

# 浙江大学实验报告

实验名称：喇叭天线的辐射特性测量

实验日期：2023/6/13

## 一、实验目的

揭示喇叭天线的辐射特性。

覆盖的基本概念：

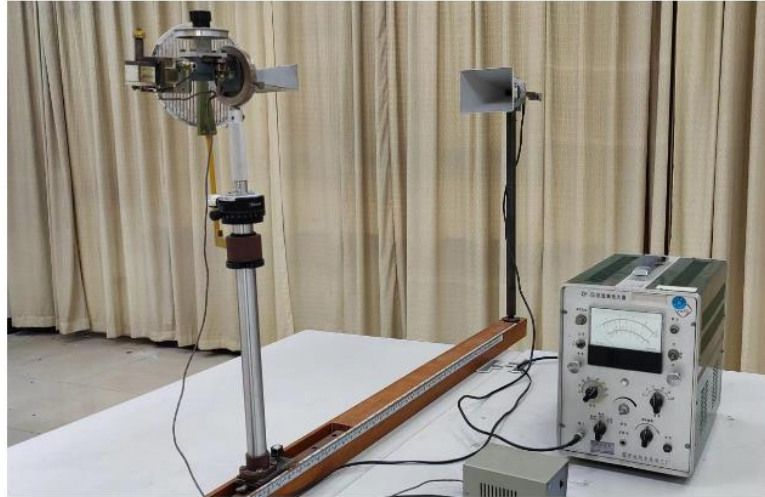
- 天线辐射方向图
- 波束宽度
- 天线极化特性
- 电磁波在空间传播中与距离的关系

## 二、实验原理

当今社会，尽管人们不一定知道无线寻呼、蜂窝电话、卫星通信、无线广播与电视的具体工作原理，但它们已成为人们生活中不可缺少的一部分。在这些无线通信系统中，不管是发送还是接收，天线都是一个不可缺省的部件。描述天线的参量很多，择其主要的有：天线方向性、辐射方向图、波束宽度、旁瓣电平、工作频率与响应、效率等。除此之外，天线发射（或接收）的电磁波都具有极化特性。所谓极化，是指电磁波电场矢量的方向，所以接收机接收到的信号大小跟收发天线的安装方向有关（以下简称发射天线的极化方向或接收天线的极化方向）。如果发射天线所发射电磁波的极化方向与接收天线的极化方向一致，接收信号最大，若两者正交，接收机将收不到信号。

本实验用 3 公分波段（8 – 12GHz）喇叭天线揭示天线方向性、波束宽度、波的极化特性。

实验装置如图 1，装置包括三部分：信号发射端、接收端、天线移动架。发射端由固态振荡源、微波衰减器、小喇叭天线连接组成，并装在一个旋转云台上。发射端喇叭天线可以绕矩形波导轴向旋转，由此可以改变发射电磁波的极化方向，其极化角度可从指示刻度盘读出；发射功率的大小可用微波衰减器来调节。云台可在垂直面和水平面上转动，用于测量发射天线的方向性特性；发射端还装有一个可移动的金属栅网；天线移动架可以使发射端沿着移动架轨道平移，从而改变收发喇叭间距，其测量值可以从移动架上的刻度尺读取。接收端将喇叭天线与微波晶体检波器连接在一起固定不动，如图 2 所示。



图一 实验装置图



图二 接收模块

用到的方程：

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (W)$$

其中 $R$ 为收发天线间距。（本实验 $R$ 取收发天线喇叭口之间的图距离）

最佳角锥喇叭天线增益：

$$G = 0.51 \frac{4\pi A_p}{\lambda^2} \quad (A_p \text{ 为喇叭口的物理口径 } D_H \times D_E)$$

