 130~134 GHz using a vector network analyzer-based measurement platform, and the frequency dependence and incidence angle dependence of the terahertz channel reflection and transmission characteristics were analyzed, which were compared with the measurement results at 282~290 GHz, to have the reflection loss characteristics in the two frequency bands revealed. A quantum particle swarm optimization algorithm was used to extract the material electromagnetic parameters, and a joint frequency-incidence angle model of the reflection coefficient was proposed. The results are shown to indicate that the variation rule of the reflection coefficient with frequency and incidence angle can be accurately portrayed by the model. The material propagation coefficient database of the 130~134 GHz band is supplemented by the research results, the electromagnetic parameter dataset is enriched, and the reflection coefficient model is established. The data basis and model reference for the detection, identification, and environmental reconstruction of the terahertz ISAC system are provided.

**Keywords:** THz communication, ISAC, propagation coefficient, complex permittivity

收稿日期: 2024-03-22; 修回日期: 2024-08-28

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)

## 0 引言

IMT-2030 (6G) 推进组在《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书中明确指出, 6G 利用通信信号实现目标探测、定位、识别、成像等感知功能, 使通信感知一体化 (ISAC, integrated sensing and communication) 成为 6G 核心特征之一<sup>[1]</sup>。太赫兹 (THz, terahertz) 波位于 0.1~10 THz 频段, 因其高频段和连续大带宽, 使其在实现无线传输的同时, 也使三维定位、成像和目标探测识别等功能成为可能。太赫兹通信与通信感知一体化的结合, 能够通过通信和感知性能的双促进, 充分提升频谱利用率, 有效增强感知精度。太赫兹波在空气中传播时很容易被水分子吸收, 信号衰减严重, 更适合室内短距通信<sup>[2]</sup>, 例如办公场所<sup>[3]</sup>的高速无线接入点或无线设备到设备通信, 室内工厂场景的移动机器类通信, 高速移动的列车车厢内通信<sup>[4]</sup>。不同室内场景分布着不同的散射体, 致使太赫兹波与散射体相互作用并产生反射、散射、衍射等传播机制, 导致信道大、小尺度衰落特性发生显著变化<sup>[5]</sup>, 并且可能出现一些新特性, 致使全面理解室内复杂环境下太赫兹无线信号多径传播特性并建立准确的一体化信道模型极具挑战。目前许多研究表明, 材料对太赫兹波的反射、散射、衍射等的传播机制对于太赫兹 ISAC 信道建模至关重要<sup>[6-8]</sup>。对太赫兹波传播机制的研究已是当前的研究热点和难点。

准确理解太赫兹信道反射特性和透射特性是认知太赫兹通信感知一体化信道特性, 构建信道模型的前提。近年来, 国内外学者结合测量开展了室内典型材料在太赫兹频段的反射特性和透射特性研究, 测量频率可达 1.1 THz。文献[9]在 110~170 GHz 频段测量了木材、玻璃、丙烯酸及混凝土等材料, 研究了反射损耗与透射损耗的频率依赖性。文献[10]在 750 GHz~1.1 THz 频段研究了木板、砖及塑料等材料 0° 入射角时的透射系数。但上述研究缺乏对反射系数与透射系数入射角依赖性的研究。文献[11]在 240~310 GHz 频段研究了铝合金、瓷砖等 5 种建筑材料反射系数入射角依赖性, 并基于瑞利 (Rayleigh) 模型提出了电磁波垂直极化时依赖于入射角的反射系数统计模型, 但该模型无法同时表征反射系数频率与入射角依赖性。为了表征反射系数频率与入射角依赖性, 文献[12]在 220~320 GHz 频段研究了玻璃、石膏等 5 种建筑材料的反射系数频率与

入射角依赖性, 并提出了用洛伦茨 (Lorenz) 和德鲁德 (Drude) 模型修正菲涅耳 (Fresnel) 模型的频率角二维反射系数模型。

太赫兹信道的反射特性和透射特性一方面随电磁波频率、入射角、电波极化变化而变化, 另一方面还取决于材料表面粗糙度、电导率、相对介电常数。兼具准确性和低复杂度的电磁参数提取算法成为研究重点。文献[13]基于无限反射模型构建目标函数, 利用优化算法提取了建筑材料的相对介电常数。文献[14]提出了一种基于法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 谐振的介电常数提取方法, 但该方法需要较大带宽, 适用性受到限制。文献[15]使用水平极化反射系数, 通过最小均方根误差 (RMSE, root-mean-square error) 法估算了材料的相对介电常数, 但该方法忽略了材料内部多径效应。文献[16]考虑了材料内部多径效应, 利用一阶反射系数遵循菲涅耳反射理论, 提出一种主次径剥离的相对介电常数提取方法, 但该方法未使用优化算法, 计算复杂度较高。文献[17]在 219~224 GHz 频段研究了玻璃、花岗岩等 5 种建筑材料反射系数和透射系数, 使用最小二乘法提取了材料电磁参数。

综上, 现有研究主要聚焦在 220 GHz、300 GHz 等频段反射特性和透射特性, 对 130 GHz 频段室内典型材料太赫兹信道传播特性表征不足, 反射系数计算模型的准确性、有效性和普适性有待提升。

