

# 带电介质板对电磁波的衰减特性研究

张超,孔晓玉,郑丹丹

(河北太行计量检测有限公司,河北 石家庄 050000)

**摘要:** 电磁信号在穿透带电介质板时由于电磁波的散射等原因其信号强度会降低,甚至会改变电磁波的极性。为了测量电荷本身对电磁波衰减的影响,设计了带电介质板对电磁波的衰减实验,选取了PP板、PVC板、PMMA板等典型介质板,对电磁波信号衰减进行了实验研究。研究结果表明介质板带电会增强对电磁波的衰减,且随着电量增加,衰减增强。

**关键词:** 电磁波;带电量;衰减;介质板

中图分类号: TN011; O241.4; O441.4

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211864

中文引用格式: 张超,孔晓玉,郑丹丹. 带电介质板对电磁波的衰减特性研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 152-156.

英文引用格式: Zhang Chao, Kong Xiaoyu, Zheng Dandan. Study on the scattering characteristics of electromagnetic wave with dielectric band[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 152-156.

## Study on the scattering characteristics of electromagnetic wave with dielectric band

Zhang Chao, Kong Xiaoyu, Zheng Dandan

(Hebei Taihang Measurement Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** When the electromagnetic signal penetrates the medium, its signal intensity will be reduced due to the scattering of electromagnetic waves and other reasons, and even change the polarity of electromagnetic waves. In order to measure the influence of electric charge on electromagnetic wave attenuation, this paper designed an electromagnetic wave attenuation experiment with dielectric plate, and selected typical dielectric plates such as PP plate, PVC plate and PMMA plate to conduct an experimental study on electromagnetic wave signal attenuation. The results show that the attenuation of electromagnetic wave is enhanced when the dielectric plate is charged, and the attenuation is enhanced with the increase of electric quantity.

**Key words:** electromagnetic wave; charged quantity; attenuation; dielectric plate

## 0 引言

电介质,又叫作绝缘体,它们中的电子被束缚在它所属的原子核周围,因而在物质内部的自由电子极少,即使受到外电场的作用,其分子中的绝大多数带电粒子也只能作微观位移,不可能像导体中的自由电子那样发生宏观迁移<sup>[1]</sup>。

电导率是表示物质传输电流能力强弱的一种测量值,以欧姆定律定义为电流密度和电场强度的比率。相对介电常数表征材料的介电性质或极化性质的物理参数,其值等于预测材料为介质与以真空介质制成的同尺寸电容器电容量之比<sup>[2-4]</sup>。介电常数与电导率之间的关系是  $\varepsilon_e = \varepsilon(1 - j\kappa/\omega\varepsilon)$ 。其中,  $\varepsilon_e$  为介电常数,  $\kappa$  为介质的电导率,  $\omega$  为电磁波的角频率,  $\varepsilon$  为理想介质的介电常数。由此推导出,当  $\varepsilon_e = \varepsilon$  时,电导率为 0,面电导率为 0。带电量为 0 时电导率为 0,带电量不为 0 时电导率不为 0。

物质的导电性不仅与其凝聚状态和组成结构有关,而且与物质所处的外电场条件有关,物质在传导静电过程中,导电性是由物质与电场共同确定的。处在强场中

的物质,分子电偶极矩的大小、分子的排列分布状态、结晶点阵的热振动情况等都可能发生较大的变化,从而改变物质的导电性能<sup>[5]</sup>。

通过固体介质的表面有一种表面导电电流  $I_s = G_s U$ ,其中,  $G_s$  为固体介质的表面电导,单位为 S。如果固体介质表面上加以两平行的平板电极,极间距离为  $d$ ,电极长度为  $l$ ,则  $G_s = \gamma_s \frac{l}{d}$ ,比例系数  $\gamma_s$  为介质的表面电导率,它与介质电导具有相同的单位,亦为西门子。此时亦可写成表面电流密度形式  $J_s = \frac{I_s}{l} = \gamma_s \frac{U}{d} = \gamma_s E$ ,其中,  $J_s$  为表面电流密度,单位为  $\text{Am}^{-1}$ 。介质的表面电导率  $\gamma_s$ (或表面电阻率  $\rho_s$ )的数值不仅与介质的性质有关,而且受到周围环境的湿度、温度、介质表面结构和玷污情况的影响<sup>[6]</sup>。

