



北京理工大学  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## 电磁理论、计算、应用实验报告

实验名称	预警机载相控阵雷达目标精确探测虚拟仿真实验
任课教师	██████████
学生姓名	████
学号	██████████
班级	██████████
学院	信息与电子学院
成绩	



集成电路与电子学院  
SCHOOL OF INTEGRATED CIRCUITS  
AND ELECTRONICS

# 目录

一、虚拟仿真实验操作及原理分析报告 .....	1
1. 实验预备知识 .....	1
(1) 理论知识学习 .....	1
(2) 理论测试 .....	1
2. 仿真实验操作 .....	5
(1) 相控阵组装 .....	5
(2) 相控阵馈电 .....	8
(3) 雷达定标 .....	12
(4) 相控阵扫描 .....	16
(5) 雷达安装 .....	19
(6) 机载三面相控阵扫描 .....	20
(7) 空中目标设置 .....	21
(8) 载机姿态设置 .....	22
(9) 雷达机械扫描 .....	23
(10) 雷达电子扫描 .....	31
(11) 重复实验探究 .....	35
3. 数据统计分析 .....	37
二、我的实验探究心得.....	38
三、虚拟仿真实验评价与优化改进方案 .....	39
1. 实验评价 .....	39
2. 实验优化改进方案 .....	41

# 一、虚拟仿真实验操作及原理分析报告

## 1. 实验预备知识

### (1) 理论知识学习

在进入实验后，点击“实验预备知识”可以对虚拟实验所需的相关理论知识进行整理和学习，具体界面如下图所示：

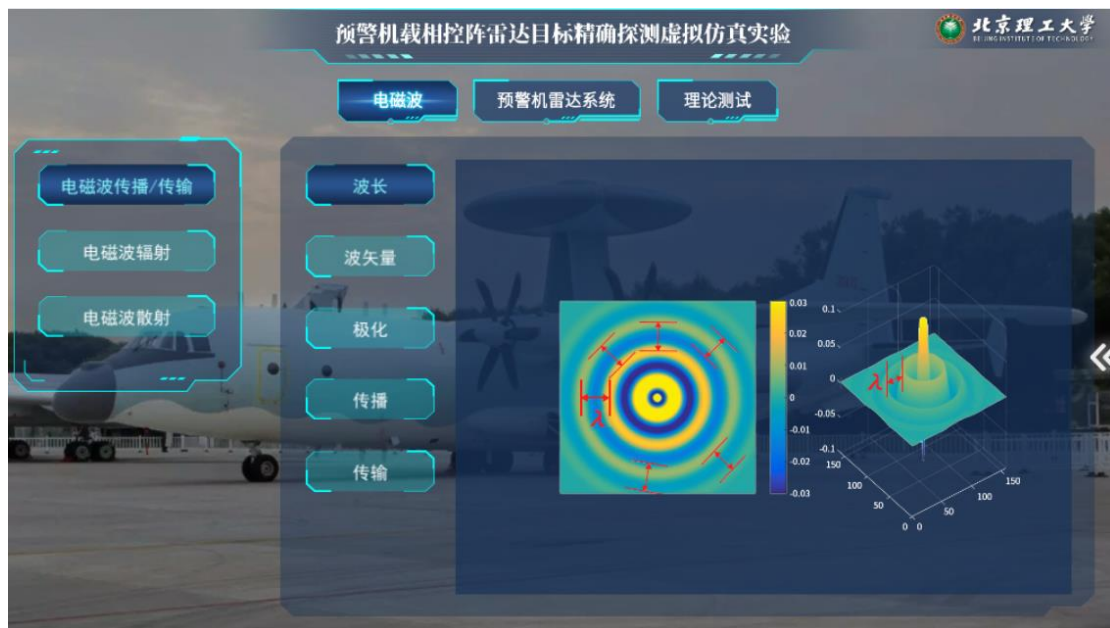


图 1：实验预备知识学习界面

在这一部分，可以学到电磁波以及预警机雷达系统的相关理论知识。在电磁波这一部分，通过电磁波的传播/传输，电磁波辐射，电磁波散射这三方面对电磁波基本知识进行了介绍。在这里，我对电磁波的波长、波矢量、极化、传播和传输等基本理论和概念进行了复习和回顾，并且对线天线、微带天线、喇叭天线的方向图有了直观的认识，也了解到了电磁波散射的发生过程。在预警机雷达系统这一块，我对雷达探测原理有了初步的认识，并且了解了实验的操作方法和步骤。

### (2) 理论测试

在学习完理论知识后，我便进行理论测试，以此检验自己的学习程度。理论测试一共有十道题，下面我会对每一道题进行分析和解答：

➤ 第一题

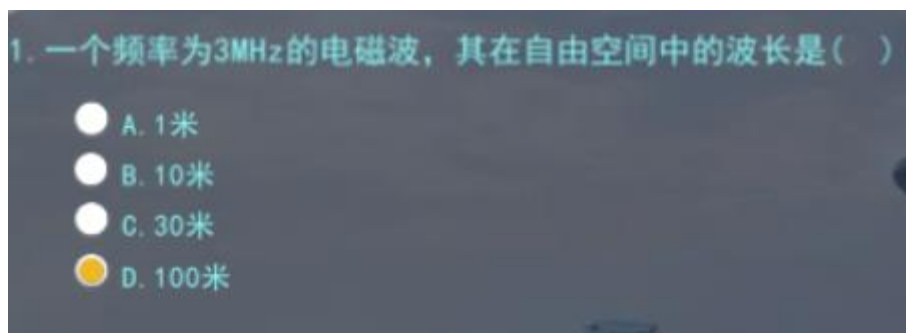


图 2：第一题

电磁波的波长可由下列公式计算：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

在自由空间中，电磁波的传播速度为  $c = 3 \times 10^8 m/s$ ，代入频率  $f = 3MHz$ ，则电磁波的波长为  $100m$ ，故选 D。

➤ 第二题



图 3：第二题

在波导中，具有最小截止频率或最大的截止波长的模式称为波导的主模。矩形波导截止波长的计算公式为：

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2)$$

对于一般的矩形波导，长度  $a$  通常略大于宽度  $b$  的二倍，所以当  $m$  取 1， $n$  取 0 时截止波长最大，此时对应的模式为  $TE_{10}$  模，矩形金属空波导的主模为  $TE_{10}$  模，故选 B。

➤ 第三题

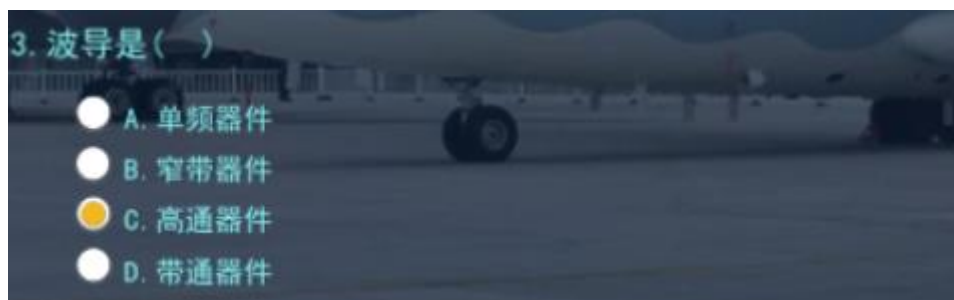


图 4：第三题

对于一般的波导来说，只有当传输的电磁波频率大于截止频率时，电磁波才能在波导中传输。因此波导可以滤除频率在截止频率以下的电磁波，属于高通器件，故选 C。

➤ 第四题

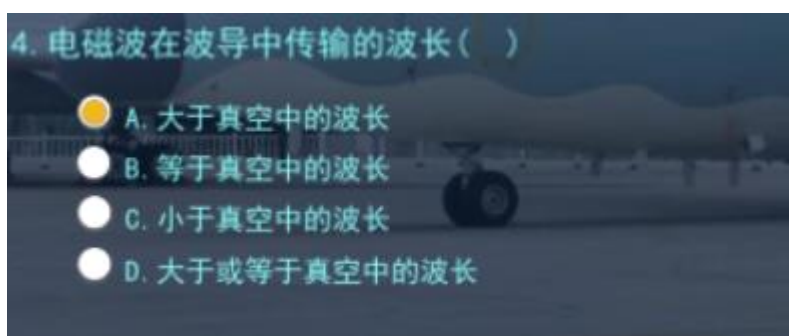


图 5：第四题

电磁波在波导中的导波波长可由下列公式计算：

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{mn}}\right)^2}} \quad (3)$$

很显然  $\lambda_g > \lambda$ ，故选 A。

➤ 第五题



图 6：第五题

由电磁波在波导中传输的特点可知，波导中电磁波的模式与波导横截面的形状，波导的馈电方式，电磁波的频率等因素有关。而波导的主要作用就是将电磁波沿着波导的方向传输到指定位置，波导中电磁波的传输模式不随波导长度的改变而变化。同时由公式(2)可知，波导的截止波长与传输距离  $z$  无关，故选 D。

➤ 第六题

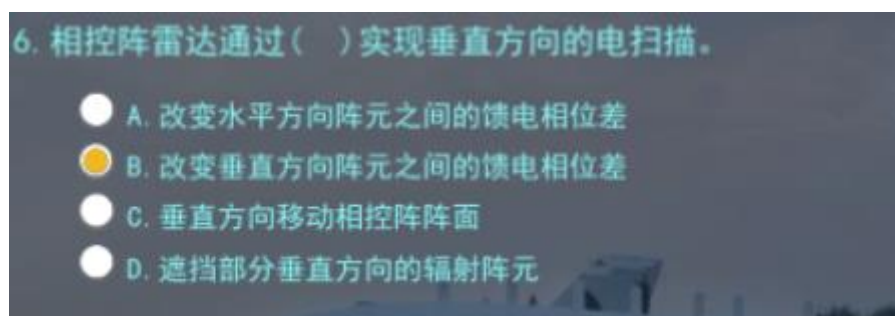


图 7：第六题

根据阵列天线的性质，一组直线排列的阵元天线，通过改变阵元之间的相位差，即可改变阵列天线的方向图形状，使其主瓣指向沿着这条直线上的不同方向，从而实现阵列天线的电扫描，这也是相控阵雷达的设计原理。

