

浙江大学

本科实验报告

实验设计报告

课程名称：	电磁场与电磁波
姓 名：	箫宇
学 院：	信息与电子工程学院
系：	
专 业：	信息工程
学 号：	
指导老师：	王子立

2023 年 7 月 2 日

浙江大学实验报告

专业：信息工程
姓名：箫宇
学号：
日期：2023年7月2日
地点：东 4-221

课程名称：电磁场与电磁波 指导老师：王子立 成绩：
实验名称：实验设计报告 实验类型：测试实验 同组学生姓名：

第一部分 CST 仿真

一 实验目的

- 了解并掌握波导喇叭天线的常用参数指标和分析方法。
- 熟悉 CST 软件的基本操作流程, 并能够运用其对特定的微波器件或电路进行建模、仿真分析。

二 实验要求

1. 喇叭尺寸

- 角锥喇叭天线尺寸: $D_H = 80mm, D_E = 38mm, L = 80mm$
- 波导尺寸: $a = 22.86mm, b = 10.16mm, \lambda = 29.1mm$
- 铜壁厚: $t = 1mm$

2. 实验任务

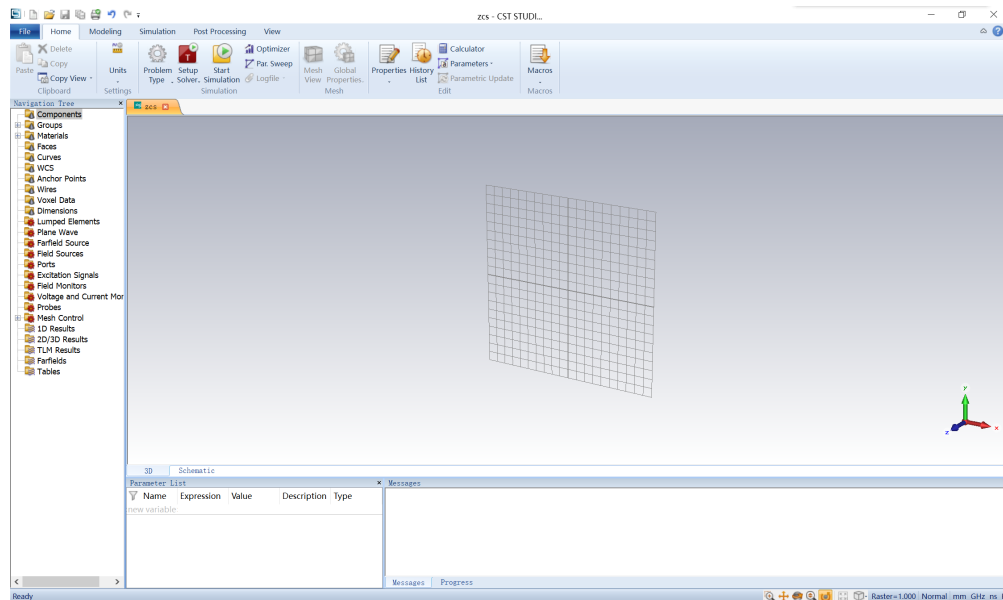
用 CST 软件建模并仿真, 观察方向图和喇叭中电场等情况。

- 分析喇叭天线的方向图, 和理论计算的异同。
- 分析喇叭天线 S11 和驻波比特性曲线。
- 分析说明喇叭天线和波导口的电场情况。

三 实验步骤

1. 制作喇叭模型

1.1 新建工程



1.2 创建矩形

Name:

OK

Preview

Cancel

Xmin: Xmax:

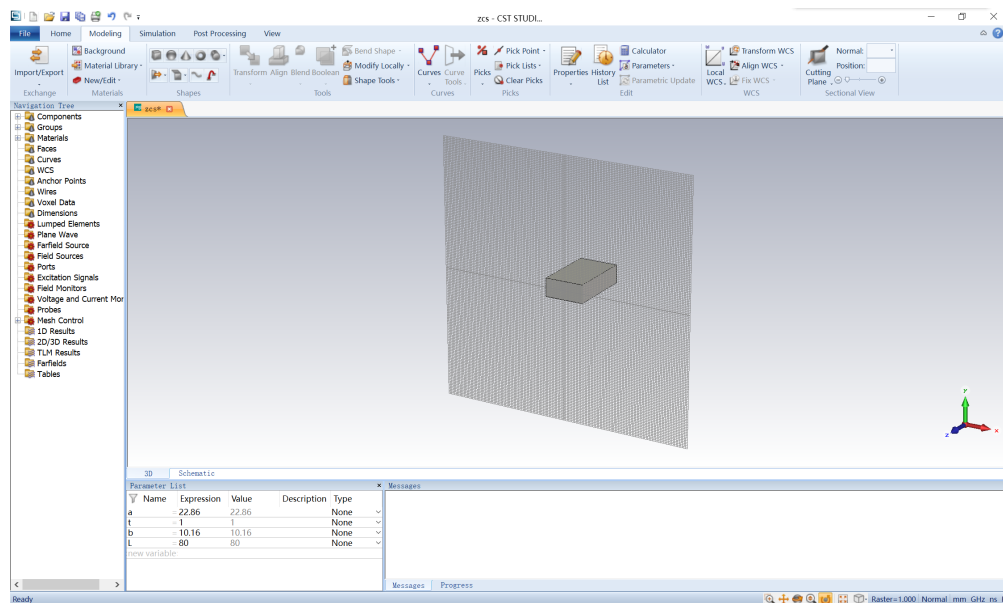
Ymin: Ymax:

Zmin: Zmax:

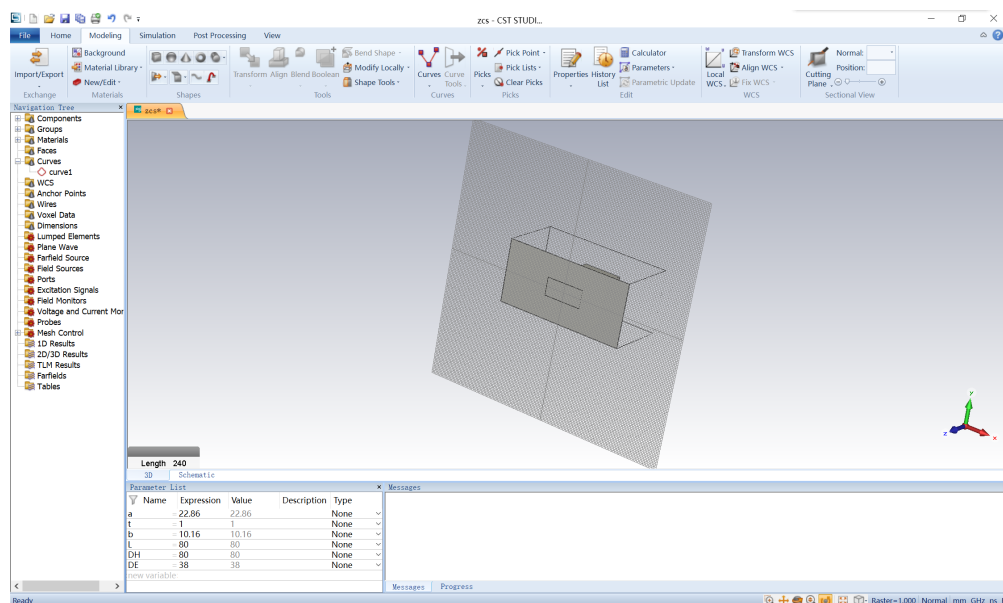
Component:

Material:

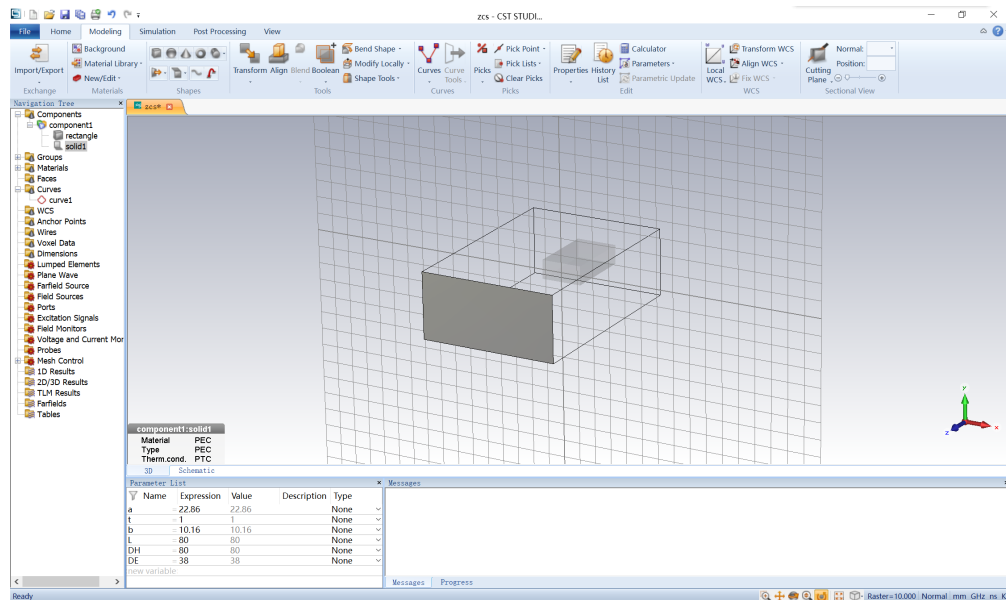
Help



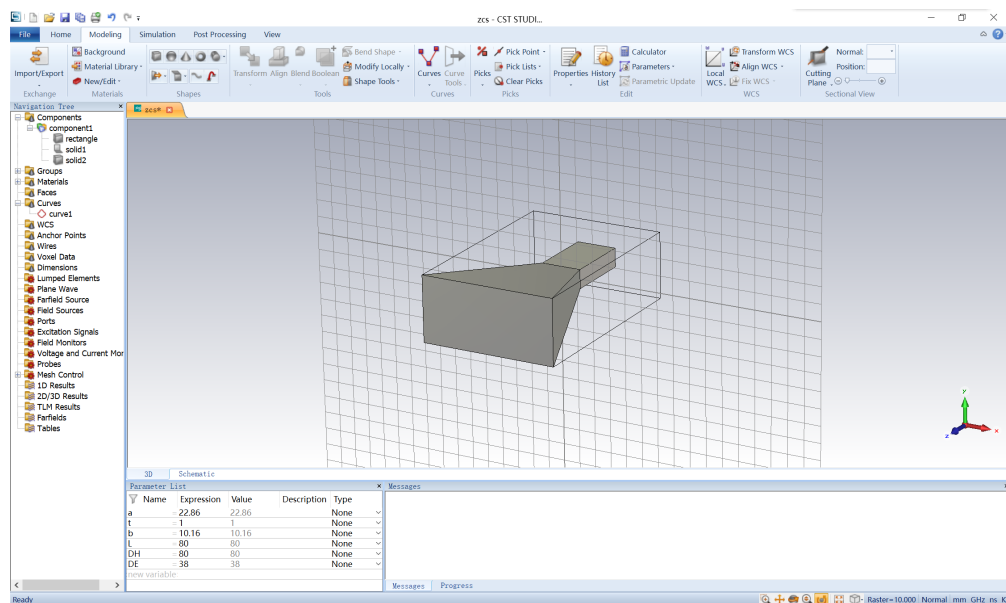
1.3 喇叭口径面



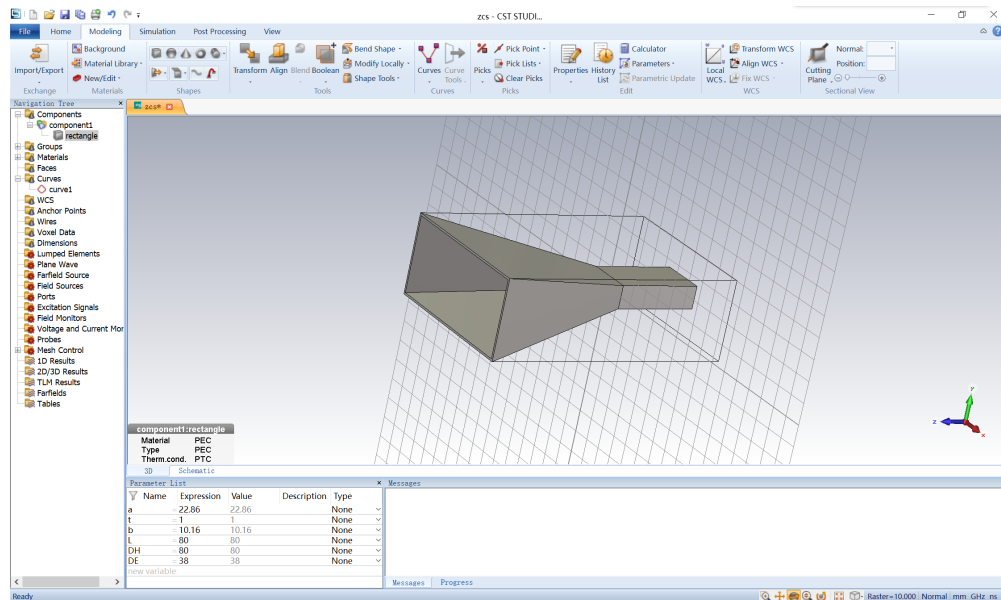
1.4 设置喇叭口径面空间位置



1.5 生成侧壁



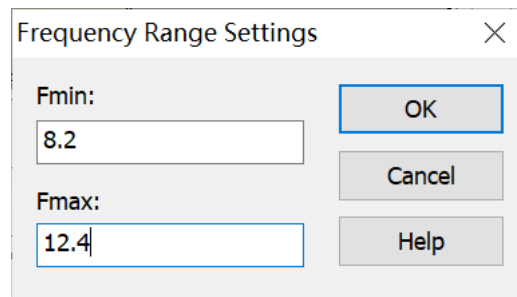
1.6 生成侧壁



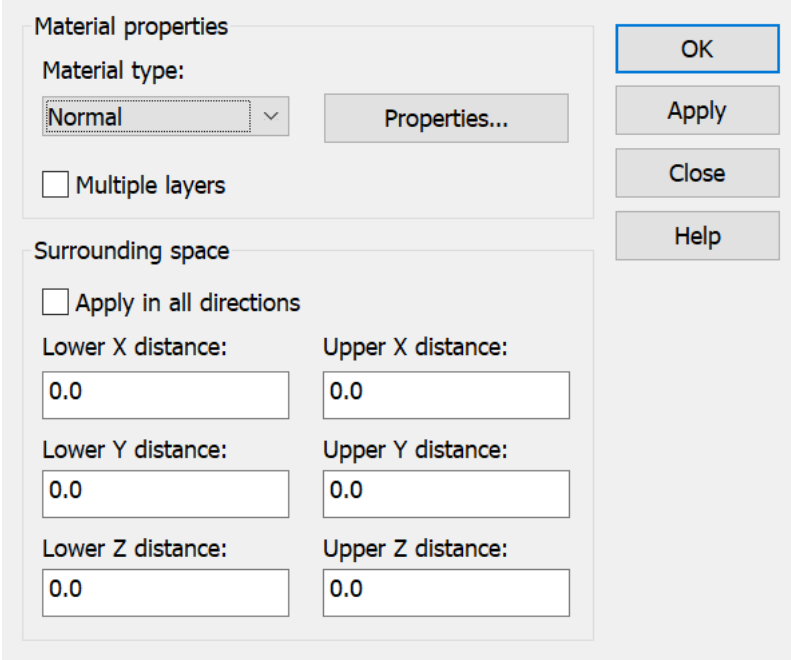
至此，喇叭模型创建完成，下面进行仿真参数设定

2. 仿真设置

2.1 仿真频率设置



2.2 设置背景



The dialog box is titled "Material properties". It contains two main sections: "Material properties" and "Surrounding space".