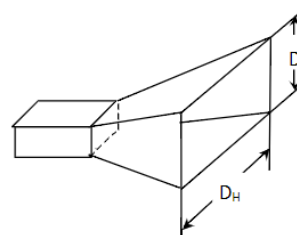
（参阅国防工业出版社顾瑞龙、沈民谊《微波技术与天线》）

喇叭天线半功率波束宽度：

$$\text{H面: } 2\theta_{0.5} \approx 1.18 \frac{\lambda}{D_H} \quad (rad)$$

$$\text{E面: } 2\theta_{0.5} \approx 0.89 \frac{\lambda}{D_E} \quad (rad)$$

$$\text{边区场条件: } R \gg \frac{2D_H D_E}{\lambda}$$



图三 角锥喇叭图

### 三、实验内容

#### 3.1 电磁波在空间传播中与距离的关系测量

实验装置见图 1。工作频率：9.375GHZ。

安装步骤如下：

- 拧松天线移动架的锁紧螺栓，调节两天线之间距离为1.0m，然后拧紧锁紧螺栓使发射端位置固定。（注意：实验中两喇叭口之间的距离近似为两天线距离。）
- 接收端的波导检波器输出通过馈线接到选频放大器。

实验步骤：

- （1） 将发射天线极化方向调整到与接收天线的极化方向一致，即同为垂直极化方式。
- （2） 开启固态信号源（工作方式方波调制）与选频放大器电源。调节波导检波器调配螺钉或短路活塞位置使选频放大器上指示的检波输出最大（即检波器匹配），选择选频放大器的“分贝”旋钮量程为30dB或40dB档位，并调节发射端的微波衰减器，使选频放大器输出满量程，即归一化数值为0dB。
- （3） 依次改变收发天线距离，把测量的数据记录于下表：

表一 天线距离与接收功率的关系

距离 $R(m)$	实验测量值	相对归一化功率
1.0	-40.0dB	1
1.1	-41.3dB	0.74
1.2	-41.6dB	0.68
1.3	-42.2dB	0.60
1.4	-42.8dB	0.52

#### 3.2 极化测量

##### ① 天线极化测量：

实验步骤：

- （1） 拧松发射天线锁紧螺栓，调整发射喇叭天线的极化方向与接收天线一致后锁紧螺栓，此时记录极化刻度盘上的角度值为相对值0°。

- (2) 依次拧松云台的垂直与水平锁紧螺栓，调节发射天线的水平与垂直指向，找到选频放大器指示最大位置（即找到天线方向图最大值这一点）后锁紧螺栓，然后调节发射端的微波衰减器使选频放大器输出满量程，即相对归一化数值为0dB。
- (3) 依次绕矩形波导轴向旋转发射喇叭天线，从0°到90°，每隔10°记录选频放大器指示的读数于下表：

表二 发射喇叭天线极化特性

发射喇叭天线角度 $\theta$	实验测量值	相对归一化功率
0°	-40.0dB	1
10°	-40.4dB	0.91
20°	-41.2dB	0.76
30°	-42.2dB	0.60
40°	-43.8dB	0.42
50°	-46.8dB	0.21
60°	-53.2dB	0.05
70°	-59.2dB	0.01
80°	-63.0dB	0.005
90°	-71.5dB	0.0007

距离为 1.0m

## ② 极化栅网特性测量：

极化栅网是在一块铜板上开了很多槽缝，如果金属条的宽度与缝的宽度都比波长小得多，则投射到开槽铜板上的电磁波，对于电场具有平行于槽缝方向的电磁波分量将被全反射，而具有垂直于槽缝方向的电磁波将能顺利通过。所以图4所示极化栅网放到发射天线前面。则接收天线所接收到的信号大小随着极化栅网旋转角度的改变而改变。



图四 极化栅网

实验步骤:

- (1) 调整发射喇叭天线的极化方向与接收天线一致后锁紧螺栓, 即极化角度为 $0^\circ$ 的位置。
- (2) 将极化栅网移至发射喇叭天线前面, 选择极化栅网使选频放大器读数最大, 然后调节发射端的微波衰减器使选频放大器输出满量程, 即相对归一化数值为0dB, 并记栅网上的角度为相对 $0^\circ$ 。
- (3) 一次将极化栅网转过 $90^\circ$ 和 $45^\circ$ 分别记录选频放大器读数。

表三 极化栅网极化特性

极化栅网角度	实验测量值	相对归一化功率
$0^\circ$	-40.0dB	1
$45^\circ$	-43.5dB	0.45
$90^\circ$	-51.7dB	0.07

### 3.3 喇叭天线辐射方向图测量

实验装置:

- 如图五所示, 调节接收与发射喇叭天线间距离为 1.2m。
- 将极化器栅网移开。
- 调整发射喇叭天线极化角度, 使之与接收喇叭天线的极化角度一致; 当发射、接收喇叭选择垂直极化方式, 通过旋转发射喇叭的水平角度可测得水

