

# 电磁波传播特性 实验报告

Zhang Chuheng  
zhangchuheng123@live.com

2015年10月15日

## 1 第一部分：电磁波参量的测量

### 1.1 实验目的

1. 了解电磁波综合测试仪的结构，掌握其工作原理
2. 利用相干波原理，测定自由空间内电磁波波长 $\lambda$ ，确定电磁波的相位常数 $K$ 和波速 $v$

### 1.2 实验仪器

1. 三厘米固态信号发生器一台
2. 电磁波综合测试仪一台
3. 反射板（金属板）两块
4. 半透射板（玻璃板）一块

### 1.3 实验原理简述

#### 1.3.1 其他参数可以由波长 $\lambda$ 求得

第一部分实验要求测得自由空间内电磁波的波长 $\lambda$ 、电磁波的相位常数 $K$ 和波速 $v$ 。其中，电磁波的相位常数和波速可以由以下公式求出

$$\begin{cases} K &= 2\pi/\lambda \\ v &= \lambda f = \omega/K \end{cases} \quad (1)$$

因此问题可以归结为测得电磁波的波长。

### 1.3.2 本实验采用干涉方法求得波长

本实验采用干涉的方法测定电磁波的波长，实验原理图如图1（实验手册图1-1）所示。入射电磁波 $\vec{E}_i$ ，通过一个半透射板C，半透射板将电磁波分束为两列波，分别经过金属全反射板A和B的反射后在接收喇叭天线 $P_R$ 前方叠加，形成干涉。

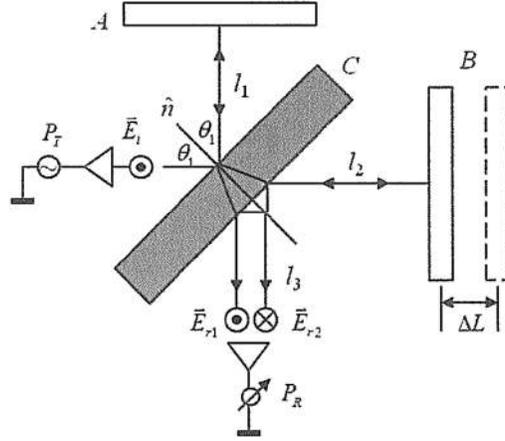


图 1: 电磁波参量测试原理图

### 1.3.3 简要推算过程

假设入射极化波为

$$\vec{E}_i = E_0 e^{-j\phi} \quad (2)$$

则，到达接收喇叭天线 $P_R$ 处的两束电磁波分别为

$$\begin{cases} \vec{E}_{r1} = -RT_0 T_c \vec{E}_0 e^{-j\phi_1} \\ \vec{E}_{r2} = -RT_0 T_c \vec{E}_0 e^{-j\phi_2} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\vec{E}_{r1}$ 为经过全反射板A反射后形成的， $\vec{E}_{r2}$ 为经过全反射板B反射后形成的。 $R$ 为C板的反射系数， $T_0$ 为由空气进入介质板的折射系数， $T_c$ 为由介质板进入空气的折射系数。固定板A和可移动板B的反射系数均为-1。同时，其中的相位因子可以表示为

$$\begin{cases} \phi_1 = K(l_1 + l_2) = KL_1 \\ \phi_2 = K(l_2 + l_3) = K(l_1 + l_2 + \Delta L) = KL_2 \end{cases} \quad (4)$$

由叠加原理可以知道，当 $2\Delta L$ 满足

$$2\Delta L = (2n + 1)\lambda/2 \quad (5)$$

时，两束波叠加相消，接收指示为零。

### 1.3.4 波长的实验计算公式

在实验中，我们沿着一个方向改变反射板B的位置，是的 $P_R$ 重复出现零指示即可测出电磁波的波长。实验中的计算公式为

$$\lambda = 2(\Delta L_3 - \Delta L_0)/3 \quad (6)$$

其中， $\Delta L_3$ 和 $\Delta L_0$ 分别为可移动板B出现第三个波节点以及初始波节点时的位移。

### 1.4 实验数据

实验测得的数据如下表所示。

试验次数	1	2	3
微安表示零次数 $n + 1$	4	4	4
初始示零位置 $\Delta L_0$ (mm)	5.849	5.119	5.480
第三次示零位置 $\Delta L_3$ (mm)	53.067	53.637	53.854
可移动板位移 $(\Delta L_3 - \Delta L_0)$ (mm)	47.2180	48.5180	48.3740
波长 $\lambda = 2(\Delta L_n - \Delta L_0)/n$ (mm)	31.4787	32.3453	32.2493
波长平均值 $\bar{\lambda} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$ (mm)	32.024		
波长理论值 $\lambda = c/f$ (mm)	31.995		

