

实验三、喇叭天线的辐射特性测量

1.1. 实验目的

本实验以角锥喇叭天线为研究对象，通过天线综合测控系统完成多维度测量，揭示喇叭天线核心辐射与电路特性。覆盖的基本概念：

- S 参数、驻波比、反射系数、回波损耗
- 天线辐射方向图
- 天线的极化特性
- 电磁波在空间传播中与距离的关系

1.2. 实验原理

天线是无线通信、雷达、卫星导航、遥控遥测系统的核心部件，负责导行波与空间电磁波的双向转换。在无线通信系统中不管是发送还是接收，天线都是不可缺省的组成部分。自从 1886 年赫兹建立第一个天线系统发展到今天，天线的种类和规格已经多种多样，同时天线的测量设备和测量技术也不断得到改进和提高。

描述天线的参量有很多，主要可分为两大类：一是如输入阻抗、驻波比、噪声温度、频带宽度等电路特性参量；除此之外就是辐射特性参量，如方向图、增益、极化等。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**）。当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。

天线测量是研究天线的重要手段，其任务就是用试验的方法测定和检测天线的这些特性。我们通常借助天线测量系统，正确使用测量仪器来进行测量。

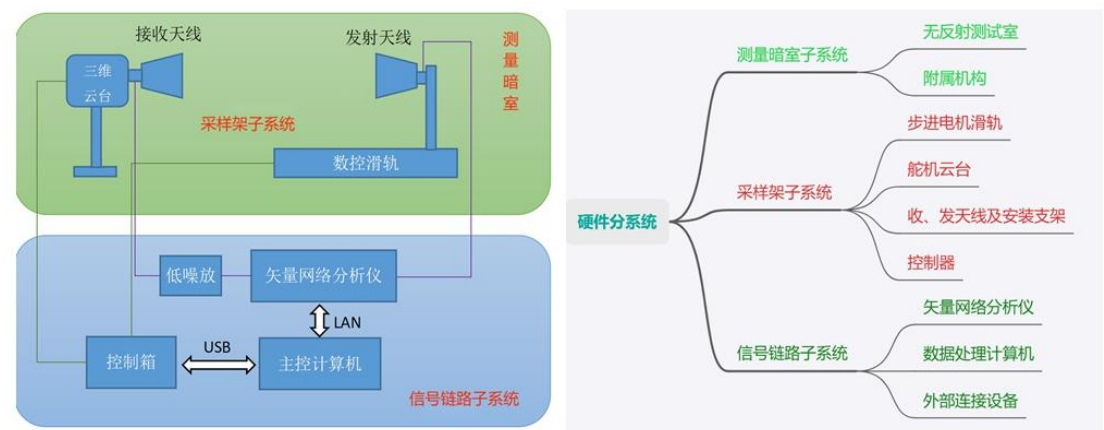


图 3-1 天线测控系统框图

本实验使用的的天线综合测控系统由硬件分系统和软件分系统构成。

如图 3-1 所示，硬件分系统分为测量暗室子系统、采样架子系统、以及信号链路子系统。其中测量暗室子系统主要承担着测量电磁环境保障的任务，使测试不受外界电磁波的干扰；采样架子系统是硬件系统的核心，它的任务是根据用户的设置和指令，带动天线探头按照预设的方式运动，并实时反馈位置和速度信息，在中心计算机的控制下，与信号链路子系统相配合完成采样任务；信号链路子系统完成信号的产生、传输、接收和采集。

测量时，通过矢量网络分析仪在收发天线之间形成一个由开放空间联系起来的广义双端口网络，对应每一个采样点，测得一个 S_{21} 参数，遍历所有采样点后，即可获知待测天线扫描面上的近场幅度和相位分布。同时，为了减少外来电磁波的干扰，可利用可移动的微波屏蔽板进行遮挡。

系统的软件分系统由测量控制、数据采集处理和结果显示输出子系统组成，均由计算机控制。数据处理子系统经预处理将矢网输出的原始数据转化成适合程序处理的格式，提取数据后加配坐标轴来排序显示。

本实验将利用该天线综合测控系统，测量 3 公分波段（8-12GHz）角锥喇叭天线。揭示天线辐射的方向性、波的极化和传输特性等。



图 3-2 角锥喇叭天线尺寸

实验用到的一些概念公式如下：

(1) 近场和远场：

天线是一种能量转换装置，发射天线将导行波转换为电磁波，接收天线则把电磁波转换为导行波。如图 3-3 通常根据观察点与天线的距离 r 不同，可将观察点周围的周围的场区划分为感应近场区、辐射近场区和辐射远场区。

