

面向 6G 的太赫兹信道反射特性研究

唐盼¹, 林佳欣¹, 张建华¹, 田磊¹, 常钊玮¹, 夏亮², 王启星²

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 中国移动研究院未来研究院, 北京 100053)

摘 要: 太赫兹信道反射特性对于认知、掌握太赫兹信道传播机理, 以及建立面向 6G 的高精度太赫兹信道模型至关重要。为此, 首先, 综述了太赫兹信道反射特性在理论建模和实测分析两方面的研究现状。接着, 针对 5 种常见建筑材料, 利用基于时域相关原理的太赫兹信道测量平台开展了 240~310 GHz 频率范围的反射系数测量, 并发现了反射系数依赖于电磁波的入射角。然后, 参考 Rayleigh 反射系数理论模型, 提出了入射角依赖的反射系数统计性模型, 该模型能准确刻画反射系数随角度的变化规律。最后, 展望了太赫兹信道反射特性的研究方向。

关键词: 6G; 太赫兹; 信道特性; 信道测量; 反射特性; 反射系数

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI:10.11959/j.issn.1000-436x.2022102

Research on reflection characteristics of the terahertz channel for 6G

TANG Pan¹, LIN Jiaxin¹, ZHANG Jianhua¹, TIAN Lei¹, CHANG Zhaowei¹, XIA Liang², WANG Qixing²

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Future Research Institute, China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: The reflection characteristics of the terahertz channel are crucial for understanding and mastering the propagation mechanism of the terahertz channel, which are also required for a high-precision terahertz channel model for 6G. Therefore, the research status of terahertz channel reflection characteristics in theoretical modeling and measurement analysis were first summarized. Then, the reflection coefficient measurement campaign in the frequency range of 240 GHz to 310 GHz for five kinds of common building materials was conducted by a time-domain correlation-based terahertz channel measurement platform. It was found that the reflection coefficients were related to the incident angle. Based on the Rayleigh reflection coefficient theoretical model, a statistical reflection coefficient model was further proposed as a function of incident angle. Generally, the proposed model could accurately describe the variation law of the reflection coefficient with angle. Finally, research directions of terahertz channel reflection characteristics were discussed.

Keywords: 6G, terahertz, channel characteristic, channel measurement, reflection characteristic, reflection coefficient

0 引言

随着 5G 在全球范围内的规模化部署, 各国研究机构和相关学者陆续开展了面向 6G 的前沿技术

研究。2021 年 6 月, 我国 IMT-2030 (6G) 推进组正式发布了《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书^[1], 提出了 6G 十大潜在关键技术, 其中包括太赫兹通信技术。太赫兹通信技术的主要优势在于可

收稿日期: 2021-10-30; 修回日期: 2022-01-16

通信作者: 林佳欣, linjx@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62031019, No.62101069); 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目 (No.61925102); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1805002); 北京邮电大学-中国移动研究院联合创新中心基金资助项目 (No.CMYJY-202000276)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62031019, No.62101069), The National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No.61925102), The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1805002), Beijing University of Posts and Telecommunications-China Mobile Research Institute Joint Innovation Center Item (No.CMYJY-202000276)

以为 Tbit/s 量级的峰值速率提供连续大带宽的频谱资源。例如，在 300 GHz 附近存在合适的大气传输窗口^[2]，可提供几十 GHz 带宽的频谱资源^[3]，利用这些频谱资源，采用常规的调制方式就可达到 Tbit/s 量级的理论数据传输速率^[4]。因此，太赫兹通信技术是支撑未来 6G 超高速数据传输最有前景的技术之一^[5]。此外，太赫兹波还具有厘米级定位的潜力和强抗干扰能力等^[6]。

太赫兹信道反射特性不仅对太赫兹信道的准确建模非常重要，而且对太赫兹通信技术优化与应用具有重要意义。一方面，信道研究是通信系统设计和优化的基础^[7]，准确的太赫兹信道模型有利于太赫兹通信技术的实际应用与部署^[8]。可靠有效的太赫兹信道模型需要能较好地表征信号的传播规律，但太赫兹波与低频电磁波的传播特性存在差异，这带来了新的反射和散射特性^[9]，如物理环境中常见材料的表面在太赫兹频率下不能再视为光滑的^[9-10]，因此需要研究适用于太赫兹频段的信道模型。目前，太赫兹信道建模仍处于初期阶段，特别是对反射系数的建模研究还不够充分，但确定性和一些混合太赫兹信道建模方法需要材料信息。另一方面，对于太赫兹通信技术的优化与应用，利用材料表面的反射特性有助于提高非视距 (NLoS, non-line-of-sight) 场景中太赫兹通信链路的稳健性^[11]，并且反射特性与通信、传感、成像、定位、可重构智能表面等技术有关，太赫兹通信技术与这些技术结合也是重要的应用方向。

