

## 3.1 电磁波反射和折射实验

### 3.1.1 实验目的

- (1) 熟悉 S426 型分光仪的使用方法。
- (2) 掌握分光仪验证电磁波反射定律的方法。
- (3) 掌握分光仪验证电磁波折射定律的方法。

### 3.1.2 预习内容

电磁波的反射定律和折射定律。

### 3.1.3 实验设备与仪器

S426 型分光仪。

### 3.1.4 实验原理

电磁波在传播过程中如遇到障碍物,必定要发生反射。假设以一块大的金属板作为障碍物来研究,当电磁波以某一入射角投射到此金属板上时遵循反射定律,即反射线在入射线和通过入射点的法线所决定的平面上,反射线和入射线分居在法线两侧,反射角等于入射角。

电磁波斜入射到两种不同媒介分界面上时会发生反射和折射现象,同时,分界面对电磁波的反射和折射现象与入射波的极化方向有关。

将分界面的法线与入射波构成的平面定义为入射面,入射波与界面法线的夹角定义为入射角,反射波与界面法线的夹角定义为反射角,折射波与界面法线的夹角定义为折射角,如图 3-1 所示。

在电磁场理论中,电场  $E$  垂直于入射面的电磁波为垂直极化波,电场  $E$  平行于入射面的电磁波为平行极化波,而任意极化波(包括任意线极化波、圆极化波、椭圆极化波)总可以分解成垂直极化和平行极化两种线极化波的合成。

入射波、反射波、折射波传播方向与法线共面,即  $k_i$ 、 $k_r$ 、 $k_t$ 、 $n$  共面。电磁波入射到两种媒质分界面时满足反射定律和折射定律。

反射定律:  $\theta_i = \theta_r$ 。

折射定律:  $k_1 \sin\theta_i = k_2 \sin\theta_t$ , 或者  $n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$ 。

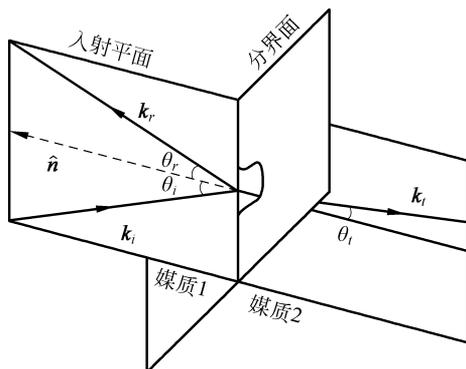


图 3-1 入射平面、入射(反射、折射)角示意图

式中,  $k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} = \frac{\omega}{c} n_1$ ,  $k_2 = \omega \sqrt{\epsilon_2 \mu_2} = \frac{\omega}{c} n_2$ ,  $n_1 = \sqrt{\epsilon_{r1} \mu_{r1}}$ ,  $n_2 = \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_{r2}}$ ,  $\theta_i$ 、 $\theta_r$  和  $\theta_t$  分别为入射角, 反射角和折射角。

若入射波为垂直极化, 反射波、折射波也是垂直极化; 若入射波为平行极化, 反射波、折射波也是平行极化。

### 1. 平行极化波

如图 3-2 所示, 当平行极化平面波从左半空间以入射角  $\theta_i$  斜入射到理想介质分界面时, 一部分波被反射, 反射角为  $\theta_r$ , 另一部分波则折射进入右半空间, 折射角为  $\theta_t$ 。

入射波:  $E_1^+ = E_m^+ (\mathbf{a}_x \cos \theta_i - \mathbf{a}_z \sin \theta_i) e^{-jk_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)}$

$$\mathbf{H}_1^+ = \mathbf{a}_y \frac{E_m^+}{\eta_1} e^{-jk_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (3-1)$$

反射波:  $E_1^- = R_{//} E_m^+ (-\mathbf{a}_x \cos \theta_i - \mathbf{a}_z \sin \theta_i) e^{-jk_1(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)}$

$$\mathbf{H}_1^- = \mathbf{a}_y \frac{R_{//} E_m^+}{\eta_1} e^{-jk_1(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \quad (3-2)$$

折射波:  $E_2^t = T_{//} E_m^+ (\mathbf{a}_x \cos \theta_t - \mathbf{a}_z \sin \theta_t) e^{-jk_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)}$

$$\mathbf{H}_2^t = \mathbf{a}_y \frac{T_{//} E_m^+}{\eta_2} e^{-jk_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (3-3)$$

式中,

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, \quad \eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \quad (3-4)$$

利用分界面上 ( $z = 0$ ) 电场和磁场切向分量连续的边界条件, 可得反射定律  $\theta_i = \theta_r$  以及折射定律为

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{\sqrt{\mu_1 \epsilon_1}}{\sqrt{\mu_2 \epsilon_2}} \xrightarrow{\mu_1 = \mu_2 = \mu_0} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad (3-5)$$

当一电磁波穿过如图 3-3 所示的介质板时, 由于介质板两侧媒质相同, 由折射定律可推得, 此电磁波入射到介质板时的入射角与穿过介质板的折射角相等, 均为  $\theta_i$ 。

可计算出平行极化波的反射系数  $R_{//}$  和折射系数  $T_{//}$  为

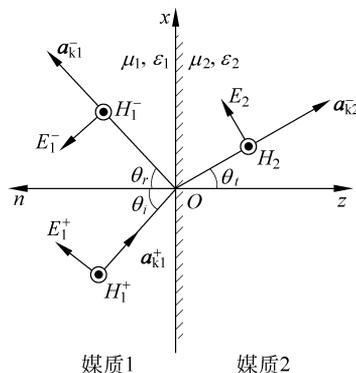


图 3-2 平行极化波斜入射理想介质

$$R_{//} = \frac{\eta_1 \cos\theta_i - \eta_2 \cos\theta_t}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t} \quad (3-6)$$

$$T_{//} = \frac{2\eta_2 \cos\theta_i}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t} \quad (3-7)$$

同时,平行极化波的反射系数和透射系数满足关系

$$1 + R_{//} = \left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right) T_{//}$$

## 2. 垂直极化波入射

可得垂直极化波的反射系数和折射系数为

$$R_{\perp} = \frac{\eta_2 \cos\theta_i - \eta_1 \cos\theta_t}{\eta_2 \cos\theta_i + \eta_1 \cos\theta_t} \quad (3-8)$$

$$T_{\perp} = \frac{2\eta_2 \cos\theta_i}{\eta_2 \cos\theta_i + \eta_1 \cos\theta_t} \quad (3-9)$$

全折射时没有反射波,发生全折射的条件可通过令反射系数为零得到。对平行极化波斜入射的情形,由式(3-6)令  $R_{//}=0$ ,可得全折射时的入射角:

$$\theta_i = \theta_B = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} = \arctan \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad (3-10)$$

该入射角称为布儒斯特角,写为  $\theta_B$ 。可以证明,此时的折射角  $\theta_t = 90^\circ - \theta_B$ 。可见,若电磁波以角度  $\theta_P$  入射到厚度为  $d$  的介质板表面,则

$$\sin\theta_t = \cos\theta_B = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (3-11)$$

这正是电磁波由 2 到 1 的全折射条件。因此,当电磁波以布儒斯特角从介质板的一侧入射时,在介质板的另一侧可接收到全部信号,如图 3-3 所示。

全折射现象只有在平行极化波的斜入射时才会发生,垂直极化波不会发生全折射。

由折射定律式(3-1)可知,波从光密媒质入射到光疏媒质时,必然有  $\theta_t > \theta_i$ ,而且  $\theta_t$  随  $\theta_i$  的增大而增大。因此,可以找到一个人射角,使其满足  $\theta_t = 90^\circ$ ,即满足关系

$$\sin\theta_i = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3-12)$$

此时,无论是平行极化波还是垂直极化波,其反射系数的绝对值都等于 1,即波在介质分界面上发生全反射现象。发生全反射现象时的入射角称为临界角,其值为

$$\theta_c = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} \quad (3-13)$$

## 3.1.5 实验内容与步骤

### 1. 连接仪器,调整系统

如图 3-4 所示,仪器连接时,两喇叭口面应互相正对,它们各自的轴线应在一条直线上。

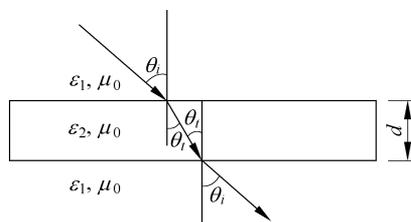


图 3-3 介质板全折射示意图

指示两喇叭位置的指针分别指于工作平台的  $90^\circ$  刻度处,将支座放在工作平台上,并利用平台上的定位销和刻线对正支座(与支座上刻线对齐)拉起平台上四个压紧螺钉旋转一个角度后放下,即可压紧支座。