平方向图；当发射、接收喇叭选择水平极化方式，通过旋转发射喇叭的水平角度可测得垂直方向图；

- 选择选频放大器的“分贝”旋钮量程选择 40dB 档位；

实验步骤：

- (1) 将发射、接收喇叭都调整为垂直极化方式，拧松云台中水平旋转锁紧旋钮,在水平方向上旋转发射喇叭天线,找到选择选频放大器指示最大点位置时锁紧旋钮。然后调节发射端的微波衰减器使选频放大器输出满量程（0dB），此时分别记水平面和垂直面上刻度盘中的角度读数为相对0°；记选择选频放大器读数为天线方向性特性的最大点，即相对归一化数值为0dB（因为天线的方向图为一立体结构，以上步骤是为了寻找方向图的最大值点）。
- (2) 拧松云台中水平旋转锁紧旋钮,在水平方向上旋转发射喇叭天线，由-90°转到+90°，每隔10°记录选择选频放大器读数于表中，然后将天线转至水平位置，锁紧水平旋转锁紧旋钮。
- (3) 将发射喇叭天线和接收喇叭天线的极化角度都调整到水平极化方式，采样和上述类似的方法，即可得到喇叭天线垂直面上的方向图，记录读数（垂直面方向图只测到 60 度即可）。
- (4) 测出水平面上-3dB功率时的波束宽度以及背景噪声。

表四 天线口径尺寸

尺寸	发射天线	接收天线
$D_E$	3.7cm	10.5cm
$D_H$	8.2cm	14.1cm

表五 天线水平方向图测量数据

天线水平方向转角	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10
实验测量值×(-1)	78.2	76.8	66.3	67.8	66.8	60.6	55.8	49.0	41.2
相对归一化功率	0.00015	0.00021	0.0023	0.0017	0.0021	0.0087	0.026	0.13	0.75

天线水平方向 转角	0	10	20	30	40	50	60	70	80
--------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----

实验测量值× (-1)	40.0	41.0	47.7	55.3	59.8	63.4	74.8	76.8	75.4
相对归一化功率	1	0.79	0.17	0.028	0.01	0.0046	0.0003 3	0.0002	0.0003
天线水平方向 转角	90								
实验测量值× (-1)	79.8								
相对归一化功率	0.0000 1								

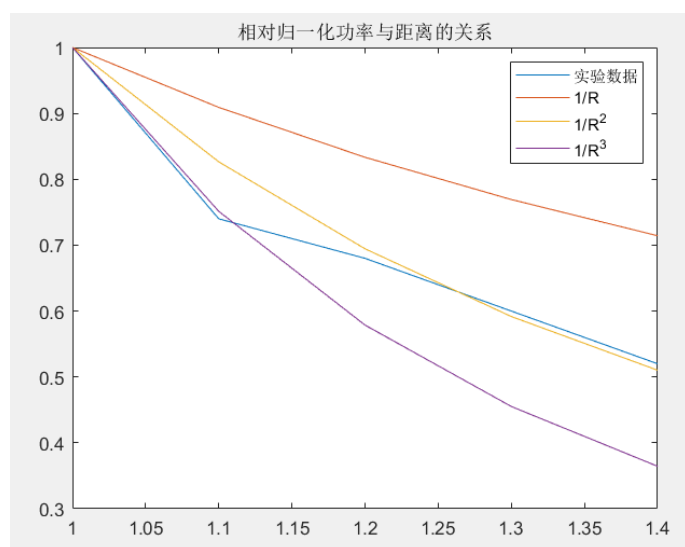
表六 天线垂直方向图测量数据

天线垂直方向 转角	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20
实验测量值	77.5	61.4	54.2	48.5	44.0	41.4	40.0	41.7	45.0
相对归一化功率	0.0001 8	0.0072	0.038	0.14	0.40	0.72	1	0.68	0.32
天线垂直方向 转角	30	40	50	60					
实验测量值	49.5	55.4	66.5	74.0					

相对归一化功率	0.11	0.029	0.0022	0.0004					
---------	------	-------	--------	--------	--	--	--	--	--