本文聚焦于基于实测的太赫兹信道反射特性研究，综述了反射系数的研究现状。给出了 240~310 GHz 的 5 种常见建筑材料的反射系数的实测结果及分析。根据理论模型和实测结果提出了入射角依赖的反射系数统计模型。最后，对太赫兹信道的反射特性在材料类型、测量方法与平台、反射特性建模 3 个方面的研究进行了展望。

1 太赫兹信道反射特性的研究现状

1.1 太赫兹反射系数理论模型

电磁波传播到 2 个介质的交界时，如果入射介质表面足够光滑，则反射分量可视为仅有反射角等于入射角的镜面分量，此情况被称为电磁波全反射；如果入射介质表面相对入射电磁波的波长粗糙，则除镜面方向上有反射分量之外，入射电磁波还以散射分量的形式传播到其他方向。通常情况下，介质表面视为相对光滑可采用基于简单射线理

论的 Rayleigh 准则判定，判定式为^[12]

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (1)$$

其中， h 为介质表面的相对高度， λ 为波长， θ_i 为入射角。由 Rayleigh 准则可知，波长越短，介质表面越容易被视为粗糙。太赫兹波入射在大多数介质表面时，反射分量为镜面反射径和散射径的组合^[13]，多表现为镜面反射径被多条散射径包围^[14]，如图 1 所示。

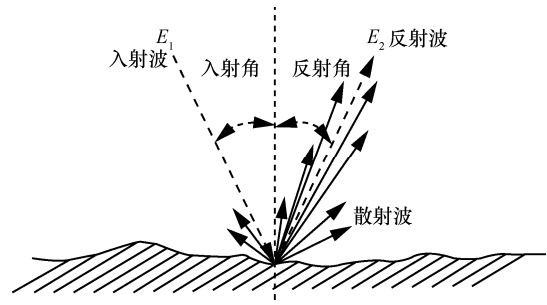


图 1 太赫兹波在大多数介质表面反射的反射分量示意

反射系数定义为镜面反射波与入射波的电场值之比，记镜面反射波和入射波电场大小分别为 E_2 和 E_1 ，则反射系数 Γ 可表示为^[12]

$$\Gamma = \frac{E_2}{E_1} \quad (2)$$

Fresnel 反射模型可得到均匀平面波入射至理想光滑均匀的无限平面的反射系数。任意方向极化的平面电磁波可以分解为垂直极化波分量和水平极化波分量。如果用横电 (TE, transverse-electric) 波和横磁 (TM, transverse-magnetic) 波分别表示垂直和水平极化波，则垂直极化的 Fresnel 反射系数 Γ_{TE} 和水平极化的 Fresnel 反射系数 Γ_{TM} 可以表示为^[12]

$$\Gamma_{TE}(f, \theta_i) = \frac{Z \cos \theta_i - Z_0 \cos \theta_t}{Z \cos \theta_i + Z_0 \cos \theta_t} \quad (3)$$

$$\Gamma_{TM}(f, \theta_i) = \frac{Z \cos \theta_t - Z_0 \cos \theta_i}{Z \cos \theta_t + Z_0 \cos \theta_i} \quad (4)$$

其中，折射角 $\theta_t = \arcsin \frac{Z \sin \theta_i}{Z_0}$ ，自由空间阻抗

$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ ， Z 为反射材料的波阻抗，即

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \left(n^2 - \left(\frac{\alpha c_0}{4\pi f} \right)^2 - j \frac{2n\alpha c_0}{4\pi f} \right)}} \quad (5)$$

其中， f 为入射波频率， μ_0 、 ε_0 和 c_0 分别为自由空

间磁导率、介电常数和速度， n 为光滑表面的复折射率， α 为入射表面材料的吸收系数。

由式(3)~式(5)可知，光滑表面的 Fresnel 反射系数取决于入射波的偏振类型、频率、入射角以及反射材料的电特性。 Γ_{TE} 和 Γ_{TM} 的幅值随入射角的变化关系如图 2 所示。由图 2 可知， Γ_{TE} 的幅值随入射角的增加而增加， Γ_{TM} 的幅值随入射角的增加呈先减小至 0 再增加至 1 的趋势。

