大连理工大学

本科实验报告五

课程名称：电磁场与微波技术实验

学院（系）：信息与通信工程学院

专　　业：电子信息工程

班　　级：电信 1806 班

学　　号：201871080

学生姓名：刘祎铭

2021 年 4 月 30 日

大连理工大学实验预习报告

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓　　名：刘祎铭 学号：201871080 组：13

实验时间：2021.4.30 实验室：创新园 C228 实验台：13

指导教师：李小兵

实验五 测量线的调整与驻波比的测量

Section I 测量线的调整与校准

一、实验目的与要求

1. 了解微波基本测试系统的组成和相关元器件的作用，掌握仪器的使用方法。
2. 熟悉并掌握波导测量线的调整及使用方法。
3. 了解并掌握晶体检波二极管的检波特性与校准方法。
4. 熟练掌握交叉读数法测量波导波长的方法。

二、实验内容与原理

1. 实验内容
   1) 了解微波基本测试系统的组成和相关元器件的作用，掌握仪器使用方法。
   2) 熟悉并了解波导传输线特性。
2、实验原理
   1) 测量系统的连接与调整：

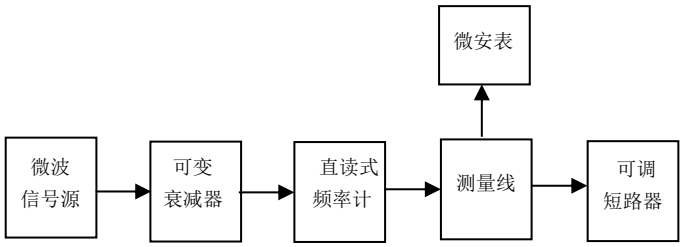

图 5.1-1 晶体二极管检波特性测试系统框图

进行微波测量前，正确地连接与调整测试系统是至关重要的。首先要参照图 5.1-1 所示的常用的微波测试系统框图，进行测试系统的连接，为了方便操作，信号源通常放置在测试系统的左侧，待测的元件放置在右侧；各个元件的接口要对准，连接的系统要平整、稳定，晶体检波器的输出线应远离电源和输入线路，以免造成干扰，如果系统连接不当，会影响测量精度。

系统调整主要是指信号源、测量线的调整及晶体检波器的校准；信号源的调整包

括振荡频率、功率电平的调整及调整方法；本实验主要讨论测量线的调整与晶体检波器的校准。

2） 测量线的调整及波长的测量

➢ 驻波测量线的调整[1]

测量线是微波测量系统中的一种常用测量仪器，有着广泛的用途，比如：可以用来测量驻波比、阻抗、相位、波长等。

测量线通常由一段开槽传输线、探头（耦合探针、探针调谐腔体和输出指示）、传动机构等三部分组成。当探针插入波导内时，在波导中会引入不均匀性，影响了系统的工作状态。

为了分析方便，通常把探针等效成导纳与传输线的并联，具体的等效电路如图 5.1-2 所示。图中的参数 g_p 反映了探针吸取功率的大小，b_p 表示 探针在波导中产生反射的影响。

在信号源和波导系统匹配的条件下，当终端接任意阻抗时，由于 g_p 的分流作用，驻波腹点和电场强度都要比实际值小，而 b_p 的存在又将使驻波腹点和节点的位置发生偏移；但在终端短路的情况下，由于此时的驻波节点处的输入导纳 $y_{in\to\infty}$ ，因此，$Y_p = g_p - jg_p$ 将不起作用，此时的驻波节点位置不会发生偏移。

然而 Y_p 对驻波腹点的影响却是十分的明显，尤其是探针容性电纳 b_p 的存在将使驻波腹点向负载方向偏移，造成测量误差。通过减小探针深度的方法可以减小 g_p 的影响，而消除 b_p 的影响则要通过调节探针调谐电路来实现。

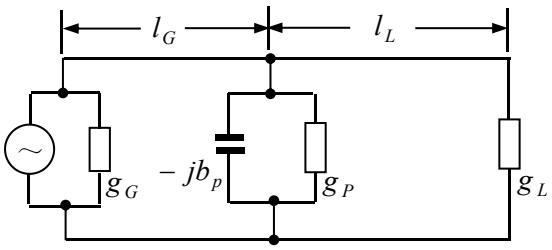

图 5.1-2 探针等效电路

探针电路的调谐方法是将探针的穿伸度放在适当的位置上（通常放置在 1.0-1.5mm 之间），将测量系统的终端短路，探针移到两个波节点的中心位置上，调节探头的调谐活塞，直到输出的指示为最大；这表明此时的 b_p 已经减到最小。其实调谐的过程就是减少探针的反射对驻波带来的影响，以提高测量灵敏度的过程，这也是减小驻波测量误差的一个关键因素，所以，一定要认真的调整。

需要指出的是：当信号源的频率或者探针的深度被改变时，由于探针的等效导纳 Y_p 也随着改变，所以必须要重新对探针进行调谐。

➢ 波长测量

测量波长常采用谐振法或者驻波分布法。

谐振法是用谐振式波长计来进行的波长测量的方法；由于谐振式波长计直接以频率刻度的，故又称为‘直读式频率计’。

驻波分布法是用驻波测量线进行测量。当将测量线的终端短路时，传输线上就形成了纯驻波，此时移动测量线的探针，可测出两个相邻驻波最小点之间的距离，即可求得波导波长；另外，还可以将可调短路活塞接在测量线的输出端上，使测量线探针处于某个波节点上，这时保持探针的位置不变，移动可调短路活塞，探针的检测值就会随之发生由小到大再由大到小的变化，这意味着探针是从一个波节点处移动到了另一个相邻的波节点上，这时短路活塞所移动的距离即为半个波导的波长。

在传输横电磁波的同轴系统中，用上述方法所测得的波导波长就是工作波长，即 $\lambda_g = \lambda$ 。在波导系统中，测量线所测出的波长是波导波长 λ_g ，根据波导波长和工作波长之间的关系式（5.1-1），便可以求出工作波长 λ，关系式（5.1-2）。

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-(\frac{\lambda}{\lambda_C})^2}} \qquad (5.1\text{-}1)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1+(\frac{\lambda_g}{\lambda_C})^2}} \qquad (5.1\text{-}2)$$

为了提高测量精度，通常采用交叉读数法来确定驻波节点的位置。

交叉读数法是指在波节点附近两边找出微安表读数相等的两个对应位置 d_{11} ，d_{12} ，d_{21} ，d_{22} ，d_{31} ，d_{32} 然后分别取其平均值，确定对应的波节点的位置，如图2-3 所示；通过相邻的波节点来计算导波长 λ_g 。[1]

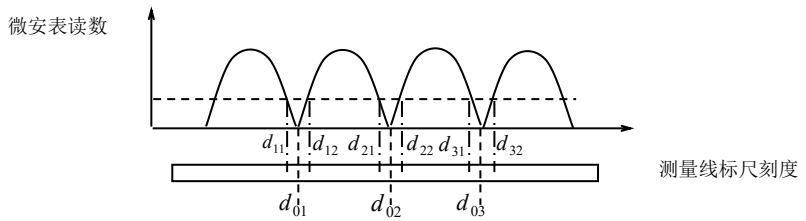

图 5.1-3 交叉读数法测量驻波比节点位置

图中： $d_{01} = \frac{1}{2}(d_{11} + d_{12})$ ； $d_{02} = \frac{1}{2}(d_{21} + d_{22})$ ； $d_{03} = \frac{1}{2}(d_{31} + d_{32})$ ；

则： $\lambda_g = 2(d_{02} - d_{01})$ 或者 $\lambda_g = 2(d_{03} - d_{02})$ 。

➢ 晶体检波特性的测量

在微波测量系统中，微安表上所指示的微波能量，是通过晶体二极管检波后的直流分量或者是低频电流。因此，我们从微安表上所读取的数值是检波电流的有效值I。我们知道，晶体二极管是一种非线性的元件，即检波电流I与两端的电压V之间不是线性关系，通常被表示为：

$$I = K|U|^n \qquad (5.1\text{-}3)$$

式中n表征了晶体二极管的检波律；当$n=1$时，$I \propto U'$，称为直线检波；当$n=2$时，$I \propto U^2$，称为平方律检波。

可以看出晶体二极管的检波律n是随着其两端电压的大小变化而变化的。因此，当晶体二极管两端电压较小时呈现出平方规律，而两端电压较大时呈现的则是线性规律。图 5.1-4 给出的是晶体二极管的典型检波曲线，由图中可以看出：