#### 四、实验结果和分析

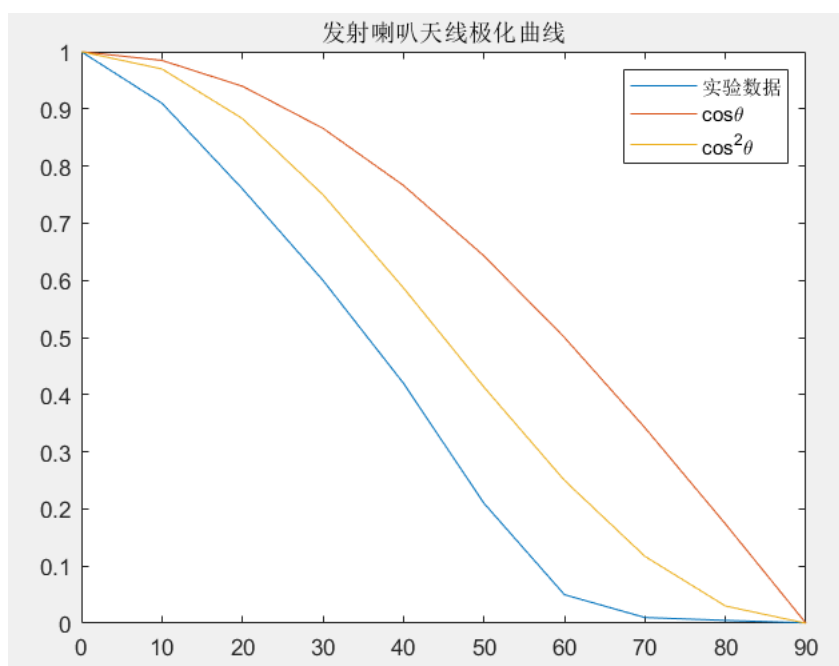
- 1、根据测得的数据作出电磁波传播与距离的关系曲线。所作出的电磁波传播与距离的关系曲线接近 $\frac{1}{R}$ 、 $\frac{1}{R^2}$ ，还是 $\frac{1}{R^3}$ ？与理论预期值符合吗？



如图，电磁波传播相对归一化功率与距离倒数的平方最接近，与理论值 $P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2}$ 符合较好。

- 2、根据数据作出发射喇叭天线极化曲线，横坐标为天线极化角度 $\theta$ 。





### 3、问题回答：

（1）从发射喇叭天线极化特性曲线看，接收喇叭天线所接收到的功率与发射喇叭天线极化角度 $\theta$ 的关系是符合 $\cos\theta$ 还是 $\cos^2\theta$ 关系？

更符合后者。但是实验做出来的图和 $\cos^2\theta$ 仍有差距，天线的衰减随极化角度的方向更大，猜测是因为发射天线和接收天线没有对准。

（2）如果发射喇叭天线和接收喇叭天线的极化角相差 $90^\circ$ ，而极化器相对于发射喇叭天线的极化角度为 $45^\circ$ ，极化器对系统的影响如何？

极化器与发射喇叭天线的极化角度为 $45^\circ$ 时，将天线发射的信号分解为平行、垂直的两路等幅信号，而接收喇叭与发射喇叭极化角相差 $90^\circ$ 度，只能接收一半的信号。而实验中，极化器相对角度为 $45^\circ$ 时测得的相对归一化功率是 $0.5$ ，与理论预期相符。

### 4、对发射天线计算远区场距离（工作频率 $9.375\text{GHz}$ ），实验中是否符合远区场条件？

$$\lambda = \frac{c}{f} = 3.2 \text{ cm}$$

$$\frac{2D_H D_E}{\lambda} = 0.1896 \text{ m}$$

$$R \geq 1.0 \text{ m} > 0.1896 \text{ m} = \frac{2D_H D_E}{\lambda}$$

实验符合远场条件。

### 5、分别计算收、发天线理论增益，半功率波束宽度（假定 $k \approx 1$ ）。有什么结论？

$$\text{发射喇叭天线: } G = 0.51 \frac{4\pi D_H D_E}{\lambda^2} = 18.99 = 12.78 \text{ dB}$$

$$\text{H 面: } 2\theta_{0.5} \approx 1.18 \frac{\lambda}{D_H} = 0.46 \text{ rad}$$

$$\text{E 面: } 2\theta_{0.5} \approx 0.89 \frac{\lambda}{D_E} = 0.77 \text{ rad}$$