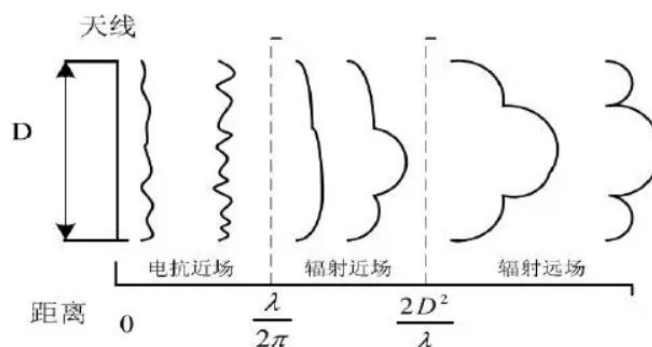


图 3-3 天线的场区

感应场区的边界条件： $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ ，场以感应场为主，不向外辐射

辐射近场区：介于感应近场与辐射远场之间，场分布复杂

远区场条件：满足 $r \gg \frac{2D_H D_E}{\lambda}$ (m)，场为平面波，方向图稳定，是工程测量常用区域

(2) 反射系数 Γ 、电压驻波比 VSWR、回波损耗 RL 三者的关系可以转换：

$$\Gamma = \frac{VSWR-1}{VSWR+1} \quad \text{式 3-1}$$

$$RL = -20\lg|\Gamma| \quad \text{式 3-2}$$

(3) 电磁波在空间传播中与距离的关系（弗里斯传输公式）：

$$\frac{P_r(W)}{P_t(W)} = \left(\frac{\lambda(m)}{4\pi R(m)}\right)^2 G_t G_r \quad \text{式 3-3}$$

P_r 、 P_t ：接收、发射功率； R ：收、发天线间距离。（实验取收发天线喇叭

口之间的距离） dBm 与 W 的换算： $dBm = 10\lg\left(\frac{xW}{1mW}\right)$ ， $W = 10^{\frac{dBm}{10}} \times 1mW$

G_r 、 G_t ：收发天线增益，与 dBi 为单位的增益换算： $G_t(G_r) = 10^{\frac{x dBi}{10}}$

根据工程经验，工程增益值通常比理论计算值低 $3-5dBi$ 。

(4) 天线增益

增益是天线极为重要的一个参数，用它可以衡量天线辐射能量的集中程度。矩形波导馈电的角锥喇叭天线的增益理论值参见 P3 “矩形波导馈电角锥喇叭天线理论分析”。

此外，还可用以下公式估算最佳角锥喇叭天线增益：

$$G = 0.51 \frac{4\pi A_p}{\lambda^2} \quad (A_p \text{ 为喇叭口的物理口径 } D_H \times D_E) \quad \text{式 3-4}$$

在实际工程测试中，天线的增益有多种测试方法，本系统选用的是弗里斯和波束宽度法。

费里斯法利用上述式 3-3 的弗里斯公式，当发射天线的增益已知或收发天线的增益相同的时候，根据公式即可计算的接收天线的增益。

$$G_t(dB) + G_r(dB) = \frac{1}{2} [20\lg\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) - 10\lg\left(\frac{P_t(W)}{P_r(W)}\right)] \quad \text{式 3-5}$$

$$G(dB) = \frac{1}{2} [20\lg\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) - (P_t(dB) - P_t(dB))] \quad \text{式 3-6}$$

波束宽度法是通过测量天线方向图的 H 面或 E 面半功率波束宽度，即 3dB 点的波束宽度从而计算天线增益的方法。

$$G(dB) = \frac{10\lg C}{\theta_{-3A} \theta_{-3E}} \quad \text{式 3-7}$$

公式 3-7 中， θ_{-3A} 和 θ_{-3E} 分别代表 H 面和 E 面方向图 3dB 点波束宽度，单位为角度， C 工程上根据经验取值，通常普通天线为 32400，反射面天线如卫星

