

高等学校电子信息类专业“十二五”规划实践教材

电磁场与微波技术 实验教程

雷振亚 主编
张福顺 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类专业“十二五”规划实践教材

电磁场与微波技术实验教程

雷振亚 主编

张媛媛 吴边 马超 翁子彬 姚俊业 参编

张福顺 主审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书共 6 章, 内容包括电磁场与电磁波、微波技术、微波电路 CAD、微波测量、天线测量和射频系统, 共计 41 个实验。

本书可供通信工程、电子信息工程、电磁场与无线技术、电波与天线、探测制导、电子对抗等电子技术类专业教学实验使用, 也可供相关科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与微波技术实验教程/雷振亚主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2012. 11

高等学校电子信息类专业“十二五”规划实践教材

ISBN 978-7-5606-2942-1

I. ① 电… II. ① 雷… III. ① 电磁场—实验—高等学校—教材 ② 微波技术—实验—高等学校—教材 IV. ① O441.4-33 ② TN015-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 254653 号

策 划 张 媛

责任编辑 王 瑛 戚文艳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 10

字 数 233 千字

印 数 1~1000 册

定 价 17.00

ISBN 978-7-5606-2942-1/O

XDUP 3234001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

本书是由国家电工电子教学基地的老师组织编写的实践系列教材之一，得到了西安电子科技大学教材建设委员会的支持。按照“基础厚，口径宽，能力强，素质高”的人才培养模式要求，教材编写小组通过研究本学科国内外教材建设现状、特点和趋势，分析自身的优势和薄弱环节，并结合我校的现有实验教学条件，从建设国内一流、国际知名高水平大学，体现时代特征，培养具备扎实学科基础以及良好的科学实验素质的学生出发，经过充分研讨，制订了编写大纲。

全书共分6章，内容依据相关理论课程的进展安排。第1章电磁场与电磁波，适用于电磁场理论、电磁场与电磁波、电磁场与天线等课程，实验内容有静电场边值问题、平面电磁波的反射和干涉、电磁波的极化；第2章微波技术，适用于微波技术与天线、微波技术基础等课程，实验内容有双导线阻抗测量与阻抗匹配、波导单口网络阻抗测量与匹配、波导双口网络参数测量；第3章微波电路CAD，适用于微波技术虚拟实验等课程，以Microwave Office为软件平台，引导学生学会使用微波电路设计和仿真软件，实验内容包括微波基础知识，以及各种微波无源和有源电路设计；第4章微波测量和第5章天线测量，可供电磁场与微波技术及相似专业的本科生使用，与微波测量和天线测量课程相配合，以使学生学会各种微波与天线参数的测试方法，以及经典和现代测量仪器的原理与使用方法；第6章射频系统，适用于射频/微波电路导论等选修课程，并提供各种微波电路模块的测试。全书共计41个实验，教师可依据各自情况选择使用。通过这些实验，学生能够得到良好的射频与微波技术知识的训练，为毕业后从事相关科研和工程技术工作奠定扎实的基础。

本书由雷振亚担任主编，具体分工如下：马超编写第1章，姚俊业、雷振亚编写第2章，张媛媛编写第3章，吴边、马超、姚俊业编写第4章，翁子彬编写第5章，雷振亚编写第6章。

本书在编写过程中得到了西安电子科技大学电子工程学院、国家电工电子教学基地等单位领导的帮助和支持，谢亮亮、高东兴等研究生为本书的出版也付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