为了能够实现全空间的扫描，需要设计一组面天线阵，改变水平方向阵元的相位差可实现水平方向的扫描，改变垂直方向阵元的相位差可实现垂直方向的扫描，故选 B。

➤ 第七题

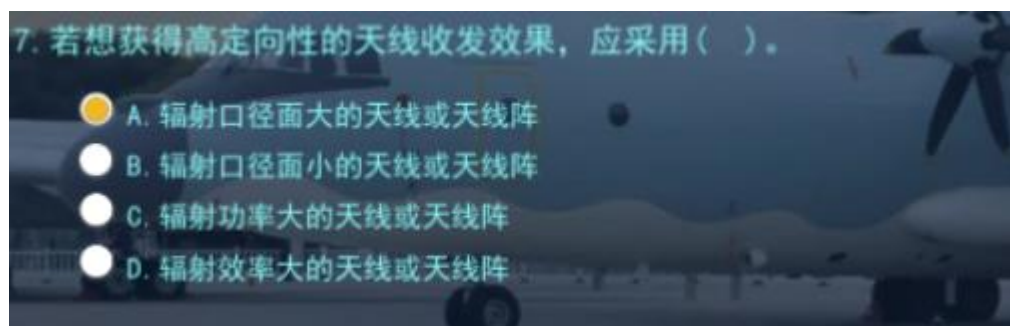


图 8：第七题

高定向性天线的主瓣宽度较窄，天线辐射口径面和主瓣宽度之间符合傅里叶变换的类似关系。因此天线辐射口径面越大，天线主瓣宽度越窄，也就具有更高的定向性，故选 A。

➤ 第八题

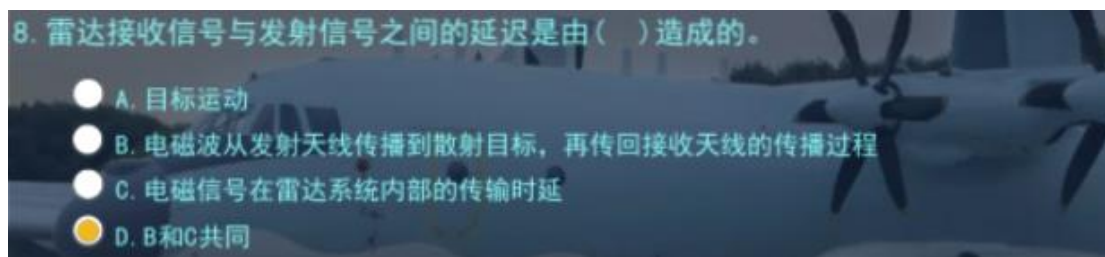


图 9：第八题

雷达通过天线发射信号，遇到探测物体反射回天线，中间会有一定的延时。于此同时，电磁信号在雷达系统内部传输，各种电子器件也会产生一定的延时，故选 D。

### ➤ 第九题

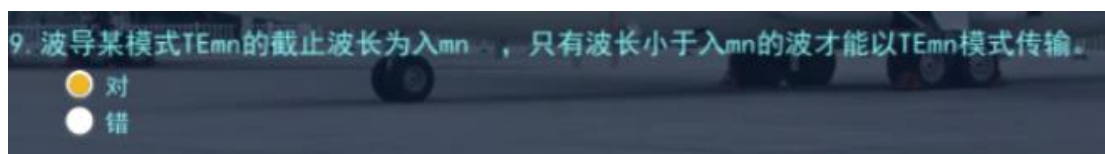


图 10：第九题

在前面几题已经说明，只有当电磁波的波长小于其截止波长时，电磁波才能在波导中传输，因此题中说法正确。

### ➤ 第十题

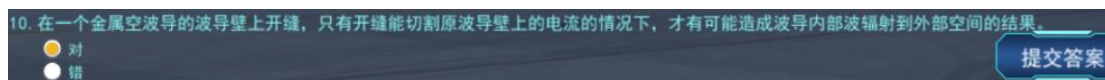


图 11：第十题

金属空波导表面为金属材质，电磁波在波导内进行传输时，在波导壁上会形成感应电流。根据镜像原理，该感应电流可以等效出一个反向电流，这两个电流产生的辐射场在远区大小相等、方向相反，因此可以相互抵消。如果在波导壁上开缝，在缝隙处会由于电场变化会形成位移电流，而位移电流并不满足镜像原理，因此可以辐射电磁场，造成波导内部波辐射到外部空间的结果，因此题中说法正确。

## 2. 仿真实验操作

### (1) 相控阵组装

在利用预警机载相控阵雷达进行目标探测时，首先要选择正确的单根波导单元进行相控阵雷达的组装，如下图所示：



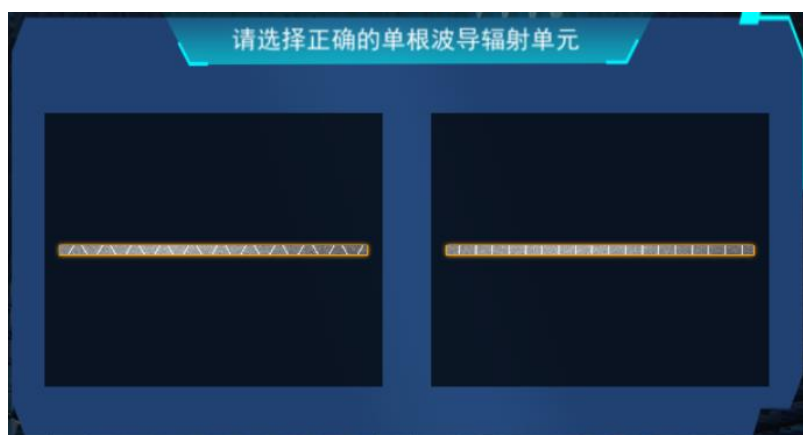


图 12：选择正确的单根波导辐射单元

实验中应选择左侧的单根波导辐射单元。由上图可以看出，左侧的单根波导辐射单元的开路缝隙与电流方向不平行，因此切割了波导壁上的电流，在缝隙处能够形成位移电流，从而产生辐射场。右侧单根波导辐射单元的缝隙与波导壁上的电流平行，无法切割电流从而产生辐射场。

在选择正确的单根波导辐射单元后，可以查看开缝波导天线上的电流分布，如下图所示：

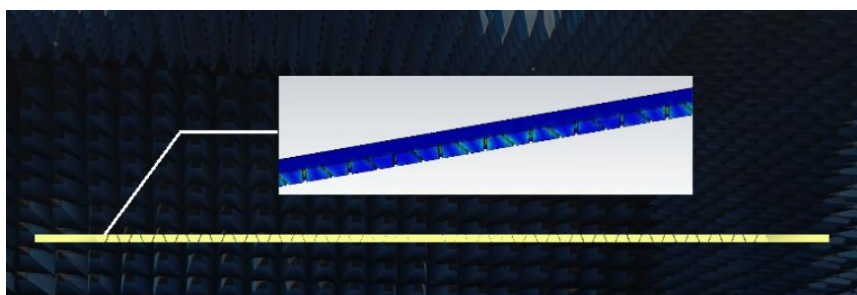


图 13：开缝波导天线上的电流分布

之后测量单根波导辐射单元的方向图，从两个不同的角度观察，如下图所示：

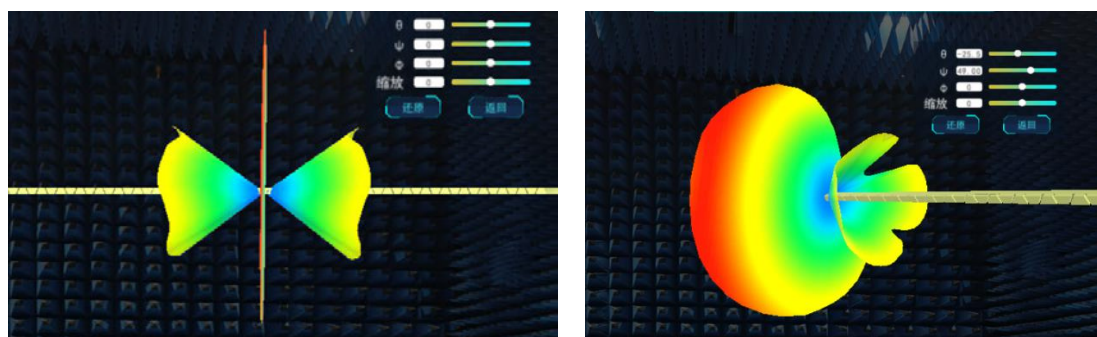


图 14：单根波导辐射单元的方向图



接下来采集单根波导辐射单元的关键指标数据。首先点击采集选项，点击天线辐射方向图的主瓣，即图中的红色部分，就采集到了开缝波导天线辐射方向图的关键指标数据，如下图所示：

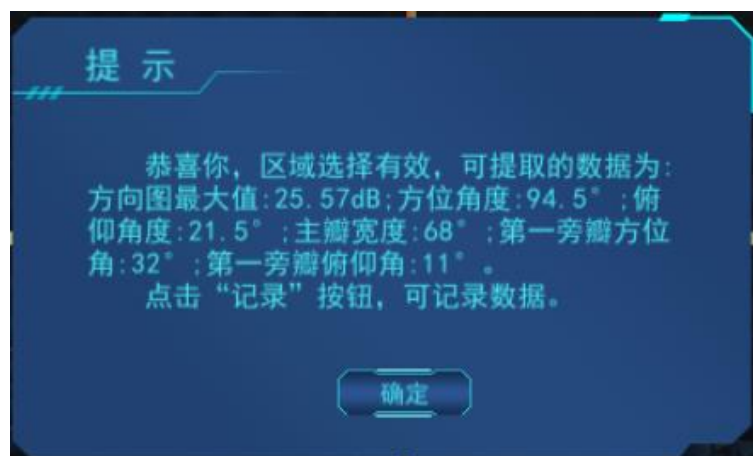


图 15：单根波导辐射单元方向图的关键指标数据

从上面采集到的数据可以看出，单根波导辐射单元的方向图最大值为 25.57dB，主瓣宽度为  $68^\circ$ 。因此单根波导辐射单元主瓣宽度过大，方向性不够强，增益不够大。这说明使用单根波导辐射单元难以满足准确定位跟踪目标的需求，因此需要将若干天线组合在一起形成天线阵列来改善方向性。