当电介质相对导体为正电时,在电介质上产生的放电区域为均匀的圆状,放电面积比较小,释放的能量也比较少;当电介质相对于导体为负电位时,在电介质上

产生的放电区域是不规则的星状区域,区域面积比较大,释放的能量也较多<sup>[7]</sup>。

不同电导率的介质对电磁波的散射不同,在电导率较小的导体介质中,介质会对电磁波产生散射及吸收,导致电磁波的能量发生衰减,对于电导率较大的导体介质,电导率入射到其表面后,会发生趋肤效应,电磁波只在介质表面传播散射,并发生衰减,不会入射到介质深处,衰减程度大于低电导率介质<sup>[8-9]</sup>。

## 1 电介质与电磁波的相互作用

基于对电磁波与介质相互作用的研究,进而研究带电介质对电磁波的传播影响。研究电磁波的传播特性主要研究电磁波的反射及透射特性,上述传播特性受材料电磁参数的影响。介质带电会改变这些参数继而影响电磁波的传播特性。

当电磁波垂直入射到两种介质交界面时会发生反射、透射吸收等现象,如图1所示。

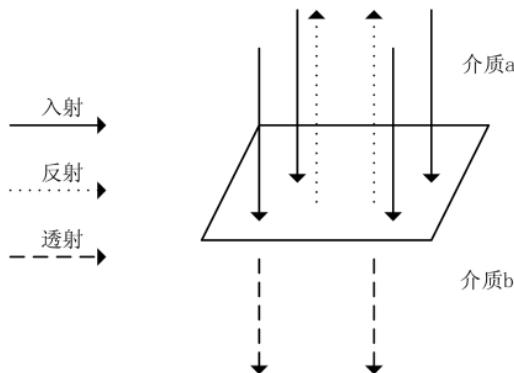


图1 电磁波在介质交界处的入射、反射和透射

假设一束电磁波从介质a入射到介质b,入射方向为z方向,且入射波、反射波以及透射波的电场方向为x方向,则入射波的电场 $E_i$ 及磁场 $H_i$ 可以表示为:

$$\begin{cases} E_i = E_{im} e^{-jk_a} \mathbf{e}_x \\ H_i = \frac{E_{im}}{\eta_a} e^{-jk_a} \mathbf{e}_y \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{e}_x$  和  $\mathbf{e}_y$  为相互垂直且与传播方向 z 也垂直的 x 及 y 方向的单位向量,  $E_{im}$  为入射波的磁感应强度;  $k$  为传播系数,  $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ ,  $\eta$  为本征阻抗, 阻抗可由下式表示:

(1)对于金属等铁磁性材料:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}}} \quad (2)$$

(2)对于非金属等绝缘性好的材料:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

其中,  $\epsilon$  和  $\mu$  为介质的介电常数和磁导率,  $\sigma$  为电导率,  $\omega$  为电磁波的角频率。同理, 电磁波的反射波和透射波的电场及磁场可表示为:

$$\begin{cases} E_r = E_{rm} e^{jk_a} \mathbf{e}_x \\ H_r = -\frac{E_{rm}}{\eta_a} e^{jk_a} \mathbf{e}_y \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E_t = E_{tm} e^{-jk_b} \mathbf{e}_x \\ H_t = \frac{E_{tm}}{\eta_b} e^{-jk_b} \mathbf{e}_y \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $E_r$  和  $E_t$  分别为反射波和透射波的电场,  $H_r$  和  $H_t$  分别为反射波和透射波的磁场,  $E_{rm}$  和  $E_{tm}$  分别为反射波和透射波的电场强度。