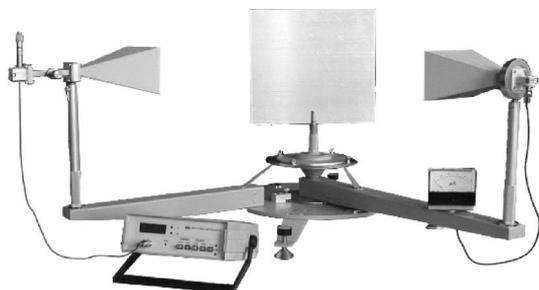


图 3-4 反射实验仪器的仪器布置

## 2. 电磁波反射实验

(1) 连接仪器。如图 3-4 所示为反射实验的仪器布置,连接仪器,调整系统。

(2) 调整仪器。仪器连接时,两喇叭口面互相正对,轴线在一条直线上,将工作平台的  $90^\circ$  刻度正对发射喇叭(其轴不可转动)的位置指针,固定后调整接收喇叭的转臂,使其位置指针指向工作平台的另一个  $90^\circ$  刻度处,则调整结束,轴线在一条直线上。

(3) 放上金属板。将支座放在工作平台上,并利用平台上的定位销和  $90^\circ$  刻线对正支座(与支座上刻线对齐),拉起平台上的四个压紧螺钉固定支座,放上金属板,调整角度,使得金属板与轴线平行。

(4) 测量入射角和反射角。系统调整后,  $0^\circ$  刻度与金属板平面的法线方向一致。旋转工作平台到  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $65^\circ$  作为入射角(入射角为入射波与反射板法线的夹角),转动接收喇叭的活动臂,观察电流计,寻找极值点,记录反射角。如果入射角太大,接收喇叭有可能直接接收入射波。做这项实验时应注意系统的调整和周围环境的影响。

(5) 可通过调整衰减器。调整发射功率,使表头指示超过半偏,接近满量程。

## 3. 电磁波折射实验

(1) 按如图 3-4 所示连接仪器,用与反射实验相同的方法调整仪器,使两喇叭口面的轴线处于同一条直线上,此时两喇叭位置的指针应分别指示于工作平台的  $90^\circ \sim 90^\circ$  刻度处。

(2) 调整发射、接收喇叭的高低位置,使两喇叭口面互相正对。

(3) 将支座放在工作平台上,并利用平台上的定位销和  $90^\circ$  刻线对正支座,拉起平台上四个压紧螺钉旋转一个角度后放下,将支座压紧。

(4) 将玻璃板放到支座上时,应使玻璃板平面与支座下面的小圆盘上的  $90^\circ \sim 90^\circ$  刻线一致。此时小平台上的  $0^\circ$  刻度就与金属板的法线方向一致。

(5) 转动小平台,将固定臂指针调到  $30^\circ \sim 65^\circ$  (为测量方便,调整间隔为  $5^\circ$ ,即选择  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $55^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $65^\circ$  作为入射角),这时固定臂指针所对应刻度盘上指示的刻度就是入射角的读数。

(6) 开启 DH1121B 型三厘米固态信号源。

(7) 在与入射喇叭同侧转动活动臂,当电流表显示出最大指示时,活定臂指针所对应刻度盘上指示的刻度就是反射角的读数,同时记录电流计示数。如果此时表头指示太大或太

小,应调整系统发射端的可变衰减器,使表头指示超过半偏,接近满量程。

(8) 在玻璃板的另一侧转动活动臂,当电流表显示出的最大指示时,活定臂指针所对应刻度盘上指示的刻度就是折射角的读数,同时记录电流计示数,此时不能调节衰减器。

### 3.1.6 实验报告

记录实验测得数据,验证电磁波的反射定律。

DH926B型微波分光仪的喇叭天线的增益大约是20dB,波瓣的理论半功率点宽度大约为:H面是 $20^\circ$ ,E面是 $16^\circ$ 。可变衰减器用来改变微波信号幅度的大小,衰减器的度盘指示越大,对微波信号的衰减也越大;晶体检波器可将微波信号变成直流信号或低频信号(当微波信号幅度用低频信号调制时)。

#### 1. 金属板全反射实验(见表3-1)

表3-1 实验结果记录

入射角/ $^\circ$	30	35	40	45	50	55	60	65
反射角/ $^\circ$								

#### 2. 观察介质板(玻璃板)上的反射和折射实验

将金属板换做玻璃板,观察、测试电磁波在该介质板上的反射和折射现象,请自行设计实验步骤和表格,计算反射系数和透射系数,验证透射系数的平方和反射系数的平方相加是否等于1。

### 3.1.7 思考题

- (1) 在衰减器旁边的螺钉有什么作用?
- (2) 电磁波的反射和激光的反射有何相同之处和不同之处?
- (3) 透射系数的平方和反射系数的平方相加是否等于1?为什么?进行误差分析。

## 3.2 单缝衍射实验

### 3.2.1 实验目的

掌握电磁波的单缝衍射时衍射角对衍射波强度的影响。

### 3.2.2 预习内容

电磁波单缝衍射现象。

### 3.2.3 实验设备

S426型分光仪。

### 3.2.4 实验原理

如图3-5所示,当一平面波入射到一宽度和波长可比拟的狭缝时,将发生衍射的现象。在缝后面出现的衍射波强度并不是均匀的,中央最强,同时也最宽。在中央的两侧,衍射波

强度迅速减小,直至出现衍射波强度的最小值,即一级极小,此时衍射角  $\theta = \arcsin \frac{\lambda}{a}$ ,其中  $\lambda$  为波长,  $a$  为狭缝宽度,两者取同一长度单位。然后,随着衍射角增大,衍射波强度又逐渐增大,直至出现一级极大值

$$\theta = \arcsin\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda}{a}\right)$$

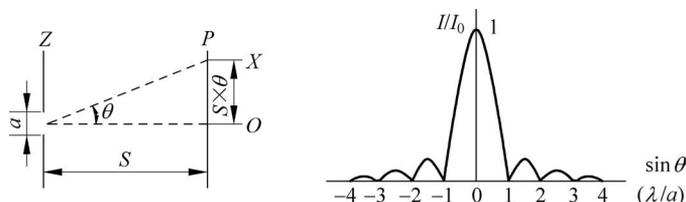


图 3-5 单缝衍射原理

### 1. 主极大

具有相同  $\theta$  角的屏上部位具有相同的光强,因而屏上的衍射图样是一些相互平行的条纹,它们都平行于狭缝。对于  $\theta=0$  处,各衍射光线之间由于没有光程差而相干加强,因而此处光强最大。最大光强与狭缝宽度的平方成正比,最大光强又称为主极大或零级衍射斑。

### 2. 次极大

除了中央主极大外,屏上光强分布还有次极大存在。次极大的位置可通过计算得到为

$$\theta = \pm 1.43\pi, \pm 2.46\pi, \pm 3.47\pi, \dots$$

通常把次极大的位置近似表示为

$$a \sin\theta = \pm (2k+1)\lambda/2 (k=1,2,3,\dots)$$

这些次极大又称为高级衍射斑。

高级衍射斑的强度比中央零级衍射斑的强度小得多。

### 3. 暗纹位置

暗纹位置满足关系

$$a \sin\theta = \pm k\lambda (k=1,2,\dots)$$

### 4. 明纹的角宽度

规定相邻暗纹的角距离为其间明纹的角宽度,即相邻暗纹间的区域为对应明纹范围,中央主极大的半角宽度为

$$\Delta\theta = \lambda/a$$

不难得到,各次极大的宽度均相等,均等于中央主极大的半宽度。

单缝衍射实验仪器的布置如图 3-6 所示。仪器连接时,预先按需要调整单缝衍射板的缝宽,当该板放到支座上时,应使狭缝平面与支座下面的小圆盘上的某一对刻线一致,此刻线应与工作平台上的  $90^\circ$  刻度的一对线一致。转动小平台使固定臂的指针在小平台的  $180^\circ$  处,此时小平台的  $0^\circ$  就是狭缝平面的法线方向。这时调整信号电平使表头指示接近满度。然后从衍射角  $0^\circ$  开始,在单缝的两侧使衍射角每改变  $2^\circ$  读取一次表头读数,并记录下来,这时就可画出单缝衍射强度与衍射角的关系曲线。根据微波波长和缝宽算出一级极小和一级极大的衍射角,并与实验曲线上求得的一级极小和极大的衍射角进行比较。

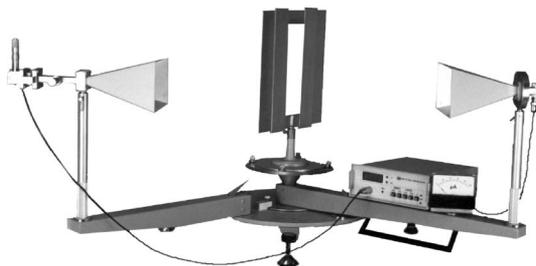


图 3-6 单缝衍射实验仪器的布置

### 3.2.5 实验报告

#### 1. 实验数据记录

记录实验测得数据,画出单缝衍射强度与衍射角的关系曲线,根据微波波长和缝宽算出一级极小和一级极大的衍射角,与实验曲线上求得的一级极小和极大的衍射角进行比较。

(1)  $a=70\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$ (见表 3-2)。

表 3-2 实验结果记录(1)