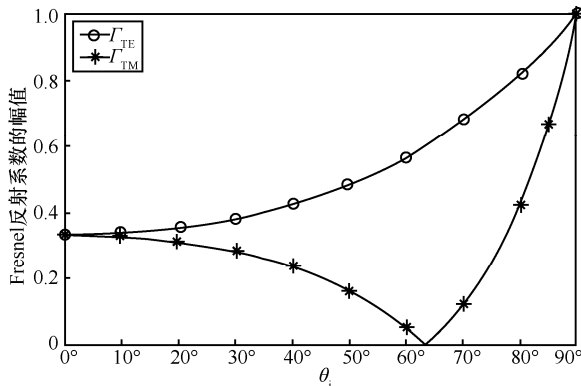


图 2 Γ_{TE} 和 Γ_{TM} 的幅值随入射角的变化关系

对于粗糙表面的反射系数，通常使用基于基尔霍夫近似的 Rayleigh 模型进行修正。在该方法中，修正反射系数 Γ' 用粗糙度因子 ρ 引入表面粗糙带来的影响， σ_h 为入射粗糙表面高度 h 的标准差。Rayleigh 模型可表示为^[12]

$$\Gamma' = \rho \Gamma \tag{6}$$

$$\rho = e^{-\frac{g}{2}} \tag{7}$$

$$g = \left(4\pi\sigma_h \frac{\cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \tag{8}$$

文献[15-16]在太赫兹频段下对比了反射系数幅值的实测值与 Rayleigh 模型，结果表明，Rayleigh 模型适用于太赫兹频段下常见表面的反射系数。

1.2 太赫兹反射系数实测现状

太赫兹反射系数的测量平台主要包括太赫兹时域光谱 (THz-TDS, terahertz time domain spectroscopy) 系统、矢量网络分析仪 (VNA, vector network analyzer) 及基于相关的测量平台^[6]。THz-TDS 利用极短的脉冲激光产生宽频谱信号，信

号频率覆盖 100 GHz~10 THz，带宽可达几 THz。但 THz-TDS 的动态范围较低，一般小于 50 dB，而且，由于 THz-TDS 系统输出功率有限，以及结构中的分光器件尺寸较大，THz-TDS 在用于信道测量时测量距离被限制在几米以内^[6]。四端口 VNA 常用于太赫兹频段的信道测量，其产生信号的频率约为 100~350 GHz，常在太赫兹的低频段，可达带宽低于 THz-TDS 系统的最大带宽，但也可达到 110 GHz。VNA 的动态范围和测量距离相比 THz-TDS 均有提升，动态范围约为 60~90 dB，测量距离可达几十米，可使用光纤无线电扩展距离至 100 m。基于相关的测量平台的适用频率范围为 100~300 GHz，略小于 VNA，可达带宽一般仅有几 GHz。基于相关的测量平台的动态范围有明显优势，可达 145 dB，测量距离同样可达几十米，但是远距离测量时需要考虑系统的同步。表 1 总结了上述 3 种太赫兹信道测量平台的主要参数^[17]。

表 2 总结了太赫兹频段下反射系数的实测结果。由表 2 可知，实测平台基于上述 3 种测量平台，反射系数的测量频率达 1.1 THz，入射角范围为 0°~80°，入射波包含 TE 波和 TM 波。被测样本为室内常见单层和多层建筑材料，以单层材料为主。

具体地，文献[11]进行了频率为 70~350 GHz、入射角为 20°~75°的反射系数实测研究，并发现了反射系数存在一定的频率依赖性。文献[15]在文献[11]的基础上将测量频率拓展至 1 THz，并将实测结果与 Fresnel 模型和 Rayleigh 模型进行比较，结果表明，Rayleigh 模型相比 Fresnel 模型可以更好地描述实测结果。文献[18]研究了分层材料的反射特性。文献[19]对比分析了分层材料和单层材料厚度对反射系数的影响，观察到分层材料和部分单层材料的反射系数随频率和入射角波动的现象。文献[16]研究了 750 GHz~1.1 THz 下木板、砖、塑料的反射特性，结果表明 Rayleigh 模型与实测结果具有较好的一致性。文献[20]使用 VNA 在相对远距离上进行反射测量，并考虑了喇叭天线波束宽度的影响。文献[21]在 3 个频点（分别为 28 GHz、73 GHz 和 140 GHz）开展了 4 个入射角（分别为 10°、30°、60°和 80°）

表 1

3 种典型太赫兹信道测量平台的参数对比

测量平台	适用频率	可达带宽	动态范围	测量距离
THz-TDS	100 GHz~10 THz	极高 (几 THz)	低 (小于 50 dB)	短 (几米)
VNA	约 100~350 GHz	高 (110 GHz)	高 (60~90 dB)	中等 (几十米, 利用光纤无线电可扩展至 100 m)
基于相关的测量平台	约 100~300 GHz	低 (几 GHz)	高 (145 dB)	长 (几十米)