表 1: 实验数据表

可以由此计算出实验测得的电磁波波长为

$$\lambda_{\text{实验}} = 32.024\text{mm} \quad (7)$$

由此可以计算出相位常数和波速

$$\begin{cases} K = 2\pi/\lambda = 1.9620\text{cm}^{-1} \\ v = \lambda f = 3.0007 \times 10^8\text{m/s} \end{cases} \quad (8)$$

结合光速理论值 $c = 299792458\text{m/s}$ 以及信号发生器频率 $f_0 = 9.37\text{GHz}$ ，可以算出波长理论值为

$$\lambda_{\text{理论}} = 31.995\text{mm} \quad (9)$$

相对误差

$$\xi = \frac{|\lambda_{\text{实验}} - \lambda_{\text{理论}}|}{\lambda_{\text{理论}}} = 0.09\% \quad (10)$$

## 1.5 实验误差分析

通过实验我们可以发现，信号源工作波长 $\lambda_{\text{理论}}$ 与测得波长 $\lambda_{\text{实验}}$ 之间存在差别，下面就此分析实验误差产生的原因。

我们计算理论波长的时候，计算利用的波速为真空中的光速，然而实际实验中存在空气介质，因此电磁波传播的波速会低于真空中的光速，从而实际的波长应该略微小于理论波长。但是我们可以看到此次实验中，实验测得波长略大于理论波长，考虑到：1) 介质对于波长的影响极其微弱；2) 实验测得波长与理论波长差距极小，我们可以认为实验结果的不精准是由于实验误差引起。

## 1.6 实验中的观察与思考

实验中有时会观察到微安表的示数并不能完全达到零，只会在波节处出现一个极小值点。这样的现象是因为被分束的两束电磁波到达探测器的时候，振幅并不是完全相同的。造成它们振幅不同的原因有很多，比如，透射反射介质板C可能并不是完全将两束电磁波等分，或者反射板A、B对于电磁波的反射具有不同的损耗。

为什么振幅不一样的两束电磁波叠加使得波节处的场强不为零呢？现简要解释如下。假设 $\vec{E}_{r1}$ 和 $\vec{E}_{r2}$ 的振幅不一样，但是偏振方向一样。因此对于合场强有

$$\begin{aligned} |\vec{E}_r| &= |\vec{E}_{r1} + \vec{E}_{r2}| \\ &= |E_{10}e^{-j\phi_1} + E_{20}e^{-j\phi_2}| \\ &= |E_{10}e^{-j\phi_1} + E_{20}e^{-j\phi_2}| \\ &= \sqrt{E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(2K\Delta L)} \end{aligned} \quad (11)$$

另外，如果两束叠加电磁波的偏振方向不一样，并且他们偏振方向之间的夹角为 $\theta$ 的情况下，合场强为

$$|\vec{E}_r| = \sqrt{E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(\theta)\cos(2K\Delta L)} \quad (12)$$

如图2所示，分别画出了 $E_{10} = E_{20}$ 和 $E_{10} \neq E_{20}$ 时，场强随着B板位移的变化趋势。在图中可以看出， $E_{10} = E_{20}$ 时，波节处探测到的场强值可以达到0，而 $E_{10} \neq E_{20}$ 时，波节的场强大小大于零。

