

清华大学实验报告

苏泓源 2019010448 电子系 无02班

suhy19@mails.tsinghua.edu.cn

2023.3.24

第一次实验

自由空间电磁波波长的测量和矩形波导截止特性的研究

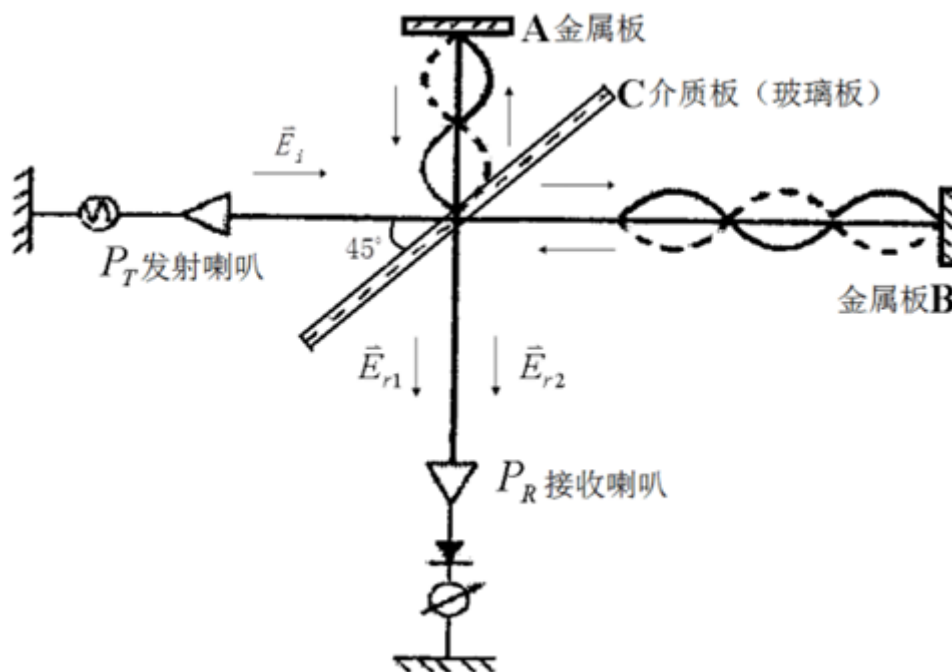
[实验目的]

1. 了解电磁波综合测试仪的结构，掌握其工作原理；
2. 在学习均匀平面电磁波特性的基础上，观察与了解电磁波传播特性；
3. 熟悉并利用相干波原理，测量自由空间内电磁波波长，并确定相位常数；
4. 研究电磁波在矩形波导中的截止特性。

[实验原理]

自由空间电磁波波长的测量

两路等幅、同频率的均匀平面的电磁波，在自由空间内以相同或者相反方向传播时，由于初始相位不同发生干涉现象，在传播路径上可形成驻波分布，进而可以测得波长。

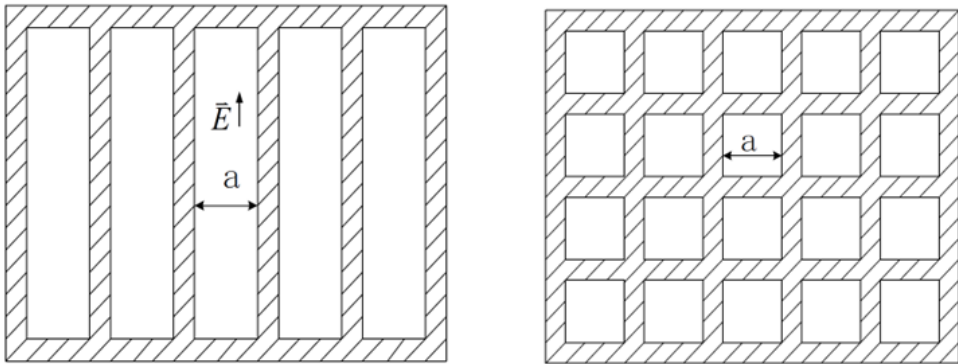


实验装置与原理如上图所示。发射喇叭PT发出的入射波以 45° 向介质板投射，在分界面上产生反射波和折射波，反射波经过固定板A的反射后再经过介质板的折射传播到接收喇叭PR处，折射波则经过可动板B的反射后再经过介质板的反射最终到达PR处，两者在PR处产生干涉。两路电磁波波程差为 $\Delta L = |L_1 - L_2|$ ，当波程差为波长整数倍时，干涉相长，接受最大；当波程差为波长的（整数+二分之一）倍时，干涉相消，接收最小。