为了解决以上问题, 本文针对 130 GHz 频段太赫兹信道开展反射特性与透射特性研究, 使用量子粒子群优化 (QPSO, quantum-behaved particle swarm optimization) 算法优化了主次径剥离法, 提取了材料电磁参数, 提出了频率-入射角联合的反射系数模型。首先, 搭建了基于矢量网络分析仪 (VNA, vector network analyzer) 的反射和透射系数测量平台, 测量了 7 种常见建筑材料反射系数与透射系数。对比研究了 130~140 GHz 频段的 7 种被测材料 (MUT, material under test) 的反射系数与透射系数特性与规律。然后, 使用主次径剥离法提取一阶反射系数, 采用 QPSO 算法提取了材料电磁参数。最后, 结合 Fresnel 反射理论, 提出了频率-入射角联合的反射系数模型, 交叉验证了模型准确性和普适性。本文的研究成果补充了 130~134 GHz 频段材料传播系数数据库, 丰富了电磁参数数据集,

建立了反射系数模型,为太赫兹 ISAC 系统检测、识别、环境重构等功能提供了数据基础及模型参考。

### 1 电磁波反射与透射传播理论

根据电磁波电场矢量运动轨迹,电磁波分为垂直极化 (TE, transverse electric) 波和水平极化 (TM, transverse magnetic) 波。电磁波照射在材料表面时,会发生反射与透射现象。电磁波由空气斜入射无磁性介质时,TE 波反射系数  $\Gamma_{\perp}$  与 TM 波反射系数  $\Gamma_{\parallel}$  分别表示为<sup>[18]</sup>

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (1)$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\epsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2)$$

透射系数  $T_{\perp}$  与  $T_{\parallel}$  分别表示为

$$T_{\perp} = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (3)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2 \sqrt{\epsilon_r} \cos \theta_i}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (4)$$

其中,  $\theta_i$  为电磁波入射角度,  $\epsilon_r$  为材料相对介电常数。

### 2 太赫兹反射系数与透射系数测量

为了研究太赫兹频段不同材料电磁传播特性,对不同材料在 130~134 GHz 频段展开了反射系数与透射系数测量。考虑到测量频段、带宽、材料类型等因素,基于自由空间法搭建了典型材料反射系数与透射系数测量平台,该方法具有易操作、无接触、低损耗等优点<sup>[19]</sup>。本节详细介绍了测量平台配置与 MUT 参数。

#### 2.1 测量平台

测量平台原理框架如图 1 所示,主要由 VNA、矢量信号发生器、功分器、射频前端及收发天线组成。信号发生器产生 10.667 GHz 的本振信号 (LO, local oscillator),经功分器分为 2 路,通过 12 倍频到 128.004 GHz。发射端侧,VNA 端口 1 产生的 1.996~5.996 GHz 中频 (IF, intermediate frequency) 信号与本振信号混频,上变频到 130~134 GHz,经滤波放大后由天线发射至传播信道。接收端侧,将天线接收到的信号与本振信号混频,下变频到

1.996~5.996 GHz 中频信号,由 VNA 端口 2 接收。测量平台如图 2 所示。

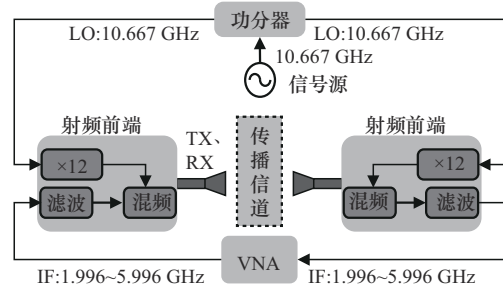


图1 测量平台原理框架

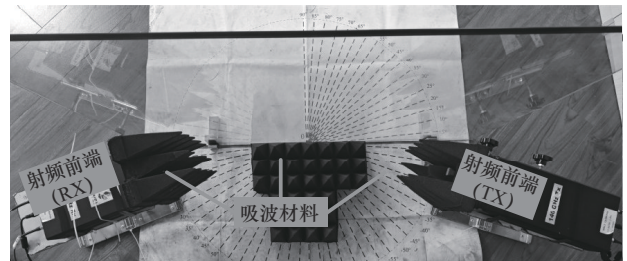


图2 测量平台

为了消除仪器带来的测量误差,在测量前通过短路-开路-负载-直通方法对测量系统进行校准。设置 VNA 的 S 参数类型、频率、带宽、扫频点数、信号功率等参数,详细参数如表 1 所示。值得注意的是,测量中入射角度步进为 10°。

表 1 测量参数设置

参数	值
测量频段 $f$ /GHz	130~134
中频信号频段 $f_{IF}$ /GHz	1.996~5.996
中频信号功率 $P_{IF}$ /dBm	0
扫描点数 $M$	801
频带宽度 $B_w$ /GHz	4
本振信号频率 $f_{LO}$ /GHz	10.667
本振信号功率 $P_{LO}$ /dBm	0
倍频数 $f_{MF}$	12
收发天线增益 $G$ /dBi	25
收发天线半功率波束宽度 HPBW	10°/9°(H 面/E 面)
收发天线极化方式 Pol	垂直极化
收发天线高度 $h$ /cm	20
收发天线至 MUT 距离 $d$ /cm	50
反射测量入射角 $\theta_i^r$	[10°,70°]
透射测量入射角 $\theta_i^T$	[10°,70°]