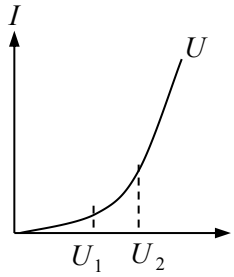

图 5.1-4 二极管检波特性图

在 $U < U_1$区间，电流 I 呈直线性；

在 $U < U_2$区间，电流 I 呈现平方律；

在 $U_1 < U < U_2$区间，检波律不是整数；

可见，当施加在晶体二极管两端的电压变化幅度较大时，n不是常数。

所以在精密测量中必须要对晶体检波律进行标定。

测量线探针在波导中所感应的电动势（晶体二极管两端的电压 U）与探针所在处的电场E成正比，因此检波电流和波导中的场强也同样满足这样的关系：

$$I = K'E^n \qquad (5.1\text{-}4)$$

检波电流的大小是相对于探针所在电场的强度的相对值，所以必须要确定晶体二极管的检波律 n。

$$\rho = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (5.1\text{-}5)$$

当$n=2$时，该检波电流的读数即为相对功率的指示值。

实验室常用的晶体标定方法（驻波法）：

测量电流表读数与相对场强的关系曲线，当测量线终端被短路时，沿线各点的电场分布如为：

$$|E| = \left|E_m \sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right| \qquad (5.1\text{-}6)$$

整理得到：
$$\left|\frac{E}{E_m}\right| = \left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right| \tag{5.1-7}$$

式中 E_m 为驻波波腹点的电场强度，λ_g 为波导波长，d 为探针距驻波节点的距离，如图 5.1-5 所示。将式（5.1-7）带入式（5.1-4）中可以得到：

$$I = K'\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right|^n \tag{5.1-8}$$

式中 $\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right|$ 为探针位置的相对场强。

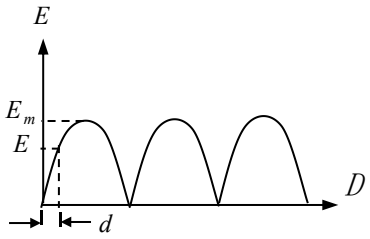

图 5.1-5 探针与驻波关系图

对式（5.1-8）两边取对数得：

$$\log I = \log K' + n\log\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right| \tag{5.1-9}$$

通常令 $K'=1$，在 $\lambda_g/4$ 范围内，选取场强相对值为 0.1，0.2，…，1.0（即：$\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right| = 0.1, 0.2, 0.3\cdots 1.0$）各点，读取相应的电流表读数为 I，用读取的 I 值就可作出 I 和 $\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right|$ 的关系曲线来。即晶体二极管校准曲线，如图 5.1-6（a）所示。

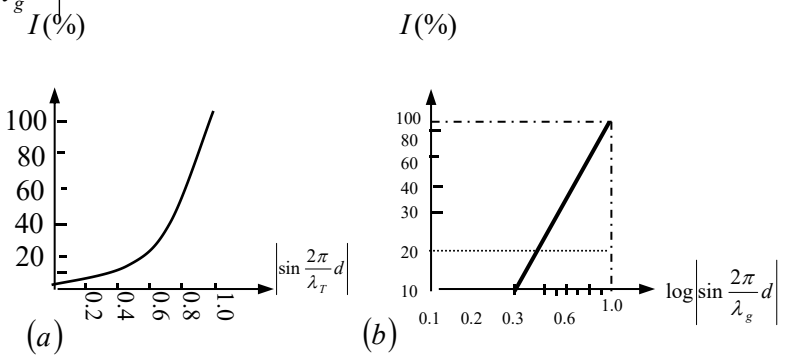

图 5.1-6 晶体检波特性校准曲线

我们在全对数坐标纸上画出 $\log I$ 和 $\log\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}d\right|$ 的平滑关系曲线，如图 5.1-6（b）

所示。根据式（5.1-9）可知，该曲线的斜率即为晶体检波律 n 。

将测量线终端短路，测出半峰之间的距离，读数为：W 。

如图 5.1-7 所示，检波律计算公式为：

$$n = \frac{\log 0.5}{\log \cos(\frac{\pi w}{\lambda_g})} \qquad (5.1\text{-}10)$$

根据测得的晶体检波律，可以获得晶体平方律检波的工作范围。

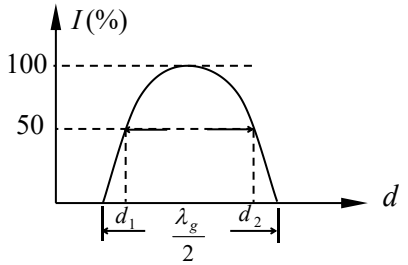

图 5.1-7 按半高点间的距离求晶体检波律

实验室中大多数微波测试系统属于小信号系统。因此，晶体检波律基本上采用平方律方法，若不是精密测量，通常取 $n = 2$ 。

需要指出的是：用上述方法测得的晶体二极管的校准曲线和检波律，在实际中还应包含电流表的非线性律；因此在更换检测仪表或晶体二极管以后都必须重新进行校准。此外，晶体二极管的检波特性会随时间、湿度、温度的变化有一定的变化，因此校准工作要经常进行以保证测量的准确性。

在微波频段内，用于检波的大多属于点接触式的硅型二极管或者锗型二极管，目前还有采用机械强度较好、一致性较高的肖特基二极管和短路电流灵敏度较高、温度变化系数较小的低峰流隧道二极管（通常所说的反向二极管）。

三、实验主要仪器设备

1. X 波段信号源（DH 1121B）
2. 1kHz 选频放大器（DH 388A0）
3. 驻波测量线（TC26）
4. 可变衰减器（BD-20-2）
5. BD-1/035A 型 3cm 空腔式波长表
6. 精密衰减器（TS 7）
7. 短路板 等

四、实验步骤及操作方法

➢ 频率及波长的测量

1) 用空腔式波长表读取频率 f ，并转换出工作波长。

2) 用测量线测量波导波长。

将测量线终端短路，移动探针到驻波节点，用交叉读数法测量相邻三个波节点，记录测量数据为：$d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}, d_{31}, d_{32}$；然后求出 d_{01}, d_{02}, d_{03}，并计算出波导波长 λ_{g1}（参

见图 5.1-3）。

3) 用可变短路活塞测量波导波长。

测量线终端接可变短路活塞，首先将短路活塞置于某一位置L_{01}（活塞标尺刻度约为 2mm 处）。用交叉读数法测量L_{01}在测量线上的等效点，并使测量线探针位于该点上，固定测量线探针的位置，移动可变短路活塞使得微安表再次出现最小值，并将该点作为L_{02}（同样用交叉读数法）；计算出λ_{g2}，并与前面得到的λ_{g1}进行比较。

将用测量线和可变短路活塞测得的波导波长λ_g用公式换算出工作波长，与用频率计测得的工作波长进行比较。

➢ 晶体二极管的检波特性的测量

测量线终端接短路板，移动探针找出相邻最大值与最小值之间的距离，然后将此距离分成十等份（每个等份作为Δd）；从最小值位置开始探针每移动Δd距离，读取微安表的数据并记录；依据前面测得的λ_g值和Δd值计算相应的$\left|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d\right|$值，并整理到表 5.1-1 中。

实验五 测量线的调整与驻波比的测量

Section II 电压驻波比的测量

一、实验目的与要求

了解、掌握波导测量线的正确使用方法。

二、实验内容与原理

1. 实验内容

1) 用直接法测量开口波导的电压驻波比。

2) 用直接法测量匹配负载的电压驻波比。

3) 用直接法测量单螺钉匹配器的电压驻波比。

2. 实验原理

驻波测量是微波测量中最基本和最重要的内容之一。通过驻波测量可以测出阻抗、波长、相位和Q值等其它参量。在传输线中若存在驻波，会使能量不能有效的传到负载端；在大功率的情况下，由于驻波的存在，可能发生击穿现象。此外，驻波的存在还会影响到微波源的输出功率与频率稳定度。因此，驻波测量非常重要。在测量时，通常测量电压驻波比，即波导中电场的最大值与最小值之比，可表示为：

$$\rho = \frac{E_{max}}{E_{min}} \qquad (5.2\text{-}1)$$

- 直接法（小驻波比的测量$1.05 < \rho < 1.5$）[1]

直接测量沿线驻波的最大点（腹点）和最小点（节点）的场强，如图 5.2-1 所示，从而求得驻波比的方法，称作直接法。

若驻波腹点和节点处电流表读数分别为I_{max}和I_{min}，根据晶体检波律可以得出相应的E_{max}和E_{min}，并通过（5.2-1）式计算驻波比ρ。