若测得四个零点值的位置 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 ，可以计算波长 $\lambda = 2(d_4 - d_1)/3$ ，为，使用两点法测量避免回程差。

矩形波导截止特性的研究

开缝金属板和开孔金属板如下图所示。设缝宽为 a ，相当于波导的宽边，电场方向平行于缝隙的开缝方向，工作波长为 λ 。对于开缝金属板，当 $a > \lambda/2$ 时电磁波可以通过波导传输，当 $a < \lambda/2$ 时一部分极化方向的电磁波会被反射，出现截止衰减现象。对于开孔金属板， $a < \lambda/2$ 时不同极化方向的电磁波都会被反射。



实验中，分别观察不同尺寸、不同方向的开缝金属板及开孔金属板对电磁波的反射与透射效果。通过实验观察到的现象掌握波导中电磁波的截止特性。

[实验内容]

自由空间电磁波波长的测量

- 1. 了解电磁波综合测试仪的工作特性、使用方法，熟悉与掌握利用相干波原理测试电磁波波长的方法
- 2. 测 λ 值。移动可动板B，并测出接收零值B板的位置 d 。根据测得的 d 值及 n 值，计算波长 λ 与传播常数 k
- 3. 用频谱仪和线天线测出信号源频率 f_0 ，计算波长 $\lambda_0=c/f_0$ ，与所测波长 λ 比较