电视接收天线为 27000，对数周期天线为 41000。

(5) 半功率波束宽度

H 面： $2\theta_{0.5} \approx 1.18 \frac{\lambda}{D_H} \text{ (rad)}$ 式 3-8

E 面： $2\theta_{0.5} \approx 0.89 \frac{\lambda}{D_E} \text{ (rad)}$ 式 3-9

(6) 轴向交叉极化隔离度

$XPD = P_{cop}(dBm) - P_{xp}(dBm)$ 式 3-10

公式 3-10 中， P_{cop} ：同极化信号功率； P_{xp} ：交叉极化信号功率。

1.3. 实验内容

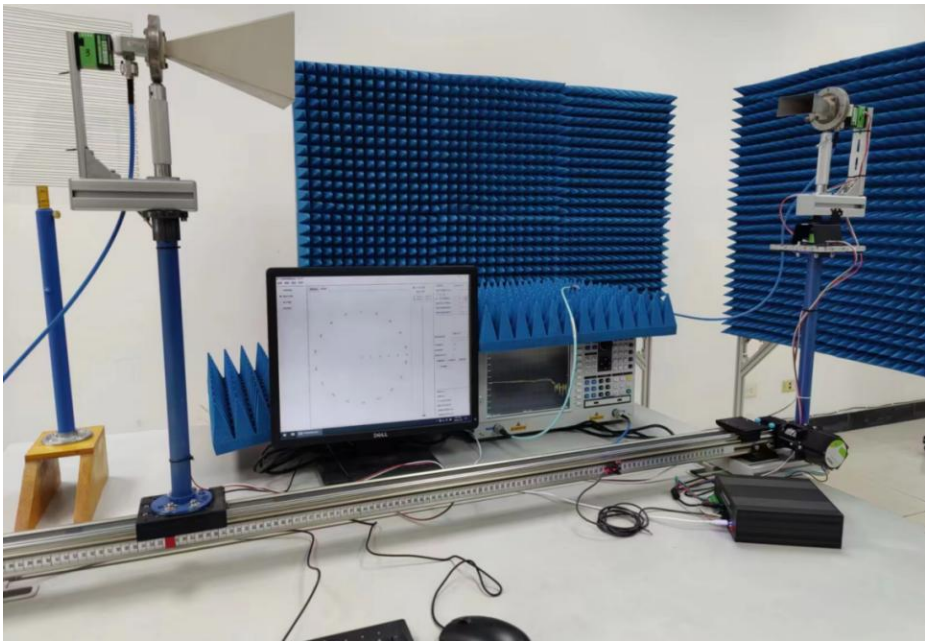


图 3-4 天线测控系统实物

实验开始前的准备工作：

(1) 天线采样架控制器开机前，必须确保接收天线位于滑轨的光电检测传感器的左侧，此时可手动调整滑轨位置（注意：开机后滑轨和舵机将被锁定，严禁强制调整以免损伤电机），然后打开控制器电源，接收天线将向发射天线端移动，经过光电传感定位后，最终停在为收发天线间距为零的位置，可记录此时滑轨标尺的位置。



图 3-5

(2) 检查计算机与天线采样架控制器的 USB 接口以及和矢量网络分析仪的 LNA 口连线是否正常，打开计算机与矢网的电源。

(3) 打开计算机桌面的“天线测量”程序，点击左上角“连接”菜单，如图 3-5，分别查找并连接天线控制器和网络分析仪。

(4) 接下去就可根据具体的实验内容进行天线特性的测量，在测量过程中请规范操作，实验数据支持导出处理，建议不要保存在 C 盘，以免计算机重启后清空。微波屏蔽板可移动到合适的位置，以降低电磁波的干扰。

(5) 在天线参量测量前，确保收发天线极化方向一致、轴向对准，可用调试窗口校正舵机角度。在测试窗口点击[调试]，可调出如图 3-6 窗口，在此窗口中，可调整发射天线水平方位角度（一号舵机角度校正值），发射天线轴向角度（二号舵机角度校正值），接收天线轴向角度（三号舵机角度校正值）。



图 3-6

1.3.1. 电路特性参数测量

1. 驻波比、反射系数、回波损耗测量

驻波比、反射系数、回波损耗三折的关系可以转换，所以只要测量一个参数就可以计算另外的参数。（转换关系可参见附录 1）

实验步骤：在[调试]窗口，调节收、发天线极化方向，轴向角度一致。在测试程序中，如图 3-7，依次选择[S 参数测量]、[驻波比]、[S11]（矢网端口 1 连接发射天线，端口 2 连接接收天线），确认收发天线的初始状态，设定扫描的起始和终止频率，点击[矢网初始化]、[刷新]之后就可以在测试窗口看到驻波比曲线。观察记录测试结果，并可调整参数重新测试。