下面使用上述提到的开缝波导天线组装雷达阵面。观察预警机雷达罩的形状，发现是一个中间较粗两端较细的椭圆形，如下图所示：

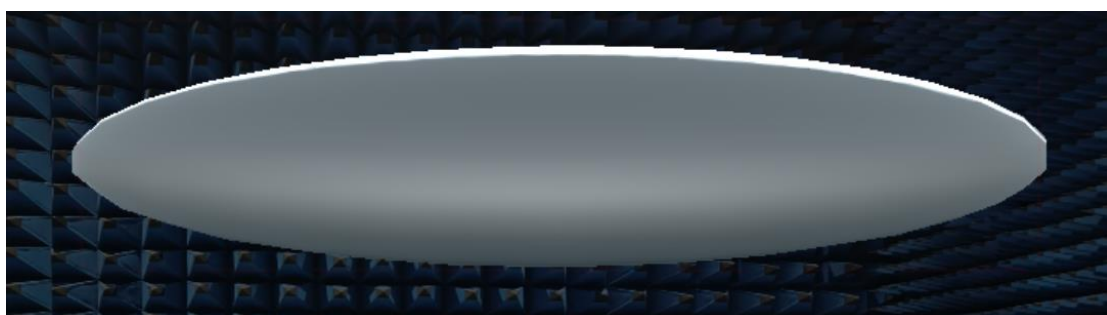


图 16：预警机雷达罩的形状

再结合相控阵雷达辐射特性的需求，因此在组装时长度较短的天线装配在两侧，长度较长的天线装配在中间，并且为相控阵天线选择合适的馈电网络和匹配网络，如下图所示：

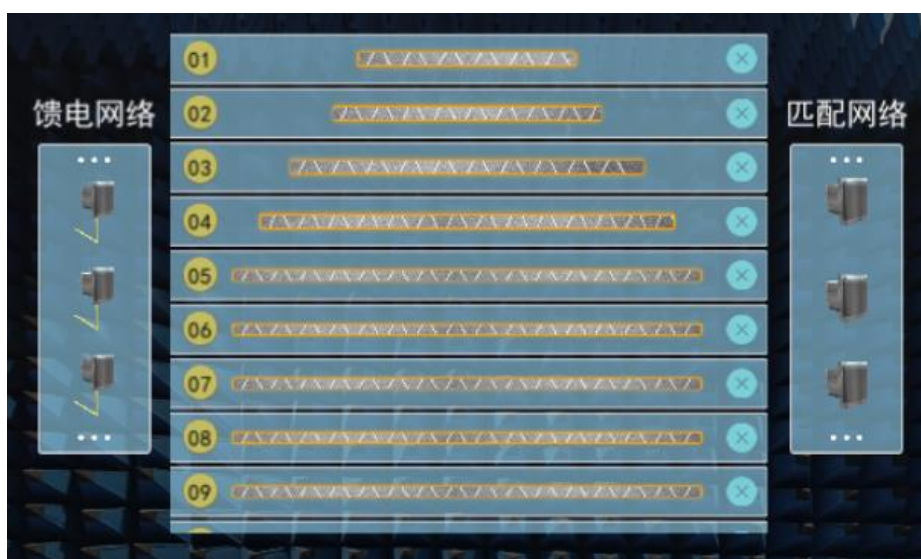


图 17：预警机雷达阵面组装示意图

组装完成后，将其装配至雷达罩内，验证组装是否正确。装配结果如下图所示：

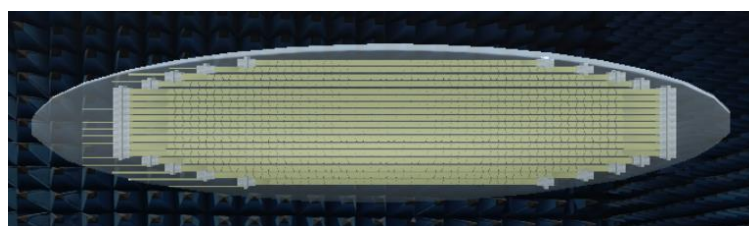


图 18：装配结果示意图

由上图可以看出，组装的雷达阵面可以很好地装配至雷达罩内，进一步验证了之前雷达阵面组装的正确性。至此完成了预警机相控阵雷达的组装，通过改变不同方向上开缝波导天线的相位，即可以实现对应方向的扫描。预警机相控阵雷达由上述三个雷达阵面组成，这三个阵面分别位于一个等边三角形的三个顶点，实现空间中  $360^\circ$  全扫描。

## (2) 相控阵馈电

在组装好相控阵雷达后，为了进一步提高相控阵天线的方向性，减小天线其他辐射瓣对目标探测的干扰，增大天线的扫描范围，需要为其选择合适的馈电方式。虚拟仿真实验中提供的馈电方案有随机、泰勒、等幅这三种，每种馈电方式都有同相和反相这两种方式，这三种馈电方案的区别是阵元馈电的电流

分布不同，分别如下图所示：



图 19：随机方案的电流分布

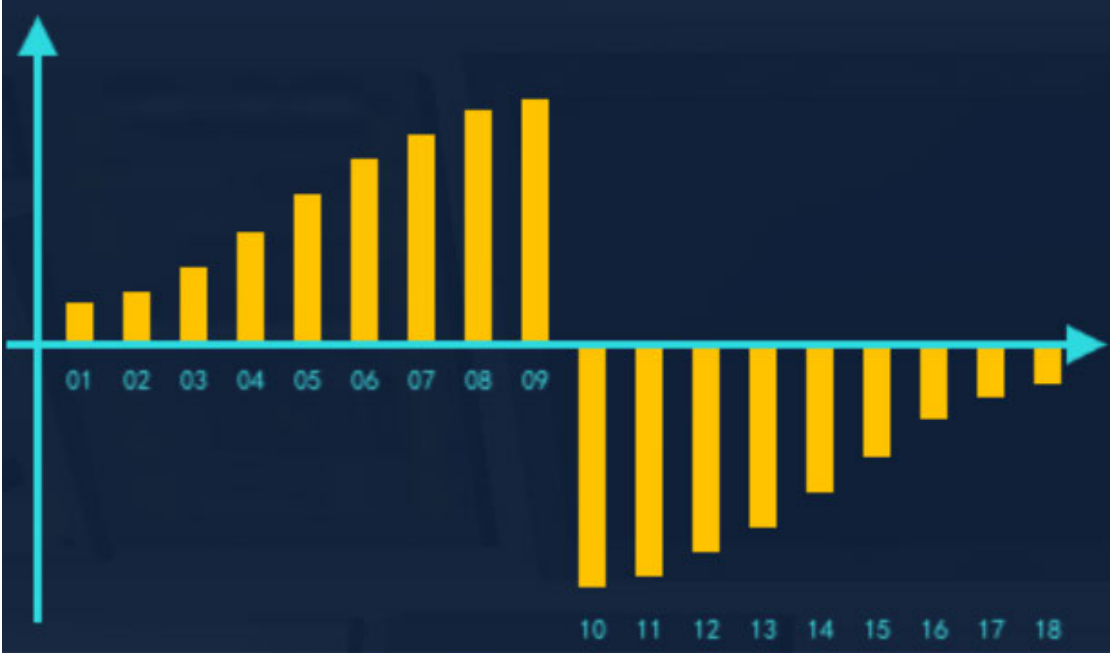


图 20：泰勒方案的电流分布



图 21：等幅方案的电流分布

打开电源和信号源，选择不同的馈电方案，相位分别调整为同相和反相，得到了这六种馈电方案的方向图如下所示：

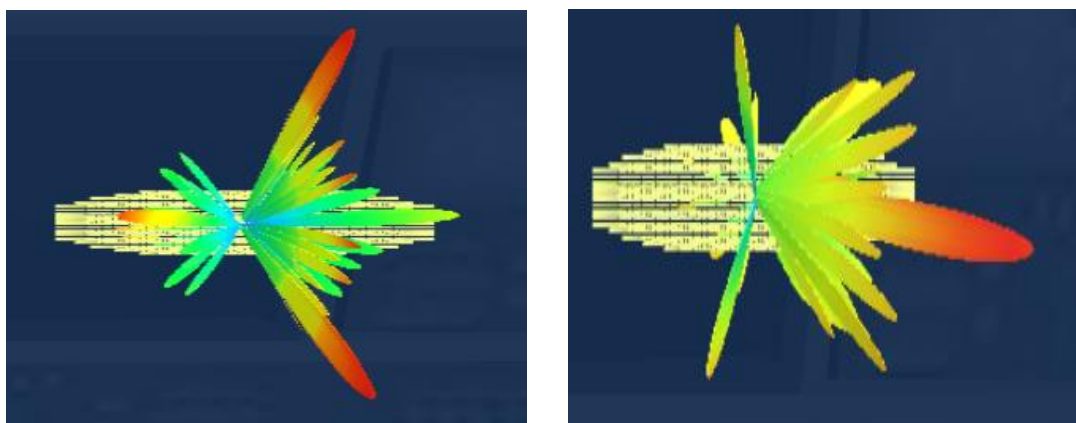


图 22：随机方案馈电方向图(左：同相，右：反相)

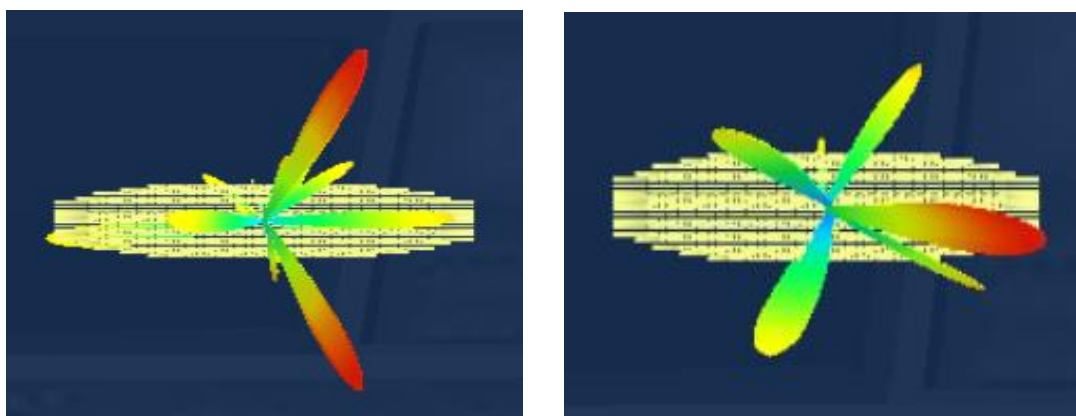


图 23：泰勒方案馈电方向图(左：同相，右：反相)