由于本书内容庞杂，加之编者水平有限，书中难免存在错误或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

联系方式：zylei@xidian.edu.cn

编 者
2012年9月

目 录

第 1 章 电磁场与电磁波	1
实验 1 静电场边值问题	1
实验 2 平面电磁波的反射和干涉	4
实验 3 电磁波的极化	6
第 2 章 微波技术	11
实验 1 双导线阻抗测量与阻抗匹配	11
实验 2 波导单口网络阻抗测量与匹配	15
实验 3 波导双口网络参数测量	19
第 3 章 微波电路 CAD	22
实验 1 传输线波形演示及圆图应用	22
实验 2 Microwave Office 软件系统介绍及应用	26
实验 3 螺旋电感的电磁分析	40
实验 4 集总元件滤波器	44
实验 5 功率分配器	46
实验 6 阻抗变换器	49
实验 7 阻抗调配器	53
实验 8 微波低通滤波器	56
第 4 章 微波测量	64
实验 1 波导测量系统认识、晶体定标	64
实验 2 驻波比测量	70
实验 3 单口网络阻抗测量	73
实验 4 双口网络参数测量	75
实验 5 波导衰减器定标	79
实验 6 波导移相器定标	82
实验 7 信号源驻波比、频率、输出功率的测量	87
实验 8 矢量网络分析仪的使用——滤波器调试	92
第 5 章 天线测量	96
实验 1 对称振子和无源振子方向图测量	96
实验 2 对称振子输入阻抗测量	99
实验 3 喇叭天线增益测量	100
实验 4 天线极化测量	105
实验 5 抛物面天线实验	108
第 6 章 射频系统	114
实验 1 传输线理论	114
实验 2 匹配理论	117
实验 3 功率衰减器	121
实验 4 功分器	125

实验 5 定向耦合器 129

实验 6 滤波器 133

实验 7 振荡器设计 135

实验 8 压控振荡器 139

实验 9 微带天线 141

实验 10 射频前端发射器 143

实验 11 射频前端接收机 145

实验 12 下变频器(混频器) 147

实验 13 微波实验软件简介 149

实验 14 史密斯圆图软件与应用 150

参考文献 153

第1章 电磁场与电磁波

实验1 静电场边值问题

一、实验目的

- (1) 学习用模拟法测量静电场。
- (2) 了解影响实验精度的因素。

二、实验原理

在静电场的无源区域中, 电场强度 $\mathbf{E}'$ 、电位移矢量 $\mathbf{D}'$ 及电位 Φ' 满足下列方程:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}' = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D}' = 0 \\ \mathbf{D}' = \epsilon \mathbf{E}' \\ \mathbf{E}' = -\nabla \Phi' \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式中 ϵ 为静电场的介电常数。

在恒定电流场中, 电场强度 $\mathbf{E}$ 、电流密度 $\mathbf{J}$ 及电位 Φ 满足下列方程:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \\ \mathbf{J} = \delta \mathbf{E} \\ \mathbf{E} = -\nabla \Phi \end{cases} \quad (1.1.2)$$

式中 δ 为恒定电流场中导电媒质的电导率。

因为方程组(1.1.1)与方程组(1.1.2)在形式上完全相似, 所以 Φ' (静电场中的电位分布函数) 与 Φ (恒定电流场中的电位分布函数) 应满足同样形式的微分方程。由方程组(1.1.1)和方程组(1.1.2)很容易求得

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi') = 0 \quad (1.1.3)$$

$$\nabla \cdot (\delta \nabla \Phi) = 0 \quad (1.1.4)$$

式中 ϵ 与 δ 处于相应的位置, 它们为对偶量。

若 ϵ 与 δ 在所讨论区域为均匀分布(即其值与坐标无关), 则方程(1.1.3)与方程(1.1.4)均可简化为拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 \Phi' = 0, \quad \nabla^2 \Phi = 0$$

由电位场解的唯一性定理可知：满足相同微分方程的两个电位场具有相同的边界电位值，因此，在保证边界电位值不变的情况下，我们可以用恒定电流场的模型来模拟无源区域的静电场，当静电场中媒质为均匀媒质时，其导电媒质也应为均匀媒质，这样测得的恒定电流场的电位分布就是被模拟的静电场的电位分布，不需要做任何改动。

三、实验设备

测试模型板两块，JW-12 稳压电源一台，万用表一部。

被测模型有两个：一个用来模拟无边缘效应的平行板电容器中的电位分布；另一个用来模拟有金属盖的无限长接地槽形导体内的电位分布。被模拟的平行板电容器和加盖槽形导体对应的模型如图 1.1.1 所示。

