

文章编号: 2095-4980(2024)05-0516-07

## 太赫兹信号在几种塑料材料遮挡下的透射衰减

王心怡, 卞诚真, 李韦萍, 张尧, 余建军

(复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200433)

**摘要:** 随着物联网时代的到来, 人们对于更高带宽和更快速率的需求日益增加。太赫兹频段的引入为这一问题提供了一种新的解决方案。太赫兹信号具有穿透力强、对非金属材料具有较好的穿透性以及较高的分辨率等特点, 在通信和成像领域具有巨大的潜力。本文基于光子辅助原理, 搭建了利用光子外差拍频的方式产生 386.2 GHz 和 438.4 GHz 两个频率的太赫兹信号的太赫兹传输系统, 并测量了太赫兹信号在聚 4-甲基戊烯(TPX)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)这 4 种常见的塑料材质遮挡下的穿透损耗, 得到了在室内环境下这些材料的衰减特性, 且将实验结果与比尔吸收定律拟合。从实验结果发现 5 mm 厚的 PP 板和 PE 板对于太赫兹信号的衰减在 1 dB 以下, 很薄的 PP 板和 PE 板对 386.2 GHz 和 438.4 GHz 两个频率的太赫兹信号的遮挡作用很微弱; 实验所选频段的太赫兹信号几乎无法穿透 15 mm 厚的 PMMA 板。太赫兹信号在塑料材质中的透射衰减特性的探索与研究对毫米波通信系统中合适的天线材料的选择具有参考价值, 在实际应用中起着重要的指导作用。

**关键词:** 太赫兹信号; 光子外差拍频; 穿透损耗; 衰减特性

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023274

## Transmission attenuation of terahertz signal blocked by several plastic materials

WANG Xinyi, BIAN Chengzhen, LI Weiping, ZHANG Yao, YU Jianjun  
(School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** With the advent of the Internet of Things era, people's demand for higher bandwidth and faster speed is increasing. The introduction of the terahertz frequency band provides a new solution to this problem. Terahertz signals bear the characteristics of strong penetrating power, good penetrability to non-metallic materials, and high resolution, and show great potential in the fields of communication and imaging. Based on the principle of photon assistance, a terahertz transmission system that uses photon heterodyne beat frequency to generate terahertz signals at two frequencies of 386.2 GHz and 438.4 GHz is built. And the penetration of terahertz signals is measured under the obstruction of four common plastic materials: poly4-methylpentene(TPX), polyethylene(PE), polypropylene(PP) and polymethyl methacrylate(PMMA). The attenuation characteristics of these materials in indoor environments are obtained, and the experimental results are fitted with Beer's absorption law. From the experimental results, it is found that the attenuation of terahertz signals by 5 mm thick PP board and PE board is below 1 dB, and the blocking effect of thin PP board and PE board on terahertz signals at 386.2 GHz and 438.4 GHz is very weak; terahertz signals in the frequency band selected for the experiment can hardly penetrate the 15 mm thick PMMA plate. The exploration and research on the transmission attenuation characteristics of terahertz signals in plastic materials has reference value for the selection of suitable antenna materials in millimeter-wave communication systems, and plays an important guiding role in practical applications.

**Keywords:** terahertz signal; photon heterodyne beat frequency; penetration loss; attenuation characteristics

移动端用户爆发式的增长是 21 世纪的巨大挑战之一。无线网络在向公民提供数据量方面面临巨大压力, 传

收稿日期: 2023-09-21; 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61835002; 61935005; 62305067; 62375219; 62331004)

统方法已不能够满足人类的流量需求。在一个高度互联的世界里，预计数字信息密度将达到每秒几兆比特每平方公里。高清(4/8 K)视频流、VR游戏、增强现实、自动驾驶汽车、实时远程手术等新方向，需要以低延迟时间传输大量数据<sup>[1]</sup>。自无线电通信的早期以来，传输链路的容量一直在稳步增加，但如今，电磁频谱在大多数已经分配的频率上已经饱和。在100 GHz以上，即太赫兹范围，正在探索新的频率资源<sup>[2-3]</sup>。国内外行业趋势表明，太赫兹波是通信发展的下一阶段，但需要大量的时间和研发成本来解决太赫兹波的传播特性，才能作为更通用的无线网络进行部署网络解决方案。