测量前在 VNA 中加入时域门, 以保留主径且滤除多径带来的影响。为了保证天线满足远场条件, 天线与 MUT 之间的距离  $d$  应满足  $d > \frac{2D^2}{\lambda}$ ,  $D$  为天线口径尺寸,  $\lambda$  为电磁波波长。将收发天线高度设置为 20 cm, 同时在地面放置吸波材料, 减小地面反射对测量结果造成的影响。为了减小天线之间的耦合, 在收发天线周围包裹吸波材料。

测量反射系数时, 首先将收发天线放置在 MUT 同侧, 如图 3(a) 所示, 其中  $\theta_r$  表示反射角。测量时记录每块材料在不同入射角的  $S_{21}$  值, 记为  $S_{21,T}^{MUT}$ 。为了消除测量时自由空间路径损耗带来的影响, 使用金属板的  $S_{21}$  值作为参考, 记为  $S_{21,T}^{Metal}$ 。反射系数可以表示为<sup>[17]</sup>

$$|\Gamma_{MUT}| = \left| \frac{S_{21,T}^{MUT}}{S_{21,T}^{Metal}} \right| \quad (5)$$

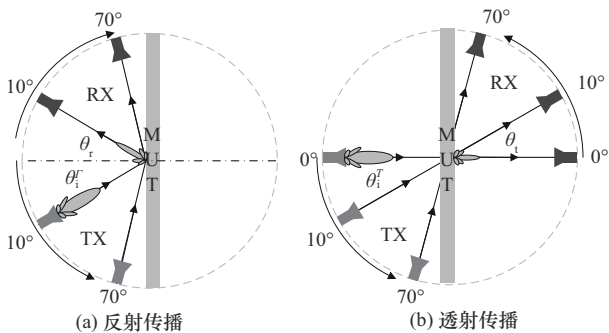
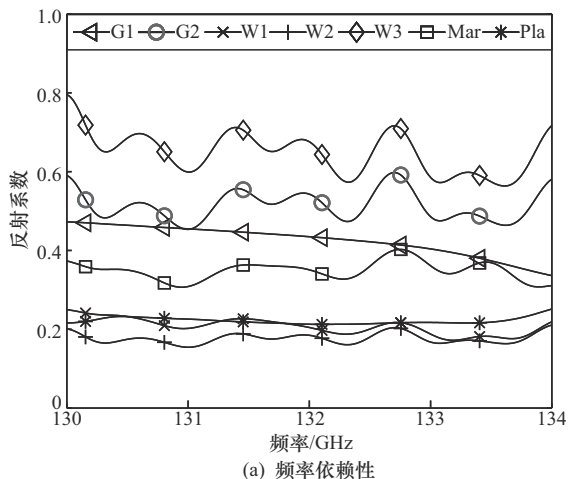


图 3 电磁波传播示意

测量透射系数时, 将收发天线放置在 MUT 两侧并保持对齐, 如图 3(b) 所示, 其中  $\theta_t$  表示透射



(a) 频率依赖性

角。测量时同样记录每块材料在不同入射角的  $S_{21}$  值, 记为  $S_{21,T}^{MUT}$ 。使用等距离视距传播时的  $S_{21}$  值作为参考, 记为  $S_{21,T}^{LoS}$ 。透射系数可以表示为

$$|T_{MUT}| = \left| \frac{S_{21,T}^{MUT}}{S_{21,T}^{LoS}} \right| \quad (6)$$

### 2.2 测量材料

本文选取 7 种室内典型材料, 包括 2 种不同厚度的玻璃、3 种不同结构的木板、大理石以及石膏, 详细参数如表 2 所示。MUT 厚度通过游标卡尺 5 次测量取平均得到。为了避免边缘效应产生的影响, 选用大尺寸 MUT。

表 2 MUT 尺寸数据

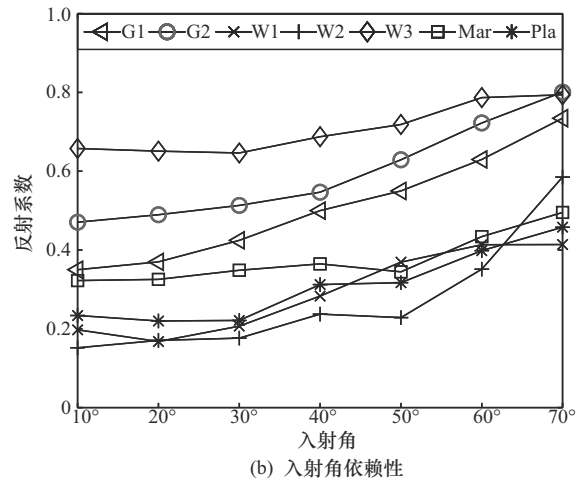
MUT	符号	长度/cm	宽度/cm	厚度/mm
玻璃 1	G1	100	100	4
玻璃 2	G2	100	100	10
木板 1(压缩木)	W1	121.5	80.7	16.8
木板 2(实木)	W2	121.5	80.7	14.4
木板 3(颗粒木)	W3	121.5	80.7	16.8
大理石	Mar	16.8	42	23.6
石膏	Pla	19.8	79	9.5