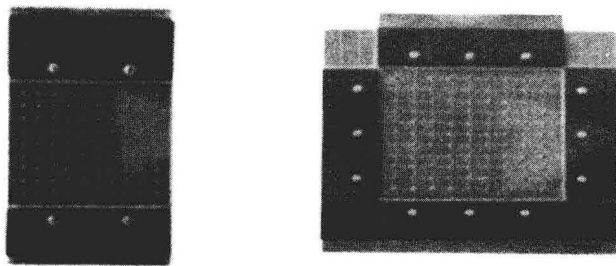


图 1.1.1 静电场测试模型

被测模型是在碳素导电纸上按所需的几何形状及尺寸制成如图 1.1.1 所示的金属“电极”。在金属“电极”上加所需的电压(本实验所需电压约为 10 V)，以保证所需的边界电位值。

四、实验内容

(1) 自制“网格板”。为保证各被测点位置，采用“网格板”来定位。该“网格板”是透明塑料薄板，板上沿 X、Y 坐标轴每一厘米打一个小孔，形成一个正方形网格阵。

(2) 按图 1.1.2 连接好电路，测稳压源输出电压并记入实验数据表中，测量时使用万用表逐点测量各点电位值。估算万用表测量误差。

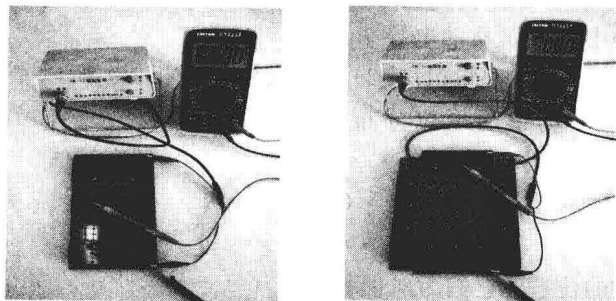


图 1.1.2 静电场测试电路

五、实验结果

1. 实验数据

平行板电容器： $u =$ _____ (V)

行 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

加盖槽形导体： $u =$ _____ (V)

行 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

2. 思考

本实验方法很简单，但它是工程上很有效的一种方法。因此，除测出所需点电位分布外，还要深入理解有关的一些问题。在做实验报告时除一般要求内容数据外，还要回答下列问题：

(1) 将平行板电容器的被测模型所测的数据画成距离-电位图，与平行板电容器理论

上的距离-电位比较,并解释为什么在 $Y=0$ 及 $Y=10\text{ cm}$ 附近(“电极”附近)电位有急剧变化。

(2) 若要模拟有边缘效应的情况,其被测模型应如何改变?

(3) 根据所测得的边界条件数据,编程计算加盖模型空间内 $X=3\text{ cm}$ 、 $Y=7\text{ cm}$ 点电场的近似值 $E(3, 7)$ 。若要精确求出各点电场值,实验应该如何改进?

(4) 造成本实验误差的因素有哪些?应如何克服?

(5) 如果想要模拟三维边值型静电场,你认为可以采取什么方法?