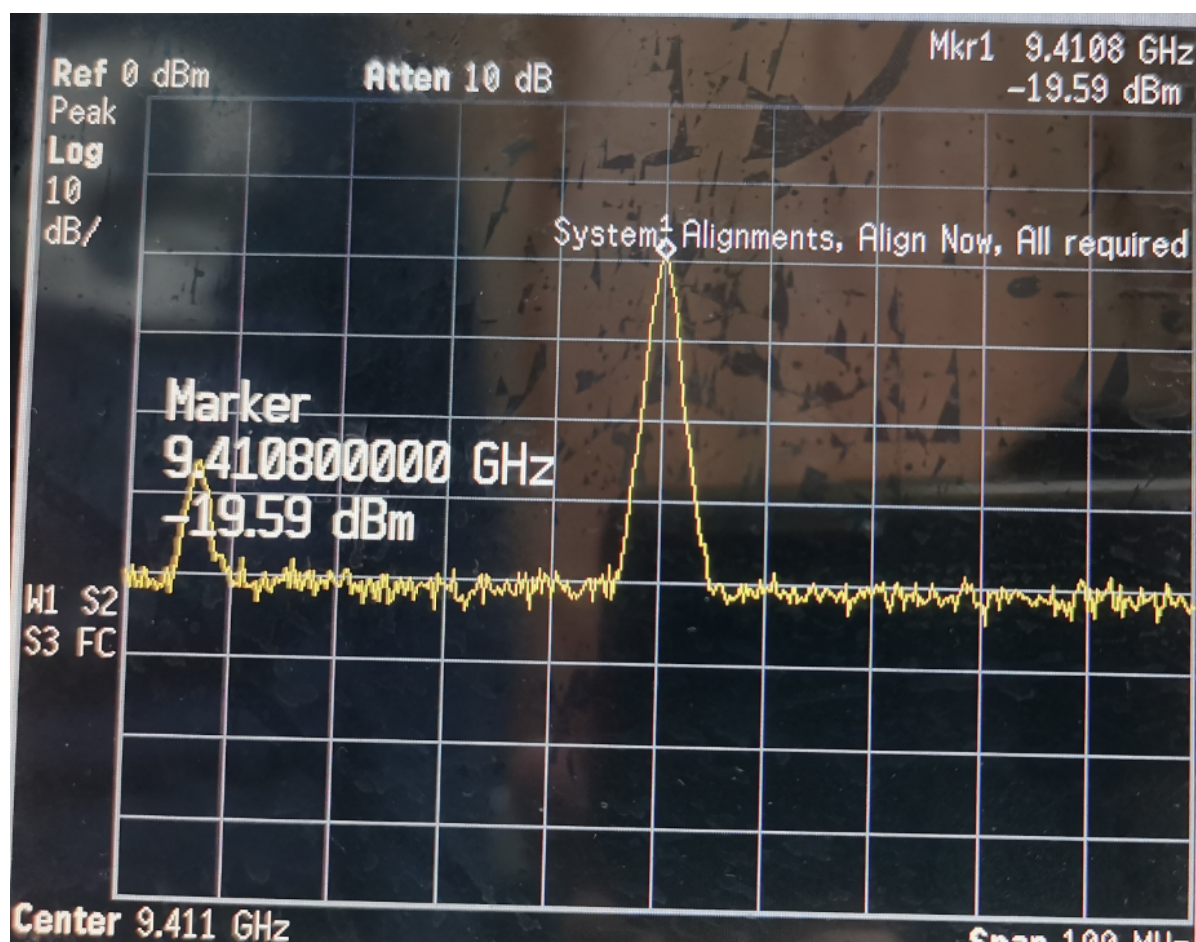
矩形波导的截止特性研究

- 1. 掌握矩形波导的截止特性
- 2. 研究不同开缝金属板和开孔金属板及其角度对电磁波反射与透射效果

[实验结果与分析]

自由空间电磁波波长的测量

	第一次			第二次			第三次		
	e1	e2	d	e1	e2	d	e1	e2	d
d1/mm	1.032	6.311	3.6715	1.006	6.368	3.687	1.103	6.411	3.712
d4/mm	48.690	54.326	51.508	48.664	54.317	51.491	48.630	54.393	51.511
λ /mm	31.891			31.869			31.866		
$\bar{\lambda}$ /mm	31.875								
k/mm^{-1}	0.197								



电磁波频率： $f_0=9.4108\text{GHz}$ ，电磁波波长： $\lambda_0=31.854\text{mm}$

误差分析：电磁波波长误差大约在0.06%，比较吻合。主要的误差来源为读数时仪器的空程差（多次测量时对一个波节两边的测量方差较大），考虑到实验环境非理想无反射的开阔环境，会有各种反射波干扰，也会引入误差。

矩形波导的截止特性研究

直接接收示数	88uA			
放置宽缝金属板时接收示数	宽缝纵向放置	42uA	宽缝横向放置	73uA
放置窄缝金属板时接收示	窄缝纵向放置	0	窄缝横向放置	48uA
放置开孔金属板时接收示数	0			

入射角 $\theta=30^\circ$	入射功率	反射功率
窄缝纵向放置的金属板	86uA	79uA
放置小孔金属板	86uA	71uA

误差分析：可以看出，电磁波通过开缝、开孔金属板时会产生强度的衰减。实验中矩形波导产生的电磁波极化方向（电场方向）为纵向，通过开缝金属板时，每条缝构成了一个矩形波导，长边为垂直电磁波极化方向的长度，也即缝在横向的宽度。当等效矩形波导长边 $a>\lambda/2$ 时电磁波通过，而当 $a<\lambda/2$ 时电磁波将截止衰减。因此，当横向放置时，等效矩形波导长边为缝长度，大于波长，电磁波通过，同时金属板的遮挡导致接收功率减小；当金属板纵向放置，等效矩形波导长边为缝宽，大于半波长，电磁波能通过，但也经过衰减；而对于窄缝，其缝宽小于半波长，因此电磁波截止衰减，接收功率为0。对于开孔金属板，同理，等效矩形波导长边小于半波长，电磁波截止衰减，接收功率为0。

[思考题]