角度/ $^{\circ}$	左侧衍射强度/ $\mu\text{A}$	右侧衍射强度/ $\mu\text{A}$
0		
2		
4		
6		
8		
10		
12		
14		
16		
18		
20		
22		
24		
26		
28		
30		
32		
34		
36		
38		

续表

角度/(°)	左侧衍射强度/ $\mu\text{A}$	右侧衍射强度/ $\mu\text{A}$
40		
42		
44		
46		
48		
50		
52		

(2)  $a = 50\text{mm}, \lambda = 32\text{mm}$ (见表 3-3)。

表 3-3 实验结果记录(2)

角度/(°)	左侧衍射强度/ $\mu\text{A}$	右侧衍射强度/ $\mu\text{A}$
0		
2		
4		
6		
8		
10		
12		
14		
16		
18		
20		
22		
24		
26		
28		
30		
32		
34		
36		
38		
40		
42		
44		
46		
48		
50		
52		

## 2. 实验数据分析

1)  $a = 70\text{mm}, \lambda = 32\text{mm}$

(1) 理论一级极小角度:

(2) 实验一级极小角度:

(3) 理论一级极大角度:

(4) 实验一级极大角度:

2)  $a = 50\text{mm}, \lambda = 32\text{mm}$

(1) 理论一级极小角度:

(2) 实验一级极小角度:

(3) 理论一级极大角度:

(4) 实验一级极大角度:

## 3. 实验图表分析

理论衍射曲线(归一化后):

实验 1 的实际图形曲线:

实验 2 的实际图形曲线:

## 4. 误差分析

### 3.3 双缝干涉实验

#### 3.3.1 实验目的

掌握来自双缝的两束中央衍射波相互干涉的影响。

#### 3.3.2 预习内容

电磁波双缝干涉现象。

#### 3.3.3 实验设备

S426 型分光仪。

#### 3.3.4 实验原理

如图 3-7 所示,如果一平面波垂直入射到一金属板的两条狭缝上,则每一条狭缝就是次级波波源。由两缝发出的次级波是相干波,因此在金属板的后面空间中,将产生干涉现象。当然,平面波通过每个缝也有衍射现象。因此本实验将是衍射和干涉两者结合的结果,主要研究来自双缝的两束中央衍射波相互干涉的结果。这里设  $b$  为双缝的间距,  $a$  为缝宽,  $a$  接近波长  $\lambda$ , 例如:  $\lambda = 3.2\text{cm}$ ,  $a = 4\text{cm}$ , 这时单缝的一级极小衍射角接近  $53^\circ$ 。因此取较大的  $b$ , 则干涉强度受单缝衍射的影响小; 反之, 当  $b$  较小时, 干涉强度受单缝衍射影响大。

干涉加强的角度为:  $\varphi = \arcsin\left(K \cdot \frac{\lambda}{a+b}\right)$ , 式中  $K = 1, 2, \dots$ 。

干涉减弱的角度为:  $\varphi = \arcsin\left(\frac{2K+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a+b}\right)$ , 式中  $K = 1, 2, \dots$ 。

#### 3.3.5 实验内容与步骤

如图 3-8 所示, 仪器连接时, 预先按需要调整双缝衍射板的缝宽, 当该板放到支座上时, 应使狭缝平面与支座下面的小圆盘上的某一对刻线一致, 此刻线应与工作平台上的  $90^\circ$  刻度的一对线一致。转动小平台使固定臂的指针在小平台的  $180^\circ$  处, 此时小平台的  $0^\circ$  就是狭缝平面的法线方向。这时调整信号电平使表头指示接近满度。然后从衍射角  $0^\circ$  开始, 在双缝的两侧使衍射角每改变  $1^\circ$  读取一次表头读数, 并记录下来。

由于衍射板横向尺寸小, 所以当  $b$  取得较大时, 为了避免接收扬声器直接收到发射扬声

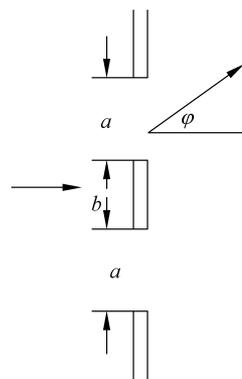


图 3-7 双缝衍射原理图

器的发射波或通过板的边缘过来的绕射波,活动臂的转动角度应小些。

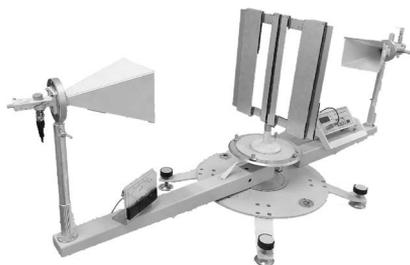


图 3-8 双缝干涉实验仪器的布置

### 3.3.6 实验报告

#### 1. 记录实验测得的数据

验证干涉加强和干涉减弱时的角度特点。标注一级极大和一级极小的角度,整理数据,绘制出曲线进行分析。

1) 双缝衍射实验( $a=40\text{mm}$ ,  $b=80\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$ (见表 3-4))

表 3-4 实验结果记录(1)

角度/ $^{\circ}$	左侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	右侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	角度/ $^{\circ}$	左侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	右侧干涉强度/ $\mu\text{A}$
0			18		
1			19		
2			20		
3			21		
4			22		
5			23		
6			24		
7			25		
8			26		
9			27		
10			28		
11			29		
12			30		
13			31		
14			32		
15			33		
16			34		
17					

以角度为横坐标,干涉强度为纵坐标作出曲线图:

2) 双缝衍射实验( $a=30\text{mm}$ ,  $b$  分别等于  $70\text{mm}$ 、 $50\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$ )

(1)  $a=30\text{mm}$ ,  $b=70\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$ (见表 3-5)。

表 3-5 实验结果记录(2)

角度/ $^{\circ}$	左侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	右侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	角度/ $^{\circ}$	左侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	右侧干涉强度/ $\mu\text{A}$
0			18		
1			19		
2			20		
3			21		
4			22		
5			23		
6			24		
7			25		
8			26		
9			27		
10			28		
11			29		
12			30		
13			31		
14			32		
15			33		
16			34		
17			35		

以角度为横坐标,干涉强度为纵坐标作出曲线图:

(2)  $a = 30\text{mm}$ ,  $b = 50\text{mm}$ ,  $\lambda = 32\text{mm}$  (见表 3-6)。

表 3-6 实验结果记录(3)

角度/ $^{\circ}$	左侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	右侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	角度/ $^{\circ}$	左侧干涉强度/ $\mu\text{A}$	右侧干涉强度/ $\mu\text{A}$
0			22		
1			23		
2			24		
3			25		
4			26		
5			27		
6			28		
7			29		
8			30		
9			31		
10			32		
11			33		
12			34		
13			35		
14			36		
15			37		
16			38		
17			39		
18			40		
19			41		
20			42		
21			43		

以角度为横坐标,干涉强度为纵坐标作出曲线图:

## 2. 数据分析

(1) 当  $a=40\text{mm}$ ,  $b=80\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$  时, 由理论知识可知:

干涉加强的角度为:  $\varphi = \arcsin\left(K \cdot \frac{\lambda}{a+b}\right)$ , 式中  $K=1, 2, \dots$ 。

干涉减弱的角度为:  $\varphi = \arcsin\left(\frac{2K+1}{2} \cdot \frac{\lambda}{a+b}\right)$ , 式中  $K=1, 2, \dots$ 。

可知理论的 1 级极大干涉角和极小干涉角分别为 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。实验得出的 1 级极大干涉角和极小干涉角分别为 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。

(2) 当  $a=30\text{mm}$ ,  $b=70\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$  时, 理论的 1 级极大干涉角和极小干涉角分别为 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。实验得出的 1 级极大干涉角和极小干涉角分别为 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。

(3) 当  $a=30\text{mm}$ ,  $b=50\text{mm}$ ,  $\lambda=32\text{mm}$  时, 理论的 1 级极大干涉角和极小干涉角分别为 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。实验得出的 1 级极大干涉角和极小干涉角分别为 \_\_\_\_\_ 和 \_\_\_\_\_。

### 3.3.7 思考题

- (1) 试阐述  $a$ 、 $b$  的变化对干涉产生的影响。
- (2) 假设  $b$  趋于 0, 实验结果的变化趋势将如何?