实验 2 平面电磁波的反射和干涉

一、实验目的

(1) 利用平面线极化电磁波投射到介质板上产生反射波和透射波的干涉现象来了解平面电磁波传播的一些基本特性。

(2) 利用干涉条纹(即空间驻波)的分布学习一种测量微波波长的方法,观察在介质中电磁波的传播,从而测量其相对介电常数。

二、实验原理

微波干涉仪与光学迈克尔逊干涉仪的基本原理相同,只是采用微波(厘米级)代替光波(微米级)而已。微波干涉仪如图 1.2.1 所示。

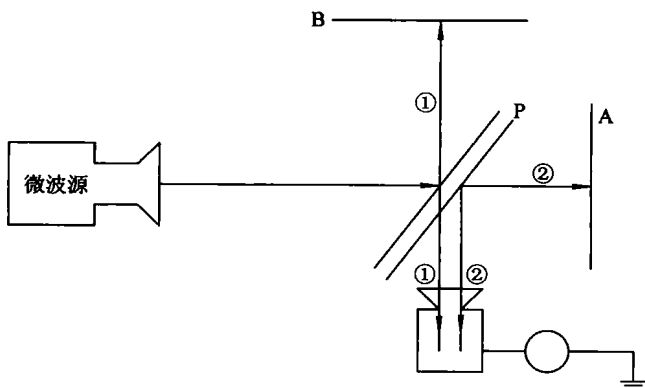


图 1.2.1 微波干涉仪

由微波源(发射喇叭)发射的平面线极化电磁波,射向与电磁波传播方向成 45° 的半透明介质板 P,其中一部分电磁波被 P 反射,向固定金属板 B 方向传播,而另一部分电磁波透射过 P 板向活动金属板 A 方向传播。此电磁波被分为极化方向一致而传播方向垂直的两束电磁波。因此半透明反射板也被称为分束板。

为使得入射的电磁波被分为振幅近似相等的两束波,以提高实验效果,反射介质板采用两层介质板构成。

如图 1.2.1 所示,被分束后的两束电磁波各自遇到金属板反射回分束板,再经反射或透射后有一部分分别进入接收喇叭天线。由于第①和第②两束波所经过的路径各不相同,而分束板对两路信号的作用是相同的,因此接收喇叭天线所接收的信号值与 A、B 两板的位置和其路径中有无其他材料有关。当两束波经不同路径所引起的相位差为 2π 的整数倍时,两波相叠加,干涉加强;当其相位差为 π 的整数齐次倍时,两波相叠加,干涉减弱。如果入射波波长为 λ ,两波的波程差为 δ ,则有

当 $\delta = k\lambda (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,接收天线检波后电流表有极大指示;

当 $\delta = \frac{2k+1}{2}\lambda (k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$ 时,接收天线检波后电流表有极小指示。

B 板固定不变,从端点移动 A 板改变波程差 δ ,当出现电流表指示极小时,A 板位置在某处(由千分尺读出),再同方向继续移动 A 板又再次出现电流表指示极小时,A 板的移动位置改变恰好为 $\lambda/2$ 。继续同方向移动 A 板,当出现 $m+1$ 个电流表指示极小时,移动距离就为 $m/2$ 个波长,由此可测出微波源的波长。

在实验时也可以测量其极大点,但通常测量极小点比测量极大点准确。

使用微波干涉仪也可以测量介质的相对介电常数 ϵ_r 。在图 1.2.1 中,固定反射板 B 前插入一块介电常数为 ϵ_r 、厚度为 d 的介质板。这时在这一路径中电磁波传播的波程改变了,由于插有介质板的这一路电磁波波程增加了 $\Delta\delta$,即

$$\Delta\delta = 2d(\sqrt{\epsilon_r} - 1) \quad (1.2.1)$$

这样必然改变了原来两束波相干的极小点位置。如将可移动金属板 A 向后移动 Δl ,使得 $\Delta l = \frac{\Delta\delta}{2}$,则回到原来同级的极小点。测得 Δl 与介质板厚度 d 后可由下列公式求出 ϵ_r 。

$$\Delta l = d(\sqrt{\epsilon_r} - 1) \quad (1.2.2)$$

三、实验设备

实验设备如图 1.2.1 所示。微波源与各透射板、反射板有足够的距离以保证近似为平面波。分束板应与入射电磁波成 45° ,与两反射板也成 45° ,A、B 两反射板互相垂直。

四、实验内容

(1) 分别调整微波源的发射角度和仰角,使接收天线和发射天线在同一平面,并注意接收与发射有相同的极化面。

(2) 移动反射板 A,观察接收信号强弱变化,当干涉加强时要尽可能地使电流表指示最大,相抵消时尽可能地使电流表指示最小。(通常使电流表最大指示与最小指示之比在 10:1 以上。)