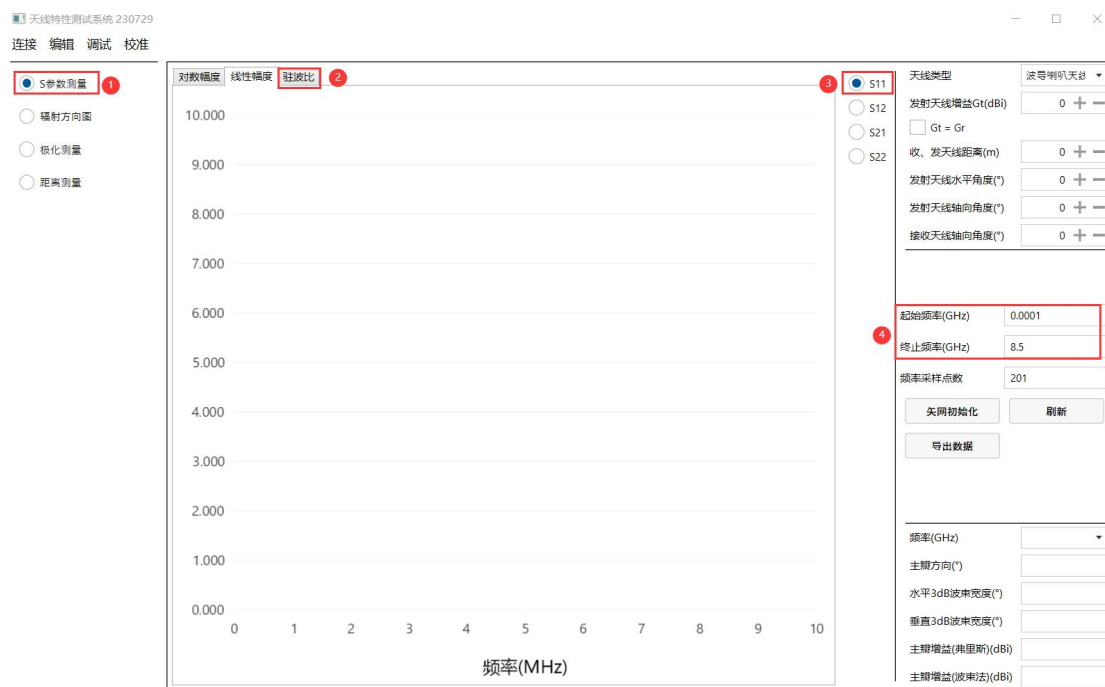


图 3-7

2. 扫频测量

实验步骤：在[调试]窗口，调节收、发天线极化方向，轴向角度一致。在测试程序中，如图 3-8，依次选择[S 参数测量]、[对数幅度]、[S21]，确认收发天线的初始状态，设定扫描的起始和终止频率，点击[矢网初始化]、[刷新]之后就可以在测试窗口看到天线的扫频曲线。观察记录测试结果，并可调整参数重新测试。