表 2 太赫兹频段下反射系数的实测结果

参考文献	测量平台	频率范围/GHz	入射角范围	入射波极化类型	被测样本
文献[11]	THz-TDS	70~350	20°~75°	TE、TM	玻璃、石膏、木板
文献[15]	THz-TDS	100~1 000	25°~70°	TE、TM	石膏混凝土、嵌纹墙纸覆盖的纸板
文献[18]	THz-TDS	100~500	25°~60°	TE、TM	双层玻璃、白色油漆覆盖的石膏
文献[19]	VNA	110~135	20°~60°	TE、TM	双层玻璃、石膏、混凝土、中纤板
文献[16]	VNA	750~1 100	0°	TE/TM	木板、砖、塑料
文献[20]	VNA	270~330	—	—	玻璃、纸、木板、塑料
文献[21]	基于相关的测量平台	28~140	10°~80°	TE	干墙
文献[22]	基于相关的测量平台	253	10°~80°	TE、TM	木板、混凝土、金属

注：—表示文献中未提及

下干墙的反射系数测量。文献[22]对比了 253 GHz 下窄带和宽带测量对反射系数的影响，结果表明利用宽带入射信号和窄带入射信号测量得到的反射系数没有显著差异。

综上所述，基于实测的太赫兹信道反射特性研究已经在频率、入射角、材料等多个维度开展，但在各维度上研究的充分性尚有不足，且缺乏基于实测的太赫兹信道反射系数模型。

2 太赫兹信道反射特性实测研究

本节介绍了 240~310 GHz 的 5 种常见建筑材料的反射系数测量结果。测量采用基于相关的测量平台，利用视距 (LoS, line-of-sight) 参考的双测量法得到材料的反射系数，对比分析了实测结果与理论 Rayleigh 模型，提出了基于实测的入射角依赖的反射系数统计模型。

2.1 测量配置

本文测量采用的基于相关的测量平台结构如图 3 所示。在发射端，矢量信号发生器生成已知序列调制后的中频信号。信号发生器生成本振信号，并经频率扩展变频至所需的射频频段。射频信号通过喇叭天线发射。在接收端，接收信号经过与发射端相对称的转换，利用已知序列的相关特性，可以得到信道的冲激响应，并由信道冲激响应得到一系列的信道参数。测量平台的详细信息可参考文献[23]。

测量参数设置如表 3 所示。选择 240~310 GHz 频率范围以 10 GHz 为间隔的 8 个频率为测量的中心频率，测量带宽为 2 GHz，采用 TE 波入射，入射角为 10°~80°以 10°为间隔的 8 个角度，待测材料样本为玻璃、瓷砖、木板、石膏和铝合金。测量方法采用 LoS 参考的双测量，包括收发端直射的 LoS 测量和待测材料样本的反射测量，如图 4 所示。

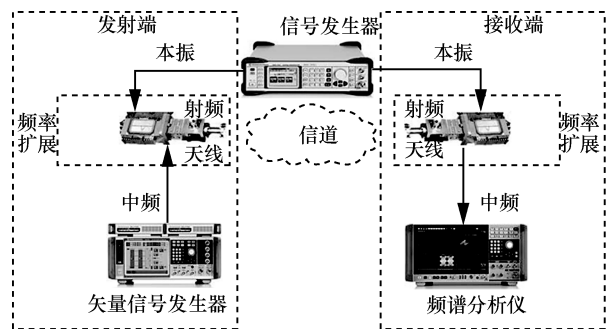


图 3 基于相关的测量平台结构

表 3 测量参数设置

参数	数值
最小中心频率/GHz	240
最大中心频率/GHz	310
中心频率间隔/GHz	10
带宽/GHz	2
天线极化类型 (波极化类型)	垂直极化 (TE)
最小入射角	10°
最大入射角	80°
入射角间隔	10°

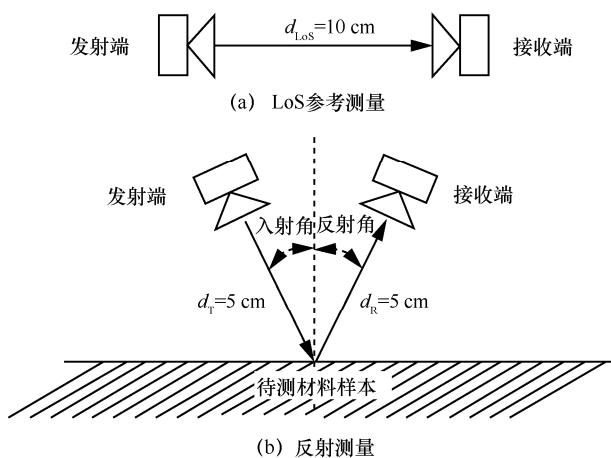


图 4 LoS 参考的双测量方法

假定 2 种测量设置下采用的设备相同，LoS 参考的双测量法的原理如式(9)~式(11)^[24]所示。

$$P_{R,LoS} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d_{LoS})^2} \quad (9)$$

$$P_{R,NLoS} = |\Gamma|^2 \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d_{NLoS})^2} \quad (10)$$

$$|\Gamma| = \frac{d_{NLoS}}{d_{LoS}} \sqrt{\frac{P_{R,NLoS}}{P_{R,LoS}}} \quad (11)$$