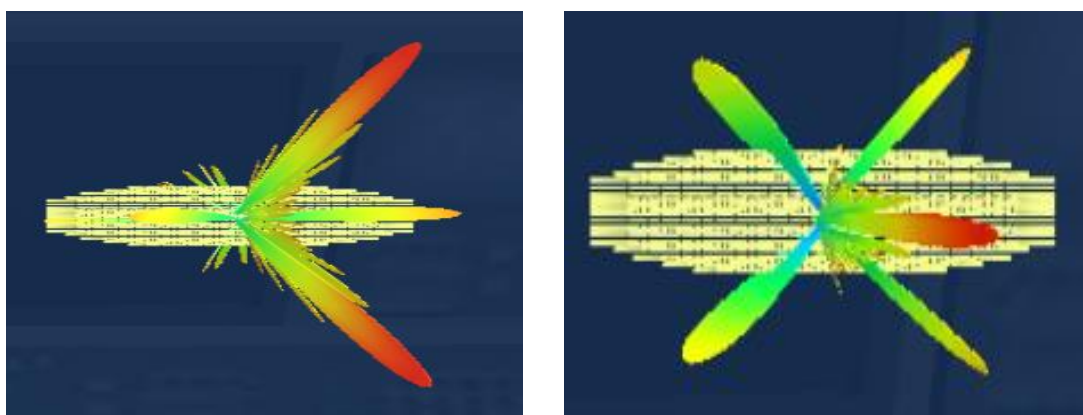


图 24：等幅方案馈电方向图(左：同相，右：反相)

这六种馈电方案的辐射方向图的关键指标数据如下表所示：

数据 馈电模式	方向图最大值 (单位：dB)	主瓣方位角度 (单位：°)	主瓣俯仰角 (单位：°)	主瓣宽度 (单位：°)	第一旁瓣方位角 (单位：°)	第一旁瓣俯仰角 (单位：°)
单根波导条方向图	25.57	94.5	21.5	68	32	11
同相等幅分布	33.96	95.5	$\pm 41.5$	5.1	95.5	35.3
同相泰勒分布	33.35	95.5	$\pm 41$	5.5	43.5	2
同相随机分布	32.91	95.5	$\pm 41.5$	5.1	95.5	36.3
反相等幅分布	37.47	94	0	4	94	7
反相泰勒分布	36.77	94	0	6	56	11
反相随机分布	36.24	94	0	4	94	8

图 25：六种馈电方案的辐射方向图的关键指标数据

通过观察这六种不同馈电方案的辐射方向图和关键指标数据，可以看出在每一种同相方案下，天线方向图均有两个对称分布的主瓣，即同时在两个方向上辐射最强。这不仅会削弱每一个主瓣的方向性，同时也会对雷达目标探测造成干扰，难以确定目标的具体方位，所以三个同相方案不符合要求。

反向的三个方案的辐射方向图均只有一个主瓣，并且方向图最大值较同相方案更大，主瓣宽度更窄，因此具有更好的方向性，便于准确探测目标的具体方位。但反相等幅和反相随机分布这两种方案的第一旁瓣方位角和主瓣的方位角相同，并且观察方向图可知其辐射强度也很大，仍有可能探测到目标，从而干扰主瓣的探测结果，造成对目标俯仰角的探测错误。因此反相等幅和反相随机这两种方案也不符合要求。



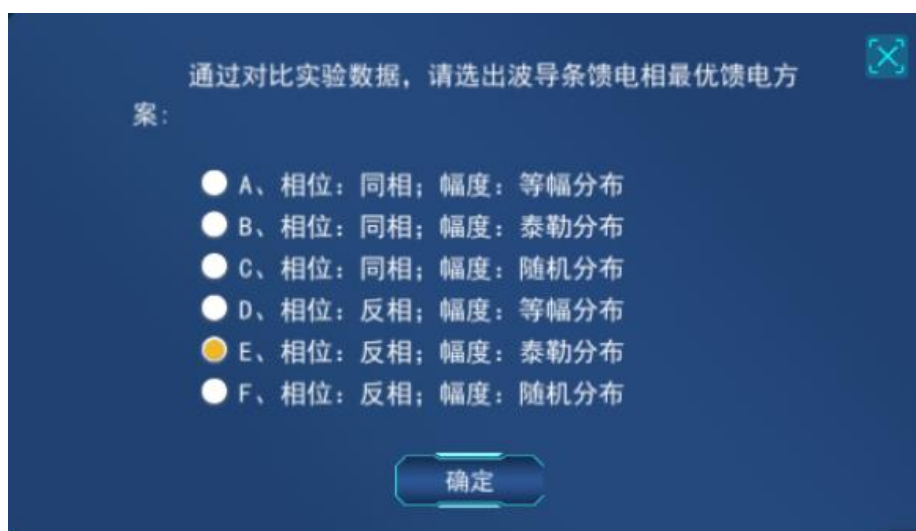


图 26: 馈电方案的选择

而对于反向泰勒方案, 由上图的测量数据可以看出, 主瓣和第一旁瓣的方向角、俯仰角差别较大, 这两个辐射瓣相距较远, 因此第一旁瓣对主瓣探测结果的干扰较小。与此同时, 反相泰勒方案的方向图最大值和主瓣宽度在折六种方案中均表现较好, 综合以上分析, 选择反向泰勒方案作为相控阵天线的馈电方案。

### (3) 雷达定标

雷达定标是指在雷达工作前对雷达系统进行校准。所有雷达在生产和装配过程中都会产生一定误差, 并且对于不同的雷达系统来说, 这些误差是不相同的。因此使用不同的雷达探测同样一个目标, 可能会导致不同的结果。为了使雷达系统可以正常工作, 提升其探测精度, 要对组装好的相控阵雷达进行定标, 以尽可能消除内部误差的影响。

由于同一个雷达系统在每次探测过程中其内部误差都是固定不变的, 因此可以采用以下方式进行雷达定标: 首先找到一个形状和尺寸已知的标准体, 用待定标的雷达系统探测该标准体, 得到一组标准测量数据。在之后的探测过程中, 通过标准体的探测数据与真实数据的关系, 就可以根据实际探测数据计算出探测目标的待测参数, 从而校准雷达内部误差对探测结果的影响。雷达定标的总体示意图如下所示:



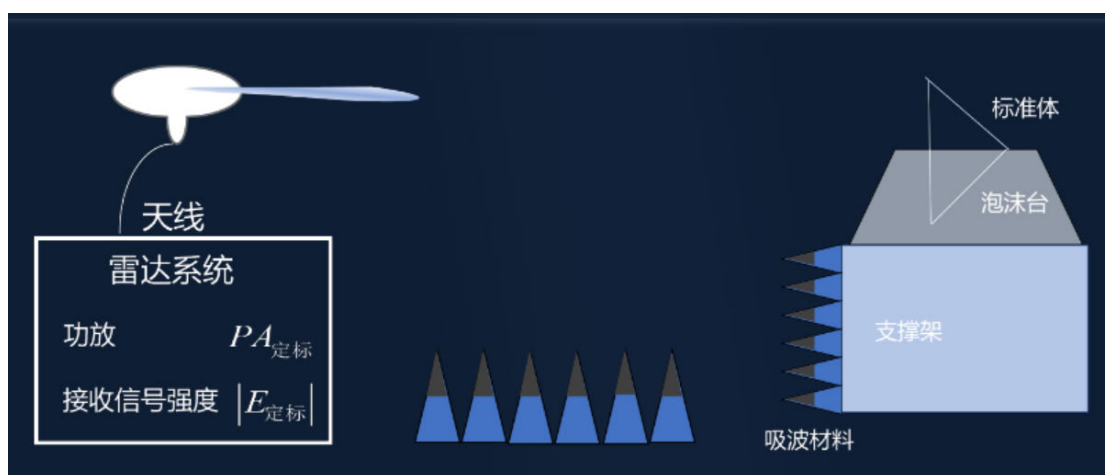


图 27：雷达定标总体示意图

雷达定标提供的标准体角反射器形状如下图所示：

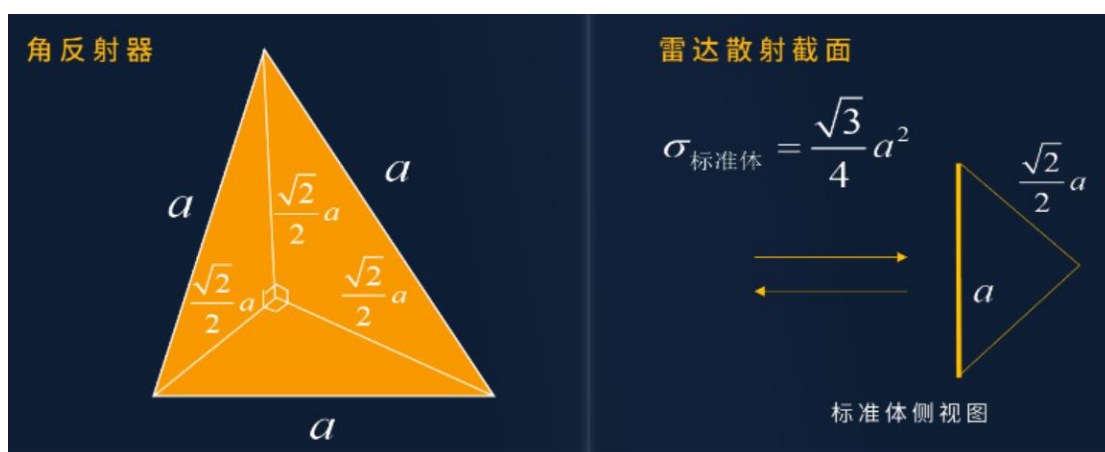


图 28：标准体角反射器的形状

虚拟仿真实验系统中提供的标准角反射器的参数如下图所示：

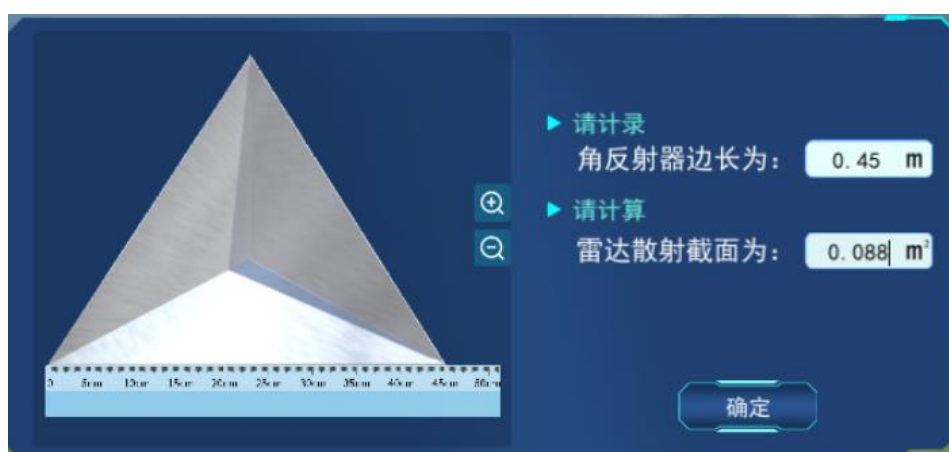


图 29：标准体的参数计算

首先计算并测量标准体的各项参数，从上图可以看出，标准体角反射器的边长为 0.45m，根据上述提供的雷达散射截面面积的计算公式，可计算出雷达散射

截面的面积为：

$$S = \frac{\sqrt{3}}{4} a^2 = 0.088m^2 \quad (4)$$

接下来搭建雷达定标设备，需要铺设不同型号的吸波材料、泡沫台和标准体，设计的方法如图 27 所示。首先需要用吸波材料包裹金属材质的支撑架，防止其对定标产生影响，并将角反射器标准体放在泡沫台上。雷达发射的电磁波到达地面会发生反射，同样会对定标结果造成影响，因此在地面的适当位置处也要铺设吸波材料，如下图所示：