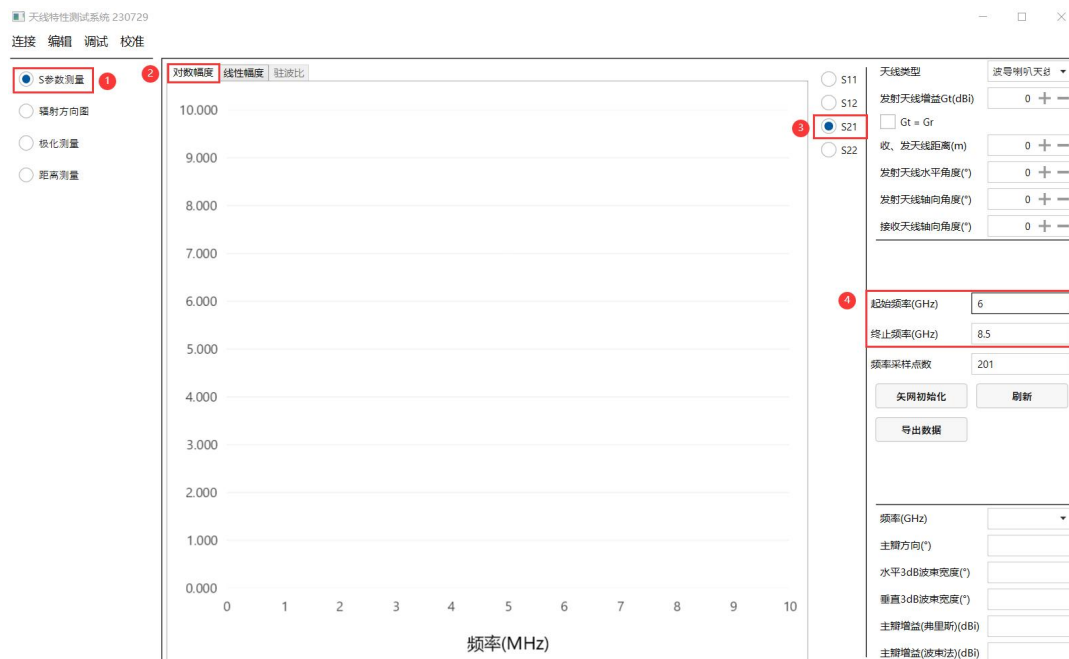


图 3-8

1.3.2. 喇叭天线辐射方向图测量

天线方向图表征天线在空间中各个方向上所具有的发射或接收电磁波的能力，是天线辐射特性的重要参数。完整的方向图是一个三维空间图，实际工程中通常只需测量水平面 H 方向图和垂直面 E 方向图。

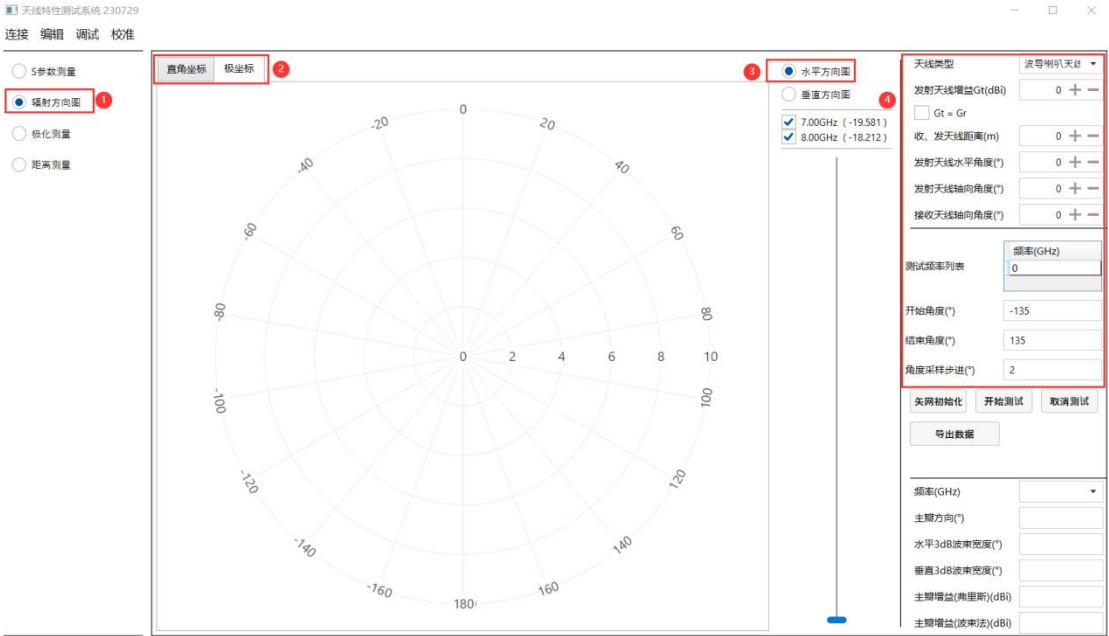


图 3-9

实验步骤：在[调试]窗口，调节收、发天线极化方向，轴向角度一致。

(1) 水平面方向图测量：在测试程序中，如图 3-9，依次选择[辐射方向图]、[极坐标]、[水平方向图]，右侧框图中，天线类型选择“波导喇叭天线”，发射天线增益未知则默认为 0dBi，当发射与接收天线相同的时候可勾选两者增益相同，设置收发天线间的距离（注意：收发天线间的距离指的是两个喇叭口之间的间距，可根据滑轨侧边的标尺来读取）。发射天线水平角度、发射和接收天线的极化角度无需设置（测试开始后都将转到 0° 的位置），测试频率可以设置多个，填入数据后回车即可（建议根据之前驻波比测量结果，选择三个频率进行测量）。开始、结束角度和采样步进选择默认值。点击[矢网初始化]、[开始测试]之后，发射天线将转到水平方位开始角度，并以步进值向结束角度旋转，同时在方向图窗口实时显示测试曲线。测试过程中注意人员不要遮挡天线，并可移动屏蔽板防止其他干扰信号，等待测试完成后，观察测试结果可导出数据，如有明显偏差可调整参数重新测试。

