



## 基于手机的电磁波实验教学设计

刘贤峰, 杨德强, 陈波, 潘锦

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 该文提出了一种基于手机的电磁波实验教学设计, 将手机变身为微波功率计, 利用 Wi-Fi 路由器作为发射信号源, 开展电磁波传播特性、电磁波极化特性和电磁屏蔽效能的实验学习。该实验设备普及、操作简便且实验时间和地点不受限制, 能够满足互联网时代学生的多样化学习需求; 另外, 该实验设计结合生活实践, 鼓励学生自由发挥, 对提升学习兴趣、培养创新思维有积极作用。

**关键词:** 电磁波; 手机; 线上教学; 实验设计

中图分类号: G424.31

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220387

## Experimental Teaching Design of Electromagnetic Wave Based on Mobilephone

LIU Xianfeng, YANG Deqiang, CHEN Bo, PAN Jin

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In this paper, a new experimental teaching design of electromagnetic wave is proposed, in which the mobile phone is transformed into a microwave power meter and Wi-Fi router is used as the transmitting signal source. The experiment is used to study the electromagnetic wave propagation characteristics, electromagnetic wave polarization characteristics and electromagnetic shielding efficiency. The experimental equipment is popular, easy to operate, and the time and location of the experiment are not limited, which can meet the diversified learning needs of students in the Internet era. In addition, the experimental design is combined with life practice and encourages free play, which plays a positive role in promoting learning interest and cultivating innovative thinking.

**Key words:** electromagnetic waves; mobile phones; online teaching; experimental design

时变电磁场以波动的形式存在于空间中并形成电磁波, 电磁波在探测、定位、通信、医疗等方面均有广泛的应用, 对电磁波特性的认知可以帮助我们更好地发挥其效能。电磁波传播、极化等特性的学习是电磁场与电磁波课程中的教学难点, 主要体现在: 时变问题属四维时空问题, 物理量多, 求解复杂; 电磁波看不见摸不着, 概念抽象, 理解困难; 电磁理论的应用门槛普遍较高, 初学者从生活中很难获得对电磁波特性的有效感知。因此设计知识点配套的实验教学来帮助学生理解和感知电磁波显得十分重要。

目前许多高校已经开展了关于电磁波特性的软、硬件实验教学研究。硬件实验平台多以电磁

波教学综合实验仪<sup>[1-4]</sup>和微波分光仪<sup>[5]</sup>为主, 实验教学严重依赖实体实验室, 但许多高校实体实验室现有实验设备很难满足学生人数众多的需求。电子科技大学实验室每年需完成电磁场相关课程近 6 千余人次的实验教学, 而现有设备仅百余台, 学生实践的空间和时间不足, 自主发挥时间短, 参与度低。传统的软件实验平台主要借助 MATLAB 软件的图形处理功能<sup>[6-10]</sup>和 HFSS 软件的 3D 建模功能<sup>[11-12]</sup>实现电磁波的动态仿真, 相比于硬件实验平台, 软件操作可实现开放式学习, 学习的空间和时间得到有效满足, 但由于软件操作复杂, 学生的参与度普遍不高。最近几年各大高校开展的电磁场虚拟仿真实验<sup>[13-15]</sup>有效克

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-10-01

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(61721001)。

作者简介: 刘贤峰(1977-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究。E-mail: xianfengliu@

uestc.edu.cn

服了传统软件实验教学的弊端,操作简洁、直观,但目前的仿真模型尚不完善,拓展实践教学内容仍然受到较大制约。

本文提出的基于手机的电磁波实验教学,设备普及、操作简便,具备将实验学习拓展到课堂和实验室以外的宿舍甚至校园外的特点,可以满足互联网时代学生多样化的学习需求,特别在 COVID-19 期间,可以实现“零准备”开展电磁场与电磁波课程的教学实验;基于手机的电磁波实验教学内容立足于解释生活中的电磁现象、鼓励学生自由发挥、自主开展动手实践,对帮助学生建立关于电磁波的正确感知,培养学生创新性思维有积极作用。

## 1 实验原理

手机内部有不同频段的接收机,通过信号格数可以大致显示接收信号的强度。借手机的工程模式或 Wi-Fi 测试 App 软件,还可以获得更加细致的信号强度等信息。

各种型号手机开启工程模式的命令可以通过互联网查找。如苹果手机,拨号键盘输入 \*3001#12345#\* 然后按拨号键;三星手机, \*#\*#4636#\*#\* ; 华为手机,进入设置—关于手机—状态信息—网络。