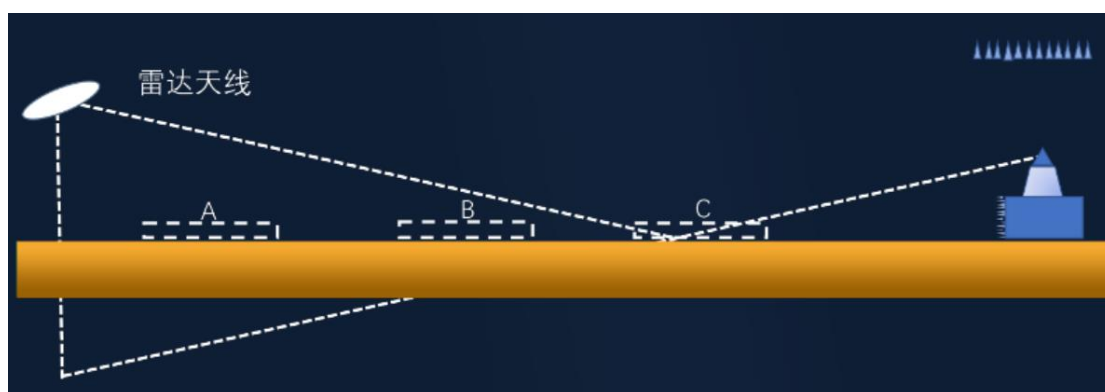


图 30：地面吸波材料的铺设方式

最后的定标设备安装示意图如下图所示：

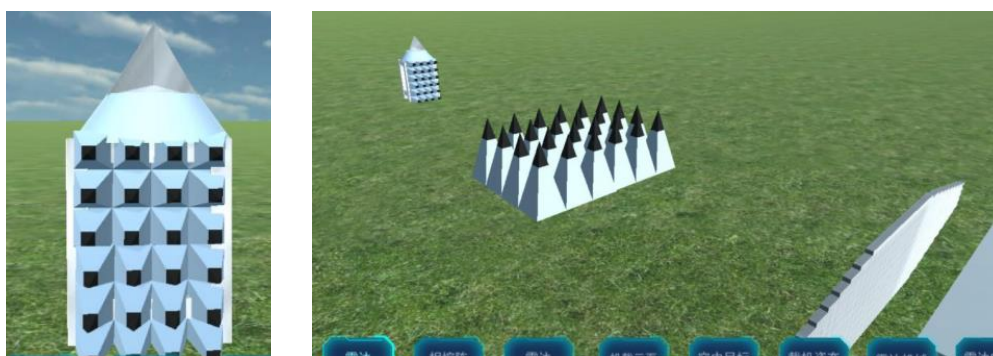


图 30：定标设备安装示意图

在搭建完雷达定标设备后，下面需要进行信号检测。由于雷达辐射较强，会对人体造成伤害，因此必须进入测试室并且关好隔离门才能进行信号的检测。

首先打开电源和信号源，为了避免电路的损坏，首先选择最小的功放 10dB，设置定标扫描方式为面扫，点击外场监控，查看超现实外场监控录像，如下图所示：

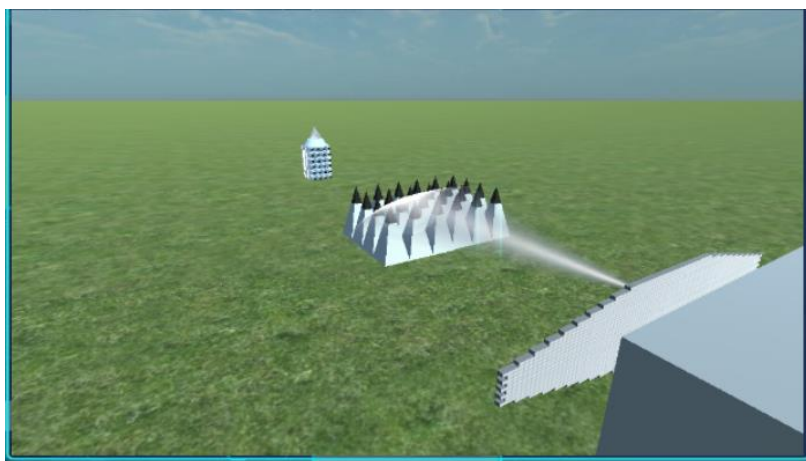


图 31：超现实外场监控录像图

扫描完毕后，点击查看信号即可得到相应的定标结果，如下图所示：

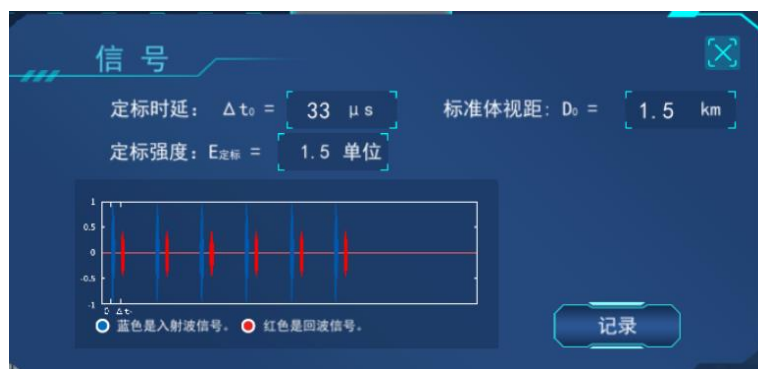


图 32：雷达定标结果示意图

从图中可以看出，最终的定标结果为：定标时延为 33us，标准体视距为 1.5km，定标强度为 1.5 单位。定标数据对于后续根据雷达的探测数据计算目标的距离、雷达散射截面等参数起到关键性的作用，要准确记录这组定标结果，由于在 10dB 功放时已经可以得到定标结果，因此不需要再次增大功放，当功放为 50dB 时，如下图所示：



图 33：功放选择过大的示意图

因此当功放选择过大，可能会造成相控阵雷达设备的损坏，严重时会造成安全事故。

#### (4) 相控阵扫描

在完成雷达的组装、馈电方式的选择以及雷达定标等工作后，一个可以探测各个方位目标的相控阵雷达制造完毕。在正式安装在到预警机之前，还需要进行相控阵扫描来检测雷达对各个方向目标的探测能力。相控阵扫描分为水平扫描、俯仰扫描和面扫这三种工作模式，下面将对这几种模式逐一进行验证。

##### ➤ 相控阵水平扫描

首先打开电源和信号源，将旋钮转至水平扫描，可以观察到水平扫描时可选的相差范围是 $-228^{\circ}$ ~ $228^{\circ}$ 。分别输入相位差 $-228^{\circ}$ 、 $-90^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 、 $228^{\circ}$ ，观察到雷达的辐射方向图如下所示：