(2) 垂直面方向图测量：在测试程序中，依次选择[辐射方向图]、[极坐标]、[垂直方向图]，可设置收发天线间的距离，开始、结束角度和采样步进。发射天线水平角度、发射和接收天线的极化角度无需设置（测试开始后都将转到到 0°

和 90°的位置），其他设置和水平方向图测试相同，等待测试完成后，观察测试结果可导出数据，如有明显偏差可调整参数重新测试。

天线方向图测试完成后，在程序右下角将自动显示主瓣，3dB 点波束宽度、增益等计算值。

1.3.3. 极化测量

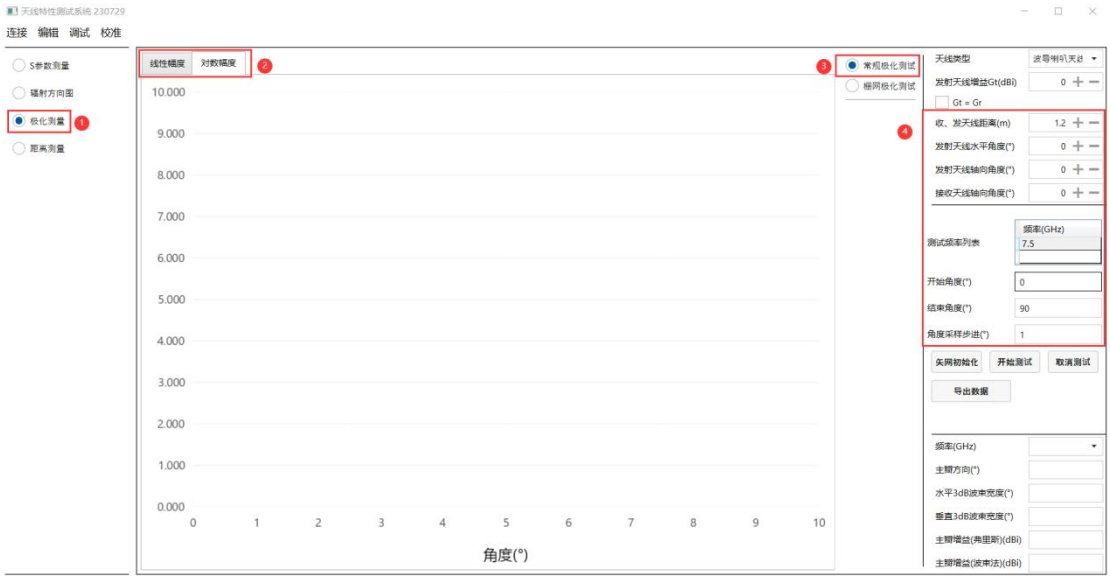


图 3-10

实验步骤：在[调试]窗口，调节收、发天线极化方向，轴向角度一致。

(1) 天线极化测量：在测试程序中，如图 3-10，依次选择[极化测量]、[对数幅度]、[常规极化测量]，确认收发天线的初始状态，设定测试频率，常规极化测试时发射天线极化角度默认从0°扫描到90°，点击[矢网初始化]、[开始]之后就可以在测试窗口看到天线的极化测试曲线。观察记录测试结果，并可调整参数重新测试。

(2) 极化栅网特性测量：极化栅网是在一块玻璃上间隔均匀的缝隙拉上金属丝，如果金属丝的宽度与缝隙的宽度都比波长小得多，则对于投射到栅网上的电磁波，对于电场平行于缝隙方向的电磁波将被全反射，而垂直于缝隙方向的电磁波将能顺利通过。所以将图 3-11 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 3-11