某些 Wi-Fi 测试的 App 软件可以显示包括信

号强度在内的详细信息,显示范围可以超出 -100~-40 dBmW,如图 1 所示。

本实验借助于 Wi-Fi 测试软件,将智能手机变成一台微波功率计,利用常见的 Wi-Fi 路由器作为发射信号源,开展电磁波相关特性实验。

### 1.1 传播特性

由 Wi-Fi 路由器发射天线发射出的电磁波,在距离波源足够远的地方,呈球面的波阵面上的一小部分,可以近似看作均匀平面波。

令一长度为  $dz$  的微分电流元在自由空间中沿  $z$  轴放置,其上电流为  $I$ ,如图 2 所示,则其在远区 ( $kr \gg 1$ ) 产生的辐射场为<sup>[16]</sup>:

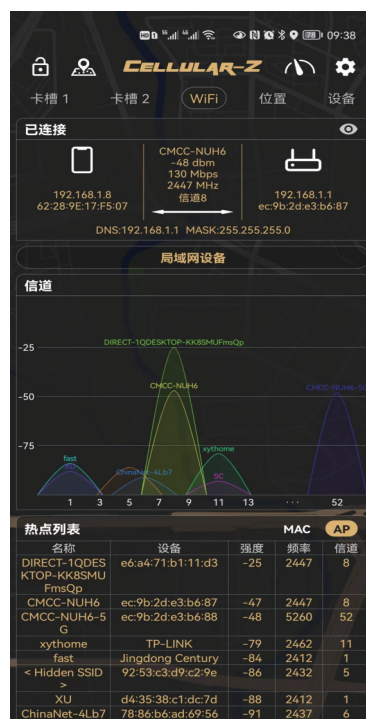
$$E_{\theta} = j60 \frac{Idz}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \quad (1)$$

式中,  $Idz$  为电流元的矩量,  $r$  为场点到电流元的距离,  $k$  为波数。

考虑到任意线天线的辐射场均可看作许多电流元辐射场的叠加,可知, Wi-Fi 路由器发出的电磁波在空间中按行波规律传播,且随着波的扩散,电场振幅逐渐减小,即当接收天线距离发射天线越远时,可以收到的信号强度就越低。显然,通过测量不同距离处的信号强度,可以帮助理解电磁波空间传播的衰减规律。



(a) 苹果版 Airport 实用工具



(b) 安卓版 Cellular-Z

图 1 手机 App 测量 Wi-Fi 信号强度界面



(c) 安卓版无线魔盒



(d) 安卓版 Wi-Fi 测评大师

图 1 (续)

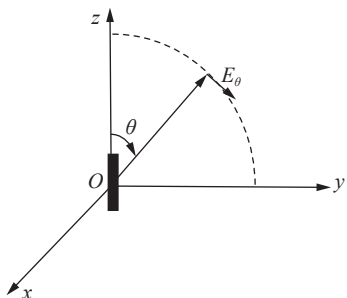


图 2 电流元辐射问题坐标系

在考虑反射的情况下，对于给定的接收点，由 Wi-Fi 路由器发射天线发射出的电磁波将沿直射路径和反射路径到达接收点，这种多径信号彼此相长(或相消)干涉，会引起信号起伏<sup>[17]</sup>。同一媒质中，在同一直线上传播两列相干波，设到达接收点的两列平面波的电场分别为：

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1 = \mathbf{e}_x E_{1m} \cos(\omega t - kz) \\ \mathbf{E}_2 = \mathbf{e}_x E_{2m} \cos(\omega t - kz + \delta) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\delta = kz_0$ 代表因波程差而产生的总相位差。可见：

- 1) 当相位差 $\delta = kz_0 = 2n\pi (n = 0, 1, 2, \dots)$ 时，合成波的振幅最大， $z_0$ 的位置为合成波的波腹；
- 2) 当相位差 $\delta = kz_0 = (2n + 1)\pi (n = 0, 1, 2, \dots)$ 时，合成波的振幅最小， $z_0$ 的位置为合成波的波节。

通过波腹、波节位置数据的测量，可进一步展开对被测电磁波波数、频率、波长等传播特性参数的分析与计算。

### 1.2 极化特性

极化是电磁理论中的一个重要概念，它表征在空间给定点上电场强度矢量随时间变化的特性。如果用一条有向线段表示电场强度矢量，则电场强度大小和方向的变化表现为该有向线段的矢端在选定坐标系中的位置变化。按矢端位置随时间变化画出来的轨迹图形分类，极化可分为线极化、圆极化和椭圆极化<sup>[18]</sup>。