## 3.4 迈克尔逊干涉实验

### 3.4.1 实验目的

掌握电磁波波长的测量方法。

### 3.4.2 预习内容

迈克尔逊干涉现象。

### 3.4.3 实验设备

S426 型分光仪。

### 3.4.4 实验原理

微波迈克尔逊干涉测量波长实验的基本原理如图 3-9 所示, 在平面波前进的方向上放置成  $45^\circ$  的半透射板。

由于该板的作用, 将入射波分成两束波, 一束向 A 方向传播, 另一束向 B 方向传播。由于 A、B 处全反射板的反射, 两列波就再次回到半透射板并到达接收喇叭处, 于是接收喇叭收到两束同频率, 振动方向一致的两个波。如果这两个波的相位差为  $2\pi$  的整数倍, 则干涉加强; 当相位差为  $\pi$  的奇数倍则干涉减弱。因此在 A 处放一固定板, 让 B 处的反射板移动, 当表头指示从一次极小变到又一次极小时, 则 B 处的反射板就移动  $\lambda/2$  的距离, 因此由这个距离就可求得平面波的波长。

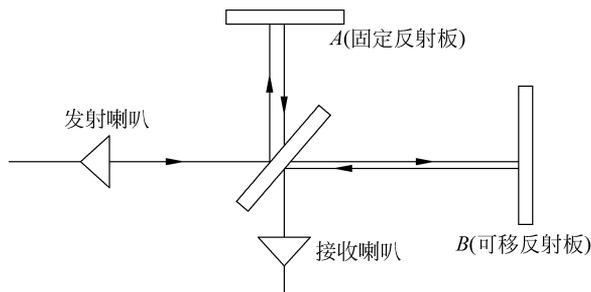


图 3-9 迈克尔逊干涉实验原理

当可移反射板移动通过  $n+1$  个极小点时, 第一个极小点与最后一个极小点之间的距离为  $L$  时, 有

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (3-14)$$

### 3.4.5 实验内容及步骤

如图 3-10 所示, 使两喇叭口面互成  $90^\circ$ 。半透射板与两喇叭轴线互成  $45^\circ$ , 将距离读数机构通过它本身带有两个螺钉旋入底座上, 使其固定在底座上, 再插上反射板, 使固定反射板的法线与接收喇叭的轴线一致, 可移反射板的法线与发射喇叭轴线一致。实验时, 将可移反射板移到距离读数机构的一端, 在此附近测出一个极小的位置, 然后旋转读数机构上的手柄使反射板移动, 从表头上测出  $n+1$  个极小值, 并同时从距离读数机构上得到相应的位移读数, 从而求得可移反射板的移动距离  $L$ , 则由式(3-14)得波长  $\lambda = \frac{2L}{n}$ 。



图 3-10 迈克尔逊干涉实验仪器的布置

### 3.4.6 实验报告

以下是自由空间电磁波波长的测量过程。

- (1) 整机进行调整, 发射天线和接收天线轴线在同一水平线上。
- (2) 开机预热后, 调整可变衰减器, 使接收端接收机表头接近合适的刻度, 接近满值。
- (3) 按照图 3-10 所示, 安装反射板、透射板, 组成迈克尔逊干涉仪, 透射板  $45^\circ$  方向。
- (4) 将 A、B 反射板法向方向垂直。
- (5) 固定 B 反射板, 将 B 反射板利用手柄移动到标尺的最左侧或者最右侧, 注意固

定好。

(6) 开始利用两点法进行测试,旋转手柄使  $B$  反射板来回移动,测得 5 个最小值,记录这些最小值对应的标尺值  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$ ,求得  $d_5 - d_1$ ,得到平面波波长  $2 \times (d_5 - d_1) / 4$ ,见表 3-7。

表 3-7 实验结果记录

	1	2	3
$d_1$			
$d_2$			
$d_3$			
$d_4$			
$d_5$			
波长			
平均值			

(7) 根据测得的波长数值,计算传播常数。

(8) 利用频谱分析仪测量电磁波频率,计算出波长,与迈克尔逊干涉仪法测出的波长值进行比较。

### 3.4.7 实验分析

1) 利用实验结果记录

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{n} = \frac{2 \times (d_5 - d_1)}{4} \quad (3-15)$$

由式(3-15)计算得到三组波长和平均波长见表 3-8 所示。

图 3-8 两点逐差法的计算结果

波长/mm			
波长平均值/mm			

2) 计算传播常数

传播常数的计算公式为

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3-16)$$

### 3.4.8 思考题

(1) 测量波长时,介质板位置如果旋转  $90^\circ$  将出现什么现象? 能否准确测量波长? 为什么?

(2) 如何测量全折射?

### 3.5 极化实验

#### 3.5.1 实验目的

验证电磁波的马吕斯定律。

#### 3.5.2 预习内容

线极化波的相关概念和电磁波的马吕斯定律。

#### 3.5.3 实验设备

DH962B 型分光仪。

#### 3.5.4 实验原理

电磁波电场强度的取向和幅值随时间而变化的性质,在光学中称为偏振。如果这种变化具有确定的规律,则称电磁波为某种极化电磁波(简称极化波)。如果极化电波的电场强度始终在垂直于传播方向的(横)平面内,其电场矢量的端点沿一闭合轨迹移动,则这一极化电磁波称为平面极化波。电场的矢端轨迹称为极化曲线,并按极化曲线的形状对极化波命名。极化的类型对于单一频率的平面极化波,极化曲线是一椭圆(称为极化椭圆),故称为椭圆极化波。顺传播方向看去,若电场矢量的旋向为顺时针,符合右手螺旋法则,称为右旋极化波;若旋向为逆时针,符合左手螺旋法则,称为左旋极化波。

偏振波电磁场沿某一方向的能量有  $\cos^2\theta$  的关系(见图 3-11)。这就是光学中的马吕斯定律:  $I = I_0 \cos^2\theta$ , 式中  $I$  为偏振光的强度,  $\theta$  是  $I$  与  $I_0$  之间的夹角。

DH926B 型微波分光仪两喇叭口面互相平行,并与地面垂直,其轴线在一条直线上,接收喇叭和一段旋转短波导连在一起。在旋转短波导的轴承环的  $90^\circ$  范围内,每隔  $5^\circ$  有一刻度,所以接收喇叭的转角可以从此处读出。

如图 3-12 所示,矩形角锥喇叭天线所发射出来的电磁波属于线极化波。若矩形喇叭的宽边与其所接矩形波导的宽边平行,则矩形喇叭口面上电场的极化方向与矩形喇叭宽边垂直,同时,矩形角锥喇叭天线也只能接收与宽边垂直的电磁波。如果两喇叭之间有一个夹角  $\theta$ ,则接收喇叭所接收到的电磁波的电场和功率分别为

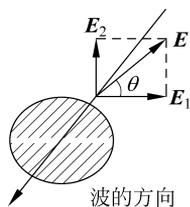


图 3-11 电磁波偏振示意图

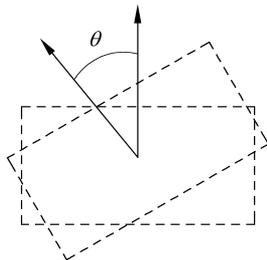


图 3-12 收发喇叭天线的极化

$$E = E_0 \cos\theta$$

$$P = P_0 \cos^2\theta$$

其中,  $E_0$  和  $P_0$  分别为接收喇叭与发射喇叭极化相同时所接收到的电场和功率。

### 3.5.5 实验过程及方法

#### 1. 实验装置的安装

DH926B型微波分光仪两喇叭口面互相平行,并与地面垂直,其轴线在一条直线上。由于接收喇叭与一段旋转短波导连在一起,所以旋转喇叭口可以接收到不同角度的极化电磁波信号。

#### 2. 实验步骤

- (1) 整机进行调整,使接收与发射喇叭正对,发射天线与接收天线轴线在同一水平线上。
- (2) 打开 DH1121B 型三厘米固态信号源,开机预热后,调整可变衰减器,使接收端接收机表头接近合适的刻度,接近满偏。
- (3) 按上述方法进行实验仪器的安装。
- (4) 发射喇叭口固定不动,接收喇叭口在旋转短波导的轴承环的  $90^\circ$  范围内,每隔  $5^\circ$  旋转一次,并记录接收信号的电流强度。
- (5) 由马吕斯定律的公式  $I = I_0 \cos^2\theta$  算出接收信号强度的理论值,并与实际测量值进行比较,验证马吕斯定律。

### 3.5.6 实验分析

整理数据表格(见表 3-9)。

表 3-9 实验数据记录

$I$ 值/mA	$\theta/(\circ)$									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
理论值										
实际值										

### 3.5.7 思考题

- (1) 垂直极化波是否能够发生全折射? 为什么? 给出推导过程。
- (2) 本实验中,平行极化和垂直极化可以调节吗? 平行极化波如何调节出来,自行设计实验方案,如何验证全折射的原理?