### 3 结果分析

本节对比研究了 130~134 GHz 范围内 7 种常见建筑材料的反射特性与透射特性, 重点表征了反射系数与透射系数的频率依赖性和入射角依赖性, 并与 282~290 GHz 频段测量结果进行对比。

#### 3.1 反射系数

为了研究反射系数的频率依赖性和入射角依赖性, 图 4 给出了 7 种 MUT 反射系数的测量值。



(b) 入射角依赖性

图 4 7 种 MUT 反射系数的测量值

由图4可以看出,颗粒木的反射系数最大,这是因为颗粒木表面被一层油漆覆盖,导致其镜面反射能量较强。实木板表面相对粗糙,其反射系数最小。图4(a)为反射系数频率依赖性测量结果。结果表明,玻璃2、颗粒木、实木、压缩木等较厚材料的反射系数出现了明显的小幅度周期性波动,这是由于电磁波在材料内部多次反射,使电磁波叠加产生震荡,这一现象被称为Fabry-Perot谐振,谐振特性主要影响因素为信号频率、材料相对介电常数和材料厚度<sup>[14]</sup>。此外,玻璃1的反射系数随频率增加呈现小幅度减小趋势,石膏的反射系数几乎不存在频率依赖性。图4(b)为反射系数入射角依赖性测量结果,7种材料反射系数均随入射角增加而增大,有较强的入射角依赖性,与垂直极化Fresnel反射系数相符。

图5对比了130~134 GHz频段与282~290 GHz频段<sup>[16]</sup>平均反射损耗。①玻璃1在130~134 GHz频段的平均反射损耗高于282~290 GHz频段,这是由文献[16]测量玻璃厚度不同导致;②2个频段下实木的反射损耗相差仅0.02 dB;③130~134 GHz频段下大理石、压缩木、颗粒木以及石膏的反射损耗低于282~290 GHz频段,这是由于大理石等材料表面相对粗糙,频率增加使得镜面反射能量减小,导致反射损耗增加。

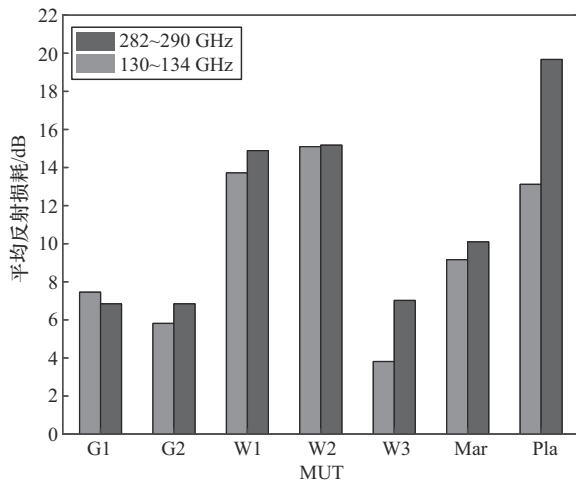
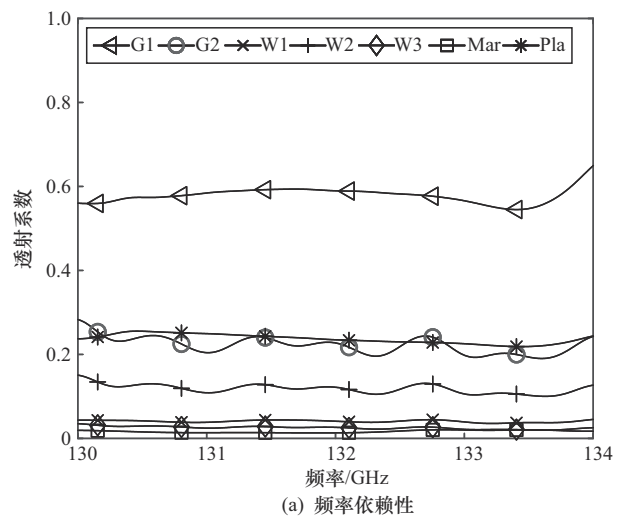