1. 可能出现接收信号功率最小值大于0的情况，不能测准 λ 。

旋转90°之后，两路波一路是经过介质板直接反射进入PR，另一路是先透射达到金属板B后反射，再通过介质板反射进入PR。后者的传播路程将明显大于前者，同时介质折射会耗散更多能量，导致两路波在PR处的强度不同，无法完全相消，导致驻波的波节波腹不明显，使测量误差增大

2. 反射功率最大即透射功率最小，故开缝方向与电磁波极化方向平行，极化方向为横向
3. 缝越宽，截止波长越长，通过的频率越低；缝越窄，截止波长越小，通过的频率越高
4. 缝宽应适度窄，减小截止波长和通过的波长范围；板厚尽量大，增加等效波导的轴向长度从而增强信号的衰减

波导波长、驻波比和阻抗的测量

[实验目的]

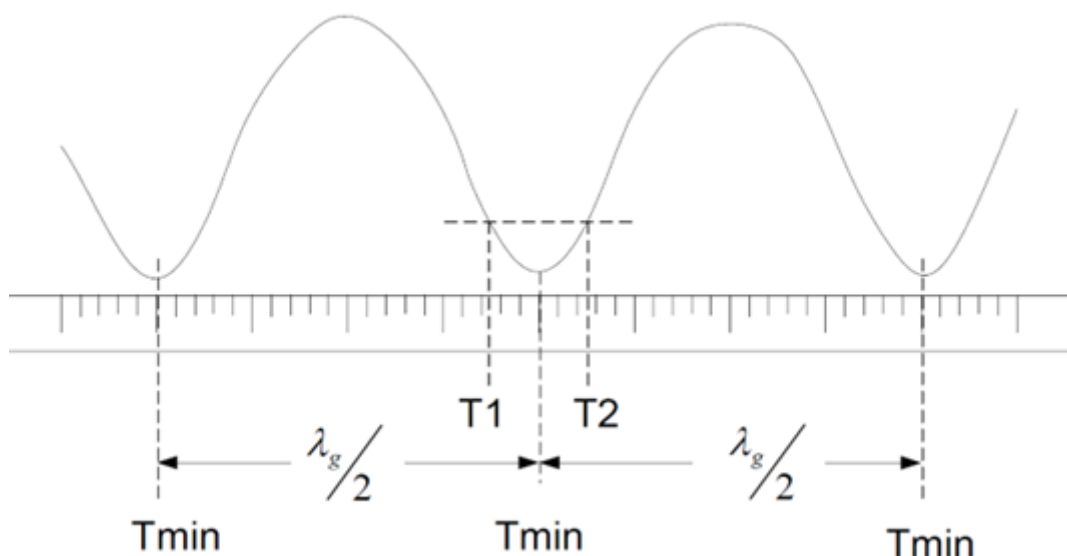
1. 了解波导测量线系统，掌握微波信号源、驻波测量线及各类微波元器件的工作原理和使用方法
2. 掌握用测量线测量波长的方法
3. 掌握用测量线测量阻抗及电压驻波比的原理和方法

[实验原理]

测量波长

为了测量波导波长，先在波导测量线上用两点法测量两个相邻波节点的位置 T_{min} 和 T'_{min} ，求出波

导波长 $\lambda_g = 2|T'_{min} - T_{min}|$ ，然后计算自由波长 $\lambda_0 = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + (\frac{\lambda_g}{2a})^2}}$



测量波节点附近两边指示电表读数相等两点 T_1 和 T_2 ，计算出波节点位置 $T_{min} = (T_1 + T_2)/2$

电压驻波系数的测量

电压驻波系数即波导中电场强度的最大值和最小值之比。本实验测量驻波系数采用直接法。设驻波腹点和节点处电表读数分别为 I_{max} 和 I_{min} 。由于是小信号工作，晶体检波律 $n=2$ ，则驻波系数为

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}}。为减小误差多次测量求平均值 \rho = \sqrt{\frac{I_{max1} + I_{max2} + I_{max3}}{I_{min1} + I_{min2} + I_{min3}}}$$

阻抗测量

传输线上驻波相位（即第一个电压驻波最小点离终端负载的距离）为 l_{min} ，由传输线理论可知，传输线的归一化输入阻抗与其归一化终端负载的关系为

$$\bar{z}_L = \frac{1 - j\rho \tan \beta l_{min}}{\rho - j \tan \beta l_{min}} \quad \beta = 2\pi/\lambda_g$$