假设电磁波在自由空间传播，近似认为待测材料样本有完美的电导率和无限的反射边界，则 LoS 设置下的接收功率 $P_{R,LoS}$ 和反射设置下的接收功率 $P_{R,NLoS}$ 分别如式(9)和式(10)所示，其中， P_T 为发射功率， G_T 为发射端天线增益， G_R 为接收端天线增益， λ 为入射电磁波波长。可由式(9)和式(10)得出

式(11)，已知收发端 LoS 径和镜面反射径距离，以及 2 种测量设置下的接收功率，可得材料样本的反射系数幅值，即反射电场与入射电场的幅值之比。其中， d_{LoS} 为收发端的 LoS 距离， d_{NLoS} 为收发端的光学反射径的传播距离，本节测量中 $d_{LoS} = 10 \text{ cm}$ ， $d_{NLoS} = d_T + d_R = 10 \text{ cm}$ 。

2.2 结果与分析

图 5 为 5 种被测材料样本在不同入射角下的反射系数的实测与模型对比结果，虚线是用于趋势对比的 Rayleigh 模型曲线。由图 5 可知反射系数随角度、频率和材料类型的变化情况。

实测结果与 Rayleigh 模型的参考曲线随入射角变化的趋势基本一致。但是，反射系数的测量值与 Rayleigh 模型仍存在一定差异。木板和石膏的波动较小，玻璃、瓷砖和铝合金的波动较大，其中铝合金的波动最大，可达 0.4。这种差异可能是由散射