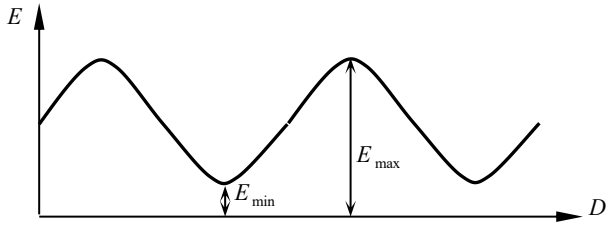

图 5.2-1 驻波的最大点和最小点示意图

实验中所使用的功率电平范围内，一般近似为平方律检波，即$n = 2$，故式（5.2-1）亦可写成：

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}} \qquad (I \propto \rho \propto E^2) \qquad (5.2\text{-}2)$$

当驻波比为：$1.05 < \rho < 1.5$时，驻波比的最大值和最小值相差不大，且不尖锐，因此不易测准。为了提高测量精度，通常采用移动探针测出多个波腹点和波节点的数据[1]，然后取均值的方法；如：

$$\overline{\rho} = \frac{1}{n}\left(\sqrt{\frac{I_{max1}}{I_{min1}}} + \sqrt{\frac{I_{max2}}{I_{min2}}} + \cdots\cdots + \sqrt{\frac{I_{maxn}}{I_{minn}}}\right) \qquad (5.2\text{-}3)$$

当驻波比为：$1.5 < \rho < 6$时，可直接读出场强最大值和场强最小值。

为了精确地测量驻波最小点的位置，应采用交叉读数法来确定。

三、实验主要仪器设备

1. X 波段信号源（DH 1121B）
2. 1kHz 选频放大器（DH 388A0）
3. 驻波测量线（TC26）
4. 可变衰减器（BD-20-2）

5. BD-1/035A 型 3cm 空腔式波长表
6. 精密衰减器（TS 7）
7. 短路板 等

四、实验步骤及操作方法

按图 5.2-2 所示的驻波比测试系统框图连接驻波比测量系统

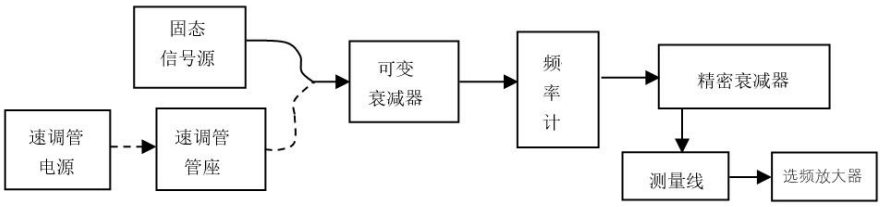

图 5.2-2 驻波比测量系统框图

测量线终端短路，调整测量线、调谐探针电路，使测量线工作在最佳状态。
用空腔式波长表测量工作频率。

测量线终端接短路板，用交叉读数法测量两个相邻波节点位置，计算出 λ_g。

➢ 用直接法测量开口波导的电压驻波比

测量线终端开口，移动探针至驻波腹点，改变可变衰减器使电表指示达到满度。分别测得驻波的腹点、节点的幅值 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ ，并列表统计数据。

➢ 用直接法测量匹配负载的电压驻波比

测量线终端接匹配负载，移动探针至驻波腹点，改变可变衰减器使电表指示达到满度。分别测得驻波的腹点、节点的幅值 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ ，并列表统计数据。

➢ 用直接法测量单螺钉匹配器的电压驻波比

测量线终端接单螺钉匹配器，移动探针至驻波腹点，改变可变衰减器使电表指示达到满度。分别测得驻波的腹点、节点的幅值 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ ，并列表统计数据。

大连理工大学实验数据记录

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓　　名：刘祎铭 学号：201871080 组：13

实验时间：2021.4.30 实验室：创新园 C228 实验台：13

指导教师：李小兵

实验五 测量线的调整与驻波比的测量

Section I 测量线的调整与校准

1. 频率及波长的测定

1) 波长表读数为: 7.71mm

查波长-频率对照表得工作频率：9371MHz，对应工作波长：32.01mm .

2) 将测量线终端短路，用测量线测量波导波长，数据见表 5.1-1.

3) 测量线终端接可变短路活塞，用可变短路活塞测量波导波长，数据见表 5.1-2.

2. 晶体二极管的检波特性的测量

记录位置，计算归一化电流，数据见表 5.1-3.

表 5.1-1 短路板测量波长

节点序号	dn_1(mm)	dn_2(mm)	dn(mm)	$\lambda_g = 2\lvert d_n - d_{n-1}\rvert$(mm)
1	85.48	93.10	89.29	
2	108.14	115.70	111.92	45.26
3	130.54	138.10	134.32	44.80
4	153.10	160.58	156.84	45.04
波导波长平均值 $\lambda_g = \frac{1}{3}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$				45.03
波长 $\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + (\frac{\lambda_g}{\lambda_c})^2}} =$ 32.18mm				

表 5.1-2 活塞测量波长

节点序号	dn_1(mm)	dn_2(mm)	dn(mm)	$\lambda_g = 2\lvert d_n - d_{n-1}\rvert$(mm)
1	10.557	16.922	13.740	
2	31.015	39.349	35.182	42.884
$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1+(\frac{\lambda_g}{\lambda_c})^2}} =$	31.367mm			

表 5.1-3 晶体管检波特性测量

位置	145.9	144.7	143.6	142.4	141.3	140.1	138.9	137.8
电流(uA)	80	78.0	72.9	62.0	51.0	38.1	23.9	12.0
$\frac{I}{I_{max}}$	1	0.975	0.911	0.775	0.638	0.476	0.299	0.150
$\lvert\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d\rvert$	1	0.9877	0.9511	0.8910	0.8090	0.7071	0.5878	0.4540
位置	136.6	135.5	134.3					
电流(uA)	4.7	1.3	1.0					
$\frac{I}{I_{max}}$	0.059	0.016	0.013					
$\lvert\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d\rvert$	0.3090	0.1564	0					

大连理工大学实验数据记录

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓　　名：刘祎铭 学号：201871080 组：13

实验时间：2021.4.30 实验室：创新园 C228 实验台：13

指导教师：李小兵

实验五 测量线的调整与驻波比的测量

Section II 电压驻波比的测量

参考“实验步骤及操作方法”完成以下表格。

表 5. 2-1 直接法测开口波导驻波比

	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	82.0	80.0	79.5	78.0
$I_{min}(\mu A)$	28.3	28.0	28.1	28.0
ρ	1.70	1.69	1.68	1.67
$\bar{\rho}$	1.685			

表 5. 2-2 直接法测匹配负载驻波比

	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	98.0	97.8	98.5	98.1
$I_{min}(\mu A)$	94.8	94.9	95.0	95.0
ρ	1.02	1.02	1.02	1.02
$\bar{\rho}$	1.02			

表 5. 2-3 直接法测单螺钉波导驻波比

d=1mm	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	85.1	84.8	84.9	84.9
$I_{min}(\mu A)$	29.9	29.3	29.2	29.4
ρ	1.69	1.70	1.71	1.70
$\bar{\rho}$	1.70			
d=9mm	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	94.5	95.1	94.7	94.9
$I_{min}(\mu A)$	11.9	12.2	12.0	11.8
ρ	2.82	2.79	2.81	2.84
$\bar{\rho}$	2.815			

大连理工大学实验报告

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓　　名：刘祎铭 学号：201871080 组：13

实验时间：2021.4.30 实验室：创新园 C228 实验台：13

指导教师：李小兵

实验五 测量线的调整与驻波比的测量

Section I 测量线的调整与校准

一、 实验目的和要求

参见实验预习报告。

二、 主要实验仪器

参见实验预习报告。

三、 实验内容与原理

参见实验预习报告。

四、 实验步骤及操作方法

参见实验预习报告。

五、 实验数据记录与处理

1. 频率及波长的测定

1) 波长表读数

表 5.1-0 频率及波长的测定

波长表读数	工作频率	对应工作波长
7.71mm	9371MHz	32.01mm

2) 将测量线终端短路，用测量线测量波导波长，数据见表 5.1-1.

3) 测量线终端接可变短路活塞，用可变短路活塞测量波导波长，数据见表 5.1-2.

2. 晶体二极管的检波特性的测量

记录位置，计算归一化电流，数据见表 5.1-3.