对于线极化而言，在工程上，将垂直于大地的线极化波称为垂直极化波，而将平行于大地的线极化波称为水平极化波。

通常，手机内置天线和 Wi-Fi 路由器的天线也有一定的极化形式，充分利用天线的极化特性，可以使接收信号更强，借此体会极化匹配对系统性能的影响。

### 1.3 电磁屏蔽效能

电磁屏蔽是以某种材料制成的屏蔽壳体将需要屏蔽的区域封闭起来，形成电磁隔离。屏蔽体的屏蔽效果通常用屏蔽效能来度量，屏蔽效能定义为空间某点上未加屏蔽时的电场强度  $E_0$ (或磁场强度  $H_0$ )与加屏蔽后该点的电场强度  $E_1$ (或磁场强

度  $H_1$ ) 的比值, 称为电屏蔽效能(或磁屏蔽效能)<sup>[19]</sup>。电屏蔽效能用分贝可表示为:

$$S_E = 20 \lg \frac{E_0}{E_1} \quad (3)$$

实际工程中测量屏蔽效能难以做到去掉屏蔽体和加上屏蔽体而完成两次场强测量, 只能利用屏蔽体的某些门窗等开口, 通过关门和开门来进行两次测量, 从而近似得到屏蔽体的屏蔽效能。如图3所示, 在打开屏蔽门时获得  $E_0$ , 关闭屏蔽门时获得  $E_1$ 。

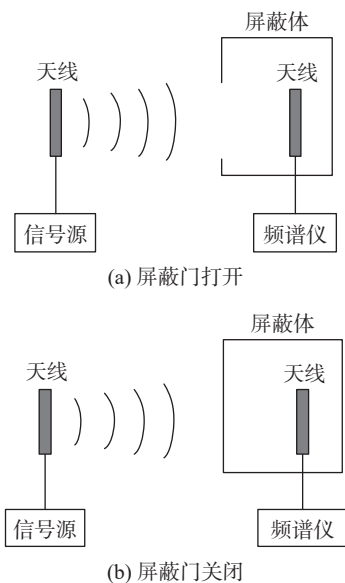


图3 屏蔽效能测量方法

对于使用微波频谱分析仪来测量屏蔽门关闭前后场强的情况, 读数为功率的分贝值, 则屏蔽效能可直接得到:

$$S_E = P_0 - P_1 \quad (4)$$

实际通信中, 无线通信信号在传播过程中遇到建筑物墙体, 发生反射、透射和绕射等现象, 信号被墙体反射衰减和吸收衰减, 就形成了一定的屏蔽作用, 导致在室内通信质量大为降低, 单栋建筑物对通信频段电磁波的衰减大约 15~20 dB, 一道墙的衰减为 5~10 dB。可见, 建筑物空间结构设计和墙体材料电磁参数设计对通信信号在室内的分布特性将产生很大影响。

## 2 实验设计和结果分析

本实验采用 Wi-Fi 路由器作为发射信号源, 将安装 Wi-Fi 测试软件智能手机作为微波功率计, 实验装置如图4所示。



图4 实验装置示意图

实验中对于同一点位, 记录多次数据, 取多次数据平均值。具体实验设计如下:

- 1) 在同一空间直视条件下, 改变手机与 Wi-Fi 路由器距离, 测量距离与信号强度的关系;
- 2) 在手机与路由器处于相同距离情况下, 将 Wi-Fi 路由器天线全部调整为垂直状态, 改变手机的姿态, 测量极化与信号强度的关系;
- 3) 保持距离不变, 测量 Wi-Fi 穿墙与不穿墙的信号强度变化。

根据以上方案, 测量结果如表1~表3所示。

表1 测量距离不同时的信号强度

参数	距离/m																	
	1			1.4			1.8			2.2			2.6			3.0		
测量次数	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
信号强度/dBm	-32	-31	-32	-34	-34	-37	-36	-38	-35	-38	-39	-41	-46	-43	-44	-45	-47	-44
平均值/dBm	-31.67			-35.00			-36.33			-39.33			-44.33			-45.33		

表2 手机姿态不同时的信号强度(r=2.5 m)

参数	次数						
	1	2	3	4	5	6	
竖直	场强/dBm	-28	-29	-28	-30	-29	-32
	平均值/dBm	-29.33					
水平	场强/dBm	-37	-40	-36	-37	-39	-38
	平均值/dBm	-37.83					
极化隔离度/dB	8.5						