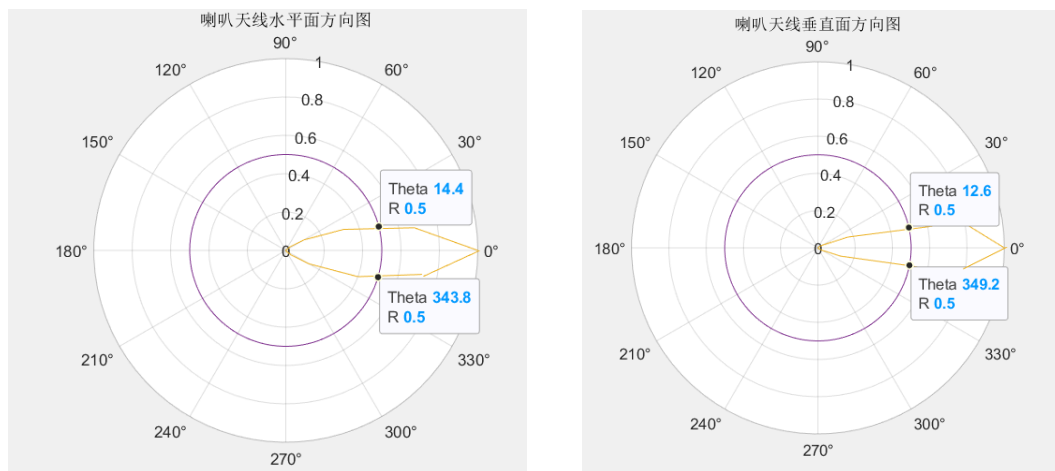
$$\text{接收喇叭天线: } G = 0.51 \frac{4\pi D_H D_E}{\lambda^2} = 92.66 = 19.67 \text{ dB}$$

$$\text{H 面: } 2\theta_{0.5} \approx 1.18 \frac{\lambda}{D_H} = 0.27 \text{ rad}$$

$$\text{E 面: } 2\theta_{0.5} \approx 0.89 \frac{\lambda}{D_E} = 0.27 \text{ rad}$$

天线口径越大，天线增益越大，半功率波束宽度越小，信号辐射集中能力越强。

6、用极坐标系分别绘制发射喇叭天线在水平面上、垂直面上的方向图。



7、比较半功率波束宽度的计算值与实测值，并对你的实验结果加以评论。

理论上水平方向半功率波束宽度为  $\frac{0.77}{\pi} \times 180^\circ = 44.12^\circ$ ，而实验测得值为  $28^\circ$  左右。

理论上垂直方向半功率波束宽度为  $\frac{0.46}{\pi} \times 180^\circ = 26.36^\circ$ ，实验测得为  $25^\circ$  左右。

此次实验垂直方向的半功率波束宽度符合较好，而水平方向理论值和实测值有较大差异，我认为是实验环境干扰。在测水平方向时实验室比较吵闹，而测垂直方向时教室由于同学剩下不多，因此比较安静，实验室少有声波的反射；另，我还认为这可能跟天线没对准有关。

8、解释在  $\pm 90^\circ$  时辐射方向图测量值（提示：跟背景噪声比较）

理论上来说， $\pm 90^\circ$  时的归一化功率为 0，但天线之所有接收到信号，在于实验室还有噪声声波等，因此此时的功率是天线噪声的功率。

9、比较波导角锥喇叭天线辐射特性的实验测量结果和 CST 仿真，有什么结论。

由于 CST 仿真时使用的参数与实验参数不同，因此增益、波束宽度都有差距（但量级不变），但可以定性判断实验测量结果和 CST 仿真得到的特性总体是相近的，都符合角锥

---

喇叭天线的辐射特性。另外，实验环境存在各种噪声干扰和仪器问题，这也会导致测得的辐射特性改变，因此在设计仿真时，还应该尽量考虑实际情形。

## 五、心得体会

通过此次实验，我进一步掌握了天线辐射特性。我学会了使用发射接收天线、波导检波器、选频放大器等仪器进行测量操作，我还进一步锻炼了 MATLAB 数据处理的能力，学会了天线极化特性图的绘制。

扣分

极化器 45 度影响 -2

方向图 -2