表 5.1-1 短路板测量波长

节点序号	dn_1(mm)	dn_2(mm)	dn(mm)	$\lambda_g = 2\|d_n - d_{n-1}\|$(mm)
1	85.48	93.10	89.29	
2	108.14	115.70	111.92	45.26
3	130.54	138.10	134.32	44.80
4	153.10	160.58	156.84	45.04
波导波长平均值 $\lambda_g = \frac{1}{3}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$				45.03
波长 $\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + (\frac{\lambda_g}{\lambda_c})^2}} =$ 32.18mm				

表 5.1-2 活塞测量波长

节点序号	dn_1(mm)	dn_2(mm)	dn(mm)	$\lambda_g = 2\|d_n - d_{n-1}\|$(mm)
1	10.557	16.922	13.740	
2	31.015	39.349	35.182	42.884
$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + (\frac{\lambda_g}{\lambda_c})^2}} =$ 31.367mm				

表 5.1-3 晶体管检波特性测量

位置	145.9	144.7	143.6	142.4	141.3	140.1	138.9	137.8
电流(uA)	80	78.0	72.9	62.0	51.0	38.1	23.9	12.0
$\frac{I}{I_{max}}$	1	0.975	0.911	0.775	0.638	0.476	0.299	0.150
$\|\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d\|$	1	0.9877	0.9511	0.8910	0.8090	0.7071	0.5878	0.4540
位置	136.6	135.5	134.3					

电流(uA)	4.7	1.3	1.0					
$\frac{I}{I_{max}}$	0.059	0.016	0.013					
$\lvert\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d\rvert$	0.3090	0.1564	0					

六、 实验结果分析

1. 在方格纸及双对数坐标纸上描绘出 I 与 $\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d$ 的关系曲线，并在双读数坐标纸上计算出直线部分的斜率 n，与上面测得的 n 值进行比较。

① 利用公式法求得晶体检波率

绘制 x-i 的关系曲线见图 1，插值法拟合出 0.5I 处的值，得

w =

11.2465

n =

2.1446

由公式（9-10）计算得到的检波系数：2.1446

方格纸：

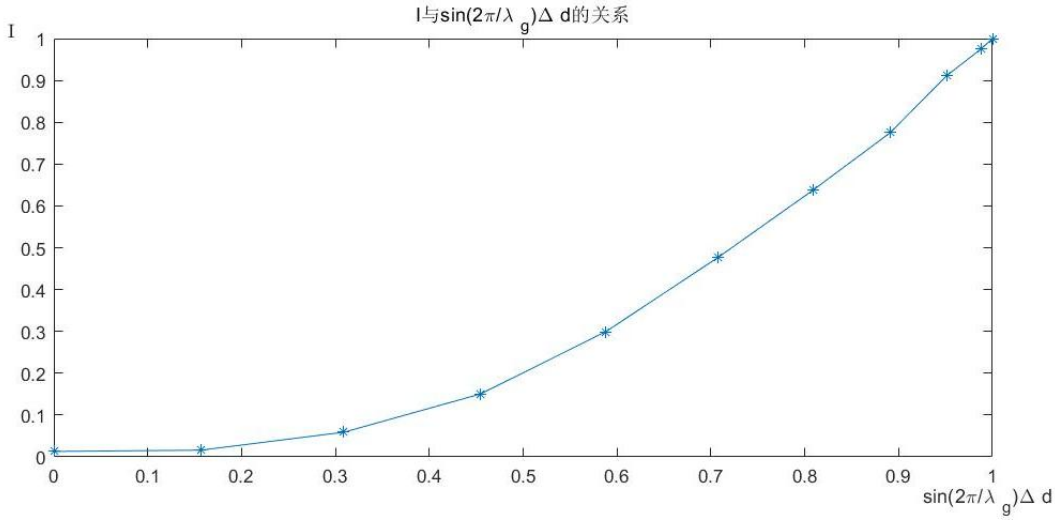

图 1 方格纸图示

② 利用 logI 与 $\log(\sin\frac{2\pi}{\lambda_g}\Delta d)$的关系曲线见图 2，利用函数拟合得到斜率为 n。与①中测得以及理论大致范围相差不多。

双对数坐标纸：

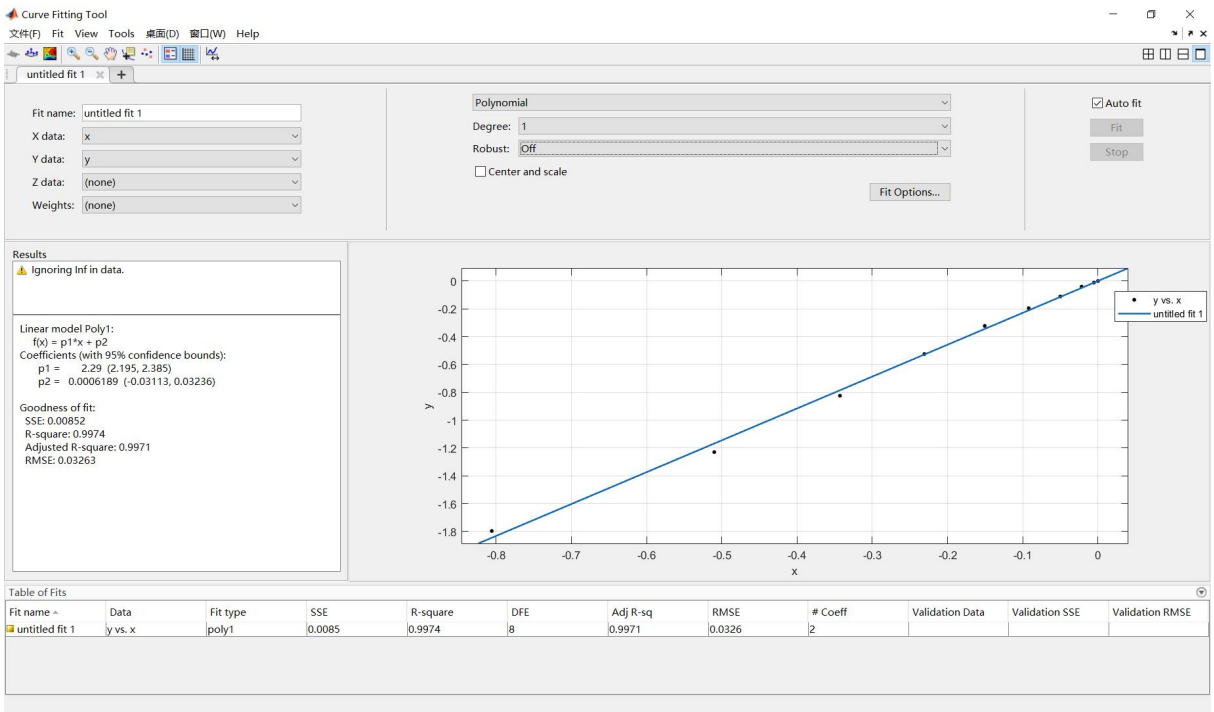

图 2 双对数坐标纸

两种最小二乘法一阶拟合：

1）Off：

Linear model Poly1:

f(x) = p1*x + p2

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = 2.29 (2.195, 2.385)

p2 = 0.0006189 (-0.03113, 0.03236)

Goodness of fit:

SSE: 0.00852

R-square: 0.9974

Adjusted R-square: 0.9971

RMSE: 0.03263

p1 = 2.29 (2.195, 2.385)，计算得出斜率为：n=2.29

2）优化 LAR：使用每一个点

Linear model Poly1:

f(x) = p1*x + p2

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = 2.251 (2.2, 2.302)

p2 = 0.001105 (-0.01586, 0.01807)

Goodness of fit:

SSE: 0.002434

R-square: 0.9993

```
  Adjusted R-square: 0.9992
  RMSE: 0.01744
```

p1 =　　2.251　(2.2, 2.302)，计算得出斜率为：n=2.25，与理论值相符，符合理论。

老师给的代码：

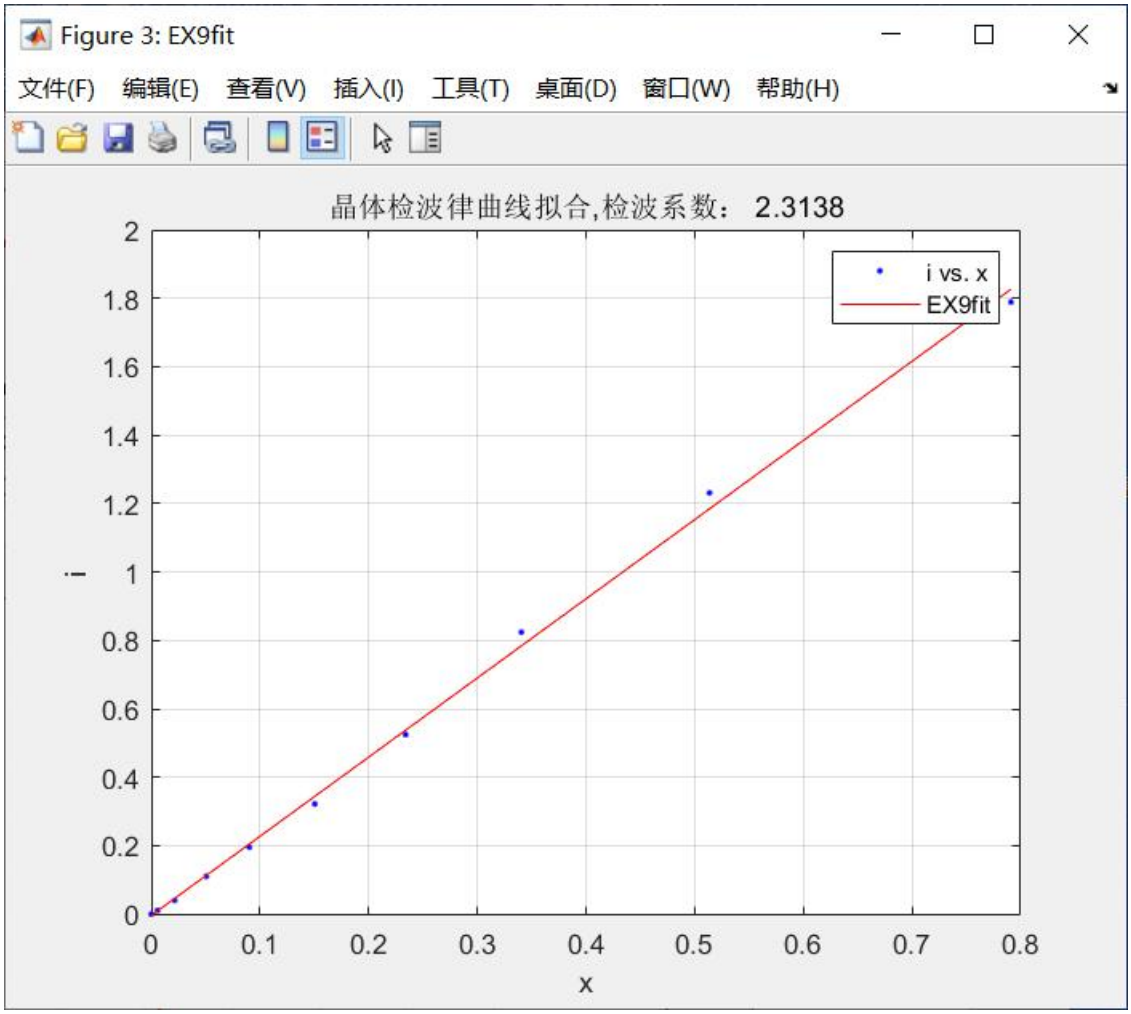

图 3 老师给的代码测出的检波系数

```
fitresult =

     Linear model Poly1:
     fitresult(x) = p1*x + p2
     Coefficients (with 95% confidence bounds):
       p1 =       2.314   (2.234, 2.394)
       p2 =   -0.003769   (-0.03031, 0.02278)

gof =

  包含以下字段的 struct:

            sse: 0.0059
```

```
      rsquare: 0.9982
          dfe: 8
   adjrsquare: 0.9980
         rmse: 0.0272
```

七、 问题与建议、体会

1. 举例指出本平台实验和对应的仿真实验的异同点，哪些点是相互印证的，哪些点是相互补充的。

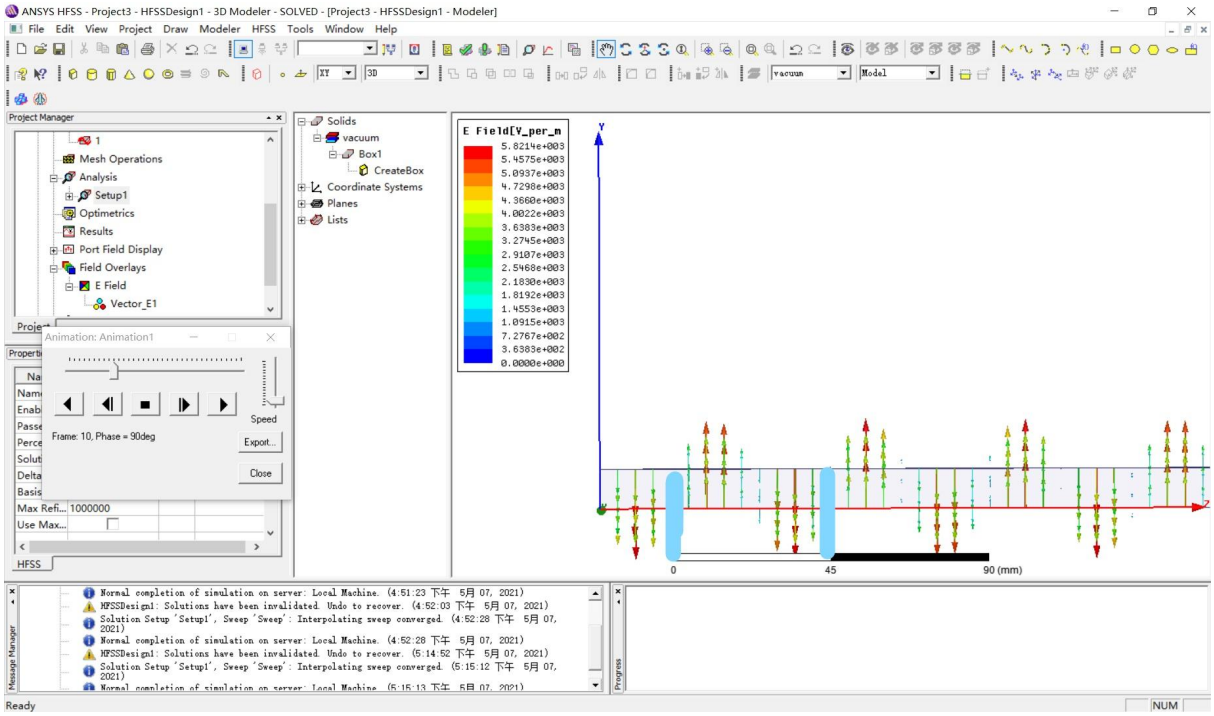

图 5 HFSS 仿真

a=23mm, b=11.5mm, f=9.371GHz。此时 2 倍驻波波长在 45mm 左右，与波导波长相同，理论符合实践结果。[2][3][4]

2. 测量波导波长误差分析

工作波长理论值：$\lambda = 32.01mm$

波导波长理论值：λ_g =44.5717mm

① 测量线测量波导波长

由表 5.1 可知，λ_{g1}=45.03mm, 相对误差$\Delta_1 = \frac{|\lambda_{g1}-\lambda_g|}{\lambda_g} * 100\%$ =1.03%

② 可变短路活塞测量波导波长

由表 5.2 可知，λ_{g2}=42.84mm, 相对误差$\Delta_2 = \frac{|\lambda_{g2}-\lambda_g|}{\lambda_g} * 100\%$ =3.89%

③ 误差产生原因分析

在本次实验中，虽然采用的测量波长实验原理与实验一类似，但是由于实验仪器的测量精度不同，可以明显看出此次实验的测量误差减小。认为误差减小的原因与前一实验中提供的猜想相同，在本次实验中上一次长杆对误差的放大效应得到了有效验证。解决方法就是把千分尺和金属板之间距离减小并牢牢固定，本次实验二者焊接在一起，确实极大减小了相对误差。

上次的补充定量分析：

理论上ε_r=2.7，对应的ΔL= 5.1453mm，两者相差 1.03mm，相对误差Δ=（6.186-5.1453）/5.1453*100%= 20.1%。

1）相对误差非常大

2）绝对误差 1.03mm 非常小

结论：所用仪器设备的精度完全不符合实验精度要求，测量结果看运气。结果应符合正态分布。符合上次提供的猜想与相关理论。底座和反射板间的长杆效应带来对误差的不可忽略的放大作用是实验结果不符合预期和理论的原因。

本次实验综合分析：

ΔL	6.186
$\varepsilon_r = (1 + \frac{\Delta L}{\delta})^2$	3. 144

%%

在最开始时，我们发现在频率计读数为 13.37mm 时输出电压会有较大衰减，我们对应查表得工作频率为 8757Mhz，工作波长为 34.3mm。我们反复验证了以上数据，确保准确无误。

之后我们按照实验步骤用短路板和活塞测量了波导波长平均值，并用公式计算了对应得工作波长，短路板为 32.18mm。活塞为 31.367mm，对应得工作频率大约在 937X Mhz 左右，工作频率相差过大，我们认为必然存在测量问题。而两种方式短路板和活塞测得数据大致相同，测量步骤反复确认后也没有问题。所以我们逆向思维，逆向查表找到频率表读数应为 7.7X mm，固在 7.7X mm 处仔细寻找衰落点。在 07.71mm 处有一极大衰减，而且衰减的带宽更小，衰减幅度更大。故更改后发现正好理论工作波长符合。说明频率表有两处衰减，这与仪器的老化和结构问题有一定关联，但是 07.71 比 13.37 处衰减更大，带宽更小，更加符合作为谐振点处的特性，也可认为理论和设备没有问题。