Material properties section:

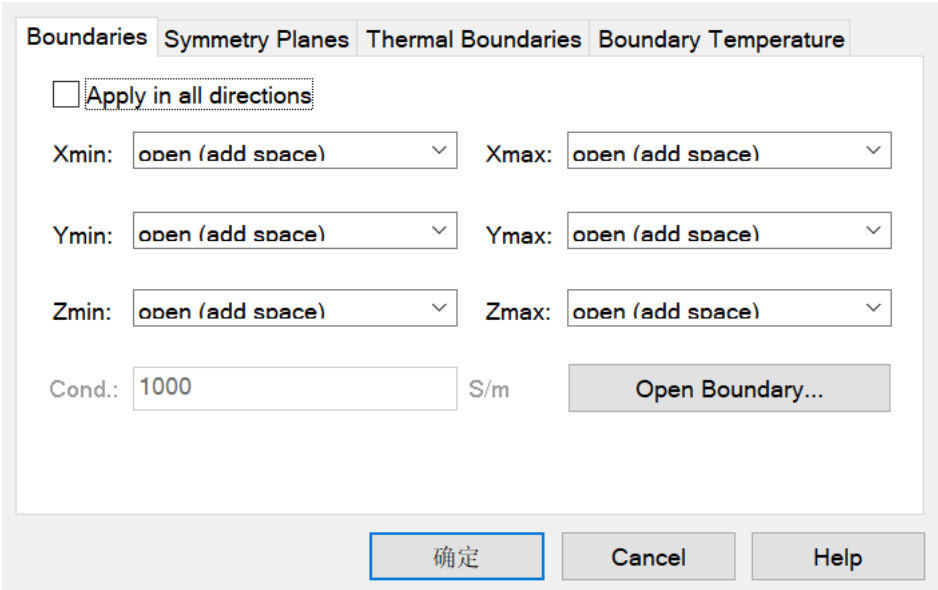
- Material type:** A dropdown menu showing "Normal" with a downward arrow. To its right is a button labeled "Properties...".
- Multiple layers:** A checkbox that is currently unchecked.

Surrounding space section:

- Apply in all directions:** A checkbox that is currently unchecked.
- Lower X distance:** A text input field containing "0.0".
- Upper X distance:** A text input field containing "0.0".
- Lower Y distance:** A text input field containing "0.0".
- Upper Y distance:** A text input field containing "0.0".
- Lower Z distance:** A text input field containing "0.0".
- Upper Z distance:** A text input field containing "0.0".

Buttons: On the right side of the dialog, there are four buttons stacked vertically: "OK" (highlighted with a blue border), "Apply", "Close", and "Help".

2.3 设置边界



The dialog box has four tabs at the top: "Boundaries" (selected), "Symmetry Planes", "Thermal Boundaries", and "Boundary Temperature".

Boundaries section:

- Apply in all directions:** A checkbox that is currently unchecked.
- Xmin:** A dropdown menu showing "open (add space)".
- Xmax:** A dropdown menu showing "open (add space)".
- Ymin:** A dropdown menu showing "open (add space)".
- Ymax:** A dropdown menu showing "open (add space)".
- Zmin:** A dropdown menu showing "open (add space)".
- Zmax:** A dropdown menu showing "open (add space)".
- Cond.:** A text input field containing "1000".
- Unit:** A label "S/m" is positioned to the right of the "Cond." field.
- Open Boundary...:** A button located to the right of the "Cond." field.

Buttons: At the bottom of the dialog, there are three buttons: "确定" (highlighted with a blue border), "Cancel", and "Help".

2.4 端口设置

Waveguide Port

General

Name: 1

Label:

Normal: ☐ X ☐ Y ☒ Z

Orientation: ☒ Positive ☐ Negative

Text size: > large

Position

Coordinates: ☐ Free ☐ Full plane ☒ Use picks

Xmin: -11.93 - 0.0 Xmax: 11.93 + 0.0

Ymin: -5.58 - 0.0 Ymax: 5.58 + 0.0

☒ Free normal position Zpos: -40

Reference plane

Distance to ref. plane: 0

Mode settings

☐ Multipin port

Define Pins...

Single-ended

Impedance and calibration

Define Lines...