图5 130~134 GHz频段与282~290 GHz频段平均反射损耗

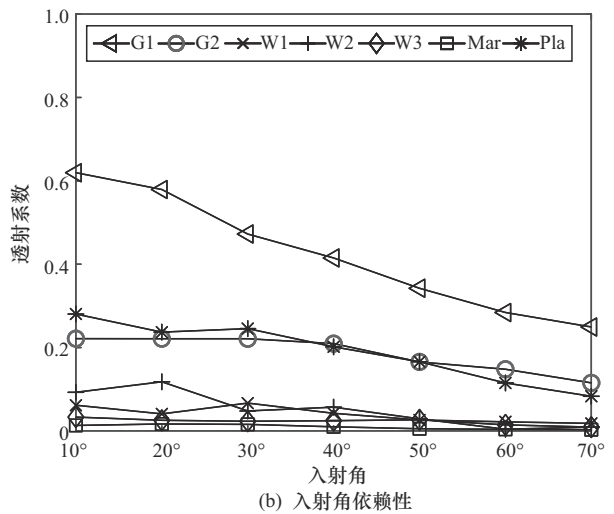
### 3.2 透射系数

为了研究透射系数频率依赖性与入射角依赖性,图6给出了7种MUT透射系数测量值。由图6可以看出,由于玻璃材料透光性好,且玻璃1较薄,透射系数明显高于其他材料。玻璃2的透射系数虽

然低于玻璃1的,但也高于其他材料的。图6(a)为透射系数频率依赖性测量结果,可见除玻璃2透射系数随频率有微小振荡,其他材料透射系数均没有表现出明显的频率依赖性。由于大理石与3种木板厚于其他材料,大部分电磁波能量被反射到原来介质或在材料中损耗,只有少量电磁波透过,表现出大理石与3种木板的透射系数较低,均在0.2以下。图6(b)为透射系数入射角依赖性测量结果,可见7种材料透射系数均随入射角的增加而减小,这与反射系数随入射角增加而增大对应,同时也与垂直极化Fresnel透射系数相符。



(a) 频率依赖性



(b) 入射角依赖性

图6 7种MUT透射系数测量值

### 4 电磁特性表征

本节根据反射系数与透射系数测量值,基于主次径剥离法提取了一阶反射系数,使用QPSO算法,提取了材料电磁参数。进一步参考Fresnel

模型，提出了频率-入射角联合的反射系数模型。

### 4.1 电磁参数反演

电磁波照射在材料表面时，会在材料内部发生多阶反射。毫米波与太赫兹频段，材料内部一阶反射和二阶反射占据主导地位，高阶反射通常较小，可以忽略不计<sup>[20]</sup>。材料反射系数可表示为<sup>[16]</sup>

$$|\Gamma_{\text{MUT}}| = R_{\text{mea}} + R_{\text{mea}} T^2 \beta e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}l + \phi\right)} \quad (7)$$

其中， $\lambda$ 表示电磁波波长， $l$ 与 $\phi$ 分别表示一阶反射路径与二阶反射路径距离差与相位差， $\beta$ 表示材料内部损耗， $R_{\text{mea}}$ 表示一阶反射系数。

首先，采用最小二乘法，通过式(7)从原始数据中提取 MUT 一阶反射系数；然后，采用 QPSO 算法提取材料电磁参数。定义材料 Fresnel 反射系数理论值为  $R_{\text{the}}$ 。通过计算  $R_{\text{mea}}$  与  $R_{\text{the}}$  之间的最小 RMSE 来确定电磁参数。考虑电磁波频率和入射角，RMSE 可以表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^N |R_{\text{mea}}(f_y, \theta_x) - R_{\text{the}}(f_y, \theta_x)|^2}{N}} \quad (8)$$

其中， $N$ 表示入射角个数， $y = 1, 2, \dots, M$ 。

为了降低介电常数计算复杂度，本文通过 QPSO 算法<sup>[21]</sup>来获得 MUT 在每个频点的相对介电常数。将 QPSO 算法的位置参数  $x_{p,1}$  设置为相对介电常数，范围为 [1,12]，采样间隔为 0.01。群体规模为搜索范围的整数倍，设置为 24。适应度函数设置为每个频点测量值与理论值之间的 RMSE。为了保证算法收敛，将迭代次数设置为 50 次。依据每个频点的最优相对介电常数计算电导率。当电磁波垂直入射并穿透材料时，材料透射系数可表示为

$$T_{\text{TE}} = |T_1 T_2 e^{-j2\pi\sqrt{\varepsilon}\Delta d}| \quad (9)$$

其中， $\Delta d$ 表示材料厚度， $\varepsilon$ 表示 MUT 复介电常数， $T_1$ 和 $T_2$ 分别表示垂直极化时，由空气入射介质与由介质入射空气时的 Fresnel 透射系数， $T_1$ 、 $T_2$ 、 $\varepsilon$ 的关系可表示为

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_r - j\frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \\ T_1 = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \\ T_2 = \frac{2\sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \end{cases} \quad (10)$$

其中， $\sigma$ 为材料电导率， $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 为空气介电常数。结合式(9)、式(10)，基于透射系数测量值与最优介电常数计算材料在各频点的最优电导率。表 3 以 132 GHz 为例，整理了 7 种材料电磁参数提取结果，其中，—表示其他文献未提及。根据表 3 与图 4 可以看出，材料反射系数越大，介电常数越大，表明材料相对介电常数直接影响电磁波反射系数。