(3) 调节可移动反射板 A,测出电流表指示极小点时 A 板的位置 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 ,求出电磁波的波长 λ 。

(4) 注意在固定反射板前插入介质板后对应的同级极小点相应位置及移动距离 Δl ,用千分尺测出介质板厚度 d ,求出 ϵ_r 数值。

注:① 公式 $\Delta l = d(\sqrt{\epsilon_r} - 1)$ 是在忽略介质板表面反射时得出的。

② 测极小值 A 板位置时有时感到变化不够灵敏, 可以先测量极小点两边变化较灵敏的点, 然后再做处理。

五、实验结果

1. 实验数据

A 板位置	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4
千分尺读数					
$\lambda =$					

$$\Delta l = \quad d = \quad \epsilon_r = \left(\frac{\Delta l}{d} + 1 \right)^2 =$$

2. 心得与收获

实验 3 电磁波的极化

一、实验目的

- (1) 学习电磁波极化的测量方法。
- (2) 学会判读线极化波和圆极化波的方法。

二、实验原理

平面电磁波沿轴线前进没有 E_z 分量, 一般情况下, 存在 E_x 分量和 E_y 分量。如果 E_y 分量为零, 只有 E_x 分量, 则称其为 x 方向线极化; 如果只有 E_y 分量而没有 E_x 分量, 则称其为 y 方向线极化。

一般情况下, E_x 和 E_y 都存在, 在接收此电磁波时, 将得到包含水平与垂直两个分量的电磁波。当这两个分量的电磁波的振幅和相位不同时, 可以得到各种不同极化形式的电磁波。

- (1) 如果电磁波场强的 x 和 y 分量分别为

$$E_x = E_{xm} \cos(\omega t + \varphi_1 - kz) \quad (1.3.1)$$

$$E_y = E_{ym} \cos(\omega t + \varphi_2 - kz) \quad (1.3.2)$$

其中, φ_1 、 φ_2 为初相位, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

当 φ_1 等于 φ_2 , 或 φ_1 与 φ_2 的相位差为 $2n\pi$ 时, 其合成电场为线极化波, 其合成场大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_{xm}^2 + E_{ym}^2} \cos(\omega t - kz + \varphi_1) \quad (1.3.3)$$

电场分量与 x 轴的夹角 α 为

$$\alpha = \arctan \frac{E_y}{E_x} = \arctan \frac{E_{ym}}{E_{xm}} = \text{常数} \quad (1.3.4)$$

(2) 如果 φ_1 与 φ_2 的相位差为 90° 或 270° , 则

$$E_x = E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_1) \quad (1.3.5)$$

$$E_y = E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_2) \quad (1.3.6)$$

其合成场大小为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = E_m = \text{常数} \quad (1.3.7)$$

它与 x 轴所成的夹角的正切为

$$\tan \alpha = \frac{E_y}{E_x} = \tan(\omega t - kz + \varphi_1) \quad (1.3.8)$$

所以

$$\alpha = \omega t - kz + \varphi_1 \quad (1.3.9)$$

式(1.3.7)和式(1.3.9)分别表示合成场振幅不随时间变化, 其方向是随时间而旋转的圆极化波。

(3) 如果其相位差不为 0° 、 180° , 也不是 90° 、 270° , 则合成波为椭圆极化波。

三、实验设备

实验设备如图 1.3.1 所示。图中: ①为微波源; ②为隔离器; ③为负载; ④为可变衰减器; ⑤为 T 型接头; ⑥和⑦为发射天线; ⑧为可变相移器; ⑨为接收天线; ⑩为检波器; ⑪为指示电流表。