## 3.6 圆极化波的产生和检测

### 3.6.1 实验目的

利用线极化波合成圆极化波并进行圆极化波的检测。

### 3.6.2 预习内容

圆极化波的产生原理,左旋圆极化波,右旋圆极化波。

### 3.6.3 实验设备

S426 型分光仪, DH30003 型栅网组件。

### 3.6.4 实验原理

波的极化描述了电场强度矢量在空间某点位置上随时间变化的规律。无论是线极化波、圆极化波或椭圆极化波都可由同频率相互正交的两个线极化波合成。若此两个线极化波同相(或反相),则其合成场的波为线极化波;若相位差为  $90^\circ$ ,即  $\Delta\phi = \pm 90^\circ$  且幅度相等,合成场波为右旋或左旋圆极化波;若不满足线极化和圆极化波的条件,则为右旋或左旋椭圆极化波。

DH30003 型栅网组件是由两个栅条方向相差  $90^\circ$  的栅网组成。栅网(见图 3-13)是在一金属框架上绕有一排互相平行的金属丝,以反射平行金属丝的电场, DH30003 型栅网组件与 S426 型微波分光仪组合使用可获得圆极化波。

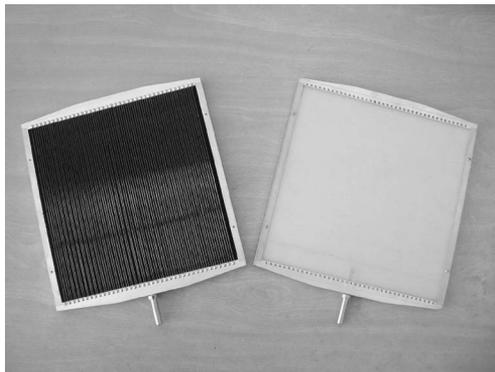


图 3-13 DH30003 型栅网组件

### 3.6.5 实验内容及步骤

如图 3-14 所示,  $P_{r1}$  为垂直栅网,  $P_{r2}$  为水平栅网, 当发射喇叭  $P_{r0}$  转角  $45^\circ$  后, 辐射波的电场  $E_{\perp}$  分解为  $E_{i//}$  与  $E_{i\perp}$  两个分量。喇叭辐射出的电磁波照射到分光仪介质板后分为两路, 一路经过分光仪介质板的反射传播到  $P_{r1}$  垂直栅网的金属丝栅条上。  $P_{r1}$  只反射  $E_{\perp}$  分量, 而  $E_{//}$  分量透过垂直栅网被吸收; 另一路信号透过分光介质板到达金属丝栅条  $P_{r2}$ ,  $P_{r2}$  只反射  $E_{//}$  分量, 而  $E_{\perp}$  分量透过水平栅网被吸收。  $P_{r1}$  反射的  $E_{\perp}$  分量经过分光介质板透射到达接收喇叭  $P_{r3}$ ,  $P_{r2}$  反射的  $E_{//}$  分量经过分光介质板反射到达接收喇叭  $P_{r3}$ 。这时转动接收喇叭  $P_{r3}$ , 当  $P_{r3}$  喇叭 E 面与垂直栅网网线平行时收到  $E_{\perp}$  波, 当  $P_{r3}$  喇叭 E 面与平行栅网网线平行时收到  $E_{//}$  波。经几次调整发射喇叭  $P_{r0}$  的转角, 使  $P_{r3}$  接收到的  $|E_{//}| = |E_{\perp}|$ , 此时实现了圆极化的两个正交分量幅度相等的要求。然后接收喇叭  $P_{r3}$  在  $E_{\perp}$  与  $E_{//}$  之间

转动,通过改变  $P_{r2}$  水平栅网位置,使  $P_{r3}$  接收的波具有  $|E_{\alpha}| = |E_{//}| = |E_{\perp}|$ ,从而实现了  $E_{//}$  与  $E_{\perp}$  两个波的相位差为  $\pm 90^{\circ}$ ,得到圆极化波。

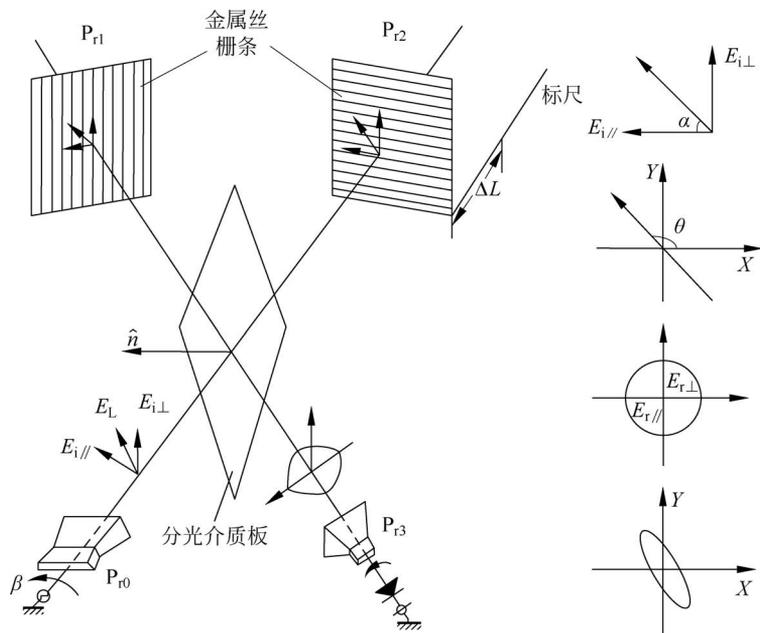


图 3-14 栅网实现波极化的原理图

由于测试条件所限,  $|E_{\alpha}|$  与  $|E_{//}|$ 、 $|E_{\perp}|$  不可能完全相等,  $P_{r3}$  转角  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  时, 总会出  
现检波电压的波动, 当  $E_{\min}/E_{\max} \propto \sqrt{V_{\min}/V_{\max}} \geq 0.93$ , 即椭圆度大于 0.93 时, 可以认为基  
本上实现了圆极化波的要求。

图 3-15 为栅网实验系统布置图。使 S426 型微波分光仪两喇叭口面互呈  $90^{\circ}$ , 半透射板  
与两喇叭轴线互呈  $45^{\circ}$ ,  $P_{r1}$  与接收喇叭口面平行, 与发射喇叭口面垂直,  $P_{r2}$  与发射喇叭口  
面平行, 与接收喇叭口面垂直。首先, 调整发射喇叭  $P_{r0}$  的转角  $\beta$ , 使  $P_{r3}$  分别接收的  $E_{\perp}$  和  
 $E_{//}$  幅度相等, 记录转角  $\beta$  度数。其次改变  $P_{r2}$  位置, 使  $P_{r3}$  处于  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  任何转角时, 其接  
收的场幅度不变, 从而获得圆极化波。

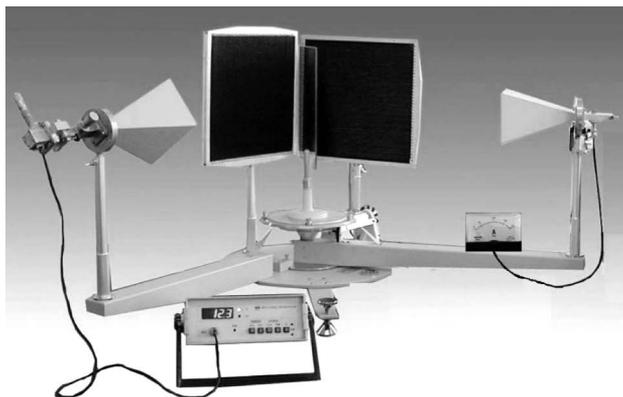


图 3-15 栅网实验系统布置图

### 3.6.6 实验报告

- (1) 写出设计方案,记录实现圆极化幅度相等要求的  $P_{r0}$  转角  $\beta$  的度数。
- (2) 记录  $P_{r3}$  不同转角下的电流值,计算生成的圆极化波的椭圆度(表 3-10~表 3-13)。

表 3-10 实验数据记录

$\theta/(^\circ)$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$I$									

表 3-11 实验数据记录

$\theta/(^\circ)$	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$I$									

表 3-12 实验数据记录

$\theta/(^\circ)$	190	200	210	220	230	240	250	260	270
$I$									

表 3-13 实验数据记录

$\theta/(^\circ)$	280	290	300	310	320	330	340	350	360
$I$									

## 3.7 圆极化波左旋/右旋实验

### 3.7.1 实验目的

- (1) 研究右旋、左旋圆极化波的形成、辐射和接收过程。
- (2) 研究右旋、左旋圆极化波的反射和折射特性及其测试方法。

### 3.7.2 预习内容

方圆波导(矩-圆波导)转换,右旋、左旋圆极化波。

### 3.7.3 实验设备

S426 型分光仪, DH30002 型极化天线组件。

### 3.7.4 实验原理

电磁波极化天线是由方圆波导转换、介质移相圆波导和圆锥喇叭连接而成。介质圆波导可做  $360^\circ$  旋转,并有刻度指示转动的角度。圆极化波辐射装置方圆波导(见图 3-16)使矩形波导中的  $TE_{10}$  的电场  $E_Y$  过渡到圆波导中的  $TE_{11}$  模的电场  $E_R$ 。在装有介质片的圆波