%%
本实验和商促实验均存在的问题：

公式：

$$\lambda = \frac{1}{3}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$$

其中：

$$\lambda_n = 2|d_n - d_{n-1}|$$

会约分并浪费掉d_3 d_2 d_1，在大物实验中多次提及该问题，只会使用两端数据，而不是多次测量取平均值的本意。

解决方法是使用逐差法[5][6]或者线性回归分析，线性回归分析使用最小二乘法，计算比较复杂费事，可借助 excel 表格来进行计算。

1	2	3	4
89.29	111.92	134.32	156.84

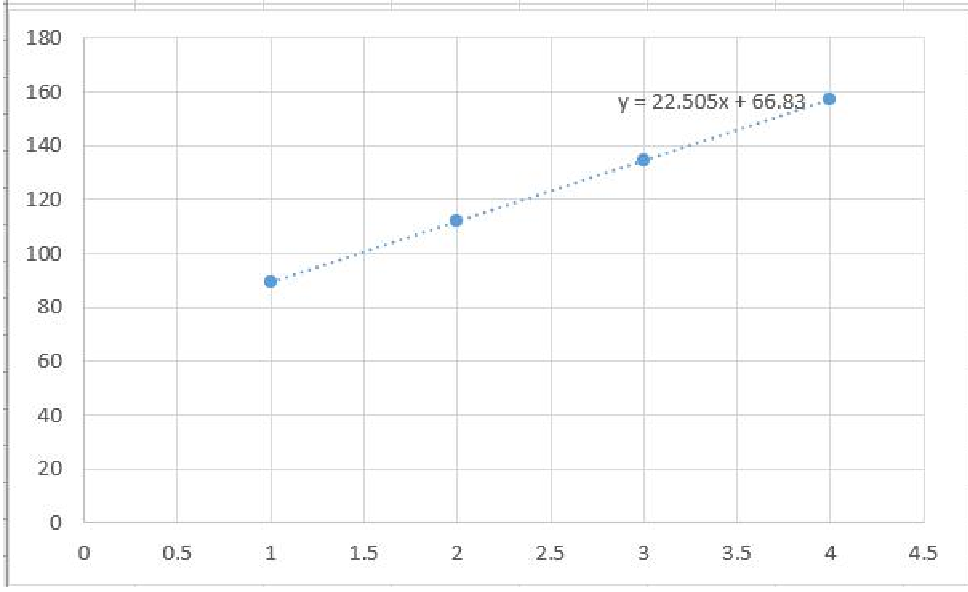

图 6 最小二乘法拟合

可得计算值λ=2*22.505mm=45.01mm，比原来的 45.03mm 更加贴近理论值。[7][8]

实验五 测量线的调整与驻波比的测量

Section II 电压驻波比的测量

一、 实验目的和要求

参见实验预习报告。

二、 主要实验仪器

参见实验预习报告。

三、 实验内容与原理

参见实验预习报告。

四、 实验步骤及操作方法

参见实验预习报告。

五、 实验数据记录与处理

参考“实验步骤及操作方法”完成以下表格。

表 5. 2-1 直接法测开口波导驻波比

	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	82.0	80.0	79.5	78.0
$I_{min}(\mu A)$	28.3	28.0	28.1	28.0
ρ	1.70	1.69	1.68	1.67
$\bar{\rho}$	1.685			

表 5. 2-2 直接法测匹配负载驻波比

	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	98.0	97.8	98.5	98.1
$I_{min}(\mu A)$	94.8	94.9	95.0	95.0
ρ	1.02	1.02	1.02	1.02

$\bar{\rho}$	1.02

表 5.2-3 直接法测单螺钉波导驻波比

d=1mm	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	85.1	84.8	84.9	84.9
$I_{min}(\mu A)$	29.9	29.3	29.2	29.4
ρ	1.69	1.70	1.71	1.70
$\bar{\rho}$	1.70			
d=9mm	1	2	3	4
$I_{max}(\mu A)$	94.5	95.1	94.7	94.9
$I_{min}(\mu A)$	11.9	12.2	12.0	11.8
ρ	2.82	2.79	2.81	2.84
$\bar{\rho}$	2.815			

六、 实验结果分析

1. 实验现象及存在问题的讨论。

（1）用直接法测量开口波导的电压驻波比

测量线终端开口，移动探针至驻波腹点，改变可变衰减器使电表指示达到满度的80%。分别测得驻波的腹点、节点的幅值 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ ，测得电压驻波比为 1.685.

（2）用直接法测量匹配负载的电压驻波比

测量线终端接匹配负载，移动探针至驻波腹点，改变可变衰减器使电表指示达到满度的 80%。分别测得驻波的腹点、节点的幅值 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ ，测得电压驻波比为 1.02.

（3）用直接法测量单螺钉匹配器的电压驻波比

测量线终端接单螺钉匹配器，移动探针至驻波腹点，改变可变衰减器使电表指示达到满度的 80%。分别测得驻波的腹点、节点的幅值 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ ，测得 1mm 处电压驻波比为 1.70，测得 9mm 处电压驻波比为 2.815.

七、 问题与建议、体会

1. 开口波导的 ρ ≠∞，为什么？

由于实验中，开口波导所形成的终端开路非理想的，在开口端存在着较大的辐射，相当于传输线有部分延长，所以负载并不是无穷大状态。因而所测得的驻波比并非无穷

大，而是有限值。

若想要形成理想的开路状态，应使用$\frac{1}{4}\lambda$阻抗变换短路板来形成理想开路状态。

2. 举例指出本平台实验和对应的仿真实验的异同点，哪些点是相互印证的，哪些点是相互补充的。

（1）直接开口法建模仿真，设置 a=23mm，b=11.5mm，介质为 air，外层边界设为 radiation，扫频后得出在 9.375MHz 的驻波比大约为 1.77 左右，而实际值为 1.685，二者相差不大，理论符合实际。[5][6][7][8]