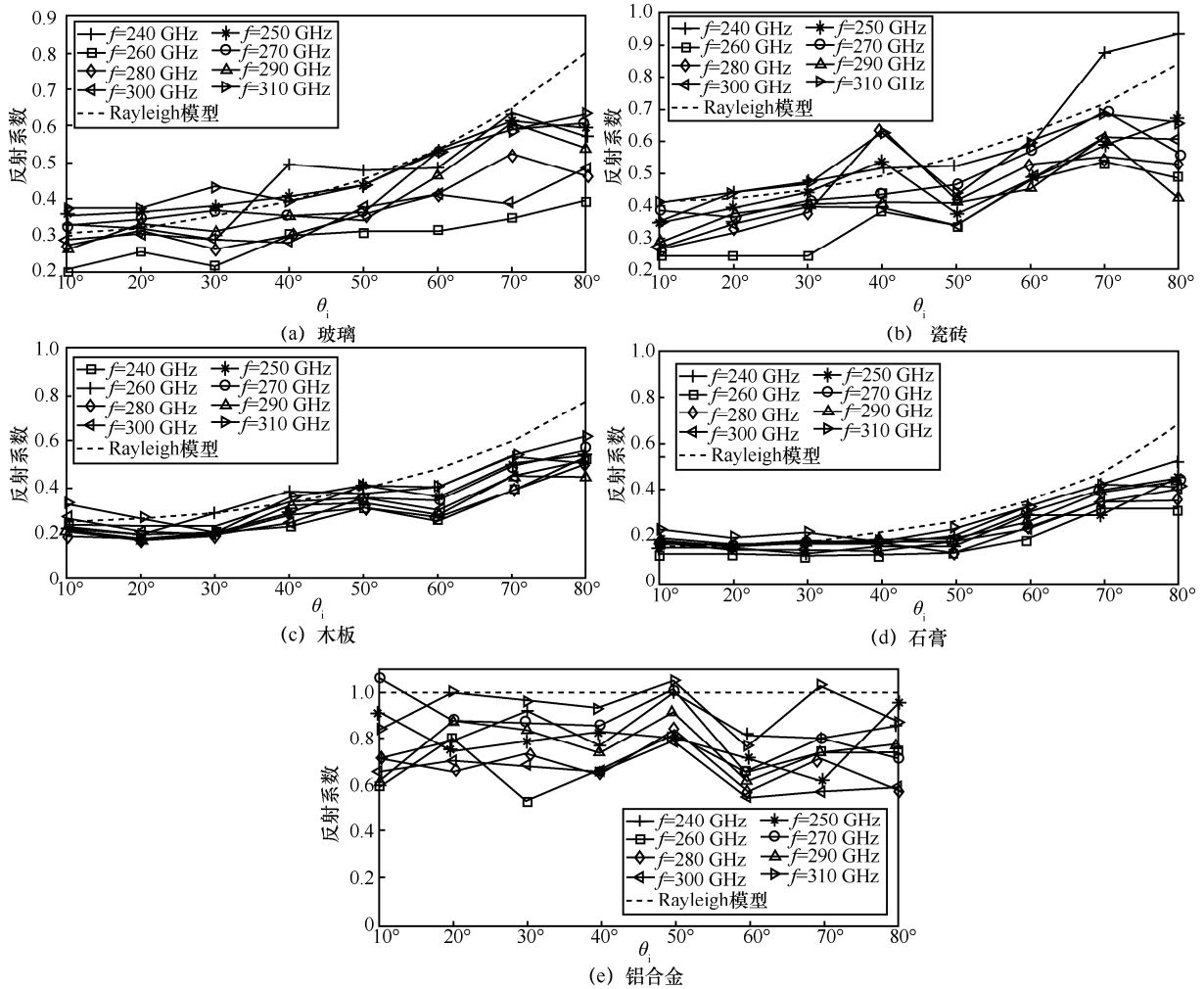


图 5 5 种被测材料样本在不同入射角下的反射系数的实测与模型对比结果

特性和测量方法引起的。

另一方面，除铝合金外，可以观察到反射系数有随频率增加而增加的一般趋势。此外，这一趋势在不同材料下的表现不同。石膏和木板的反射系数最稳定，在固定入射角下随频率变化波动较小，均在 0.3 以内。玻璃、瓷砖和铝合金的反射系数随频率变化波动较大。当入射角为 80° 时，瓷砖在 240 GHz 和 310 GHz 的反射系数之差可达 0.5。

310 GHz 下 5 种材料在不同入射角下的反射系数如图 6 所示。由图 6 可知，相同条件下，铝合金这类金属材料比非金属材料（如瓷砖、玻璃、木板和石膏）具有更大的反射系数。其次，非金属材料的反射系数随入射角的增加而增加，而金属材料反射系数的角度依赖性相对较弱。

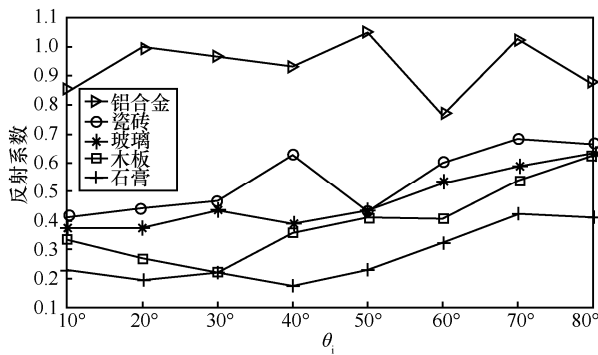


图 6 310 GHz 下 5 种材料在不同入射角下的反射系数

2.3 入射角-反射系数拟合模型

Fresnel 模型需要材料的电参数，Rayleigh 模型需要材料的电参数及表面粗糙度参数。然而，在太赫兹频段中材料的电参数和表面粗糙度参数数据

仍不完备。基于理论模型和实测结果，本文提出了拟合的反射系数模型。基于式(3)、式(5)~式(8)，将与入射角无关的项视作常数，结合部分无关项大于零的性质，得到 TE 波入射情况下对于特定材料和频率的入射角-反射系数拟合模型，如式(12)所示。

$$\Gamma = e^{-10^a \cos^2 \theta_i} \frac{\cos \theta_i - \sqrt{b - \sin^2 \theta_i - j10^c}}{\cos \theta_i + \sqrt{b - \sin^2 \theta_i - j10^c}} \quad (12)$$

其中， a 、 b 、 c 为拟合参数，具体数值由最小二乘法拟合得到。表 4 给出了与实测材料和频率对应的模型拟合参数值，以及实测与拟合的均方根误差 (RMSE, root-mean-square error)。

图 7 以 280 GHz 为例，给出了反射系数的实测与拟合结果。其中，铝合金的实测与拟合结果的平均偏差最大，RMSE 达到了 0.201；木板的 RMSE 最小，为 0.099。由图 7 可知，该统计模型能较好地刻画反射系数与入射角的关系，可用于预测本文实验测量条件下任意入射角的反射系数模值。