极化栅网特性测量时，将一个水平栅网放置在收发天线之间，在测试程序中，除选择[栅网极化测量]外，其他设置和“天线极化测量”相同。测试过程中，收、发天线将从0°

到90°轴向相对旋转，以实现和极化栅网旋转同等的效果。设置完成后，点击[矢网初始化]、[开始]之后就可以在测试窗口看到天线的极化测试曲线。观察记录测试结果，并可调整参数重新测试。

1.3.4. 电磁波在空间传播中与距离的关系测量

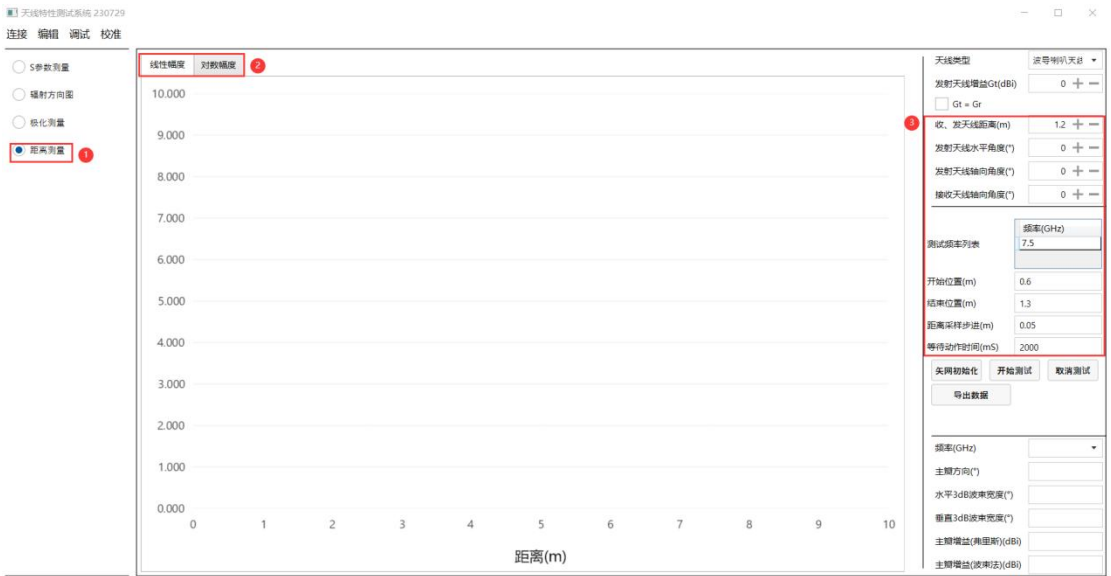


图 3-12

实验步骤：在测试程序中，如图 3-12，依次选择[距离测量]、[对数幅度]，确认收发天线的初始状态，设定测试频率、发射天线在滑轨上的的起始位置、结束位置、采样步进等参数，点击[矢网初始化]、[开始]之后就可以在测试窗口看到电波在空间传播时接收到的信号与距离的关系曲线。观察记录测试结果，并可调整参数重新测试。

注意：实验过程中，可以移动吸波棉屏蔽板放置于天线测试平台周围，以遮挡周边的干扰电磁波，使结果更准确。

1.3.5. 实验报告内容

1. 天线测量过程中主要存在哪些误差来源？为提高测量准确性，应采取哪些改进措施？
2. 根据实验数据绘制电磁波传播功率与距离的关系曲线。该曲线接近 $\frac{1}{R}$ ， $\frac{1}{R^2}$ ，还是 $\frac{1}{R^3}$ ？与理论预期是否一致？
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 。
4. 回答问题：
(1) 从极化特性曲线判断，接收功率随发射天线极化角 θ 的变化更符合 $\cos\theta$ 还是 $\cos^2\theta$ 关系？

(2) 若收发喇叭天线的极化角相差 90° ，且极化栅网相对于发射天线的极化方向为 45° ，极化栅网会对接收功率产生怎样的影响？

5. 计算发射天线的远区场距离，并判断本实验是否满足远场测量条件。
6. 分别计算收、发天线理论增益与半功率波束宽度（取 $k \approx 1$ ），并给出分析结论。
7. 当收发天线相同时，可采用哪种简便方法测量天线增益？试分析测量中如何减小或消除系统误差。
8. 根据测试数据分别绘制发射喇叭天线水平面与垂直面的极坐标辐射方向图，并对天线整体性能进行评估。
9. 对比半功率波束宽度的理论计算值与实验实测值，并论述分析。
10. 试解释在 $\pm 90^\circ$ 时辐射方向图测量值（提示：跟背景噪声比较）
11. 比角锥喇叭天线辐射特性的实验实测结果与 CST 仿真结果，并给出结论。
12. 简述本次实验的收获、体会，并对实验装置与流程提出改进建议。