传输线理论中的反射系数能够对材料的电磁波的吸收性能进行定量描述,反映介质材料对入射电磁波的反射衰减的程度<sup>[10]</sup>。

## 2 带电介质板对电磁波衰减的实验设计

本实验采用高压源喷电方式使介质板带电。介质板带电后,经过认真的消电处理,再进行后面的带电实验,因为物体的带电历史或带电状态直接影响物体的静电起电电量和物体带电的符号。原来不带电的物体相互间第一次接触、分离起电的测量结果能反映物体的实际起电性质<sup>[11]</sup>。

实验材料选取:根据物体表面电荷的消散规律,经过一系列静电泄露实验,最终选定实验的介质材料为亚克力板(长度为60 cm,宽度为60 cm,厚度分别为4 mm、15 mm、30 mm)、PVC板(长度为60 cm、宽度为60 cm、厚度分别为3 mm、15 mm、30 mm)和PP板(长度为60 cm,宽度为60 cm,厚度分别为3 mm、15 mm、30 mm)。

实验仪器:信号源 SML01(9 kHz~1.1 GHz),信号源 SMR 20(1 GHz~20 GHz),双锥天线2个,对数周期天线 ETS3142E(26 MHz~6 GHz)2个,喇叭天线 BBHA9120D(1201)2个,以及频谱仪 Agilent E4440A(3 Hz~26.5 GHz)、正高压源、负高压源、消电器。

实验选取频率:一般在每10倍频程内选择不少于3个频率点,为了更好地研究不同频率下的电磁波衰减规律,增加了频点密度,最终选取频点为:1 GHz, 1.2 GHz, 1.4 GHz, 1.5 GHz, 1.6 GHz, 1.7 GHz, 1.8 GHz, 1.9 GHz, 2.0 GHz, 2.1 GHz, 2.2 GHz, 2.3 GHz, 2.4 GHz, 3 GHz, 4 GHz, 5 GHz, 6 GHz, 7 GHz, 8 GHz, 9 GHz, 10 GHz, 12 GHz, 15 GHz, 17 GHz。实验过程中天线距离屏蔽材料的距离严格按照标准执行,且地面做标记,保证实验的可重复性,整个操作过程穿上防静电服。

实验搭建系统框图如图2所示。

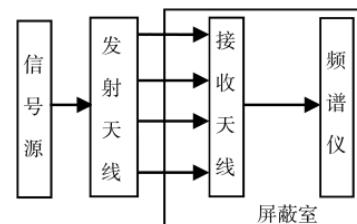


图2 介质板屏蔽效能测量实验系统框图

实验步骤如下：

- (1) 连接实验仪器, 调整天线均为垂直极化, 信号源输出功率 10 dBm;
- (2) 记录各频点通过空气后的接收功率;
- (3) 保证实验条件不变, 将所测介质板安装在屏蔽室窗口, 利用非接触式表对介质板进行电压测量, 记录基础电压下各频点的接收功率;
- (4) 利用喷电法增加介质板表面电荷量, 记录高电压下各频点的接收功率。

### 3 实验数据分析

以 3 mm PP 板为例, 将数据以三维图形式呈现, 数据如图 3 所示。

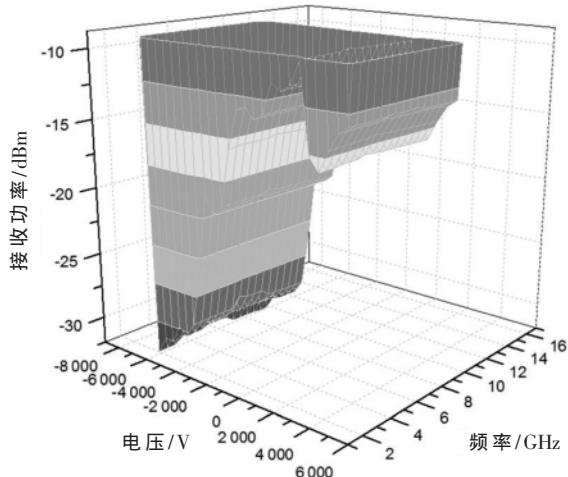


图 3 3 mm PP 板不同电压不同频率下的接收功率示意图

由图 3 可见, 随着带电量的增加, 接收功率越来越小, 说明介质板带电, 增大了对电磁波的衰减。经过数据的统计整理, 发现实验的介质板都有此趋势, 说明电荷对于介质板对电磁波的衰减是有影响的。