表3 墙壁对信号强度的影响(r=3.5 m)

参数	次数				
	1	2	3	4	
不穿墙	场强/dBm	-44	-46	-44	-43
	平均值/dBm	-44.25			
穿墙	场强/dBm	-57	-58	-56	-59
	平均值/dBm	-57.50			

从测量数据可见, 能量扩散带来的传播衰减使得信号强度随距离的增加而逐渐减小; 手机竖直放置时接收到的信号优于水平放置, 隔离度可达 8.5 dB, 初步判别该手机为垂直极化; 另外, 墙壁对电磁波的屏蔽作用, 会导致信号强度大幅下降。

基于手机的实验教学中, 在提供上述基本理论梳理和实验设计后, 还可以给出一定的提示, 鼓励学生在此实验内容基础上, 自行设计相近或相似的实验, 如:

1) 用易拉罐或其他常见金属制作反射器, 设计一个实验, 通过测量波腹、波节距离, 展开传播特性参数的分析和计算;

2) 用另一部手机开启 Wi-Fi 热点, 设计一个实验测量微波炉的屏蔽效能。

### 3 结束语

基于手机的电磁波实验利用日常生活中的电子产品作为实验设备, 操作简便、实验内容与生活中的电磁现象密切相关, 能较好地帮助学生建立对电磁波的传播特性、极化特性及其电磁屏蔽效能的正确感知。虽然实验结果精度不高, 但实验着重于电磁波基本特性的展示和验证, 能够满足上述电磁波特性学习的基本需要。

在 2020 年 COVID-19 期间, 本文设计的实验在电子科技大学电磁场与电磁波课程线上教学中得到实际开展, 从学生反馈意见看, 实验对线上教学起到很好的辅助作用。

### 参考文献

- [1] 陈波, 杨德强, 潘锦. 电磁波传播特性创新实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(4): 190-191.
- [2] 王海华, 孙贤明, 魏佩瑜, 等. “电磁场与电磁波”课程实验平台建设与实践[J]. 电气电子教学学报, 2015, 37(4): 32-34.
- [3] 霍佳雨, 高博. 电磁场与电磁波实验教学的研究与探索[J]. 实验室科学, 2016, 19(02): 25-27.
- [4] 王培章, 曹文全, 刘函. 一种新颖的电磁场、电磁波可视化教学实验系统[C]//2021年全国微波毫米波会议论文集(上册). 南京: 中国电子学会, 2021.
- [5] 丁大志, 盛亦军, 樊振宏. 电磁波极化理论的实验教学研究[J]. 电气电子教学学报, 2010, 32(2): 55-57.
- [6] 吕秀丽, 牟海维, 李贤丽. Matlab在电磁场与电磁波实验教学中之应用[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(2): 110-112.
- [7] 刘亮元, 贺达江. 电磁场与电磁波仿真实验教学[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(5): 30-32.
- [8] 凌滨, 郭也, 刘文川. 应用MATLAB设计电磁场与电磁波模拟仿真实验[J]. 高师理科学刊, 2019, 39(9): 52-55.
- [9] 李丽芬, 张秋菊, 李扬. 基于MATLAB的均匀平面电磁波的仿真[J]. 现代电子技术, 2013, 36(21): 136-138.
- [10] 张梦娇, 郑丹, 刘小标, 等. 基于MATLAB GUI的电磁波动态仿真[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(12): 128-132.
- [11] 郭瑜, 虞致国. 电磁场与电磁波仿真实验教学研究[J]. 无锡职业技术学院学报, 2018, 17(2): 28-31.
- [12] 赵爽. 基于HFSS的电磁场与电磁波教学虚拟实验研究[J]. 科技资讯, 2014(27): 186.
- [13] 万棣, 范懿. 电磁场与电磁波虚拟仿真实验系统的设计与开发[J]. 电气电子教学学报, 2020, 42(5): 130-133.
- [14] 付琴, 黄秋元, 李政颖, 等. 电磁波传播特性虚拟仿真实验教学[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(1): 151-154.
- [15] 刘北佳, 林澍, 王楠楠, 等. 浅谈电磁场与无线技术虚拟仿真创新实验建设[J]. 教育现代化, 2020, 7(46): 1-3.
- [16] 聂在平. 天线工程手册[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014.
- [17] 刘选谋. 无线电波传播[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [18] 谢处方, 饶克谨, 杨显清, 等. 电磁场与电磁波[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [19] 蔡仁钢. 电磁兼容原理、设计和预测技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.

编辑 张俊