Number of modes: 5

☐ Ensure shielding

Electric

☐ Polarization angle

0.0

OK

Apply

Preview

Cancel

Help

2.5 设置监视器

Labeling

Name: ☒ Automatic labeling

Type

- ☐ E-Field
- ☐ H-Field and Surface current
- ☐ Surface current (TLM only)
- ☐ Power flow
- ☐ Current density
- ☐ Power loss density/SAR
- ☐ Electric energy density
- ☐ Magnetic energy density
- ☒ Farfield/RCS
- ☐ Field source

Specification

☐ Transient Broadband ☒ Frequency

Frequency:

Freq. minimum:

Freq. maximum:

Subvolume settings

☐ Use Subvolume

	X	Y	Z
Minimum:	-47.7765159	-26.7765159	-47.2765159
Maximum:	47.77651597	26.77651597	87.27651597

☐ Export farfield source

3. 模式分析

3.1 模式分析设置

选中 Calculate modes only 选中此选项, 只计算端口模式不执行整个时域仿真, 可预先了解模式分布, 结果如下:

```

-----
Number of mesh faces filled with PEC due to fill limit restrictions: 0
-----
----- F-Calc 10.3 -----
Port  Mode  Type  Z-Wave  Z-Wave-Sigma  Z-Line  F-Cutoff
1      1      TE    505      1.40e-005      ---      6.85
1      2      TE    437      1.18e-005      ---      13.6
1      3      TE    306      1.26e-005      ---      16.3
1      4      TE    269      1.26e-005      ---      17.7
1      5      TM    527      3.33e-005      ---      17.7
-----
Pass 1 successfully completed.
Adaptive port meshing finished.

```

可见仅有 mode1 在频率范围内, 所以仿真时仅仿真 mode1

3.2 仿真设置如下

Time Domain Solver Parameters

Solver settings

Mesh type: Hexahedral Accuracy: -30.0 dB

☐ Store result data in cache

Stimulation settings

Source type: All Ports Mode: 1

☐ Inhomogeneous port accuracy enhancement

☐ Calculate port modes only

☐ Superimpose plane wave excitation

S-parameter settings

☐ Normalize to fixed impedance 50 Ohms

☐ S-parameter symmetries

S-Parameter List...

Adaptive mesh refinement

☐ Adaptive mesh refinement Adaptive Properties...

Sensitivity analysis

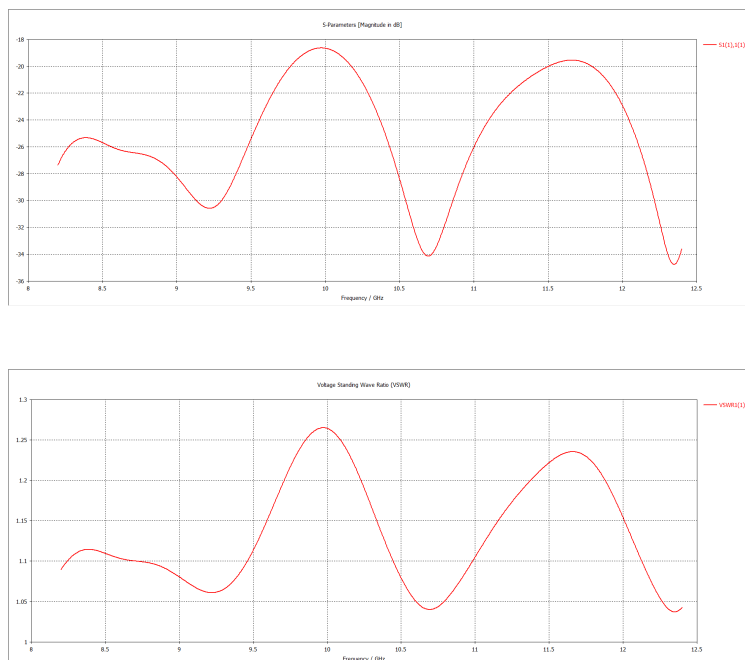
☐ Use sensitivity analysis Properties...

Start Optimizer... Par. Sweep... Acceleration... Specials... Simplify Model... Apply Close Help