到2022年，电话超过移动数据流量的90%<sup>[4]</sup>，5G占移动总流量的12%以上。尽管光纤通信已经达到了非常快的传输速度，载波频率从未停止过增加。载波频率不断增加，波长不断减小是无线通信的发展趋势，频率更高、波长更短的太赫兹通信有望成为未来移动通信的主导方向<sup>[5]</sup>。从未来通信网络的角度来看，到2025年至2030年，无线传输系统将被要求使用太赫兹频率范围<sup>[6-7]</sup>，以增加每个基站之间的网络容量。

太赫兹波的频率为0.1~10 THz，波长为3 mm~30  $\mu\text{m}$ ，波段介于微波与远红外光之间<sup>[8]</sup>。与微波相比，太赫兹波频率更高，能够实现微波不能满足的高速无线传输，且波束更窄，方向性更好<sup>[9]</sup>；与红外光相比，THz波的工作场景更加不受限，它能穿透沙尘烟雾，在大风或沙尘天气正常工作；THz波的光子能量约为可见光的1/40，利用太赫兹波做信息载体能量效率高<sup>[10]</sup>。电磁频谱的最后一个“自由”区域，太赫兹范围已经开始显示出在非常高速的无线通信系统中的潜力。

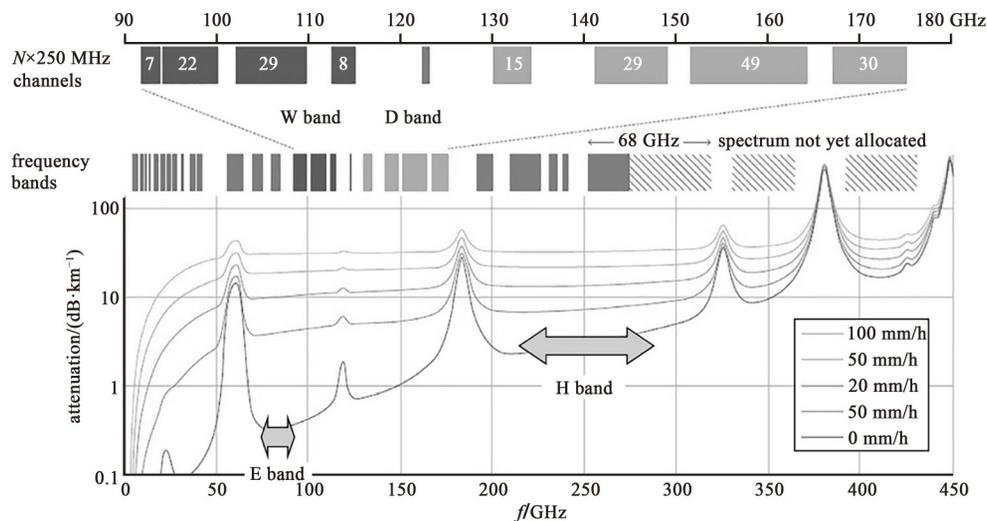


Fig.1 Frequency bands and atmospheric attenuation before 450 GHz

图1 450 GHz之前的频带和大气衰减

图1展示了450 GHz之前的大气衰减<sup>[11]</sup>。太赫兹波在自由空间中的传输损耗主要是由大气吸收造成。大气的吸收带主要由两种成分组成：水蒸气( $\text{H}_2\text{O}$ )和氧气( $\text{O}_2$ )。这对特定频率的损耗产生了强烈影响。因此，为了限制未来太赫兹无线电通信系统中失真/损耗对这些频率范围的影响，未来的信道必须使用没有强吸收线的带宽，从图1来看，本次的实验频率386.2 GHz和438.4 GHz位于380~440 GHz频带，看起来是有希望的。存在于空气中的液体或固体颗粒对波的扩散也导致衰减。这在太赫兹范围内比在微波范围内更重要，然而，对于亚毫米大小的颗粒(雾、灰尘等)，太赫兹范围内的扩散比在可见光或红外范围内低得多。此外，由于空气密度的波动，大气折射率的波动会产生闪烁效应，它在太赫兹范围内麻烦小得多<sup>[12-13]</sup>。目前，71~76 GHz和81~86 GHz通信频带(“E”频带)已经开通，商业设备现在存在于这些频率范围内<sup>[14-16]</sup>。E波段之外是高达110 GHz的“W”波段，然后是高达170 GHz的“D”波段。D波段之外是“H”波段或“300 GHz”波段，目前没有超过275 GHz的频率分配。在某种程度上，与太赫兹频率为通信应用创造的新机会有关，国际机构化IEEE<sup>[17]</sup>于2017提出了第一个标准，即IEEE 802.15.3d。尽管这些标准仍在讨论中，但有一个明确的目标，即在探索不足的范围内，为300 GHz频带内的这些新无线通信提供一个框架<sup>[15]</sup>。