1.3.6. 附、天线测量导图



图 3 -13

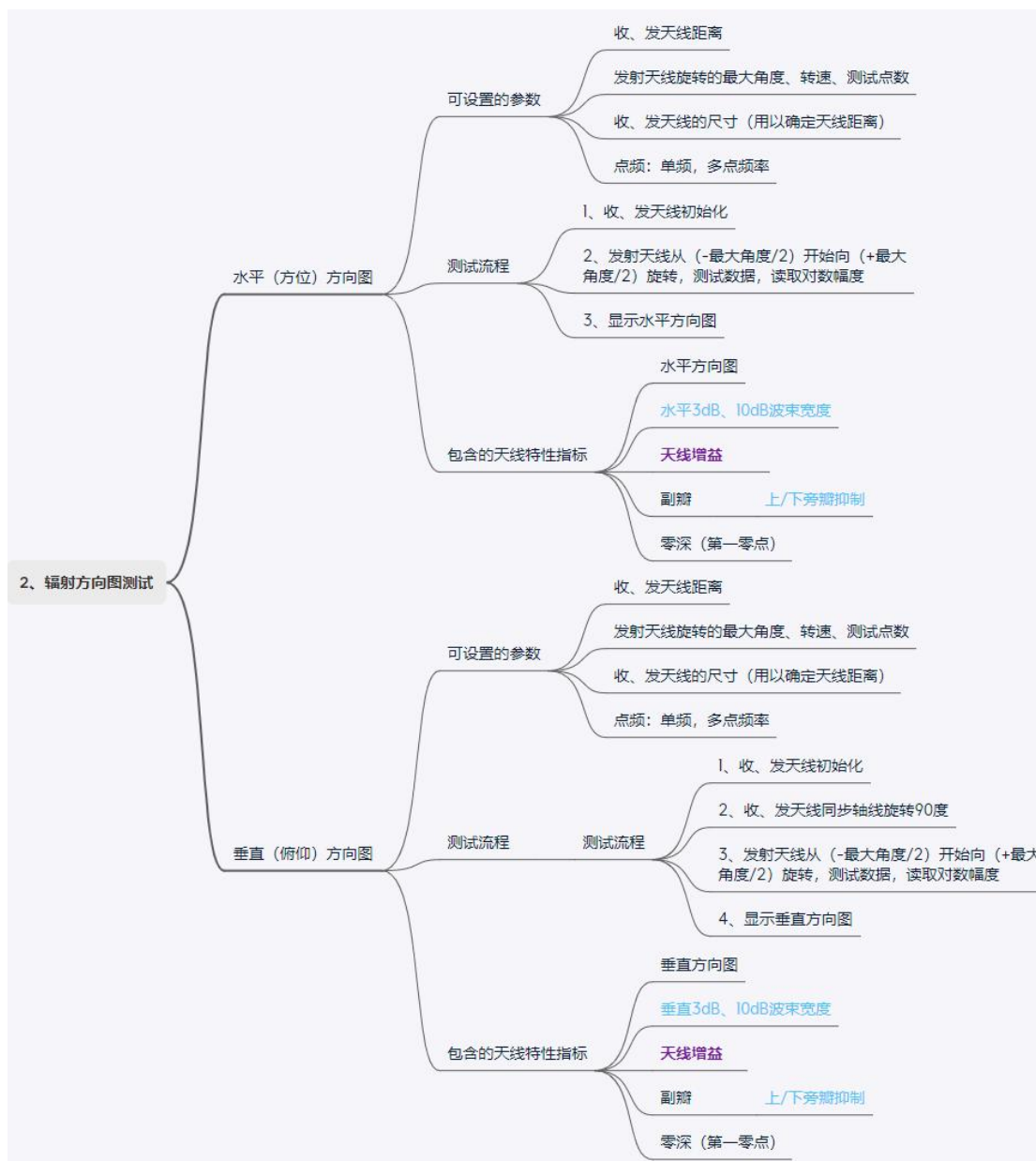


图 3-14



图 3-15



图 3-16