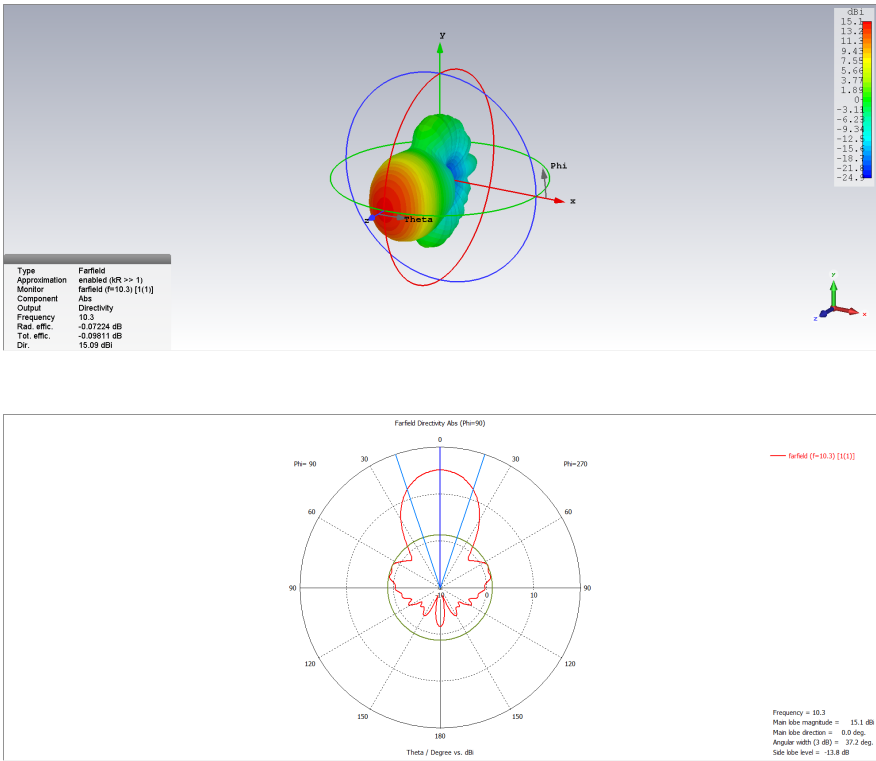
4. 仿真结果

4.1 1D Results

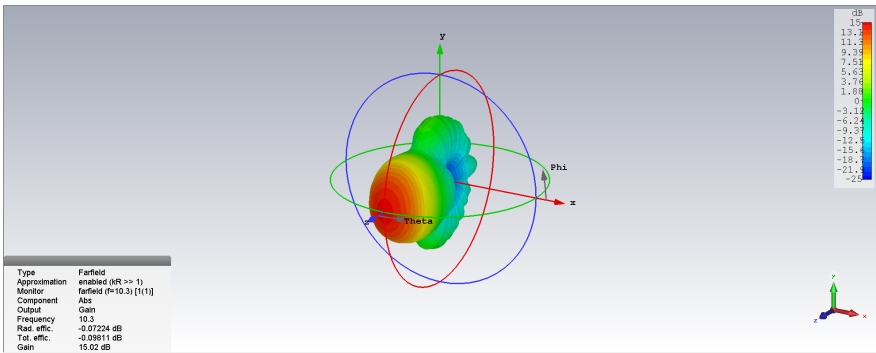
在 1D Results 中 11 S 和驻波曲线

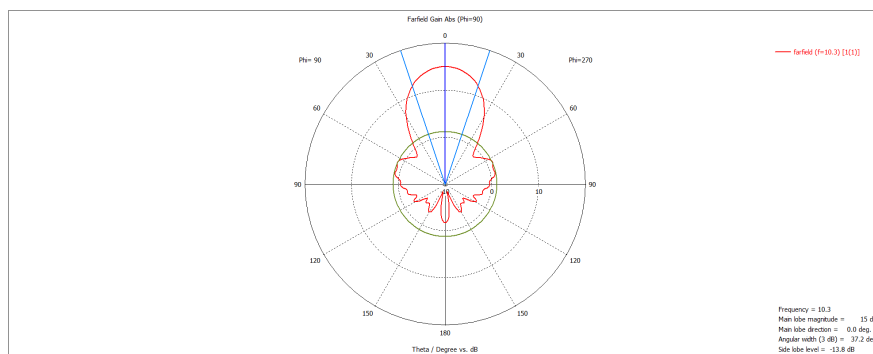


4.2 方向图

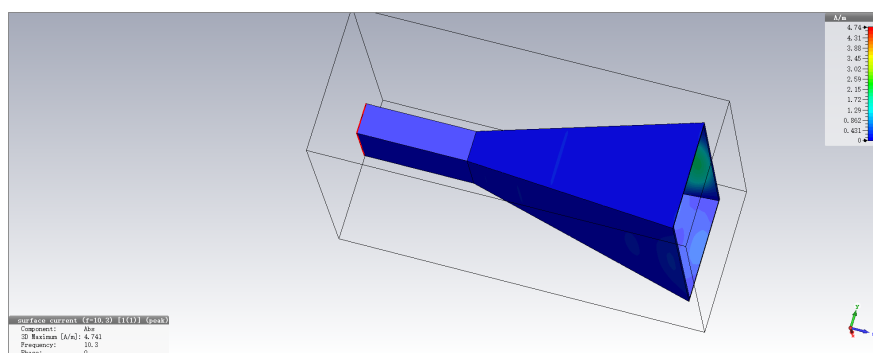


4.3 增益





4.4 表面电流



四 实验结果分析

从仿真结果来看, 该矩形波导馈电的角锥喇叭天线的主瓣方向为 $\varphi = 0^\circ \theta = 0^\circ$ 主瓣宽度为 37.2° , 主瓣的最大增益为 15dB, 最大增益的仿真值与理论估计值相近。同时, 该天线输入端口的反射系数在工作频段内均在 20dB 以下, 能够较好的工作。

五 讨论与心得

通过本次实验, 我学会了如何利用 CST 软件进行天线仿真, 虽然步骤大多是按照老师给的文档进行的, 操作不大熟练, 但通过对实验过程以及实验结果的分析, 也学到了不少关于天线的知识。例如如何阅读并理解天线的方向图等等。我相信, 通过后续天线测量实验的进程, 一定更加深刻地掌握天线的相关知识与设计方法。

第二部分 喇叭天线辐射特性测量

六 实验目的

揭示喇叭天线的辐射特性。

覆盖的基本概念:

- (1) 天线辐射方向图
- (2) 波束宽度
- (3) 天线的极化特性
- (4) 电磁波在空间传播中与距离的关系

七 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时,接收信号最大,若两者正交,接收机将接收不到信号。

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 2-29,装置包括三部分:分别是信号发射端、接收端和天线移动架。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、发喇叭天线之间的距离,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

用到的方程为:

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

其中 R 为收、发天线间距离。

最佳角锥喇叭天线增益:

$$G = 0.51 \frac{4\pi A_p}{\lambda^2}$$

A_p 为喇叭口的面积

喇叭天线半功率波束宽度: H 面: $2\theta_{0.5} \approx 1.18 \frac{\lambda}{D_H} (rad)$

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

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

八 实验数据

1. 天线距离与接收功率

距离 R(m)	实际测量值 (dB)	相对归一化功率
1.0	-30	1
1.1	-31.2	0.759
1.2	-32.6	0.550
1.3	-33.4	0.457
1.4	-34.2	0.380