但现有的高频信号透射研究主要集中在100 GHz以下的毫米波频段，如芬兰阿尔托大学基于60 GHz矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)在15、28、60 GHz和E频段(81~86 GHz)完成多点会议室测量，得到扩展的Salen-Valenzuela(SV)信道模型<sup>[18]</sup>。爱立信利用VNA测量系统参与了METIS、mmMAGIC和5GCM项目，完成了以下几项测量：a) 在室内60 GHz传输人体遮挡实验中<sup>[19]</sup>，发现人体遮挡损耗也可以高达10~20 dB；b) 通过室内多频中远距离路径损耗测量，观察到绕射是毫米波室内非视距传输的主要路径<sup>[20]</sup>；c) 城市街区非视距条件下

的多频。测量发现信号路径损耗对频率的依赖性不大,说明室外非视距情况下的信号主要来自其他反射路径<sup>[17]</sup>。d) 最后测量了多波段实测穿墙损耗。在太赫兹波段透射研究还有待补充,在之前的工作中,对 D 波段信号在植物、木板、玻璃和石板等典型建筑材料遮挡下的穿透损耗进行了研究<sup>[21]</sup>。本文将继续探索更高频率的太赫兹信号的穿透损耗。4 种非极性材料被选择用于这项研究,因为它们太赫兹频率下具有相对良好的传输性能,能够获得高质量的数据<sup>[22]</sup>,因此常常被用作毫米波通信系统中的天线材料。研究它们对于太赫兹信号的穿透损耗有助于之后太赫兹通信系统中天线材料的选择。

## 1 实验装置与过程

太赫兹信号透射实验系统原理框图如图 2 所示,基于光子辅助原理<sup>[23-24]</sup>,采用光子外差拍频的方式产生实验所需要的太赫兹信号。激光器的频率会随时间和温度而改变,采用光子外差拍频产生太赫兹波的方案会导致频率测量不准确,但本实验中涉及的太赫兹波带宽很宽,由于系统限制而产生的信号偏移对本次实验结果的影响很微弱,同时也会采取一些积极手段尽量减少激光器频率的变化。在发射端,手动设置激光器参数,使 2 个独立的激光器 ECL1 和激光器 ECL2 分别产生波长为 1 550 nm 和 1 553.52 nm 的 2 束光信号,先将 2 路光信号进入光耦合器(Optical Coupler, OC)进行耦合,随后 2 路光信号进入光电二极管(Photo-Diode, PD)。利用具有平方律特性的 PD,2 路光信号之间进行拍频,产生光频率之差为 438.4 GHz 的太赫兹信号。最后,将 438.4 GHz 的太赫兹信号(功率为 -20 dBm)通过发射端的喇叭天线发送至自由空间。这种方案结构简单,成本不高,能灵活产生所需的太赫兹频率<sup>[25-26]</sup>。在无线传输链路中,采用 2 个聚四氟乙烯(PTFE)透镜(Lens1 和 Lens2)对传输的无线信号进行聚集,其中 Lens1 放置在无线发送端天线的前方。438.4 GHz 的太赫兹信号经过 1.85 m 的自由空间传输之后,被接收端的另一个透镜(Lens2)和天线捕获。然后通过混频器在模拟域中的下变频得到中频(IF)信号,混频器由 18.64 GHz 的射频源经过 24 倍频后驱动。最后,将放大后的中频信号进行模数转换,并由实时数字示波器(oscilloscope, OSC)进行采样保存和频谱分析。