采用等效截面法测量 l_{min} ：首先将测量线终端短路，此时终端为波节点，用测量线测得某一驻波节点位置DT 为终端负载的等效位置。去掉短路线，改接被测负载，用测量线测得DT左边第一个驻波最小点的位置DA，则 $l_{min}=|DT-DA|$ 。最后利用Smith圆图读出待测元件归一化阻抗 \bar{z}_L ，与理论计算进行比较。

[实验内容]

测量信号波长

- 1. 调整信号源载波频率10GHz，功率15dBm，调制方式设为AM、1kHz方波调整、调制深度98%，选频放大器的分贝选择为40dB
- 2. 将驻波测量线探针插入适当深度，并将探针移至两个波节点的中点位置，然后调节其调谐回路，使测量放大器指示最大。再将波导测量线终端短路（同轴测量线终端开路），调谐选频放大器的衰减量和可变衰减器使当探针位于波腹时，放大器指示电表在量程的2/3以上，用两点法测量导波波长

测量给定器件的电压驻波系数和阻抗

接上被测件，采用直接法测量驻波波腹点和波节点处的选频放大器读数 I_{max} 和 I_{min} （连续测量三次，取平均值），求出电压驻波比。按照等效截面法，在测量线系统上测量DT和DA的位置，计算 l_{min} 。在Smith圆图上标出A、T两个点，求出归一化阻抗值和实际阻抗值

[实验结果与分析]

测量信号波长

	第一次	第二次	第三次
T1/mm	102.1	117.6	77.4
T2/mm	97.7	122.0	82.5
Tmin	99.9	119.8	79.95
T1'/mm	117.6	137.0	97.3
T2'/mm	122.0	142.8	102.6
T'min	119.8	139.9	99.95
$\lambda_g = 2 T'_{min} - T_{min} /\text{mm}$	39.8	40.2	40.0
$\bar{\lambda}_g/\text{mm}$	40.0		
λ_0/mm	30.1		

误差分析：可见各次的测量结果差异较小，最终得到的波导波长40.0mm，自由波长30.1mm。

对于理论值 $\lambda'_0 = c/f_0 = 30.0mm$ ，误差约0.3%。误差可能源自电表读数的不稳定、空程差和非理想空间内的反射波。

测量给定器件的电压驻波系数和阻抗

	第一次	第二次	第三次
I_{max}	759	754	748
I_{min}	230	231	238
$\rho = \sqrt{\frac{I_{max1} + I_{max2} + I_{max3}}{I_{min1} + I_{min2} + I_{min3}}}$	1.80		

DT/mm	119.8
DA/mm	123.5
$l_{min} = D_A - D_T /\text{mm}$	3.7
l_{min}/λ_g	0.0925
Smith圆图测量值	0.7-0.39j
实际阻抗值	35.1-20.0j

误差分析：根据理论计算得到的归一化阻抗为0.702-0.401j，与测量值非常接近。误差主要来自圆图读数的误差和驻波系数的误差。

[思考题]

- 1. 波导系统的频响特性由波导的种类（矩形波导/圆波导/同轴线等的特性不同）、材料（功率衰减性能不同）、波导尺寸（影响截止频率等）、开缝情况（开缝放入探针一定程度破坏波导性质）、负载的性质（负载本身具有一定的阻抗-频率特性）等因素决定
- 2. 理论上，开口波导反射系数满足 $|\Gamma| = 1$ ，驻波比理论值为 ∞ 。然而实际系统因为无法实现理想波导、理想开路，空气介质以及环境杂波等影响，导致实际终端负载无法达到 $+\infty$ ，因此驻波比 $\rho \neq \infty$ 。

[总结]

本次实验让我重新回顾了微波课上学到的传输线理论和电磁波导内容，并进一步熟悉了Smith圆图在工程上的使用。实验中我体会到了理论和实际之间的差异，例如非理想空间中有环境杂波影响，设备电流影响等。