表 1: 天线距离与接收功率关系

2. 极化测量

2.1 天线极化测量

发射喇叭天线角度 θ	实际测量值 (dB)	相对归一化功率
0	-30	1
10	-30.4	0.912
20	-31.1	0.776
30	-32.8	0.525
40	-34.8	0.331
50	-38	0.158
60	-42.2	0.060
70	-48.5	0.014
80	-58.6	0.001
90	-65.0	0.000

2.2 极化栅网特性测量

极化栅网角度	实验测量值	相对归一化功率
0	-40	1
90	-69	0.001
45	-56	0.025

表 2: 极化栅网特性测量数据

3. 喇叭天线辐射方向图测量

天线水平方向转角	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
实验测量值	-74.2	-75	-75.5	-70.5	-63.4	-57.2	-51.6	-46	-41.8	-40	-41	-45	-50.6	-55	-61.2	-69	-77.5	-73.8	-76.2
相对归一化功率	0.0004	0.0003	0.0003	0.0009	0.0046	0.0191	0.0692	0.2512	0.6607	1	0.7943	0.3162	0.0871	0.0316	0.0076	0.0013	0.0002	0.0004	0.0002

表 3: 天线水平方向图测试数据

天线垂直方向转角	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
实验测量值	-79.5	-70	-71.8	-66	-52.6	-43.2	-40	-42.8	-53.6	-64.8	-68.5	-76.5	-73
相对归一化功率	0.0001	0.001	0.0007	0.0025	0.055	0.4786	1	0.5248	0.0437	0.0033	0.0014	0.0002	0.0005

表 4: 天线垂直方向图测量数据

水平面-3dB 功率时的波束宽度: 25°

九 实验结果与分析

1. 根据测得的数据作出电磁波传播与距离的关系曲线。

利用 MATLAB 对上述数据进行拟合, 得到如下拟合结果:

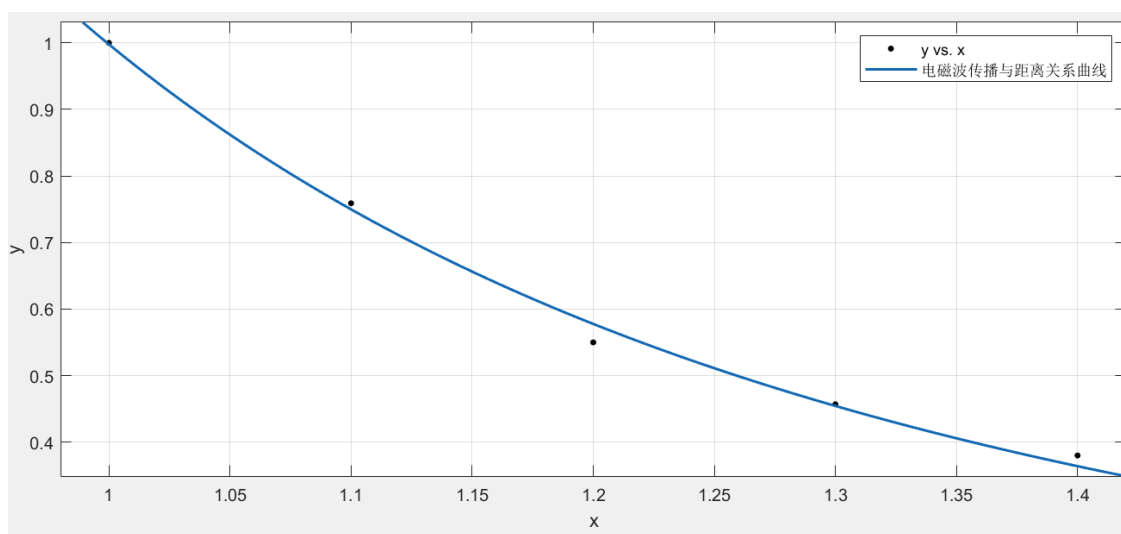


图 1: 拟合曲线

2. 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?

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.9978 \quad (0.9425, 1.053)$$

$$b = -2.997 \quad (-3.386, -2.609)$$

图 2: 拟合结果

由上述结果可知, 拟合而成的曲线与 $\frac{1}{R^3}$ 比较接近, 但是这与理论值中的 $\frac{1}{R^2}$ 并不符合, 分析之后我认为是实验室中其他同学的设备以及实验环境中人员过多, 走动过于频繁带来了这一误差。