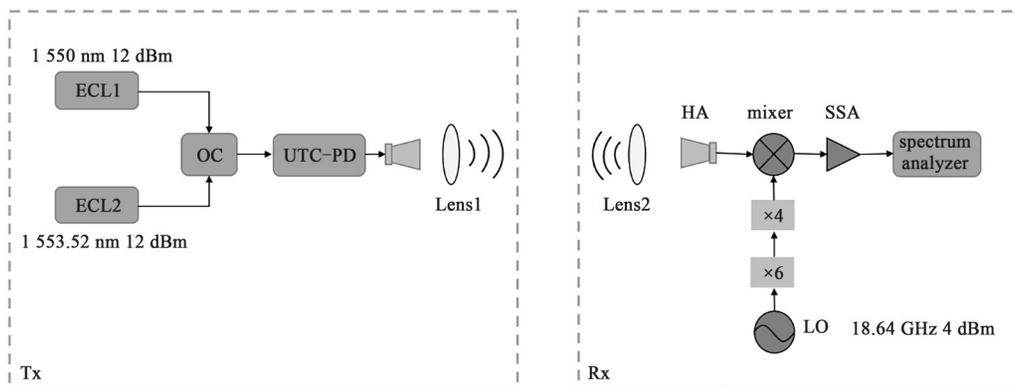


Fig.2 Diagram of 438.4 GHz terahertz signal penetration experimental system

图2 438.4 GHz 的太赫兹信号穿透实验系统原理框图

本次实验只测量 2 个特定频点的太赫兹信号穿透所选材料的信号衰减,因此在发射端手动改变激光器参数,将 2 个激光器的波长分别调整为 1 550 nm 和 1 553.1 nm,其他参数保持不变。由此产生了频率为 386.2 GHz 的信号。在接收端,驱动混频器的射频源的参数也需做出相应的调整,将射频源调整为 18.61 GHz,功率由 4 dBm 调整为 0 dBm。系统的其他部分保持不变,对应的系统原理框图如图 3 所示。未来工作将聚焦于更多频段的信号透射衰减测量,届时可以利用自动化程序更改发射端激光器的波长参数以及接收端射频源的对应参数,以提高整体实验的效率。

由于激光器的频率随时间和温度而变化,实验场景维持在一个恒定的实验条件,同时每次实验时长都维持在系统稳定运行的时间区间中。此次实验在室内环境下进行测量,实地测量场景如图 4 所示,在复旦大学江湾校区交叉二号楼的实验室内进行,实验室空调常年运行以保持室温在 26 °C 左右。收发端天线位置高为 1 m,收发端之间相距 1.85 m,角度为水平校准,用激光笔进行校准,保证天线对齐。将接收端固定不动,首先在接收端之间不放置任何遮挡物,小幅度调整接收端透镜 Lens1 的位置,使接收端实时数字示波器得到最佳结果,测出此时无任何遮挡情况下接收到的信号功率,将其作为基准。接着在直径为 10 cm 的 Lens1 和 Lens2 中间人为放置遮挡物,不断小幅度调整遮挡物的位置使功率损失达到最小,从而完成校准。由于不同厚度的材料是由相同的材料叠加在一起得到的,因此在测量太赫兹信号穿透每个厚度的信号衰减时,将材料排列组合,测量出所有组合

的结果取平均值作为该厚度的测量结果，从而减小随机误差。即当测量厚度为一块材料的透射衰减结果时，分别测量出 3 块相同的材质的透射衰减结果，继而取平均值。最后将穿透不同遮挡物所接收到的信号功率与基准相减即为遮挡物阻挡产生的衰减。为比较不同遮挡物的透射结果，人为更换遮挡物从而得到不同的透射损耗结果。太赫兹信号透射实验照片如图 4 所示。左侧为整个太赫兹信号透射实验系统，右上为发射端，右下为接收端。

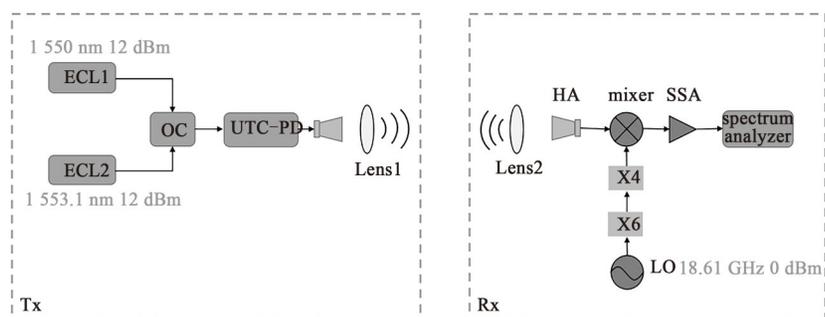


Fig.3 Diagram of 386.2 GHz terahertz signal penetration experimental system  
图 3 386.2 GHz 的太赫兹信号穿透实验系统原理框图