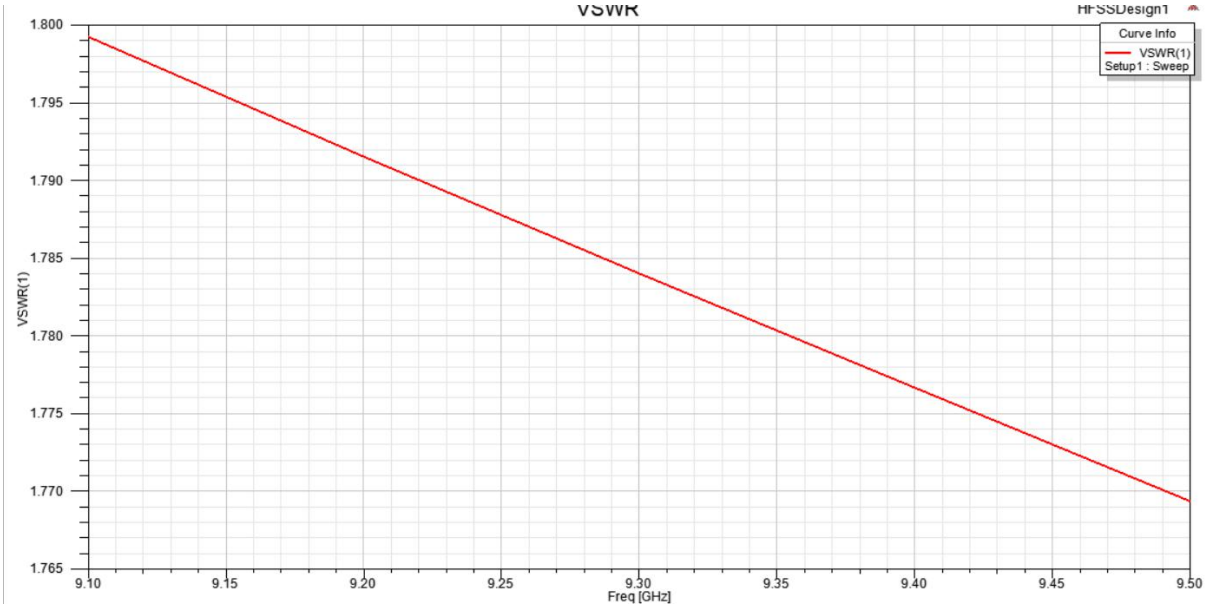

图 7 直接开口法 HFSS 仿真结果

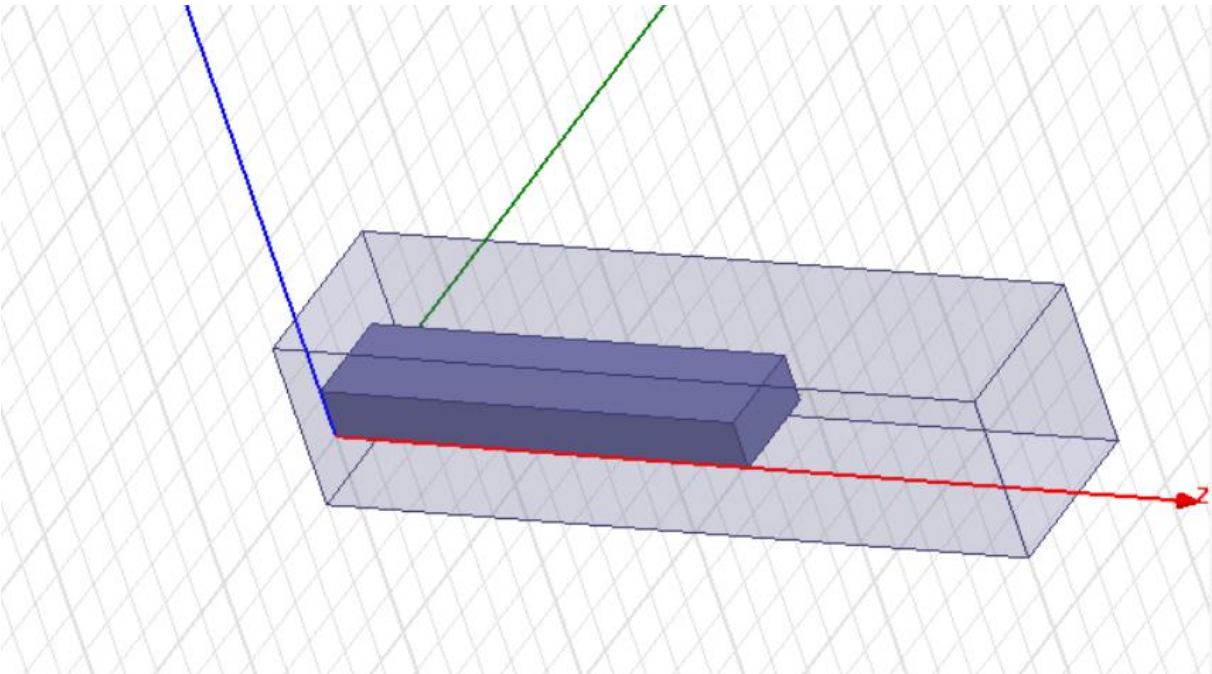

图 8 直接开口法建模

（2）d=9mm 直接法测单螺钉波导

在 9.375MHz 时波导驻波比为 2.9 左右，与理论值相差不大，符合理论。

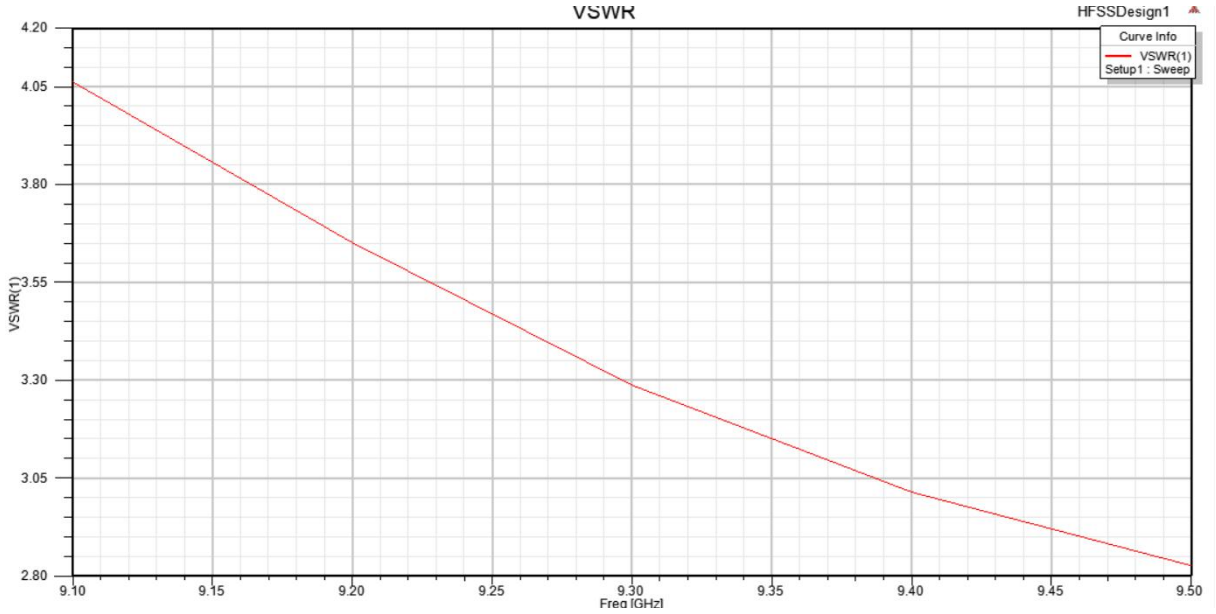

图 9 d=9mm 直接法测单螺钉波导驻波比

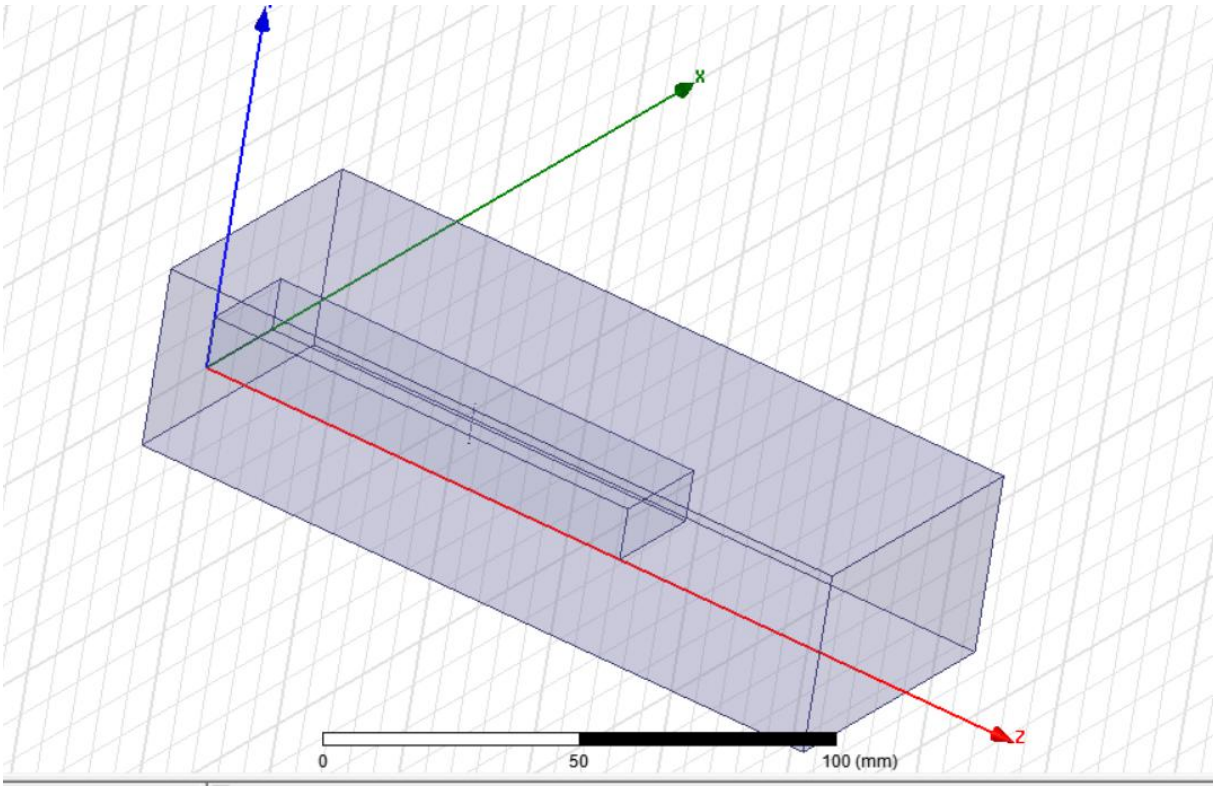

图 10 d=9mm 直接法测单螺钉波导建模

（3）d=1mm 直接法测单螺钉波导

在 9.375MHz 时波导驻波比为 1.79 左右，符合理论值。

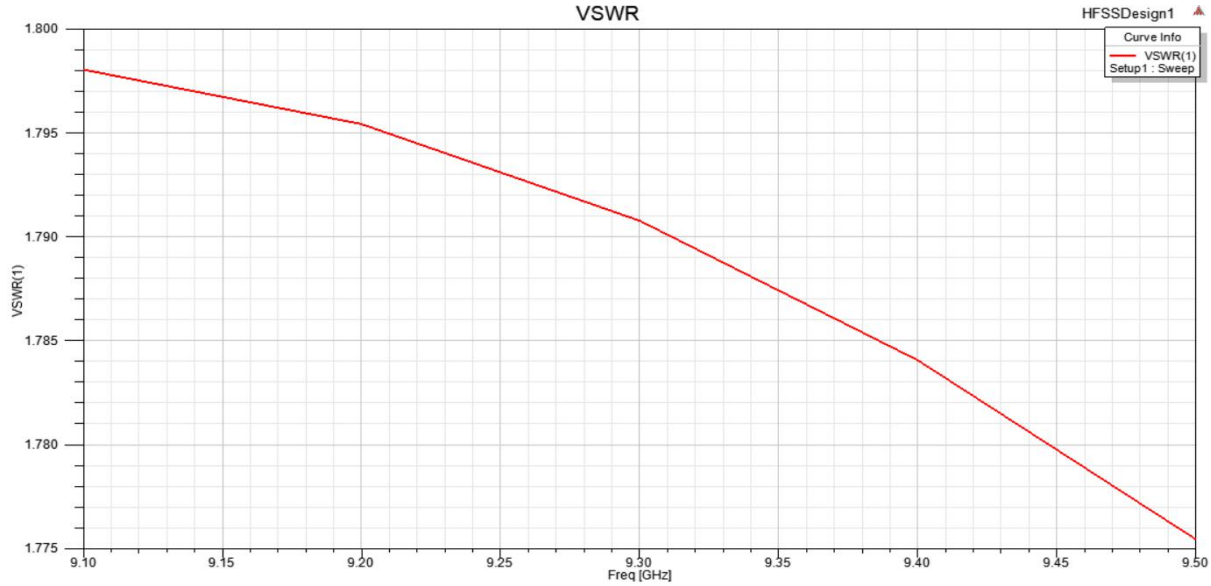

图 11 d=1mm 直接法测单螺钉波导驻波比

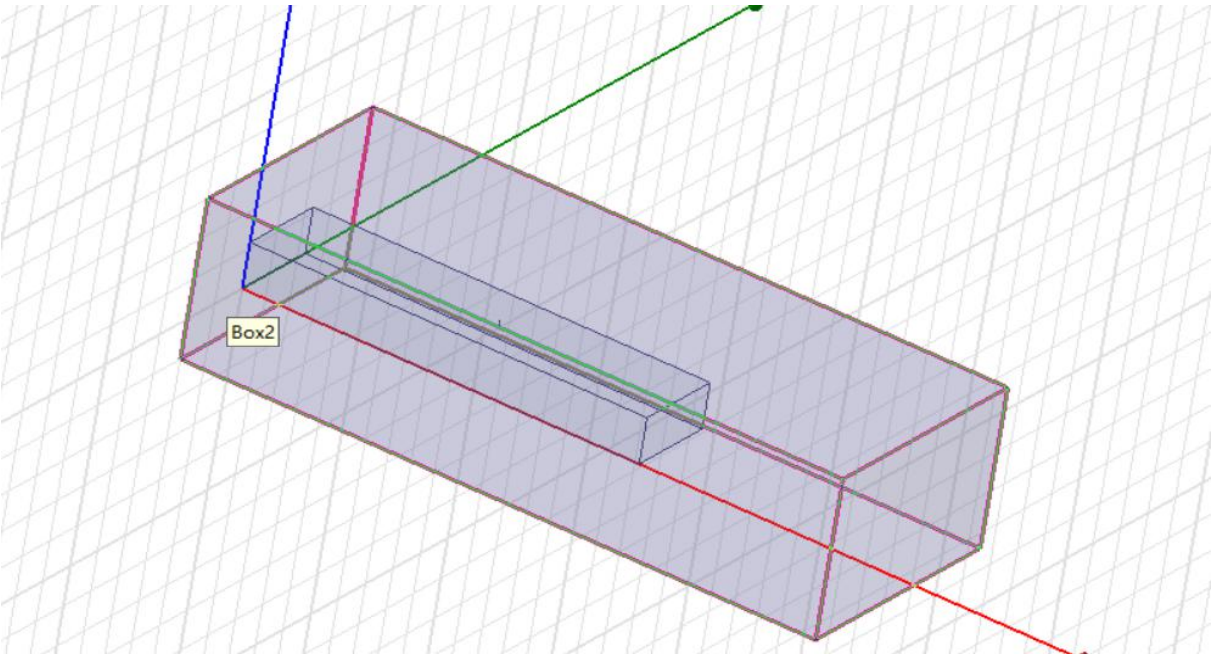

图 12 d=1mm 直接法测单螺钉波导建模

3. 对实验的建议与体会。

1）升级并仔细维护实验设备，两次实验已经给出足够多的理由。

2）联合实验仿真与实践有好处，也更加有用。对个人能力提高和知识掌握具有很大作用。但是仿真也要有限度，不可以对目标设的太高。比如本次实验的驻波比仿真，有些情况下理想和实践还是存在很大差别的。

3）Python 代表着未来发展方向，建议加大实践内容与权重。

4）参考文献没必要吧，书和网页就够了，但是会加参考文献的能力还是要有的，需要锻炼。

5）LATEX 编译器和 mathtype 公式的能力需要加强。

6）感谢老师的指导和培养，学会了工程上不少有用的东西，编程能力也有了较大提升。

参 考 文 献

[1]. 《电磁场与电磁波》(第 2 版)，Bhag Singh Guru 等，2005 年，机械工业出版社

[2]. 杨慧春,高晶敏,魏英,王丽霞,付晓辉.基于 HFSS 的电磁场仿真实验课堂设计[J].电气电子教学学报,2021,43(02):157-159+173.

[3]. Critchlow Nathan,Newberry Le Vay Jessica,MacKintosh Anne Marie,Hooper Lucie,Thomas Christopher,Vohra Jyotsna. Correction: Critchlow, N., et al. Adolescents' Reactions to Adverts for Fast-Food and Confectionery Brands That Are High in Fat, Salt, and/or Sugar (HFSS), and Possible Implications for Future Research and Regulation: Findings from a Cross-Sectional Survey of 11–19 Year Olds in the United Kingdom. <italic>Int. J. Environ. Res. Public Health</italic> 2020, <italic>17</italic>, 1689[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(6).