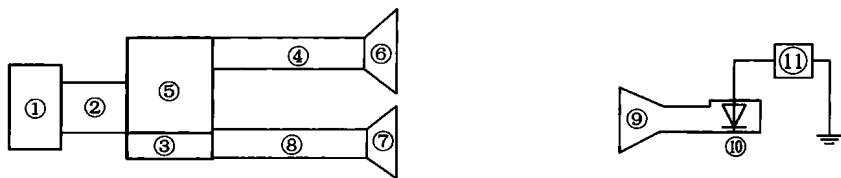


图 1.3.1 电磁波极化实验设备

T 型接头用于将传来的微波功率分成等强度的两束波。可变衰减器用于调节支路中的功率强弱。可变相移器用于调节支路中的初相位 φ , 从而产生相位的变化。

四、实验内容

- (1) 用金属板挡住发射天线⑥, 转动接收天线⑨, 测出发射天线⑦的辐射图(线极化)。
- (2) 用金属板挡住发射天线⑦, 利用接收天线⑨, 测出发射天线⑥的辐射图(线极化)。
- (3) 发射天线⑥和发射天线⑦同时辐射, 使接收天线⑨在水平方向和垂直方向指示相同(不同时可调节衰减器改变两束波的振幅, 使其相等); 使接收天线⑨在水平方向和垂直方向电磁波相位正交(将接收天线⑨转动 45° , 调节可变相移器, 使电流表指示与水平和垂直相等), 测其合成辐射图为圆极化。也可调节可变相移器, 测出不同的相移量时的椭圆极化图像。

五、实验结果

1. 实验数据

线极化：

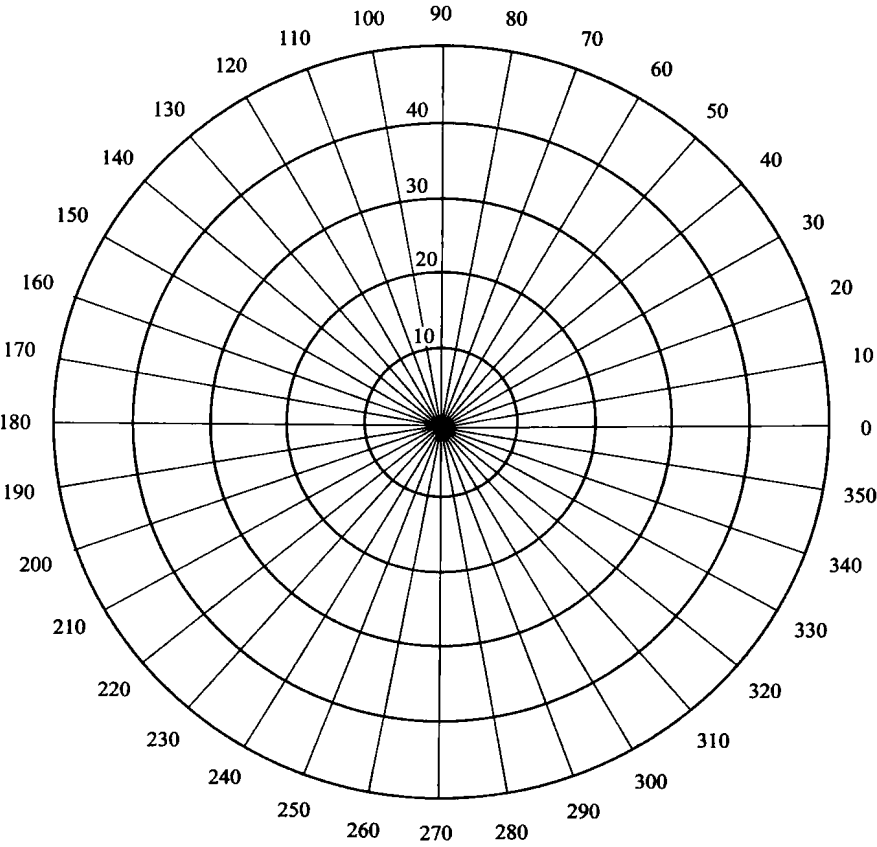
角度/(°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
天线⑥																			
天线⑦																			