以 3 GHz 的 3 mm PP 板为例, 不同电压下的接收功率和拟合曲线如图 4 所示。

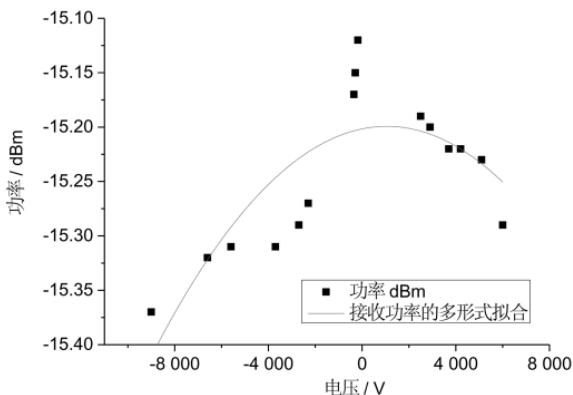


图 4 3 GHz 下 3 mm PP 板的接收功率

图 4 直观地反映了在电压为 0 处接收功率最大, 随着带电量的增加, 接收功率出现了明显衰减, 亚克力板、

PVC 板的接收功率也有此规律, 实验验证了介质板带电对电磁波的衰减是有一定影响的, 带电量越大, 衰减越大。

各种材料的衰减量最值统计如表 1 所示。

表 1 各材料的功率衰减量最值统计表

介质板材料	正电压下		负电压下	
	功率最大 衰减量/dB	功率最小 衰减量/dB	功率最大 衰减量/dB	功率最小 衰减量/dB
3 mm PP 板	0.89	0.08	0.72	0.13
15 mm PP 板	0.37	0.02	1.1	0.05
30 mm PP 板	0.69	0.05	0.8	0.05
3 mm PVC 板	1.04	0.04	0.65	0.09
15 mm PVC 板	0.47	0.05	0.39	0.07
30 mm PVC 板	1.63	0.04	1.64	0.06
4 mm PMMA 板	1.89	0.04	2.53	0.08
15 mm PMMA 板	0.85	0.03	0.97	0.06
30 mm PMMA 板	0.42	0.04	0.51	0.08

各种因素对带电介质板电磁波衰减量的影响如下。

(1) 不同厚度对带电介质板电磁波衰减量的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 根据实验数据结果判断带电介质板厚度与电磁波衰减量并不成比例关系。

(2) 不同频率对带电介质板电磁波衰减量的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 随着频率的增加, 电磁波的衰减量整体呈增大趋势, 以 PP 板为例进行分析, 3 mm PP 板随着频率增大, 电磁波衰减量单调增加; 15 mm PP 板正电压下随着频率增加电磁波衰减量单调增加; 15 mm PP 板负电压下及 30 mm PP 板随着频率增加, 电磁波衰减量先增加后减小, 整体趋势平缓。在 3 GHz 频段以下, 在记录的有效数据中, 大部分电磁波衰减量在 0.3 dB 以下, 且分布比较集中; 在 3 GHz~10 GHz 频段, 电磁波衰减量呈明显上升趋势; 在 10 GHz~18 GHz 频段, 电磁波衰减量与带电介质板厚度及介质板的带电极性相关性更明显。

(3) 不同材料对带电介质板电磁波衰减量的影响如图 7 所示。由图 7 可知, 同种材料下不同厚度及不同电压下对电磁波衰减量的影响趋势是相同的。

### 4 结论

电磁波传播过程中会遇到各种障碍, 由于障碍的形状、尺寸、材料性质等的不同会造成电磁波不同形式的散射, 使接收到的电磁波能量有所衰减。当电磁波遇到的障碍物带有静电时, 由于自由电子在电磁波磁场中发生受迫振动, 受迫的自由电子被看作电偶极子, 向外散射电磁波, 造成散射场增加, 同时自由电子的振动消耗了传播中的电磁波能量, 造成电磁波传播过程中的能量损耗<sup>[12~13]</sup>。带电介质板对电磁波衰减的实验验证了带电量对电磁波传播的影响是增强的, 随着带电量增加, 对电磁波的衰减量增加。