表 3 132 GHz 电磁参数提取结果

MUT	相对介电常数		电导率	RMSE
	本文	其他文献		
G1	4.87	5.58@220 GHz <sup>[17]</sup>	0.80	0.021
G2	7.75	6.43@45 GHz <sup>[13]</sup>	2.09	0.020
W1	1.99	—	0.60	0.016
W2	1.72	1.60@170 GHz <sup>[15]</sup> 1.88@280 GHz <sup>[16]</sup>	1.95	0.012
W3	12.0	—	4.04	0.035
Mar	3.52	3.64@280 GHz <sup>[16]</sup>	1.25	0.023
Pla	2.08	1.30@280 GHz <sup>[16]</sup>	1.15	0.007

### 4.2 频率-入射角联合的反射系数模型

Fresnel 模型未涉及频率相关项，文献[11]提出的反射系数模型仅描述了反射系数角度依赖性，并未直观体现出反射系数频率依赖性。为此，本文提出了频率-入射角联合的反射系数模型。结合相对介电常数与电磁波频率的相关性，得到相对介电常数与频率之间的关系为

$$\varepsilon(f) = \sum_{a=1}^k A(a) \sin(B(a)f + C(a)) \quad (11)$$

其中， $k$ 为整数。经计算，当 $k=9$ 时介电常数近似值与测量值间的均方根误差已满足精度要求。 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为 $1 \times 9$ 的向量参数，由最小二乘法拟合得到。结合式(1)与式(11)，得到频率-入射角联合的反射系数模型。

$$\Gamma_{\perp}(f, \theta_i) = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon(f) - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon(f) - \sin^2 \theta_i}} \quad (12)$$