导段内分解为平行介质面的一个分量  $E_t$  和垂直介质片平面的一个分量  $E_n$  两个电场分量, 因  $E_t$  和  $E_n$  的速度不同, 即  $V_c = V_n > V_t = V_c / \sqrt{\epsilon_r}$ , 式中  $V_c$  为空气中的波速,  $V_t$  和  $V_n$  分别为  $E_t$  波和  $E_n$  波的速度。当介质片的长度  $L$  取得合适时, 使  $E_n$  波的相位超前  $E_t$  波的相位  $90^\circ$ , 这就实现了圆极化波相位条件的要求。介质片设计在频率约为 9370MHz 时, 使两个分量的波相位差为  $90^\circ$ 。为使  $E_n$  与  $E_t$  的幅度相等, 可使介质片的法向  $\hat{n}$  与  $Y$  轴之间夹角为  $\alpha = \pm 45^\circ$ , 若介质片的损耗略去不计, 则有各电场分量的幅值满足  $E_{tm} = E_{nm} = 1/\sqrt{2} E_{rm}$ , 实现了圆极化波幅度相等条件的要求(有时需稍偏离  $45^\circ$  以实现幅度相位的要求)。

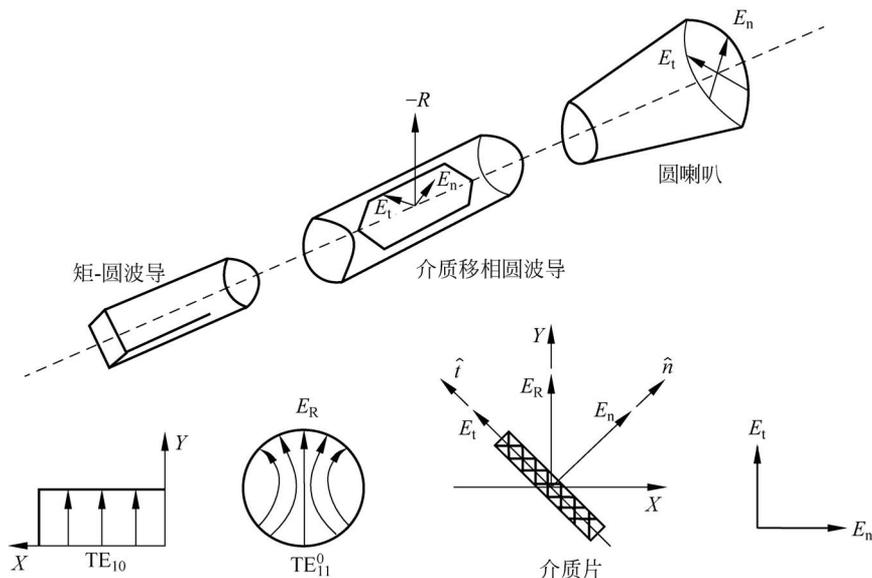


图 3-16 圆极化波辐射(或接收)装置

由于  $E_n$  的相位超前  $E_t 90^\circ$ , 当  $\hat{n}$  转到  $\hat{Y}$  方向与电磁波传播方向之间符合右手螺旋规则时, 产生右旋圆极化波; 当  $\hat{n}$  转到  $\hat{Y}$  方向与电磁波传播方向之间符合左手螺旋规则时, 产生左旋圆极化波。

### 3.7.5 实验内容及步骤

#### 1. 圆极化波的产生

如图 3-17 所示, 将 S426 型微波分光仪发射端喇叭换成 DH30002 型电磁波极化天线, 即如图 3-18 所示的圆锥喇叭, 并使圆锥喇叭连接方式同原矩形发射喇叭的连接方式(圆锥喇叭的方圆波导转换仍连接微波衰减器和三厘米固态信号源的振荡器); S426 型微波分光仪的接收喇叭(矩形喇叭)口面应与 DH30002 型电磁波极化天线(圆锥喇叭)口面互相正对, 它们各自的轴线应在一条直线上, 指示两喇叭位置的指针分别指于工作平台的  $90^\circ$  刻度或  $0^\circ \sim 180^\circ$  某刻度处。矩形接收喇叭的宽边与地平行。

将发射喇叭(圆锥喇叭)旋转  $45^\circ$ , 其内部介质片也随之旋转, 内部介质片应与喇叭垂直轴线成  $45^\circ$ , 此时, 理论上实现了圆极化波幅度相等条件的要求。察看表头指示, 同时, 旋转 S426 型微波分光仪的接收喇叭(矩形喇叭), 如果表头指示在微波分光仪的接收喇叭旋转到

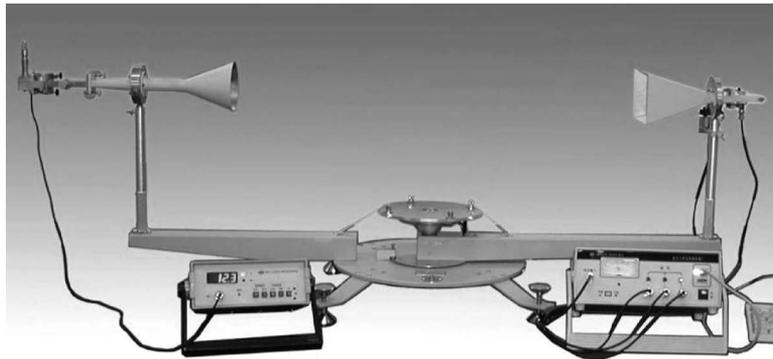


图 3-17 圆极化波左旋/右旋实验



图 3-18 DH30002 型电磁波极化天线

任一角度时基本接近,就实现了用 DH30002 型电磁波极化天线得到了圆极化波;但如果表头指示差别很大,适当调整发射喇叭(圆锥喇叭)圆波导内介质片的角度,直到接收喇叭旋转到任一角度时表头指示接近。旋转矩形接收喇叭,并记录下不同转角下所收到的信号值。

## 2. 圆极化波的反射/折射

右旋圆极化波经过反射后成为左旋圆极化波,而折射进入另一媒质时仍为右旋圆极化波。辐射的右旋圆极化波必须用右旋圆极化天线接收。若用左旋圆极化波天线接收,则接收信号为零(见图 3-19)。相反亦然。

在将 S426 型微波分光仪发射端喇叭——DH30002 型电磁波极化天线(圆锥喇叭)调整形成圆极化波的基础上,将微波分光仪接收端喇叭(矩形喇叭)更换成 DH30002 型电磁波极化天线(圆锥喇叭),并使圆锥喇叭连接方式同原矩形接收喇叭连接方式(圆锥喇叭的方圆波导转换仍连接微波分光仪的检波器);接收与发射喇叭(DH30002 型电磁波极化天线)口面互相正对,它们各自的轴线应在一条直线上,指示两喇叭位置的指针分别指于工作平台的  $90^\circ$  刻度处。

将支座放在工作平台上,并利用平台上的定位销和刻线对正支座(与支座上的刻线对齐),拉起平台上四个压紧螺钉旋转一个角度后放下,即可压紧支座。将半透射板放到支座



表 3-15 矩形接收喇叭在不同转角下接收的电流值

$\theta/(^{\circ})$	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$I$									

表 3-16 矩形接收喇叭在不同转角下接收的电流值

$\theta/(^{\circ})$	190	200	210	220	230	240	250	260	270
$I$									

表 3-17 矩形接收喇叭在不同转角下接收的电流值

$\theta/(^{\circ})$	280	290	300	310	320	330	340	350	360
$I$									

(2) 计算所产生的圆极化波的椭圆度。

## 2. 记录圆极化波反射、透射波的接收特性

1) 直射特性(表 3-18)

表 3-18 直射波的接收电流( $I$ )

圆极化发射天线		右旋 $\alpha = -45^{\circ}$	左旋 $\alpha = 45^{\circ}$
圆极化接收天线	右旋		
	左旋		

2) 反射、折射特性(入射角  $30^{\circ}$ )(表 3-19 和表 3-20)

表 3-19 反射波的接收电流( $I$ )

圆极化发射天线		右旋 $\alpha = -45^{\circ}$	左旋 $\alpha = 45^{\circ}$
圆极化接收天线	右旋		
	左旋		

表 3-20 透射波的接收电流( $I$ )

圆极化发射天线		右旋 $\alpha = -45^{\circ}$	左旋 $\alpha = 45^{\circ}$
圆极化接收天线	右旋		
	左旋		

3) 反射、折射特性(入射角  $50^{\circ}$ )(表 3-21 和表 3-22)

表 3-21 反射波的接收电流( $I$ )

圆极化发射天线		右旋 $\alpha = -45^{\circ}$	左旋 $\alpha = 45^{\circ}$
圆极化接收天线	右旋		
	左旋		

表 3-22 透射波的接收电流(I)

圆极化发射天线		右旋 $\alpha = -45^\circ$	左旋 $\alpha = 45^\circ$
圆极化接收天线	右旋		
	左旋		

### 3.8 布拉格衍射实验

#### 3.8.1 实验目的

- (1) 培养综合性设计电磁波实验方案的能力。
- (2) 验证电磁波的布拉格方程。

#### 3.8.2 预习内容

布拉格方程和布拉格衍射现象。

#### 3.8.3 实验设备

S426 型分光仪, 模拟晶体及支架, 模片。

#### 3.8.4 实验原理

任何的真实晶体, 都具有自然外形和各向异性的性质, 这与晶体的离子、原子或分子在空间按一定的几何规律排列密切相关。

X 射线的波长与晶体的常数属于同一数量级。实际上晶体是起着衍射光栅的作用。因此可以利用 X 射线在晶体点阵上的衍射现象来研究晶体点阵的间距和相互位置的排列, 以达到对晶体结构的了解。立方晶格是最简单的晶格, 为立方体结构, 如图 3-21 所示。