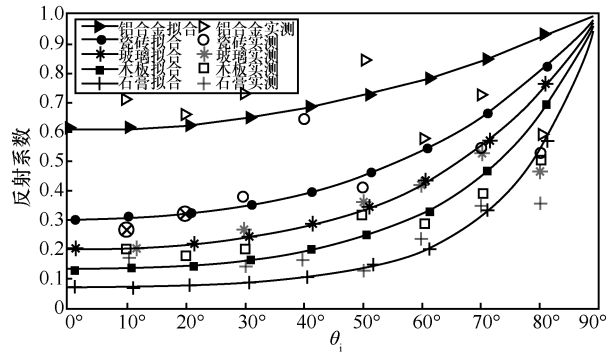


图 7 280 GHz 下反射系数的实测与拟合结果

表 4 太赫兹信道反射系数模型拟合参数结果

频率/ GHz	玻璃				瓷砖				木板				石膏				铝合金			
	a	b	c	RMSE	a	b	c	RMSE	a	b	c	RMSE	a	b	c	RMSE	a	b	c	RMSE
240	-9.506	3.277	-1.407	0.119	-6.504	5.877	-4.134	0.083	-6.576	2.291	-3.126	0.117	-7.249	1.543	-3.888	0.070	-7.949	61.730	-0.748	0.120
250	-9.100	3.410	-2.389	0.101	-8.693	3.761	-4.457	0.113	-7.494	2.076	-3.868	0.096	-7.352	1.363	-4.012	0.080	-6.638	44.190	-0.423	0.164
260	-9.771	1.665	-4.170	0.153	-6.079	2.308	-4.088	0.124	-7.613	1.691	-4.064	0.096	-7.277	1.206	-4.385	0.097	-9.674	14.930	-1.904	0.148
270	-8.786	3.007	-4.711	0.094	-8.397	3.948	-4.433	0.115	-8.116	2.092	-3.531	0.090	-7.443	1.471	-4.083	0.087	-9.964	170.300	-2.651	0.204
280	-8.694	2.228	-4.147	0.132	-9.639	3.421	-2.180	0.174	-7.677	1.690	-3.777	0.099	-7.651	1.305	-4.171	0.109	-7.212	16.110	-1.507	0.201
290	-9.183	2.606	-3.527	0.111	-8.743	2.980	-4.215	0.173	-6.619	1.745	-3.574	0.129	-8.401	1.445	-4.369	0.104	-9.556	32.500	-2.309	0.176
300	-8.288	2.124	-3.995	0.145	-8.670	2.943	-2.013	0.099	-7.883	1.826	-3.699	0.105	-7.595	1.347	-4.141	0.095	-7.408	12.970	-2.098	0.222
310	-8.588	3.563	-2.119	0.097	-8.168	5.228	-1.558	0.117	-6.537	2.481	-2.885	0.088	-7.828	1.578	-3.888	0.120	-13.250	536.500	-2.114	0.125

3 太赫兹信道反射特性研究展望

太赫兹信道反射特性是太赫兹波传播的基础特性之一,对于太赫兹信道的精确建模和太赫兹通信技术的应用都有重要的意义。未来可以在以下 3 个方面开展进一步的研究。

1) 在材料类型方向,需要增加实测材料类型,并建立较完整的材料电参数和表面参数数据库。新材料如一些电介质、半导体和人造结构材料在太赫兹频段下具有特殊的声子共振现象,在光谱中表现为光谱吸收峰^[25],可以在增加室内常见建筑材料研究的基础上,增加多维结构乃至更复杂结构材料和其他新材料的特性研究。

2) 在测量方法与平台方面,可以对各种测量方法,以及以基于相关的测量平台为代表的宽带测量平台进行进一步探究,量化不同测量方法和平台的精度。传统的金属参考双测量方法对材料位置敏感,微米级别的未对准也会引起严重误差^[26],精确的测量需要对样品和参考镜的相对位置误差进行校正。对于 THz-TDS 的反射系数测量,可以考虑无参考的椭偏法和衰减全反射法。基于相关的测量平台是常用的信道宽带特性的时域测量平台,在研究单频点反射特性的同时,考虑宽带信号对反射特性的影响,并进行相应的理论和实测建模。

3) 在反射特性建模方面,进一步刻画反射特性在材料类型、入射角、频率等多方面的依赖性。一方面,扩展单个维度的测量范围和精度,提高太赫兹频段下反射特性模型的精确度。另一方面,研究太赫兹反射特性在多个维度上的联合依赖性,提出多维联合反射特性建模方法,获得更具普适性的太赫兹反射特性模型。

4 结束语

本文基于 240~310 GHz 常见建筑材料的反射信道测量,对太赫兹频段常见建筑材料的反射特性进行了研究。实测结果表明,TE 波入射时,反射系数的材料类型依赖性较强。非金属材料的反射系数随入射角和入射频率的增加而增加,而铝合金的反射系数与入射角和频率的关系不明显。本文提出了入射角依赖的反射系数统计模型,并给出了模型参数。该反射系数模型可以较好地刻画反射系数随入射角的变化规律。此外,展望了在材料类型、测量方法与平台、反