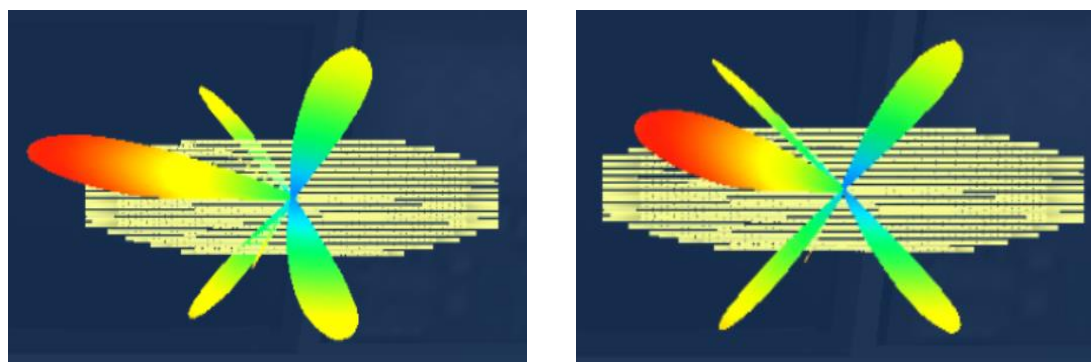


图 33：水平相差为 $-228^{\circ}$ (左)  $-90^{\circ}$ (右)辐射方向图

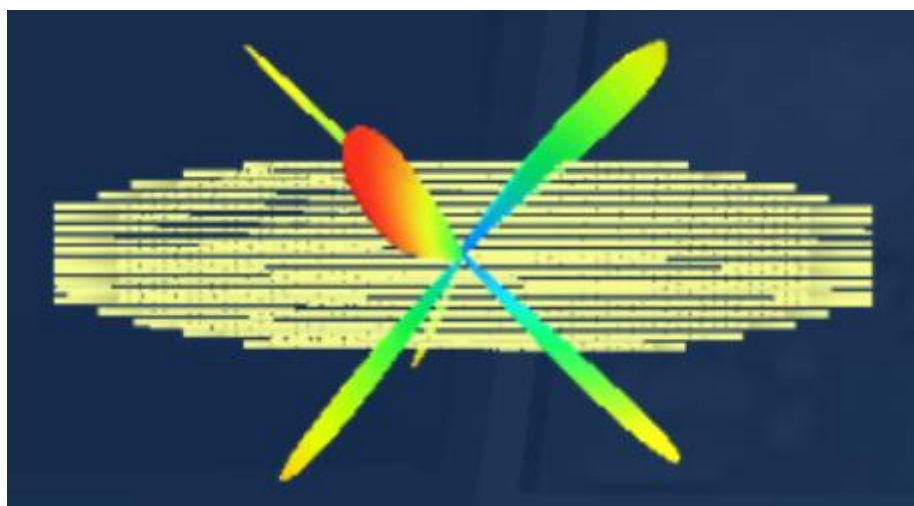


图 34：水平相差为 $0^{\circ}$ 辐射方向图

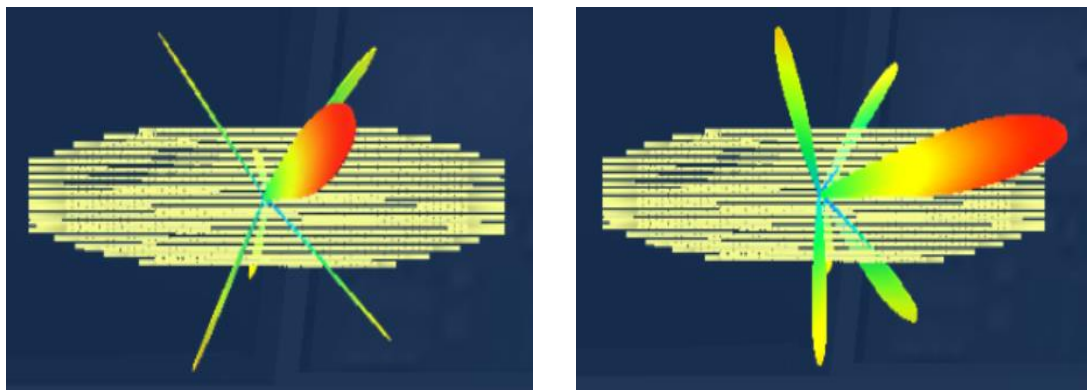


图 35：水平相差为 $90^{\circ}$ (左)  $228^{\circ}$ (右)辐射方向图

观察可知，随着水平方向阵元的相位差从 $-228^{\circ}$ 逐渐增大到 $228^{\circ}$ 时，相控阵雷达的主瓣方向在水平方向上逐渐从左向右转动。在垂直方向上主瓣的辐射方向没有明显变化，并且主瓣在转动过程中，主瓣的宽度和方向性系数也变化较小。因此通过改变水平方向不同阵元的相位差可以实现相控阵雷达的水平扫描，从而使雷达具有探测水平方向目标的能力。

#### ➤ 相控阵俯仰扫描

将旋钮转至俯仰扫描，可以观察到俯仰扫描时可选的相差范围 $-93^{\circ}\sim 93^{\circ}$ 。分别输入相位差 $-93^{\circ}$ 、 $-45^{\circ}$ 、 $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $93^{\circ}$ ，观察到雷达的辐射方向图如下所示：

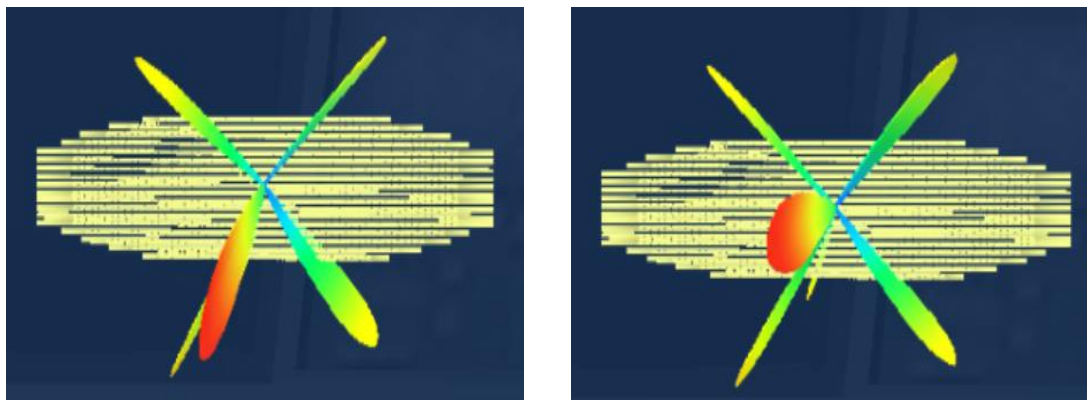


图 36：垂直相差为 $-93^{\circ}$ (左)  $-45^{\circ}$ (右)辐射方向图



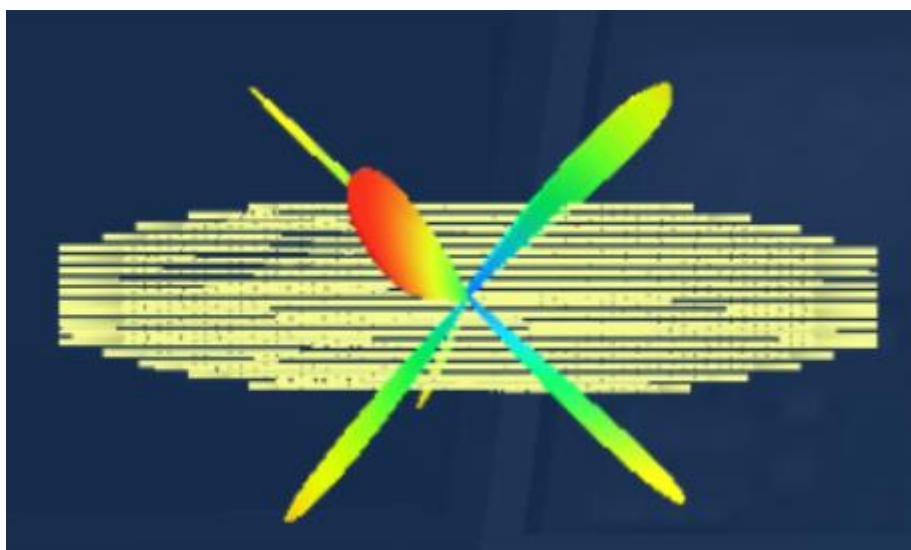


图 37：垂直相差为 $0^\circ$ 辐射方向图

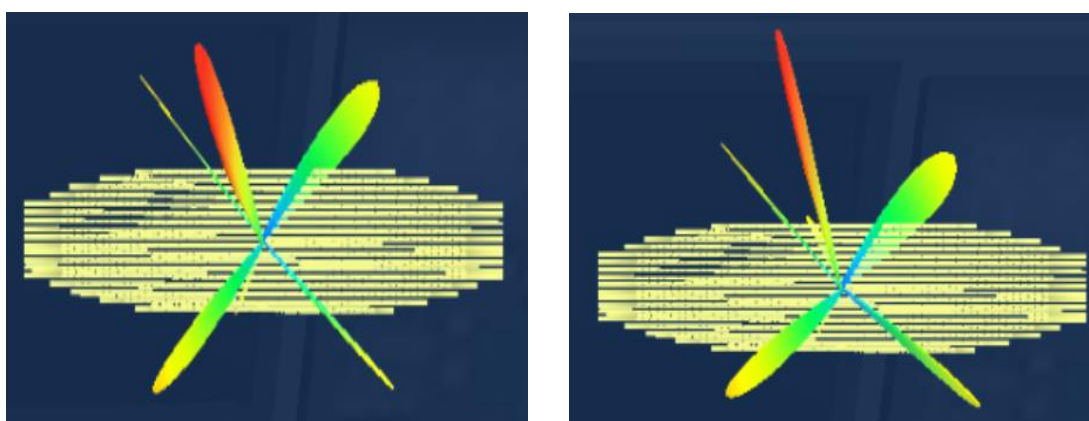


图 38：垂直相差为 $45^\circ$ (左) $93^\circ$ (右)辐射方向图

观察可知，随着垂直方向阵元的相位差从 $-93^\circ$ 逐渐增大到 $93^\circ$ 时，相控阵雷达的主瓣方向在垂直方向上逐渐从下向上转动。在水平方向上主瓣的辐射方向没有明显变化，并且主瓣在转动过程中，主瓣的宽度和方向性系数也变化较小。因此通过改变垂直方向不同阵元的相位差可以实现相控阵雷达的俯仰扫描，从而使雷达具有探测垂直方向目标的能力。

### ➤ 相控阵面扫

通过上述实验可知，相控阵雷达可以通过改变水平方向和垂直方向阵元的相位差，从而实现雷达的水平扫描和垂直扫描。如果同时改变水平方向和垂直方向阵元的相位差，即可实现相控阵雷达的面扫功能。将旋钮转至面扫，可以观察到相控阵天线的方向图进行从左到右、从上到下整个二维平面的扫描，其中一个瞬间如下图所示：



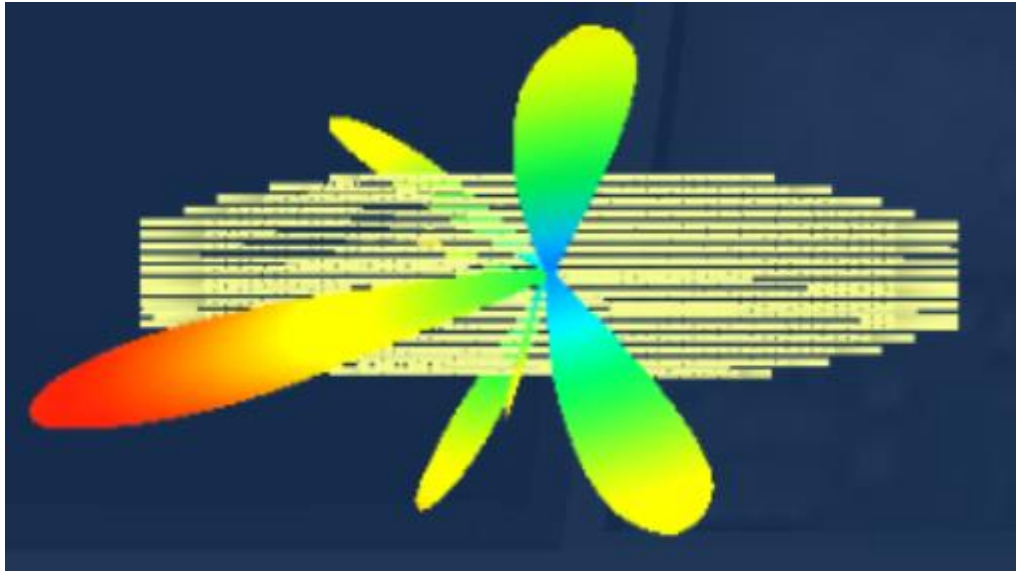


图 39：相控阵面扫

### (5) 雷达安装

在对前述组装的雷达进行相控阵扫描后，验证其可以正常工作，接下来需要将雷达安装到预警机上。一个预警机雷达系统由三个相同的相控阵雷达组成，从而实验对全空间的扫描探测。首先需要选择恰当的预警机机型，虚拟仿真实验中提供的飞机的外观形状和具体参数如下图所示：