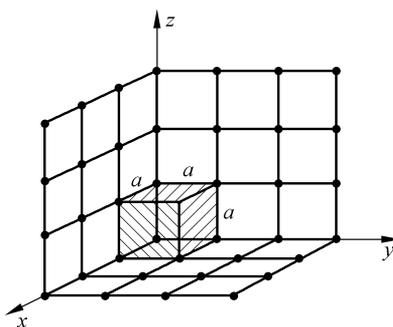


图 3-21 立方晶格

为了区分晶体中无限多族的平行晶面的方位, 人们采用米勒指数标记法。先找出晶面在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个坐标轴上以点阵常量为单位的截距值, 再取 3 个截距值的倒数比并化为最小整数比 ( $h : k : l$ ), 这个晶面的密勒指数就是 ( $hkl$ )。当然与该面平行的平面的密勒指数也是 ( $hkl$ )。利用密勒指数可以很方便地求出一族平行晶面的间距。对于立方晶格, 密勒指数为 ( $hkl$ ) 的晶面族, 其面间距  $d_{hkl}$  可按下式计算:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \tag{3-17}$$

$$d_{120} = \frac{a}{\sqrt{5}} = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 2^2 + 0^2}}, \quad d_{110} = \frac{a}{\sqrt{2}} = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}}, \quad d_{100} = a = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}}$$

式中,  $a$  为立方晶格的边长(晶格常数)。

图 3-22 为晶面与  $x$ - $y$  平面的交线, 图 3-22 中的实线表示 ( $100$ ) 面与  $x$ - $y$  平面的交线,

虚线与点画线分别表示(110)面和(120)面与  $xOy$  平面的交线。

可以用 X 射线在晶体内原子平面族的反射来解释 X 射线衍射效应的理论,如有一单色平行于  $xoy$  平面的 X 射线束以掠射角  $\theta$  入射于晶格点阵中的某平面族,例如图 3-22 所示之

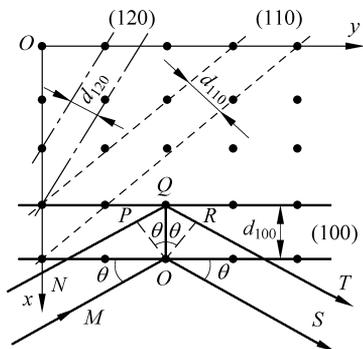


图 3-22 晶面在  $xOy$  平面上的交线

(100)晶面族产生反射,相邻平面间的波程差为

$$PQ + QR = 2d_{100} \sin\theta \quad (3-18)$$

式中,  $d_{100}$  是(100)平面族的面间距。若波程差是波长的整数倍,则二反射波有相长干涉,即满足布拉格定律:

$$2d \sin\theta = n\lambda, n = 0, 1, 2, \dots \quad (3-19)$$

而得到加强,它规定了衍射的 X 射线从晶体射出的方位。

对每个格点位置上有相同类型原子的简单立方结构,随着间距  $d$  的减小,在每个晶面上的原子数目也减少,反射就变得弱些。当用单色波对处于特定方位的晶体进行分析时,随着掠射角  $\theta$  的改变,可得到一个反射光强度的分布。若把最强的反射峰对应的  $\theta$  角值代入式(3-19),就能算出对这个峰值有贡献的平面族的面间距  $d$ ,如有几个满足布拉格定律的晶面族产生反射,其弱者可视为总强度分布的本底。

本实验是仿照 X 射线入射真实晶体发生衍射的基本原理,制作了一个方形点阵的模拟晶体,以微波代替 X 射线,使微波向模拟晶体入射,观察从不同晶面上点阵的反射波产生干涉应符合的条件,这个条件就是布拉格方程,即当微波波长为  $\lambda$  的平面波入射到间距为  $d$  (晶格常数)的晶面上,入射角为  $\alpha$ ,当满足条件  $n\lambda = 2a \cos\alpha$  时( $n$  为整数)发生衍射,衍射线在所考虑的晶面反射线方向。而在一般的布拉格衍射实验中采用入射线与晶面的夹角(即通称的掠射角) $\theta$ ,这时布拉格方程为  $n\lambda = 2d \sin\theta$ 。

本实验中,主要装置为 DH926B 型微波分光仪,除两喇叭的调整同反射实验一样外,要注意的是模拟晶体球应用膜片调得上下左右成为一方形点阵,模拟晶体架上的中心孔插在支架上与度盘中心一致的一个销子上。当把模拟晶体架放到小平台上时,应使模拟晶体架晶面法线一致的刻线与度盘上的 0 刻度一致。为了避免两喇叭之间波的直接入射,入射角取值范围最好在  $30^\circ \sim 70^\circ$ 。

### 3.8.5 实验内容及步骤

(1) 设计利用 S426 型分光仪演示电磁波布拉格衍射现象的方案。

(2) 按如图 3-23 所示,连接仪器,调整系统。实验中除了两喇叭的调整同反射实验一样外,要注意的是模拟晶体球应用膜片调得上下左右成为一方形点阵,模拟晶体架上的中心孔插在支架上与度盘中心一致的一个销子上。

当把模拟晶体及晶体架放在中心轴上的分度转台时,要调整微波发射喇叭和微波接收喇叭对准模拟晶体的中部高度,并使两喇叭口在一条通过载物台转轴的直线上,两臂分别对准度盘的  $0^\circ$  和  $180^\circ$  位置。

开启微波发生器电源后,调整两个角锥喇叭天线的方位,使接收喇叭一方的微安表指示达到相对最大值。在调节波导调谐器(短路活塞)和衰减器时,先加大衰减,再调节短路活塞,使微安表指示达到最大,再减小衰减使指针达到适当位置。



表 3-26 实验结果记录表(4)

$\theta/(\circ)$	63	64	65	66	67	68	69	70
$I$								
100 面								
110 面								

由实验数据计算得表 3-27。

表 3-27 实验数据计算结果

位置	$\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的测量值		$\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的理论		误差百分比	
	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_1$	$\theta_2$
100 面						
110 面						

找出被测各晶面族的掠射角,用布拉格公式计算晶格中 2 个平行晶面族的平面间隔,再分别求出晶格常量,取平均值并与用米尺测量值的相比较。

## 3.9 无线信号场强特性的研究

### 3.9.1 实验目的

- (1) 通过实地测量校园内室内外的无线电信号场强值,掌握室内外电波传播的规律。
- (2) 熟悉并掌握无线电中的传输损耗、路径损耗、穿透损耗、衰落等概念。
- (3) 熟练使用无线电场强仪测试空间电场强度的方法。
- (4) 学会对大量数据进行统计分析,并得到相关传播模型。

### 3.9.2 实验原理

#### 1. 电波传播方式

电磁场在空间中的传输方式主要有反射、绕射、散射三种模式。当电磁波传播遇到比波长大的物体时会发生反射;当接收机和发射机之间无线路径被物体阻挡时会发生绕射;当电波传播空间中存在物理尺寸小于电波波长的物体且这些物体的分布较密集时会发生散射。散射波产生于粗糙表面,如小物体或其他不规则物体、树叶、街道、标志、灯柱等。

#### 2. 无线信道中信号衰减

无线信道中的信号衰减分为衰落、路径损耗、建筑物穿透损耗,此外还有多径传播的影响。

##### 1) 移动环境下电波的衰落包括快衰落和慢衰落(又叫阴影衰落)

快衰落的典型分布为 Rayleigh 分布或 Rician 分布;阴影衰落的典型分布为正态分布,即高斯分布。快衰落和慢衰落两者构成移动通信系统中接收信号不稳定因素。

##### 2) 路径损耗

路径损耗的定义为当收发天线分别为点源时,发射天线的输入功率与接收天线的输出功率的比值。距离是决定路径损耗大小的首要因素。除此之外,还与发射点和接收点之间

的电波传播条件密切相关。根据理论和测试的传播模型,无论室内或室外信道,平均接收信号功率随距离衰减,对任意的传输距离,大尺度平均路径损耗表示为

$$\bar{P}_L(d)[\text{dB}] = \bar{P}_L(d_0) + 10n \lg(d/d_0) \quad (3-20)$$

即平均接收功率为

$$\begin{aligned} \bar{P}_r(d)[\text{dBm}] &= P_t[\text{dBm}] - \bar{P}_L(d_0) - 10n \lg(d/d_0) \\ &= \bar{P}_r(d_0)[\text{dBm}] - 10n \lg(d/d_0) \end{aligned} \quad (3-21)$$