[4]. 孙成芹,胡永建,李显义,孙琦,唐昱哲,张冠杰.基于 HFSS 仿真的感应耦合传输装置设计[J].电子测量技术,2021,44(02):32-35.

[5]. 宋静,林钦.高中物理“逐差法”研究综述与教学建议[J].物理通报,2020(12):119-121.

[6]. 戴耀东.再议“探究逐差法处理纸带时奇数段位移该如何取舍”[J].湖南中学物理,2020,35(11):59-60.

[7]. 梁志国.非均匀采样条件下残周期正弦波形的最小二乘拟合算法[J].计量学报,2021,42(03):358-364.

[8]. 王红平,史明.基于改进移动最小二乘法的数据拟合[J].组合机床与自动化加工技术,2021(03):9-13+20.

[9]. 张泽奇,陈海涛,何德军.基于 HFSS 的铜包钢绞线损耗电阻仿真计算[J].舰船电子工程,2020,40(12):84-86.

[10]. Hung Phan Van,Dinh Nguyen Quoc,Yamada Yoshihide,Michishita Naobumi,Islam Mohammad Tariqul,Mohan Ananda S.. Parametric Analysis of Negative and Positive Refractive Index Lens Antenna by ANSYS HFSS[J]. International Journal of Antennas and Propagation,2020,2020.

[11]. Ophoff Cedric,Ozalp Nesrin,Moens David. Monte Carlo Ray Tracing-Coupled Computational Fluid Dynamic Modeling and Experimental Testing of a 1-kW Solar Cavity Receiver Radiated via 7-kW HFSS[J]. Journal of Solar Energy Engineering,2020,142(6).

[12]. Praveen Kumar Padakandla Chenna,Trinatha Rao Polipalli. Design of reconfigurable circularly polarised double folded inverted–L antenna with rectangular ground plane using HFSS[J]. IET Networks,2020,9(5).