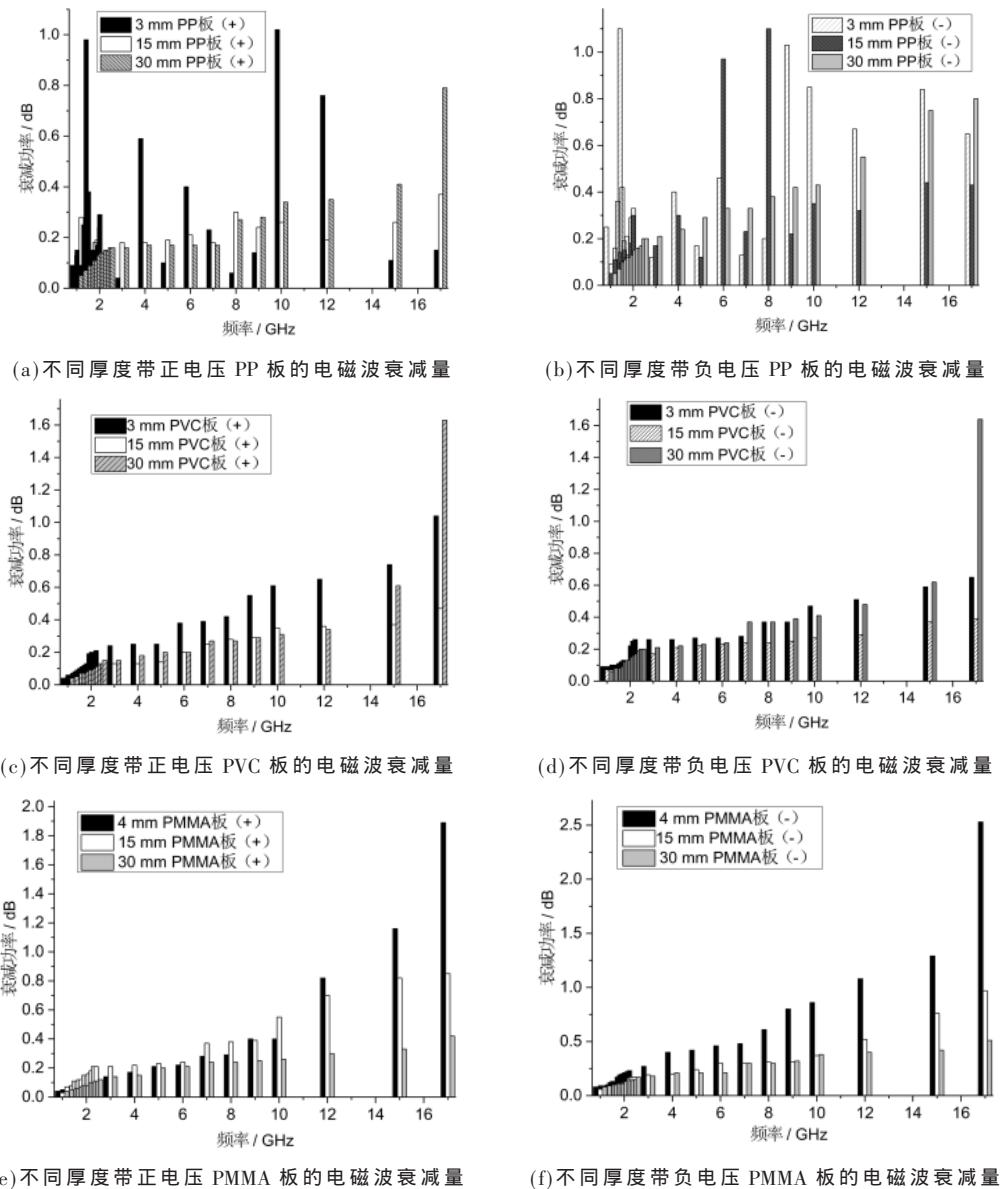


图 5 不同厚度下带电介质板的电磁波衰减量

## 参考文献

- [1] 谢莉, 吴牡丹. 局部带电介质对 1.2 GHz 电磁波交叉极化的实验研究[C]//中国力学大会, 2013.
- [2] WILSON P F, MA M T. Fields radiated by electrostatic discharges[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1991, 33(1): 10–18.
- [3] 刘亚奎, 谢莉. 电磁波辐射下的表面带电介质的介电常数研究[C]//2016 年全国环境力学学术研讨会, 苏州, 2016: 52–55.
- [4] 徐兰云, 潘留仙. 几种典型带电导体的电荷面密度[J]. 零陵学院学报, 2003, 24(2): 45–47.
- [5] 安振连, 陈清如, 章新喜. 粉体碰撞带电机理的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(2): 71–74.
- [6] 唐凯, 候加林, 王震, 等. 基于改变物体表面电荷密度的避雷原理及实验[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(1): 118–121.
- [7] 王秀娥. 关于静电平衡导体表面电荷分布规律的研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2003, 21(3): 59–60.
- [8] 董群锋, 李应乐, 李俊杰, 等. 基于 Mie 球的带电沙尘媒质微波衰减特性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 99–102.
- [9] 洛桑平措. 高等数学在静电学中的一些应用[J]. 数理化研究, 2016(10): 297–298.
- [10] 宋鑫华, 闫鸿浩, 马征征, 等. 基于传输线理论的电磁波反射系数正交分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 137–141.
- [11] 张自嘉, 潘琦, 陈海秀. 带电粒子的瑞利散射研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 368–374.
- [12] 刘尚合, 魏光辉, 刘直承, 等. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999: 38–64.