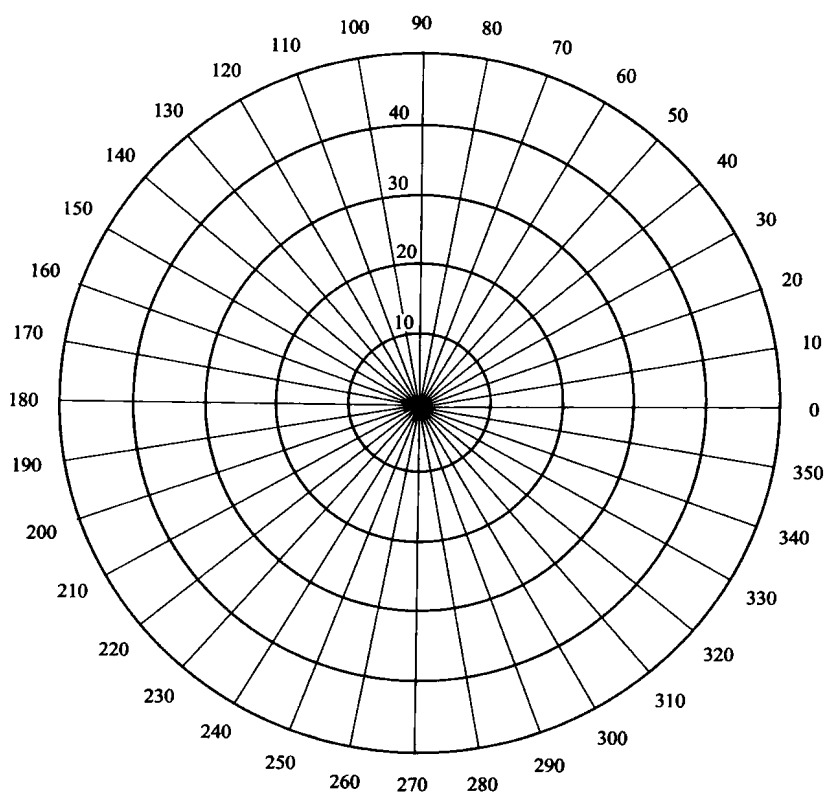
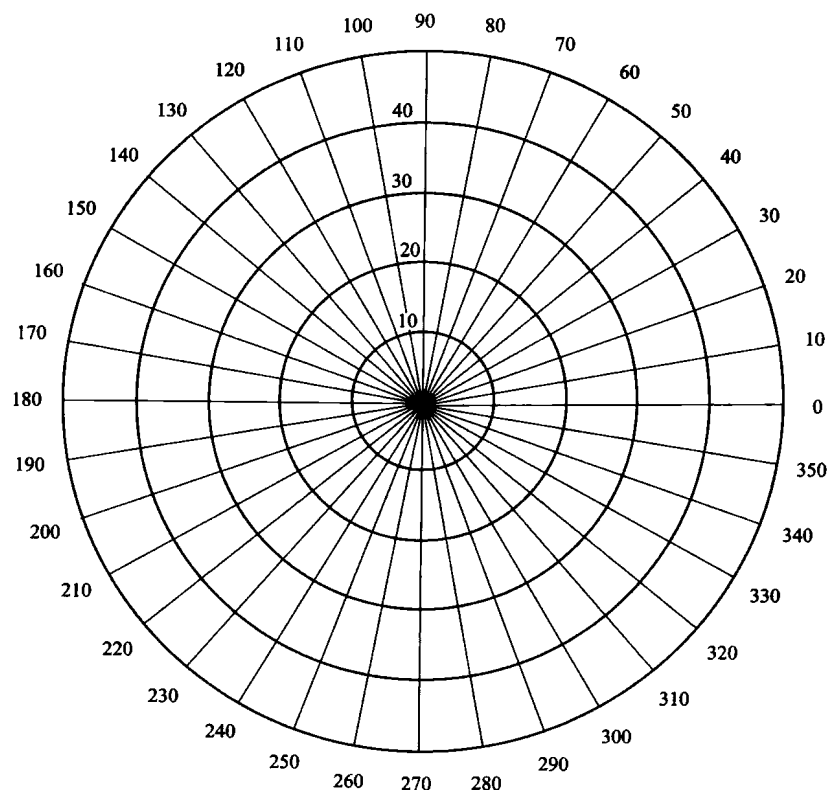
圆极化：