7 种材料反射系数频率依赖性与入射角依赖性实测与拟合结果如图 7 所示。模型参数拟合值与测量值之间的 RMSE 如表 4 所示。

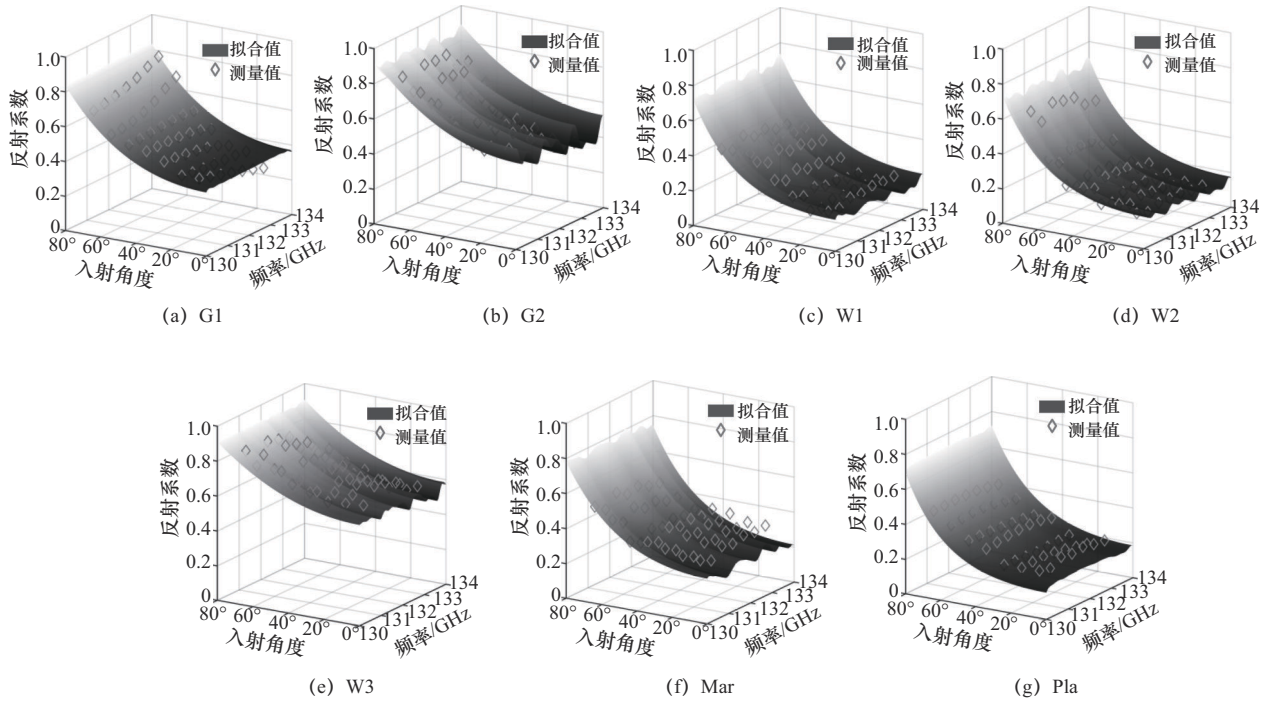


图7 7种材料反射系数频率依赖性与入射角依赖性实测与拟合结果

表4 模型参数拟合值与测量值之间的RMSE

MUT	A	B	C	RMSE
G1	[7.85,3.31,0.64,0.26,0.14,0.09,0.06,0.04,0.03]	[ $7.81 \times 10^{-10}$ , $1.56 \times 10^{-9}$ , $3.12 \times 10^{-9}$ , $4.68 \times 10^{-9}$ , $6.25 \times 10^{-9}$ , $7.81 \times 10^{-9}$ , $9.38 \times 10^{-9}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ , $1.25 \times 10^{-8}$ ]	[-0.97,-0.38,3.87,1.72,5.72,3.16,6.44,2.56,2.90]	0.038
G2	[12.31,4.20,1.94,1.94,1.54,0.49,0.73,0.32,0.19]	[ $7.01 \times 10^{-10}$ , $1.51 \times 10^{-9}$ , $4.64 \times 10^{-9}$ , $9.41 \times 10^{-9}$ , $3.09 \times 10^{-9}$ , $1.39 \times 10^{-8}$ , $6.20 \times 10^{-9}$ , $1.25 \times 10^{-8}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ ]	[9.71,5.30,7.68,3.41,7.73,17.42,13.79,8.44,-0.34]	0.030
W1	[3.25,1.39,0.33,0.25,0.08,0.03,0.04,0.03,0.02]	[ $7.79 \times 10^{-10}$ , $1.54 \times 10^{-9}$ , $3.11 \times 10^{-9}$ , $4.67 \times 10^{-9}$ , $9.38 \times 10^{-9}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ , $7.85 \times 10^{-9}$ , $1.25 \times 10^{-8}$ , $6.28 \times 10^{-9}$ ]	[-0.60,3.04,4.96,2.30,5.66,3.16,1.99,-1.44,5.44]	0.051
W2	[3.01,1.27,0.30,0.20,0.13,0.07,0.04,0.02,0.02]	[ $7.81 \times 10^{-10}$ , $1.56 \times 10^{-9}$ , $3.12 \times 10^{-9}$ , $4.68 \times 10^{-9}$ , $9.38 \times 10^{-9}$ , $6.25 \times 10^{-9}$ , $7.81 \times 10^{-9}$ , $1.41 \times 10^{-8}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ ]	[-1.01,-0.51,3.60,1.36,6.77,5.65,3.17,0.78,3.28]	0.042
W3	[22.34,9.55,2.31,1.70,1.22,0.80,0.56,0.39,0.37]	[ $7.82 \times 10^{-10}$ , $1.49 \times 10^{-9}$ , $3.07 \times 10^{-9}$ , $4.61 \times 10^{-9}$ , $9.416 \times 10^{-9}$ , $6.30 \times 10^{-9}$ , $1.42 \times 10^{-8}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ , $1.884 \times 10^{-8}$ ]	[-1.25,7.92,9.41,11.34,2.90,-0.65,-17.24,12.12,4.81]	0.056
Mar	[4.45,1.81,0.36,0.35,0.14,0.07,0.05,0.09,0.024]	[ $7.78 \times 10^{-10}$ , $1.53 \times 10^{-9}$ , $3.08 \times 10^{-9}$ , $4.60 \times 10^{-9}$ , $9.29 \times 10^{-9}$ , $7.87 \times 10^{-9}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ , $6.30 \times 10^{-9}$ , $1.25 \times 10^{-8}$ ]	[-0.58,3.02,9.33,12.03,18.82,-0.24,10.48,-4.90,12.76]	0.063
Pla	[3.46,1.44,0.25,0.12,0.04,0.03,0.02,0.01,0.01]	[ $7.67 \times 10^{-10}$ , $1.46 \times 10^{-9}$ , $3.06 \times 10^{-9}$ , $4.64 \times 10^{-9}$ , $6.22 \times 10^{-9}$ , $7.79 \times 10^{-9}$ , $9.36 \times 10^{-9}$ , $1.09 \times 10^{-8}$ , $1.25 \times 10^{-8}$ ]	[0.86,12.58,11.74,7.65,9.83,6.22,10.47,8.06,10.21]	0.039

从图7和表4可以看到，7种材料的反射系数测量值与拟合值几乎一致，它们之间RMSE均不超过0.07。其中，大理石测量值与拟合值偏差最大，RMSE为0.063，玻璃2的偏差最小，RMSE为0.030。表明该模型能较好地刻画反射系数频率依赖性与入射角依赖性，可用于预测本文实验测量

条件下任意频率与入射角的反射系数。

### 5 结束语

本文面向ISAC开展了太赫兹波反射、透射信道特性分析和典型建筑材料反射系数建模研究工作。首先，本文基于VNA搭建了反射、透射系数

测量平台,研究了 130~134 GHz 频段太赫兹信道反射、透射特性,涵盖了 7 种典型建筑材料,同时,对比分析了 282~290 GHz 频段的反射损耗特性。然后,利用 QPSO 算法优化了主次径剥离法,在反射系数原始数据中分离了一阶反射系数,提取了材料相对介电常数和电导率。最后,提出了频率-入射角联合的反射系数模型,该模型联合建模了电磁波频率与入射角,并交叉验证了模型的有效性。同时得出以下结论。

1) 除较厚材料反射系数随频率出现波动外,其他材料反射系数频率依赖性不明显。7 种材料反射系数均随入射角增加而增大,具有较强的入射角依赖性。透射系数没有明显频率依赖性,只存在一定入射角依赖性。并且大多数材料在 130~134 GHz 频段的反射损耗低于 282~290 GHz 频段的。