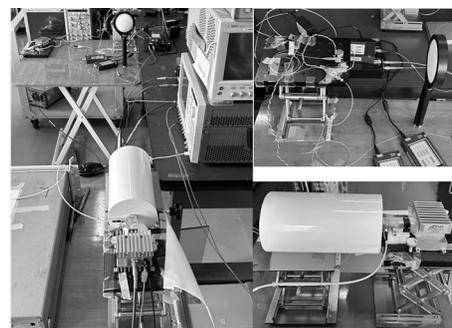


Fig.4 Photos of experimental scenes  
图 4 实验场景的照片

遮挡物选择了 TPX、PE、PP 和 PMMA 这 4 种常见的塑料材质。4 种材料的分子结构如图 5 所示。实验所用塑料遮挡物从网上购买，共购买 1 块 TPX 板、2 块 PE 板、3 块 PP 板、3 块 PMMA 板，4 种材料的尺寸如表 1 所示。

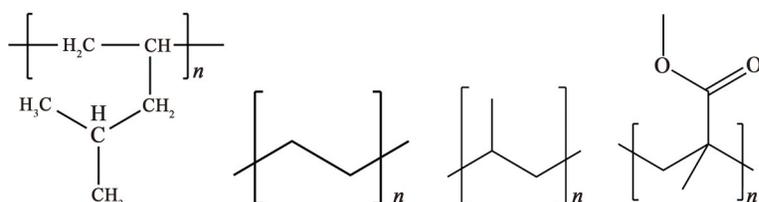


Fig.5 Molecular structure diagram of four plastics(TPX、PE、PP、PMMA)  
图 5 4 种塑料的分子结构图(从左到右依次为:TPX、PE、PP、PMMA)

表 1 塑料遮挡物的规格

Table1 Specifications of plastic coverings

type	size
TPX	10 mm×400 mm×400 mm
PE	7 mm×200 mm×300 mm
PP	5 mm×100 mm×100 mm
PMMA	5 mm×100 mm×100 mm

TPX 为一种高结晶透明塑料，是所有塑料中最轻的；PE 为常用的太赫兹透光材料之一；PP 具有良好的加工性，用途很广；PMMA 是一种高分子聚合物，又称为亚克力或有机玻璃，具有高透明度、低价格、易于机械加工等优点，是平常经常使用的玻璃替代材料，主要用于建筑采光体、透明屋顶、棚顶、电话亭、楼梯和房间墙壁护板等方面。由于具有较好的透明性、耐磨耗性、低加工成本等优点，塑料已成为人们日常生活和仪器系统中不可或缺的组成部分，这 4 种塑料材质为毫米波通信系统中天线的常用材料，这也是实验中选择其作为实验遮挡物的原因。测量太赫兹信号在塑料材质遮挡下的穿透特性，对未来更加快速、更大容量的网络布局有着现实意义。

## 2 实验结果与分析

图 6 为实验测得的不同材质的塑料遮挡物对 438.4 GHz 太赫兹信号近距离传输损耗的影响。由图可以看出，遮挡物对太赫兹信号传输的衰减与遮挡物的厚度呈正相关趋势，遮挡物越厚，信号衰减越严重。同时，PP 板对 438.4 GHz 的太赫兹信号的遮挡损耗是 4 种所测材料中最小的。438.4 GHz 的太赫兹信号传输时，穿过 5 mm 厚的 PP 板损耗在 1 dB 以下；10 mm 厚的 PP 板损耗在 2 dB 左右；15 mm 厚的 PP 板损耗在 3.5 dB 左右，信号衰减与遮挡 PP 板厚度可能成正比。实验中 PE 板对 438.4 GHz 的太赫兹信号的遮挡损耗与 PP 板相似。438.4 GHz 的太赫兹信号传输时，穿过 7 mm 厚的 PE 板损耗在 1 dB 左右；14 mm 厚的 PE 板损耗在 4 dB 左右，信号衰减与遮挡 PE 板厚度正相关。438.4 GHz 的太赫兹信号穿过 10 mm 厚的 TPX 板的损耗大概为 11 dB 左右；穿过 10 mm 厚的 PMMA 板的损耗高达 24 dB；438.4 GHz 的太赫兹信号几乎不能穿透 15 mm 厚的 PMMA 板。

由实验结果可以看出，在不同成分的塑料材料的遮挡下，438.4 GHz 太赫兹信号的衰减程度不同，太赫兹信号的透射衰减与遮挡物的材质有关。衰减最少的是 PP 材质的塑料，其次是 PE 材质，接着是 TPX 材质，衰减最多的是 PMMA 材质的塑料。随着遮挡物厚度的增加，太赫兹信号的衰减也越来越大。太赫兹信号的衰减与遮挡物的厚度正相关，且由折线图可以看出，438.4 GHz 信号的衰减与遮挡物的厚度几乎成线性关系。