角度/(°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
同时辐射																			

2. 数据处理

根据测试数据，画出三种极化方式的方向图。





3. 思考

将实验测量所得的图形与教材上所示结果进行对比,说明二者不同的原因,并将此写入实验报告。

如图 1.3.2 所示, A 为椭圆横轴场强, B 为椭圆纵轴场强,其所测图像中 A 为椭圆长轴, B 为椭圆短轴。当 B 等于零时为水平线极化波,当 A 等于零时为垂直线极化波,当 B 等于 A 时为圆极化波。

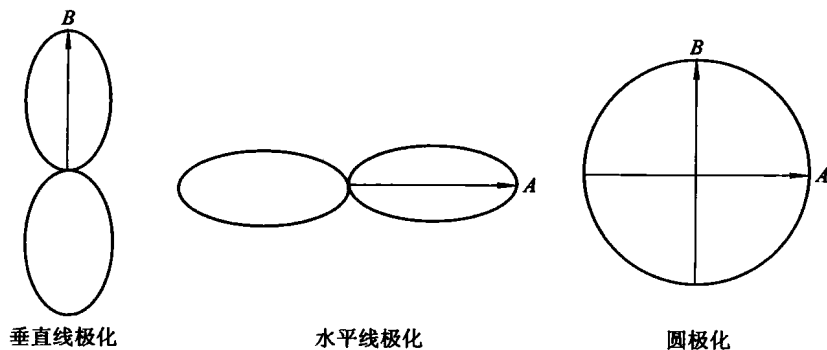


图 1.3.2 极化图

第2章 微波技术

实验1 双导线阻抗测量与阻抗匹配

一、实验目的

- (1) 熟悉双导线传输线上的三种工作状态。
- (2) 学会双导线测量与单枝节匹配的方法。

二、实验原理

双导线传输线原理如图 2.1.1 所示。

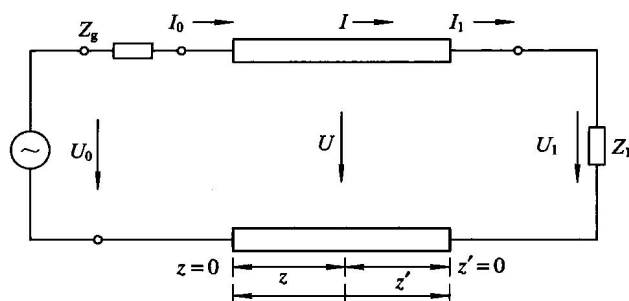


图 2.1.1 双导线传输线

1. 短路状态 $Z_L=0$, $\Gamma_L=-1$

$$\begin{cases} U(z') = U_L^+ e^{j\beta z'} + U_L^- e^{-j\beta z'} = U_L^+ e^{j\beta z'} - U_L^+ e^{-j\beta z'} = j2U_L^+ \sin\beta z' \\ I(z') = I_L^+ e^{j\beta z'} + I_L^- e^{-j\beta z'} = I_L^+ e^{j\beta z'} + I_L^+ e^{-j\beta z'} = 2I_L^+ \cos\beta z' \end{cases} \quad (2.1.1)$$

电压、电流呈驻波分布。

$$Z(z') = \frac{U(z')}{I(z')} = jZ_0 \tan\beta z' \quad (2.1.2)$$

$\beta z' = m\pi, z' = m \cdot \frac{\lambda_g}{2}$	$\beta z' = (2m+1)\frac{\pi}{2}, z' = (2m+1)\frac{\lambda_g}{4}$
电压节点 $ U(z') = 0$ 电流腹点 $ I(z') = 2 I_L^+ $	电压节点 $ U(z') = 2 U_L^+ $ 电流腹点 $ I(z') = 0$