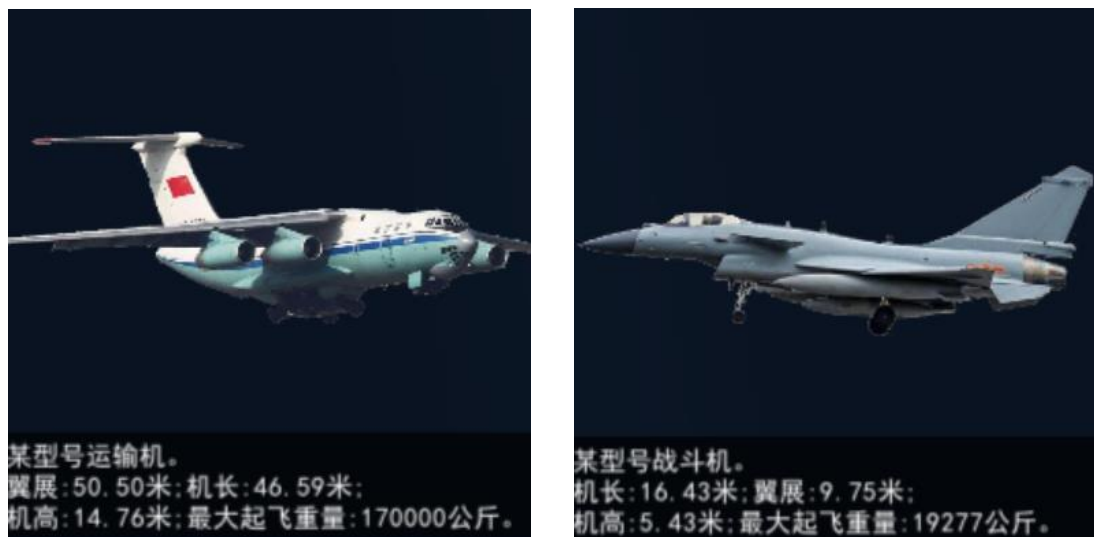


图 40：某型号运输机(左)某型号战斗机(右)

作为空中机动指挥中枢的预警机，其搭载的并非单一相控阵雷达，而是一整套完整的雷达配套体系。这套庞大的系统网络，需要数量众多的处理设备。与此同时，为确保探测任务顺利执行，预警机还需要搭载一定数量的技术人员和操作人员。要承载这些设备与人员，载机必须具备充足的内部空间和强劲的

动力。由上图的参数可以看出，运输机相对于战斗机具有更大的体型和起飞重量，这意味着运输机可以搭载更多的人员和设备。战斗机的主要设计目的是为了空中作战，需要具备体型小巧精简、机动性能灵活的特性，这些特性对于预警机载机来说并不是必须的。而运输机设计目的就是运输战略物资，更符合预警机载机的需求，因此选择运输机作为预警机载机。

在选择好预警机载机后，在安装相控阵雷达之前，需要选择合适高度的雷达支架。雷达支架安装的高度不能太高或者太低，安装太高时支架会受到很大的力矩作用，对材料的强度要求非常高。并且当预警机在高空中飞行时，会造成横截面的增大，进而导致风阻变大。此外，雷达支架安装过高也会导致预警机重心变高，从而对预警机的姿态控制提出了更大的挑战，降低了飞行稳定性。如果雷达支架安装高度过低，飞机本身的材料会对雷达辐射的电磁波产生较大的干扰。并且当安装高度较低时，相控阵雷达在进行垂直方向的扫描时可能会扫描到机身，进而导致探测视野的变小。综上所述，雷达支架的高度应该比较适中，因此选择 7m 作为合适高度的雷达支架。

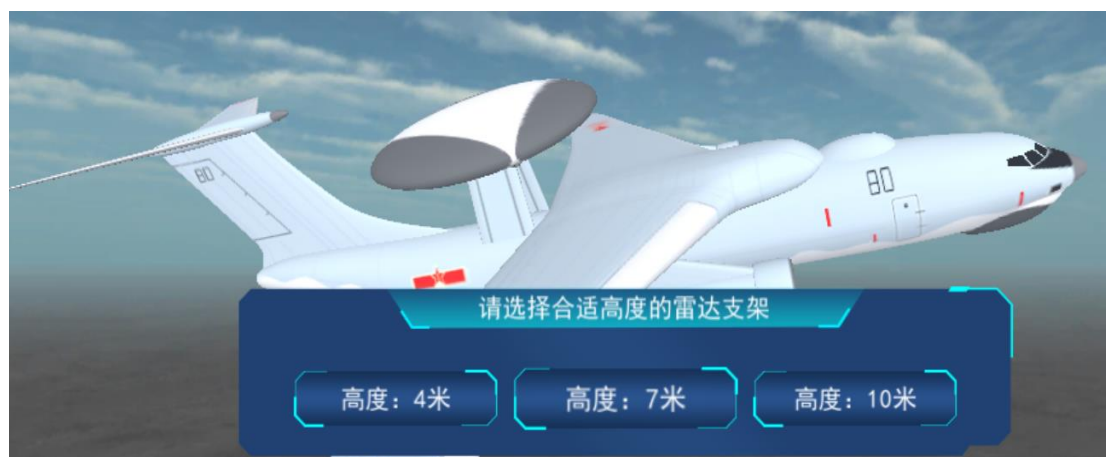


图 41：雷达支架高度的选择

## (6) 机载三面相控阵扫描

在选择合适的预警机载机以及合适的雷达支架高度后，最后要将相控阵雷达安装到预警机上。在探测目标之前，先从不同视角观察相控阵雷达的扫描方向图，现将观察结果列举如下(所有方向图均显示雷达位置)：

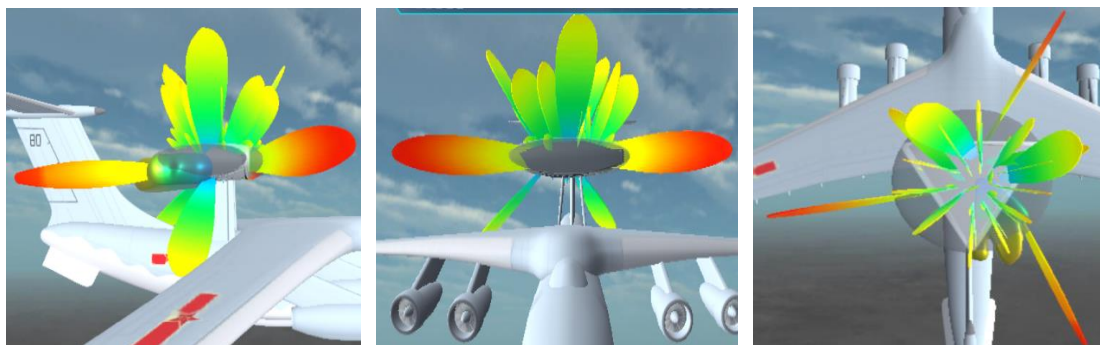


图 42：侧视(左)正视(中)俯视(右)

通过侧视、正视、俯视这三个视角观察相控阵雷达的方向图可以看出，预警机雷达系统由三个相同的相控阵雷达组成，这三个相控阵雷达排列成一个等边三角形，并且相邻的相控阵雷达的方向图主瓣之间的夹角为 $120^\circ$ ，分别扫描各自所对应的区域，从而完成对全空间的扫描。

最后分析预警机对相控阵雷达扫描的实际影响。在雷达安装环节，由于已选用合适的支架高度，载机对雷达扫描的干扰相对较小。不过，雷达副瓣仍有可能扫描到到载机区域，因为载机与雷达的间距较近，副瓣会接收到比较强的回波信号，这有可能会导导致雷达系统对探测目标的距离和方位产生误判。在相控阵雷达进行垂直方向扫描时，由于载机处于雷达下方位置，并且翼展尺寸较大，可能会导致相控阵雷达的主瓣扫描到预警机机身从而造成误判。为避免误探测到载机自身结构，因此雷达主瓣的扫描角度不能过度向下。但又因为雷达支架的高度不能过高，这会导致相控阵雷达的探测范围缩小，不利于其性能的发挥。

## (7) 空中目标设置

在组装完预警机雷达系统并完成了初步的性能测试后，就可以使用这套系统进行实际目标的探测。在虚拟仿真实验系统中可以模拟实际场景，指定特定高度和方位角的目标，利用组装的预警机雷达系统进行探测。为计算方便，在实验中指定探测目标为一家飞机，所在高度为  $10000\text{m}$ ，所在方位角为 $10^\circ$ ，如下图所示：



图 43：探测目标数据(左)探测目标位置(右)

## (8) 载机姿态设置

确定探测目标后，就可以让预警机起飞执行目标的探测任务。在驾驶预警机时，确保飞行安全是一件十分关键的事情，因此有必要在起飞前进行安全教育。首先要认真阅读安全手册，做好物理伤害防护和设备损伤防护，然后确认安全出口的位置、确认救生衣的位置、系好安全带，做好所有的安全措施才可以起飞。

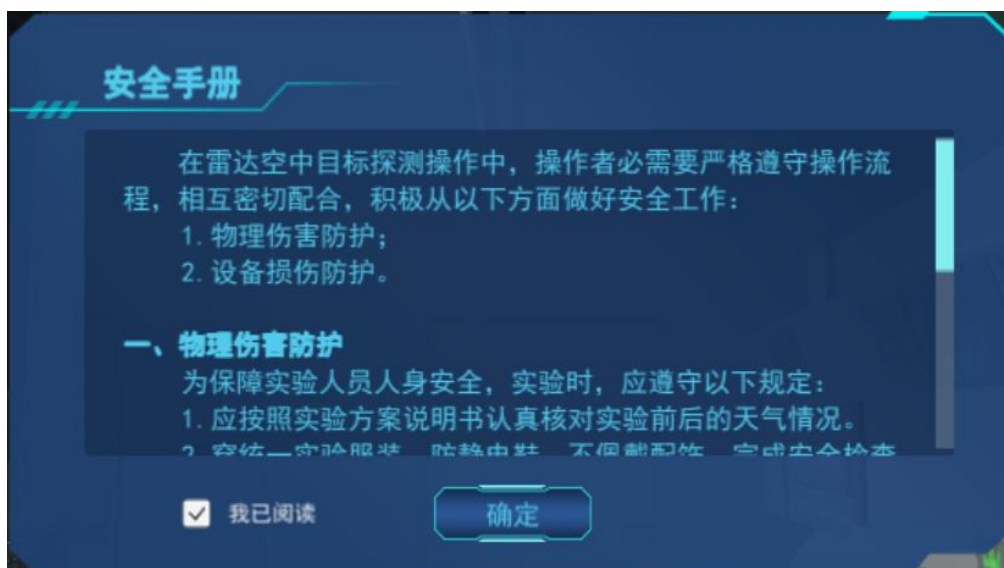


图 44：安全手册内容

预警机起飞后要保持正确的飞行高度和姿态才能有效地探测目标。由于设定的目标高度为 10000m,所以可设定预警机的升空高度为 9000m, 偏航角为108°, 俯仰角为5°, 设定结果和预警机的飞行姿态如下图所示：