图 7 为实验测得的不同材质的塑料遮挡物对 386.2 GHz 的太赫兹信号近距离传输损耗的影响。由图可以看出, 4 种塑料材质对 386.2 GHz 太赫兹信号的衰减效果与 438.4 GHz 太赫兹信号的衰减效果接近。同样衰减最少的是 PP 材质的塑料, 其次是 PE 材质, 接着是 TPX 材质, 衰减最多的是 PMMA 材质的塑料。随着遮挡物厚度的增加, 信号的衰减也越来越大。THz 信号的衰减与遮挡物的厚度正相关, 且由折线图可以看出, 386.2 GHz 太赫兹信号的衰减与遮挡物的厚度大致成线性相关。在 386.2 GHz 的频率下, PP 材质和 PE 材质的塑料对太赫兹信号的衰减效果几乎一致。

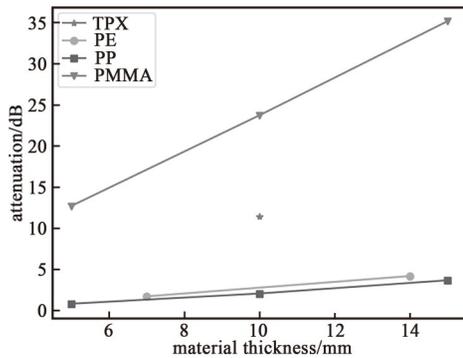


Fig.6 Relationship between plastic thickness and short-range transmission loss of terahertz signals at 438.4 GHz

图 6 塑料厚度与 438.4 GHz 的太赫兹信号近距离传输损耗的关系

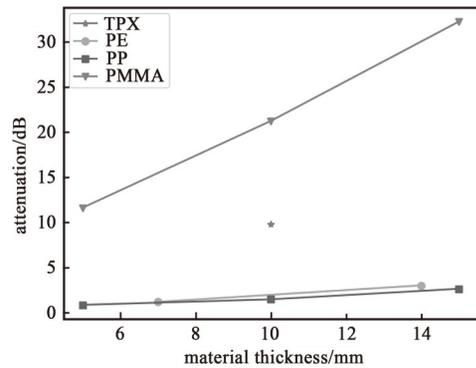


Fig.7 Relationship between plastic thickness and short-range transmission loss of terahertz signals at 386.2 GHz

图 7 塑料厚度与 386.2 GHz 的太赫兹信号近距离传输损耗的关系

为更加直观地显示本次实验结果, 引入比尔定律:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

式中:  $I$  为穿透塑料遮挡物后的太赫兹信号强度;  $I_0$  为未穿透塑料遮挡物前的太赫兹信号强度;  $d$  为塑料遮挡物的厚度;  $\mu$  为比尔公式的吸收系数。采用所得的实验数据拟合比尔公式, 找出各个材料的吸收系数。其中要注意的是, 记录的实验数据中太赫兹信号的强度信息采用对数单位分贝, 为便于拟合, 将对数分贝值转换为线性尺度后再进行拟合, 最终得到的各类遮挡物的吸收系数如图 8 所示。

这些吸收系数反映了各遮挡物对太赫兹波的吸收能力, 即反映出太赫兹波在如上各种材料的遮挡物下的穿透能力。结果表明, 太赫兹信号对不同材料遮挡物的穿透能力存在显著差异。4 种材质的遮挡物在 386.2 GHz 和 438.4 GHz 两个频点的吸收系数变化曲线趋势一致, 相差不大。可见在 386.2 GHz~438.4 GHz 频率范围内, 信号频率的变化对这 4 种塑料材质的遮挡物的透射衰减变化影响不大。其中 PMMA 材料在 2 个频率下均展现出最高的吸收系数, 表明其对太赫兹波的遮挡能力最强, 即太赫兹信号在 PMMA 材质的穿透能力最弱。相比之下, PP 和 PE 的吸收系数较低, 表明太赫兹信号对这两种材质的遮挡物的穿透能力较强。需要注意的是, 这些结果是基于本次实验的特定数据集进行拟合得出的, 可能受实验条件和测量精确度的影响。实际应用中, 还需考虑更多因素, 如波长、材料的具体成分和结构等。