## 2 第二部分：电磁波的反射与折射

### 2.1 实验目的

1. 研究电磁波在良导体表面的反射（本次实验仅做这一项）
2. 研究电磁波在电介质表面的反射和折射
3. 研究电磁波在介质表面发生无反射的条件

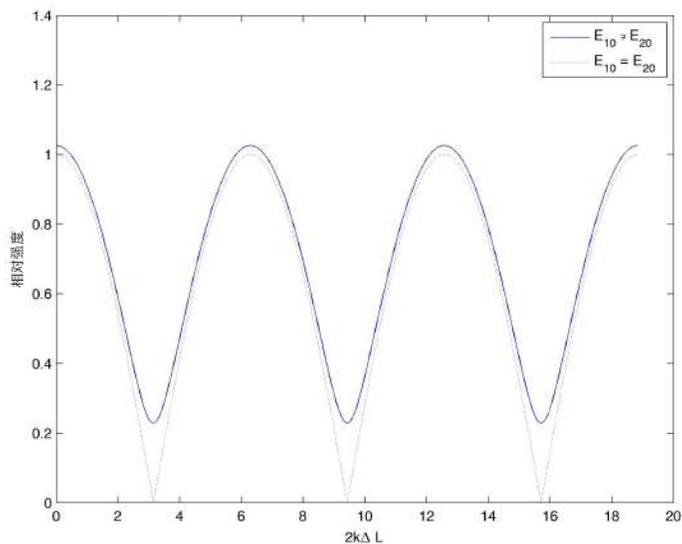


图 2:  $E_{10} = E_{20}$ 和 $E_{10} \neq E_{20}$ 时喇叭天线探测器处的场强变化

## 2.2 实验仪器

1. 三厘米固态信号发生器
2. 电磁波综合测试仪
3. 测试用介质板、金属板

## 2.3 实验原理

### 2.3.1 电磁波斜入射到两种不同介质分界面上的反射和折射

电磁波斜入射到两种不同介质分界面上的反射和折射分别遵从反射定律以及折射定律。

### 2.3.2 平行极化波入射到两种介质分界面上发生全透射的条件

当平行极化波的入射角为布鲁斯特角的时候，电磁波会在介质界面发生全透射。

当平行极化波以布鲁斯特角入射到厚度为 $d$ 的介质板上时，入射波在第一个界面上发生全反射，折射波入射在第二个界面上，仍然满足发生全透射的条件，因此介质板后面仍然可以接收到全部的入射信号。

### 2.3.3 垂直极化波不可能产生全透射

如果入射电磁波为垂直极化波，可以证明无论从光疏介质到光密介质还是光密介质到光疏介质，都不可能产生全透射。

沿着任意方向极化的平面波如果以布鲁斯特角入射到两种介质的分界面上时，反射波中只有垂直极化波分量，利用这种方法可以产生垂直极化波。

### 2.3.4 电磁波斜入射到良导体的表面的反射

电磁波斜入射到良导体表面时会发生全反射。

## 2.4 实验内容

### 2.4.1 调试实验装置

首先使得两个喇叭天线相互正对，它们的轴线应该在一条直线上。具体方法如下：旋转工作平台使得 $0^\circ$ 刻线与固定臂上的指针正对，再转动活动臂使得活动臂上的指针对正工作平台上的 $180^\circ$ 刻线，然后锁定活动臂。打开固态信号源开关，连接在接收喇叭天线上的微安表将会有指示，分别微调发射喇叭天线和接收喇叭天线的方向，使微安表的指示最大，这时发射天线与接收天线就相互正对了。

### 2.4.2 电磁波入射到良导体表面的反射特性

首先不加反射板，使得发射天线与接收天线正对，调整固态信号源，测出入射波电场 $E_1$ （可以使微安表指示 $80\mu A$ ），然后把良导体反射板放在转台上，使导体半平面对准转台上 $90^\circ$ 刻线，这时转台上的 $0^\circ$ 刻线与导体板的法线方向一致，转动转台改变入射角 $\theta_1$ ，测量在反射角 $\theta'_1 = \theta_1$ 时的反射波场强 $E'_1$ （仍用微安表指示的电流表示），把测试数据记录在表中。最后可以把接收天线转到导体板后，观察有无折射波。

## 2.5 实验数据

实验数据如下表所示。

入射角 $\theta_1$ (deg)	20	30	40	50	60	70	80
反射角 $\theta'_1$ (deg)	20.9	26.1	40.8	50.8	60.1	65.2	81.9
正入射时微安表示数 ( $\mu A$ )	80.0						
反射处微安表的示数 ( $\mu A$ )	68.2	76.0	77.0	93.7	92.7	63.8	70.1

表 2: 实验数据表

由此作出反射角和入射角的理论-实验对比图，可以看出实验较好地验证了反射定律。同时从表中数据我们还可以观察到随着入射角的增大，反射场先增大后减小的趋势。

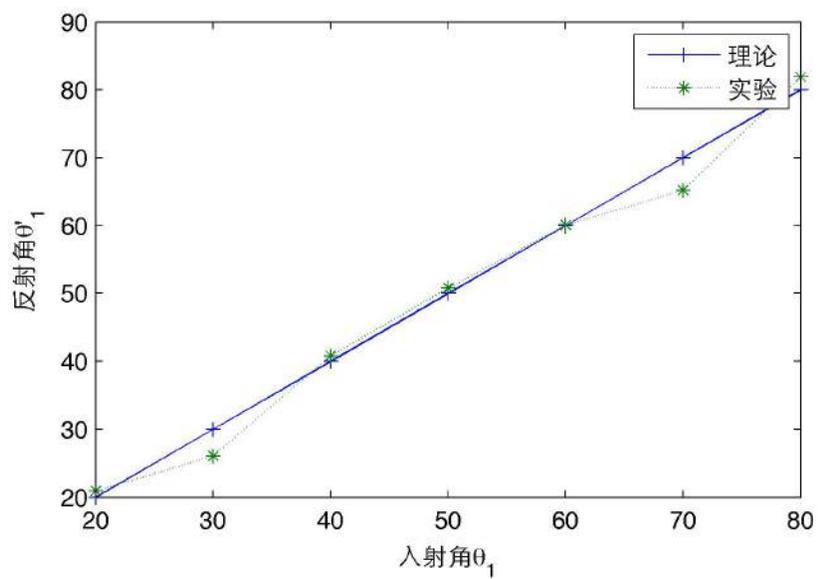


图 3: 对于反射定律的验证