2) 材料相对介电常数直接影响电磁波反射系数。表现为相对介电常数越大,反射系数越大。

3) 本文提出的频率-入射角联合的反射系数模型拟合值与测量值间的 RMSE 小于 0.07,表明该模型能准确描述本文测量条件下任意频率与入射角的反射系数。

本文的研究成果补充了 130~134 GHz 频段材料传播系数数据库,丰富了电磁参数数据集,建立了适用于 130~134 GHz 的反射系数模型,这为太赫兹 ISAC 系统检测、识别、环境重构等功能提供了数据基础及模型参考。进而对于深入理解太赫兹波传播机理、建立精确的室内太赫兹 ISAC 信道模型具有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 中国信息通信研究院. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2021. China Academy of Information and Communications Technology. 6G overall vision and potential key technology white paper[R]. 2021.
- [2] 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 and Tutorials, 2022, 24(4): 1957-1996.
- [3] LI S, TANG P, TONG Y, et al. Measurement-based analysis and modeling of channel characteristics in an indoor-office scenario at 100 GHz[C]// Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-7.
- [4] GUAN K, LI G, KÜRNER T, et al. On millimeter wave and THz mobile radio channel for smart rail mobility[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(7): 5658-5674.
- [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. China Academy of Information and Communications Technology. Evaluation methods research report of 6G integrated sensing and communication [R]. 2023.
- [6] YI H, GUAN K, MATHIOPOULOS P T, et al. Full-wave simulation and scattering modeling for terahertz communications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2023, 17(4): 713-728.
- [7] HAN C, BICEN A O, AKYILDIZ I F. Multi-ray channel modeling and wideband characterization for wireless communications in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(5): 2402-2412.
- [8] PAN R, HE D, GUAN K, et al. Terahertz channel modeling based on scattering characterization[C]//Proceedings of the 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [9] DE BEELDE B, PLETS D, DESET C, et al. Material characterization and radio channel modeling at D-band frequencies[J]. IEEE Access, 2021, 9: 153528-153539.
- [10] SHEIKH F, ZANTAH Y, MABROUK I B, et al. Scattering and roughness analysis of indoor materials at frequencies from 750 GHz to 1.1 THz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7820-7829.
- [11] 唐盼, 林佳欣, 张建华, 等. 面向 6G 的太赫兹信道反射特性研究[J]. 通信学报, 2022, 43(5): 102-109. TANG P, LIN J X, ZHANG J H, et al. Research on reflection characteristics of the terahertz channel for 6G[J]. Journal on Communications, 2022, 43(5): 102-109.
- [12] CHANG Z, ZHANG J, TANG P, et al. Frequency-angle two-dimensional reflection coefficient modeling based on terahertz channel measurement[J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2023, 24(4): 626-632.
- [13] LUO J G, SHAO Y, ZHANG R, et al. Complex Permittivity estimation for construction materials based on PSO method[C]//Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1045-1046.
- [14] DEGLI-ESPOSTI V, ZOLI M, VITUCCI E M, et al. A method for the electromagnetic characterization of construction materials based on fabry-pérot resonance[J]. IEEE Access, 2017, 5: 24938-24943.
- [15] WANG M X, WANG Y Y, LI W P, et al. Reflection characteristics measurements of indoor wireless link in D-band[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6908.
- [16] WANG Y, LIU Y Y, LIAO X, et al. Complex permittivity extraction of building materials from transmission/reflection measurements at Sub-THz band[C]//Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1934-1939.
- [17] WANG Y, LIU Y Y, LIAO X, et al. Measured reflection and transmission properties of building materials for indoor THz communication[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(6): 1361-1365.
- [18] 谢处方, 饶克谨, 杨显清, 等. 电磁场与电磁波: 第 5 版[M]. 北京: 高

等教育出版社, 2019: 283-294.

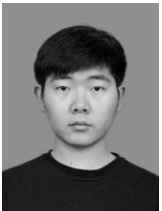
XIE C F, RAO K J, YANG X Q, et al. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Higher Education, 2019: 283-294.

- [19] AKHTER Z, AKHTAR M J. Free-space time domain position insensitive technique for simultaneous measurement of complex permittivity and thickness of lossy dielectric samples[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10): 2394-2405.
- [20] ZHANG J L, LIAO X, GLAZUNOV A A, et al. Two-ray reflection resolution algorithm for planar material electromagnetic property measurement at the millimeter-wave bands[J]. Radio Science, 2020, 55(3): 1-14.
- [21] LUO J G, SHAO Y, LIAO X, et al. Complex permittivity estimation for cloths based on QPSO method over (40 to 50) GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(1): 600-605.

#### [作者简介]



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、散射反射通信等。



林长溪 (2000-), 男, 山东德州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为散射反射通信。



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。



王洋 (1986-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为第六代移动通信技术、毫米波太赫兹信道测量与建模、涡旋电磁波、智能反射面等。



林峰 (1978-), 男, 山东烟台人, 重庆邮电大学高级工程师、硕士生导师, 主要研究方向为5G-V2X车联网与车路协同控制等。



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, 主要研究方向为无线通信、多媒体信息传输与处理等。