### 3 结论

本文讨论了 386.2 GHz 和 438.4 GHz 两个频段的太赫兹信号被 TPX、PE、PP 和 PMMA 这 4 种常见的塑料材质屏蔽时的穿透损耗, 以及室内环境下的遮挡测量实验。实验结果表明, 在给定的实验条件下, 5 mm 厚的 PMMA 板的遮挡对 386.2 GHz 和 438.4 GHz 两个频段的太赫兹信号的平均传输衰减约为 12 dB, 随着 PMMA 板厚度的增加, 信号的衰减急剧增加。实验中, 当 PMMA 板厚度增加到 15 mm 时, 接收端几乎无法接收到太赫兹信号。由此可见, 较厚的 PMMA 板或许可用来制作一些需要屏蔽太赫兹信号的仪器或装置。对于 PP 板和 PE 板, 5 mm 厚的 PP 板和 PE 板对于太赫兹信号的衰减在 1 dB 以下, 很薄的 PP 板和 PE 板对 386.2 GHz 和 438.4 GHz 两个频点的

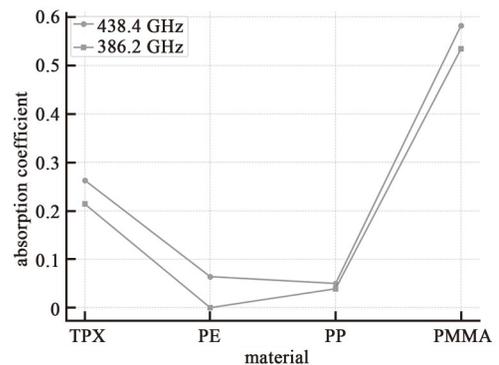


Fig.8 Absorption coefficients of various materials at different terahertz frequencies

图 8 不同太赫兹频率下各遮挡物的吸收系数

太赫兹信号几乎没有屏蔽作用。在即将到来的万物互联的物联网时代，塑料作为日常生活中随处可见的材料，较薄的 PP 板和 PE 板可被大量应用。在通信领域，太赫兹信号的高频率和较低能量使其能够在高带宽数据传输和物联网通信方面发挥重要作用。通过太赫兹信号的透射，可以实现对障碍物的穿透通信，为室内定位和通信提供全新的解决方案。太赫兹信号在塑料材质中的透射衰减特性的探索与研究为在室内通信系统中选择合适的塑料材料提供了参考，在实际应用中起着重要的指导作用。但由于实验室的客观条件限制，在 300 GHz 以上的频段，目前只能测量出信号穿透过遮挡物后的强度信息，无法测量其相位信息、折射率等，材料的这些特性往往对通信系统中天线材料的选择具有重要的价值。在未来的工作中，将探索更多的太赫兹频点和更多材料的遮挡传输损耗以及相位信息变化。