3. 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 θ 。

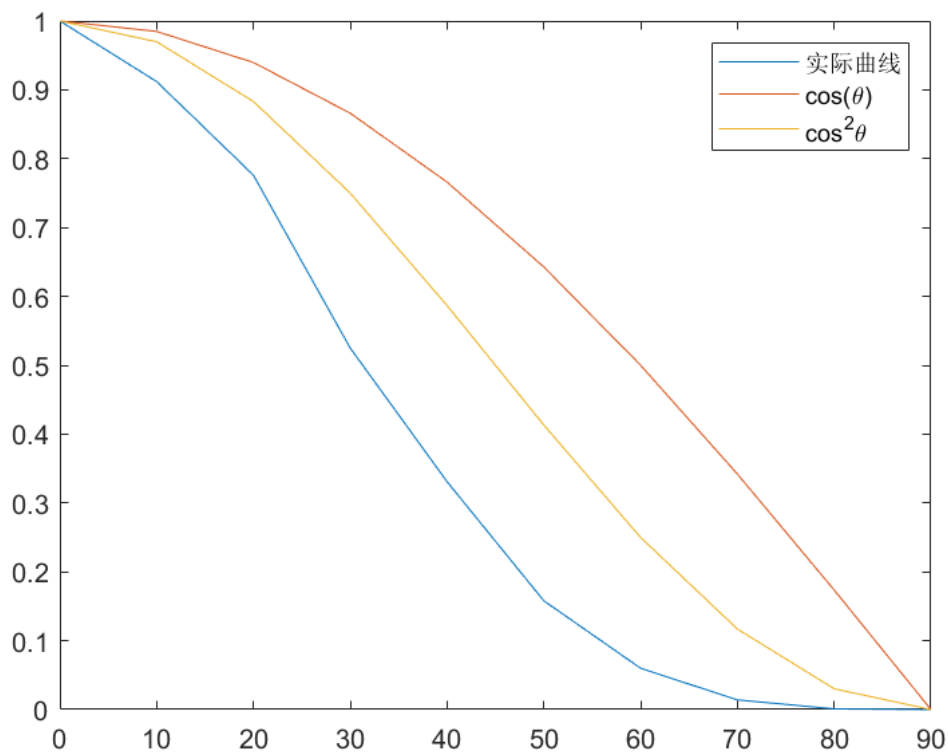


图 3: 天线极化曲线

4. 问题回答

4.1 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 θ 的关系是符合 $\cos \theta$ 还是 $\cos^2 \theta$ 关系?

由上述曲线可得, 接收喇叭天线所收到的功率与发射喇叭天线极化角度 θ 的关系是符合 $\cos^2 \theta$ 。

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

发射的信号经极化器分解成与极化器平行和垂直的两路信号, 在经过接收喇叭, 原始信号的一半被收到

5. 对发射天线计算远区场距离 (工作频率 9.375GHz), 实验中是否符合远区场条件?

$\because 2D_E D_H / \lambda = 0.1896m, R = 1.2m \therefore$ 符合远区场条件

6. 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?

6.1 发射喇叭

最佳角锥喇叭天线增益: $G = 0.51 \frac{4\pi A_p}{\lambda^2} = 0.51 \frac{4\pi(3.78.2)}{3.2^2} = 18.99$

半功率波束宽度:

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

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

6.2 接收喇叭

最佳角锥喇叭天线增益: $G = 0.51 \frac{4\pi A_p}{\lambda^2} = 0.51 \frac{4\pi(10.514.1)}{3.2^2} = 92.66$

半功率波束宽度:

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

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

7. 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。

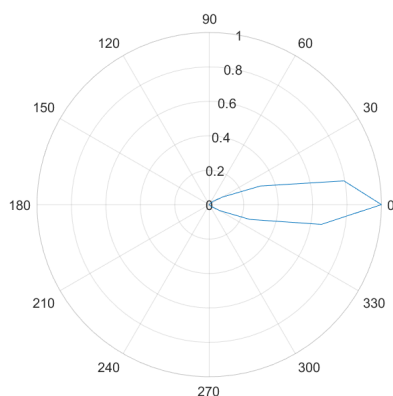


图 5: 水平方向图
()

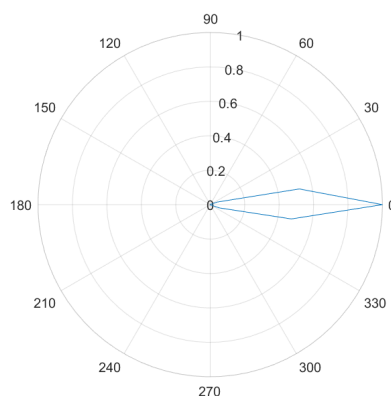


图 6: 垂直方向图
()

8. 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。

测量值发射喇叭 H 面为 25° , 折合 $0.43 rad$, 相比计算值 $0.46 rad$ 偏小

测量值发射喇叭 E 面为 35° , 这个 $0.61 rad$, 相比计算值 $0.77 rad$ 偏小

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

在 $\pm 90^\circ$ 的方向测得的结果并非为零, 原因是背景噪声的干扰和发射处的电磁波在四周反射后被接收的结果

十 收获与体会

在天线辐射特性测量实验中,我验证了以前 CST 软件仿真出来的特性。在实践中认识到随着距离增加,衰减增强的关系,虽然这一规律因为其他组实验的干扰没有成功得出其与 $\frac{1}{R^2}$ 之间的关系,但也从定性的角度了解到了这一规律。其次,后续的极化测量实验也让人更加直观地了解到了电磁场的极化;最后,天线的辐射方向图测量更是让人清晰地认识到了天线发射的信号具有方向性。

实验极其容易受到外界干扰,人员应该注意分工,尽量不要随意走动,同时注意不要几组一起进行实验,我们测量与距离关系实验时,因为实验室内同时做实验的人员很多、各种电子设备之间相互干扰,带来了一定的误差。