其中,  $n$  为路径损耗指数,表明路径损耗随距离增长的速度;  $d_0$  为近地参考距离;  $d$  为发射机与接收机之间的距离。

人们根据不同的地形地貌条件,总结出各种电波传播模型:自由空间模型、布灵顿模型、EgLi 模型、Hata-Okumura 模型。

(1) 自由空间模型。

所说的自由空间一是指真空,二是指发射天线与接收台之间不存在任何可能影响电波传播的物体,电波是以直射的方式到达移动台的。自由空间模型计算路径损耗公式为

$$L_p = 32.4 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (3-22)$$

式中,  $d$  是以千米为单位的移动台与基站之间的距离;  $f$  是以 MHz 为单位的移动工作频点或工作频段的频率。

(2) 布灵顿模型。

布灵顿模型假设发射天线和移动台之间的地面是理想平面大地,并且两者之间的距离  $d$  (单位: km) 远大于发射天线的高度  $h_t$  (单位: m) 或移动台高度  $h_r$  (单位: m), 此时的路径损耗(单位: dB)计算公式为

$$L_p = 120 + 40 \lg d - 20 \lg h_t - 20 \lg h_r \quad (3-23)$$

(3) EgLi 模型。

EgLi 模型是从大量实测结果中归纳出来的中值预测公式,属于经验模型,其计算公式为

$$L_p = 88 + 40 \lg d - 20 \lg h_t - 20 \lg h_r + 20 \lg f - G \quad (3-24)$$

其中,  $G$  为地形修正因子(单位: dB)。  $G$  反映了地形因素对路径损耗的影响。EgLi 模型认为路径损耗同接收点的地形起伏  $\Delta h$  有关,地形起伏越大,则路径损耗也越大,当  $\Delta h$  用米来测量时,可按照式(3-25)近似地估计地形的影响:

$$G = \begin{cases} 0 & \Delta h < 15\text{m} \\ 2.43 \left(1 - \frac{\Delta h}{15}\right) & \Delta h > 15\text{m} \quad 150\text{MHz 频段} \\ 3.05 \left(1 - \frac{\Delta h}{15}\right) & \Delta h > 15\text{m} \quad 280\text{MHz 频段} \end{cases} \quad (3-25)$$

(4) Hata-Okumura 模型。

Hata-Okumura 模型也是依据实测数据建立的模型,当移动台高度为典型值  $h_r = 1.5\text{m}$  时,按照 Hata-Okumura 模型计算路径损耗的公式为

$$\text{市区: } LP_1 = 69.55 + 26.2 \lg f - 13.82 \lg h_t + (44.9 - 6.55 \lg h_t) \lg d \quad (3-26)$$

$$\text{开阔地: } LP_2 = LP_1 - 4.78 (\lg f)^2 + 18.33 \lg f - 40.94 \quad (3-27)$$

一般情况下,开阔地的路径损耗都比市区小。

### 3) 建筑物的穿透损耗

建筑物外测量的信号的中值电场强度和同一位置室内测量的信号中值电场强度之差 (dB) 称为建筑物的穿透损耗。建筑物穿透损耗的大小同建筑物的材料、结构、高度、室内陈设、工作频率等多种因素有关。室外至室内建筑物的穿透损耗定义为: 室外测量的信号平均场强减去在同一位置室内测量的信号平均场强, 用公式表示为

$$\Delta P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^{(\text{outside})} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_j^{(\text{inside})} \quad (3-28)$$

式中,  $\Delta P$  为穿透损耗 (单位: dB);  $P_j$  是在室内所测的每一点的功率 (单位:  $\text{dB}\mu\text{V}$ ), 共  $M$  个点;  $P_i$  是在室外所测的每一点的功率 (单位:  $\text{dB}\mu\text{V}$ ), 共  $N$  个点。

## 3.9.3 实验内容

(1) 根据不同的地形地貌条件, 归纳总结各种环境条件下可能采用的各种电波传播模型。在数据测试前, 先用理论模型在理论上对待测区域进行分析。

根据不同的地形地貌条件, 归纳出电波传播模型, 如表 3-28 所示。

表 3-28 电波传播模型

理论模型	适用的物理情景
自由空间模型	发射天线与接收台之间不存在影响电波传播的物体
布灵模型	理想平面大地
EgLi 模型	地形起伏地区
Hata-Okumura	移动台高度为 $h_r = 1.5 \text{ m}$ 时

(2) 观测波段和实验地点的确定。

① 例如选择频段: 940MHz 或其他。

② 地点: 可以选择例如操场地面开阔, 遮挡物较少, 空间相对开放; 教学楼里开阔地带; 研究阴影衰落相当合适; 用来研究建筑物的穿透损耗的地带。

(3) 数据的测量。第一组数据在空间开放区域, 地点自行选择, 每半个波长测量一个数据, 每个地点的数据应该在 50~100 个。

(4) 第二组数据可以选在室内, 例如, 楼道或房间, 仍以半个波长为单位记录数据, 并进行数据处理。

(5) 第三组数据在建筑物的遮挡下, 观察“阴影衰落”, 总结衰落服从的分布规律。

(6) 第四组数据可以找个地点, 以反映建筑物外和建筑物内之间的场强差异。对建筑物穿透损耗的测量结果进行分析, 用室外平均信号场强减去同一位置室内的所测信号的平均场强, 得到建筑物穿透损耗。

(7) 数据处理。数据录入可以用 Excel 表格等工具, 表格设计要清晰, 数据电平值的分布和处理可以利用 Mworks Syslab 和 Julia 语言等工具, 得到不同区域下信号电平分布情况, 得到累积概率分布曲线, 得到理论值和实际值之间的标准差, 进行误差分析。

(8) 根据不同区域的测试结果进行比较分析, 分析不同环境下造成这些结果的原因, 测试结果流程图如图 3-24 所示。

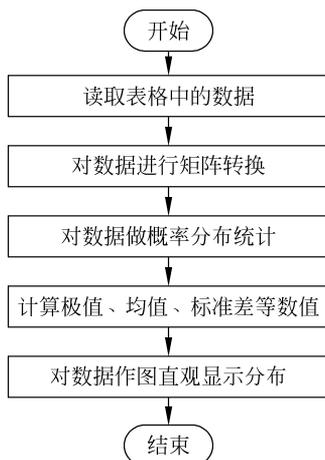


图 3-24 测试结果流程图

(9) 模型分析。根据所测试的数据,分析不同地带的测试结果和所适用的理论模型。

得到理论值和实际值的标准差,给出 Julia 语言代码,进行误差分析;根据不同区域的测试结果,进行比较分析,分析不同环境下造成这些结果的原因。

### 3.9.4 拓展实验内容

路测是运营商进行日常维护、设备管理经常要进行的工作。路测指通过在覆盖区域内选定路径上移动,利用路测设备记录各种测试数据和位置信息的过程。从 Scanner 或测试手机采集的路测数据,可以采用专业的网络优化分析软件进行分析。基于路测数据和其他辅助数据,能对无线网络进行多种智能化分析,从而快速准确地定位网络问题,进行网络优化。主要用于获得以下数据:服务小区信号强度、话音质量、各相邻小区的信号强度与质量、切换及接入的信令过程、小区识别码、区域识别码、手机所处的地理位置信息、呼叫管理、移动管理等。其作用主要在于网络质量的评估和无线网络的优化。

选用合适的设备和频点,进行相关测试。

### 3.9.5 报告示例

#### 【摘要】

#### 【关键字】

#### 【实验目的】

#### 【实验要求】

#### 【实验仪器】

场强仪一台。

#### 【问题分析】

#### 【实验步骤】

- (1) 实验对象的选择。
- (2) 数据采集。
- (3) 用绘图工具简单地绘制场强分布图。

利用场强仪对无线信号的电平值进行测量,对于室内外的信号的测量均为每隔半个波长就记录一个数据。对于建筑物的穿透损耗的测量要在对该建筑的室内进行测量的基础上,再在该建筑物一层的路面上,围绕该建筑物转一圈测量,测量的方法与室内信号的测量方法类似,在室外按照从西-南-东-北-西的方向测量信号电平值。测量时手持场强仪斜向前方测量,场强仪距离身体一定距离防止身体的干扰,测量时保持同一测量姿势不变。

该实验数据的测量受诸多因素影响,导致读数难度增加,即使同一地点进行读数,数据显示也会不断波动,故统一读取信号基本稳定时的信号电平值。

#### (4) 数据录入。

将测量得到的数据填入 Excel 表格,得到一个总表,并将不同地点得到的数据放在不同的表格中,并记录数据记录的顺序。

#### (5) 数据处理。

实验测得的数据比较多,在处理时采用 Mworks Syslab 软件处理 Excel 录入的数据,并对数据进行矩阵变换以及概率分布统计分析,计算极值、均值、标准差等数值,并作图直观分析。

#### 【实验结果】

以表格、图形方式给出。

#### 【实验结论】

#### 【心得体会】

#### 【参考文献】

#### 【附录】

附 Julia 语言代码。