射特性建模方面的太赫兹信道反射特性研究工作。本文的研究成果对理解太赫兹波传播机理、建立精确太赫兹信道模型具有一定的参考意义。

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] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(6): 24-39.
- [3] TATARIA H, SHAFI M, MOLISCH A F, et al. 6G wireless systems: vision, requirements, challenges, insights, and opportunities[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(7): 1166-1199.
- [4] 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.
- [5] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [6] RAPPAPORT T S, XING Y C, KANHERE O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. IEEE Access, 2019, 7: 78729-78757.
- [7] 张建华, 唐盼, 姜涛, 等. 5G 信道建模研究的进展与展望[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 163-178.
ZHANG J H, TANG P, JIANG T, et al. Research on channel modeling for 5G: current status and future outlook[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(2): 163-178.
- [8] 谢莎, 李浩然, 李玲香, 等. 太赫兹通信技术综述[J]. 通信学报, 2020, 41(5): 168-186.
XIE S, LI H R, LI L X, et al. Survey of terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2020, 41(5): 168-186.
- [9] 田浩宇, 唐盼, 张建华. 面向 6G 的太赫兹信道特性与建模研究的综述[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 29-35, 43.
TIAN H Y, TANG P, ZHANG J H. A review of terahertz channel characteristics and modeling for 6G[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 29-35, 43.
- [10] 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.
- [11] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Terahertz characterisation of building materials[J]. Electronics Letters, 2005, 41(18): 1002.
- [12] KATZIN M. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[J]. Proceedings of the IEEE, 1964, 52(11): 1389-1390.
- [13] KOKKONIEMI J, PETROV V, MOLTCHANOV D, et al. Wideband

- terahertz band reflection and diffuse scattering measurements for beyond 5G indoor wireless networks[C]//Proceedings of 22th European Wireless Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [14] PRIEBE S, JACOB M, JANSEN C, et al. Non-specular scattering modeling for THz propagation simulations[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [15] 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.
- [16] SHEIKH F, ZANTAH Y, BEN M I, 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.
- [17] LYU Y, KYÖSTI P, FAN W. Sub-terahertz channel sounder: review and future challenges[J]. China Communications, 2022, 19(11): 1-17.
- [18] JANSEN C, PIESIEWICZ R, MITTLEMAN D, et al. The impact of reflections from stratified building materials on the wave propagation in future indoor terahertz communication systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(5): 1413-1419.
- [19] JACOB M, KÜRNER T, GEISE R, et al. Reflection and transmission properties of building materials in D-band for modeling future mm-wave communication systems[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [20] SHEIKH F, ZANTAH Y, BATRA A, et al. Far-distance VNA-based measurements of indoor materials at 300 GHz[C]//Proceedings of 2021 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 64.
- [21] XING Y C, KANHERE O, JU S H, et al. Indoor wireless channel properties at millimeter wave and sub-terahertz frequencies[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [22] KIM M D, KIM K W, KWON H K, et al. Experimental reflection characteristics of 253 GHz in a small closed-room[C]//Proceedings of 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 689-690.
- [23] TANG P, ZHANG J H, TIAN H Y, et al. Channel measurement and path loss modeling from 220 GHz to 330 GHz for 6G wireless communications[J]. China Communications, 2021, 18(5): 19-32.
- [24] LANDRON O, FEUERSTEIN M J, RAPPAPORT T S. A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(3): 341-351.
- [25] MØLSTER K M. THz time domain spectroscopy of materials in reflection and transmission[D]. Trondheim: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2017.
- [26] NASHIMA S, MORIKAWA O, TAKATA K, et al. Measurement of optical properties of highly doped silicon by terahertz time domain

reflection spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(24): 3923-3925.

[作者简介]



唐盼(1991-)，男，湖南衡阳人，博士，北京邮电大学特聘副研究员，主要研究方向为毫米波、太赫兹和可见光信道测量与建模。



林佳欣(1999-)，女，甘肃兰州人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为太赫兹信道建模。



张建华(1976-)，女，河北迁安人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为5G和6G传输技术、智能信道建模、毫米波和太赫兹信道建模、信道模拟器等。



田磊(1986-)，男，河北宁晋人，博士，北京邮电大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为无线宽带信道和MIMO信道测量方法、信道参数估计、信道特性建模以及无线信道建模。



常钊玮(1998-)，男，河北邯郸人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为太赫兹信道测量与建模。

夏亮(1982-)，男，山东潍坊人，中国移动研究院高级工程师，主要研究方向为毫米波、太赫兹和可见光通信。

王启星(1980-)，男，广东惠州人，博士，中国移动研究院高级工程师，主要研究方向为5G和6G先进技术。