#### 参考文献：

- [1] 姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009,36(9):2213-2233. (YAO Jianquan,CHI Nan, YANG Pengfei, et al. Terahertz communication technology research and its prospect[J]. China Laser, 2009,36(9):2213-2233.) doi:10.3788/CJL20093609.2213.
- [2] LI X Y, YU J J, CHANG G K. Photonics-aided millimeter-wave technologies for extreme mobile broadband communications in 5G[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020,38(2):366-378. doi:10.1109/JLT.2019.2935137.
- [3] YU Jianjun, LI Xinying, ZHOU Wen. Tutorial: broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication[J]. APL Photonics, 2018,3(11):111101. doi:10.1063/1.5042364.
- [4] CISCO. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2017-2022[EB/OL]. [2023-09-21]. <https://s3.amazonaws.com/media.mediapost.com/uploads/CiscoForecast.pdf>.
- [5] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931-937.) doi:10.11805/TKYDA201806.0931.
- [6] WANG Can, YU Jianjun, LI Xinying, et al. Fiber-THz-Fiber link for THz signal transmission[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2):1-6. doi:10.1109/JPHOT.2018.2809433.
- [7] YU Jianjun, ZHOU Wen. Optimization of lens layout for THz signal free-space delivery[J]. Optics Communications, 2018(410): 443-446. doi:10.1016/j.optcom.2017.10.060.
- [8] 张教,童伟东,朱敏,等. 太赫兹无线和有线融合通信技术的研究与展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(1):22-29. (ZHANG Jiao, TONG Weidong, ZHU Min, et al. Research and prospect of terahertz wireless and wired fusion communication technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(1):22-29.) doi:10.11805/TKYDA 2021430.
- [9] 李纪舟,蒋文涛. 太赫兹波通信技术研究现状及展望[J]. 通信技术, 2014,47(4):348-353. (LI Jizhou, JIANG Wentao. Terahertz communication technology research status and prospects[J]. Communications Technology, 2014,47(4):348-353.) doi:10.3969/j. issn.1002-0802.2014.04.002.
- [10] 顾立,谭智勇,曹俊诚. 太赫兹通信技术研究进展[J]. 物理, 2013,42(10):695-707. (GU Li, TAN Zhiyong, CAO Juncheng. Terahertz communication technology review[J]. Physics, 2013,42(10):695-707.) doi:10.7693/wl20131003.
- [11] MA Jianjun, VORRIUS F, LAMB L, et al. Experimental comparison of terahertz and infrared signaling in laboratory-controlled rain[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2015,36(9):856-865. doi:10.1007/s10762-015-0183-3.
- [12] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016,10(6):371-379. doi:10.1038/nphoton.2016.65.
- [13] SU Ke, MOELLER L, BARAT R B, et al. Experimental comparison of performance degradation from terahertz and infrared wireless links in fog[J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2012,29(2):179-184. doi: 10.1364/JOSAA.29.000179.
- [14] EDSTAM J, HANSRYD J, CARPENTER S, et al. Microwave backhaul beyond 100 GHz[J]. Ericsson Technology Review, 2017(2): 1-15.
- [15] DUCOURNAU G, NAGATSUMA T. Wireless communications in the THz range[J]. Fundamentals of Terahertz Devices and Applications, 2021:479-510.
- [16] HADAR M. Smart-city E-band communication network for opportunistic weather sensing[D]. Tel Aviv: Tel Aviv University, 2020.
- [17] IEEE. IEEE standard for high data rate wireless multi-media networks—amendment 2: 100 Gb/s wireless switched point-to-point physical layer: IEEE Std 802.15.3d-2017[S]. 2017.

- [18] GUSTAFSON C, HANEDA K, WYNE S, et al. On mm-wave multipath clustering and channel modeling[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(3): 1445–1455. doi:10.1109/TAP.2013.2295836.
- [19] IIDOWU-BISMARCK B, IDACHABA F E, ATAYERO A A. Large-scale parameter modelling for millimeter-wave multiple-input multiple-output channel in 5G ultra-dense network[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2022, 26(2): 794–807. doi:10.11591/ijeecs.v26.i2.pp794-807.
- [20] GUPTA S, SNIGDH I. A review on parameters that impact IoT application—an experimental evaluation[C]// Microelectronics, Communication Systems, Machine Learning and Internet of Things. Singapore: Springer, 2022: 203–213. doi:10.1007/978-981-19-1906-0\_19.
- [21] WANG Xinyi, LI Weiping, WANG Mingxu, et al. Research on penetration loss of D-band millimeter wave for typical materials[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7666. doi:10.3390/s22197666.
- [22] 王鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1185–1188. (WANG He, ZHAO Guozhong. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1185–1188.) doi: 10.3788/gzxb.20103907.1185.
- [23] 余建军, 周雯, 王心怡, 等. 光子辅助的宽带太赫兹通信技术[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 11–23. (YU Jianjun, ZHOU Wen, WANG Xinyi, et al. Photonics-aided broadband terahertz communication technology[J]. Journal on Communications, 2022, 43(1): 11–23.) doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2022012.
- [24] 余建军. 宽带太赫兹通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020. (YU Jianjun. Broadband terahertz communication technologies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.)
- [25] YU Jianjun, WANG Yanyi, DING Junjie, et al. Broadband photon-assisted terahertz communication and sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3332–3349. doi:10.1109/JLT.2023.3252821.
- [26] YU Jianjun. Photonics-assisted millimeter-wave wireless communication[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(6): 1–17. doi:10.1109/JQE.2017.2765742.

#### 作者简介:

王心怡(1997–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信和毫米波通信方面的研究和应用. email: 21210720236@m.fudan.edu.cn.

卞诚真(1997–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为D波段毫米波通信的研究和应用.

李韦萍(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信和光载无线方面的研究和应用.

张尧(1999–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信中的数字信号处理的研究和应用.

余建军(1968–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速光纤通信技术、毫米波和太赫兹波通信技术.