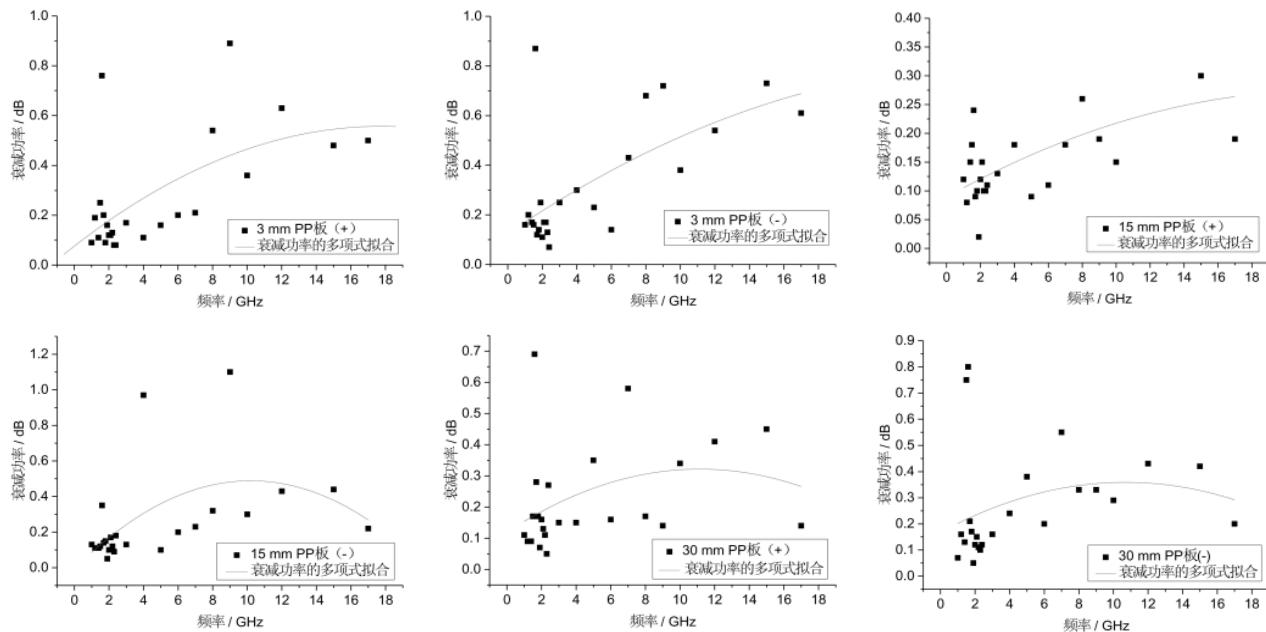


图 6 不同频率下 PP 板电磁波衰减量

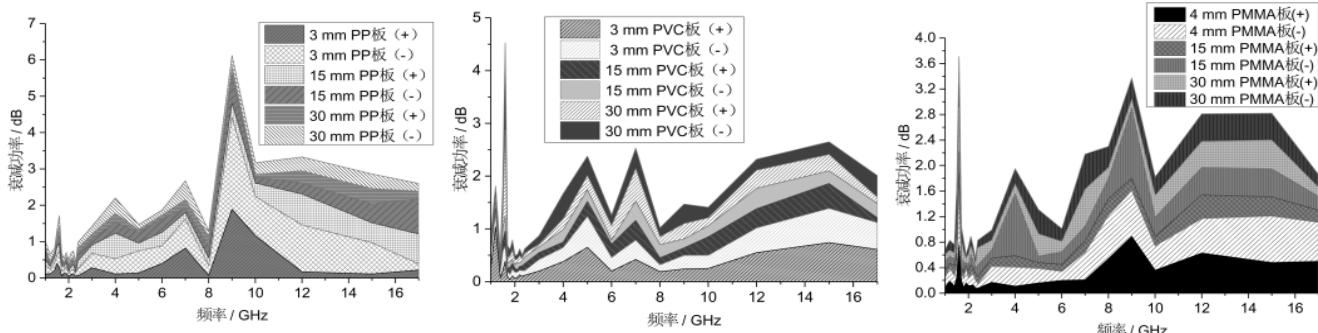


图 7 不同材料下带电介质板电磁波衰减量

[13] 法林, CASTAGNA J P, 董和风. 一种计算反射/传输系数的快速精确算法[J]. 中国科学: G 辑, 2008, 38(7): 873-895.

(收稿日期: 2021-06-16)

作者简介:

张超(1988-), 通信作者, 男, 本科, 工程师, 主要研究方

(上接第 151 页)

- [4] 周泽伦, 李祎. 2~18 GHz 超宽带接收分系统的设计[J]. 微波学报, 2016, 39(14): 116-119.
- [5] 何俊岑, 候智鹏, 周俊. 基于 LTCC 的小型化宽带变频组件[J]. 电子信息对抗技术, 2015, 30(3): 59-62.
- [6] 周凤艳, 刘秉策. 一种 6~18 GHz 宽带接收前端的设计[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(1): 95-98.
- [7] 庞玉会. 一种 X 波段小型化上下变频组件的研制[J]. 现代电子技术, 2012, 35(23): 101-104.
- [8] 荀民. 超宽带接收前端的设计与实现[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(3): 55-58.
- [9] 苏明慧, 杜二旺, 姜立伟. 基于 LTCC 的星载 S 频段上变

向: 电磁环境模拟与测试、电学热学测量,  
E-mail: zhoushuafei@163.com。

孔晓玉(1987-), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向: 电学热学测试。

郑丹丹(1990-), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向: 电学热学测试。



扫码下载电子文档

- 频器[J]. 微波学报, 2016, 32(3): 93-96.
- [10] 傅显慧. 2~18 GHz 接收前端关键技术研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2020.
- [11] 李镇, 杨燕, 吴国中, 等. 2~18 GHz 超宽带小型化下变频通道设计[J]. 微波学报, 2020, 36(4): 78-81.
- [12] 唐霆宇. 一种小型化超宽带接收前端的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2019, 45(6): 11-14.

(收稿日期: 2021-08-04)

作者简介:

王毅(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 射频微波电路与系统、航天测控系统中的信道设计。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所