图 45：预警机飞行参数(左) 预警机飞行姿态(右)

## (9) 雷达机械扫描

预警机升空后，需要通过雷达扫描的方式对各个方位进行探测，从而确定目标所在的方位和距离。雷达扫描的方式分为雷达机械扫描和雷达电子扫描这两种方式，本部分首先使用雷达机械扫描对目标进行探测。

在进行雷达机械扫描探测目标之前，可以先打开虚拟仿真实验系统右侧的帮助文档对雷达机械扫描探测目标的原理进行学习。雷达测距的原理和公式如下图所示：

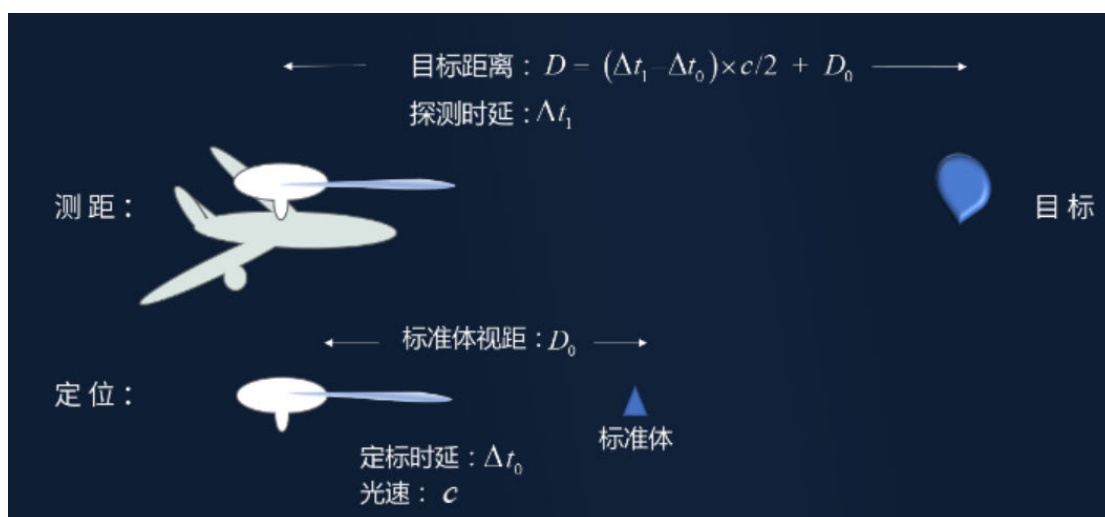


图 46：雷达测距原理

雷达测量目标雷达散射截面的原理和公式如下图所示：



$$\sigma_{\text{目标}} = \sigma_{\text{标准体}} \times \frac{|E_{\text{测}}|^2}{|E_{\text{定标}}|^2} \times 10^{(PA_{\text{定标}} - PA_{\text{测}})/10} \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^2$$

$PA_{\text{定标}}$  : 定标功率                       $D$  : 目标距离  
 $PA_{\text{测}}$  : 测量功放                         $D_0$  : 标准体视距

图 47：雷达测量目标雷达散射截面的原理

雷达测量目标径向尺寸的原理和公式如下图所示：

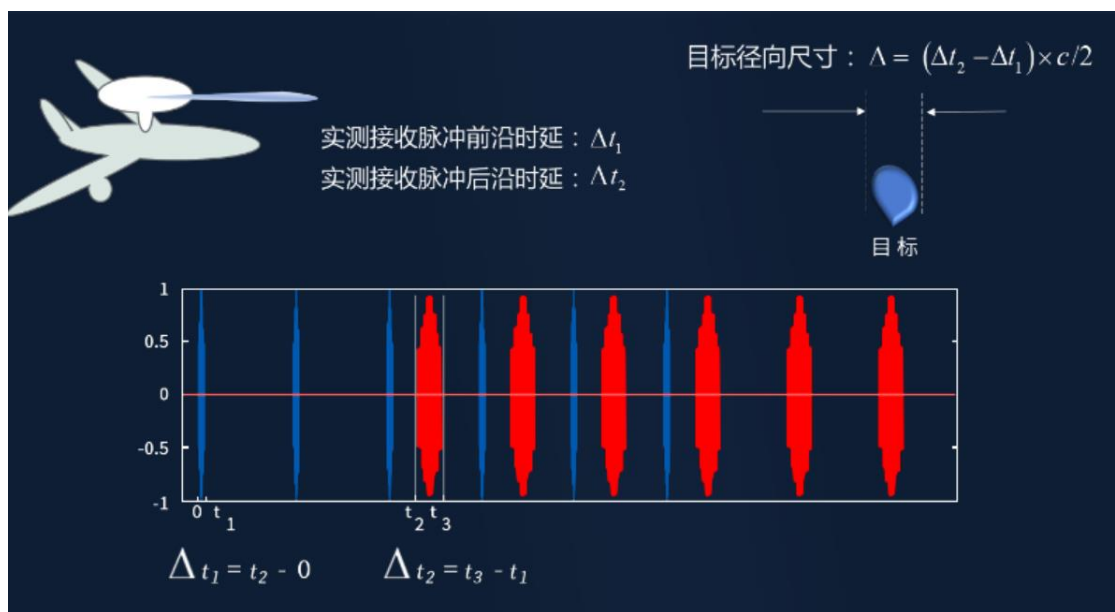


图 48：雷达测量目标径向尺寸的原理

雷达机械扫描是指雷达的辐射方向图的主瓣在扫描过程中保持不变，通过旋转雷达的机械结构，是雷达朝向空间中的不同方向，从而实现全空间的扫描。雷达机械扫描测量目标的方位角、俯仰角的原理和公式如下图所示：



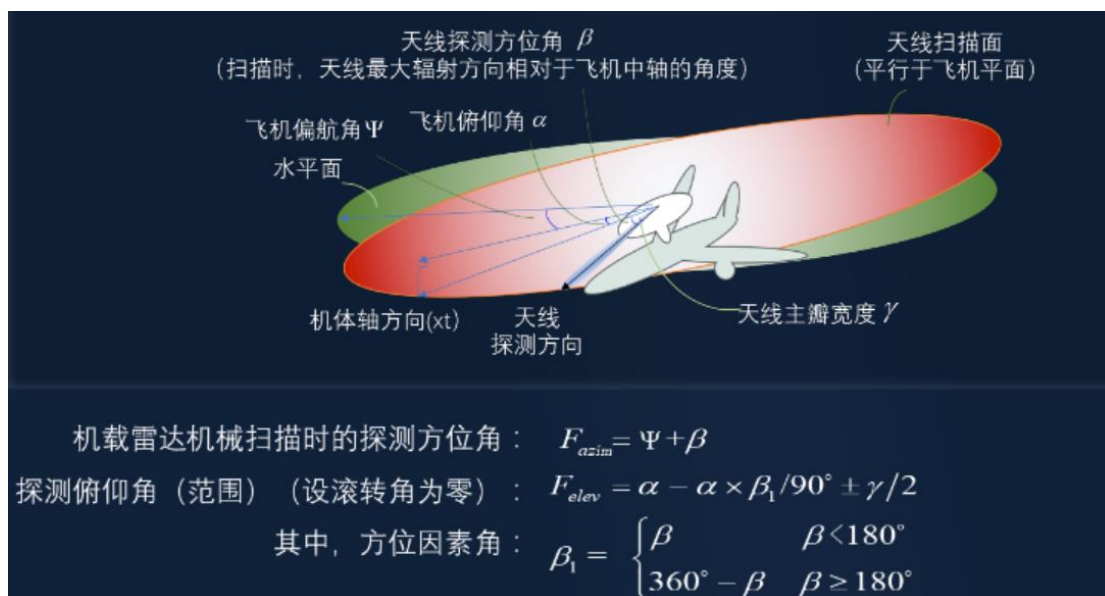


图 49: 雷达机械扫描的测向原理

观察上述公式可以发现, 雷达机械扫描的探测方位角在计算时可能会超过  $360^\circ$ , 这显然不符合方位角的定义, 因此方位角的计算公式应该作以下修正:

$$F_{azim} = \begin{cases} F_{azim} & F_{azim} \leq 360^\circ \\ F_{azim} - 360^\circ & F_{azim} > 360^\circ \end{cases} \quad (5)$$

修正后, 得到的方位角最终取值范围就落在  $0^\circ \sim 360^\circ$  区间, 符合方位角的定义。

在完成对雷达机械扫描原理的学习后, 就可以在虚拟仿真实验系统中利用雷达机械扫描探测目标了。打开电源和信号源, 功放选择  $10\text{dB}$ , 预警机雷达系统就开始机械扫描。当其中一个通道探测到目标时雷达就会接收到回波信号, 如下图所示:

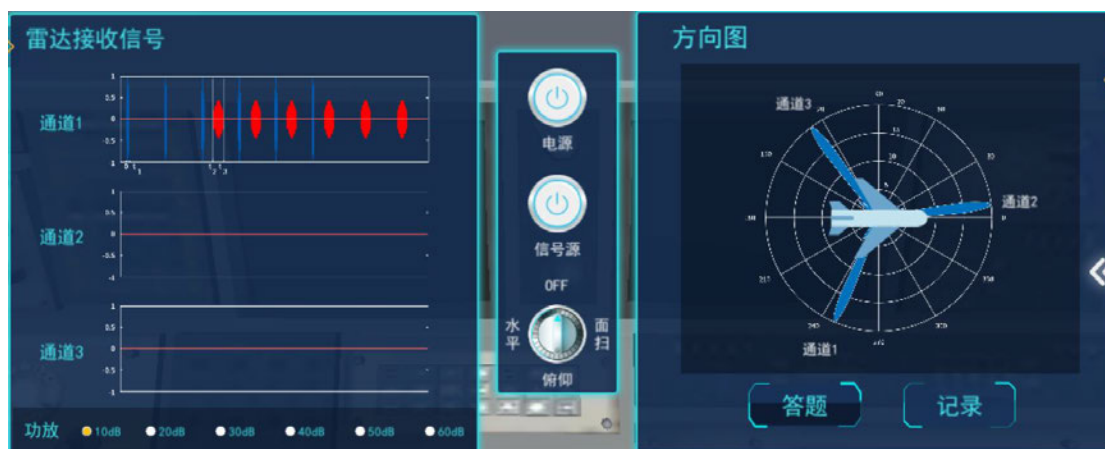


图 50: 回波信号的接收

点击记录, 即可记下回波信号的有关数据, 如下图所示:

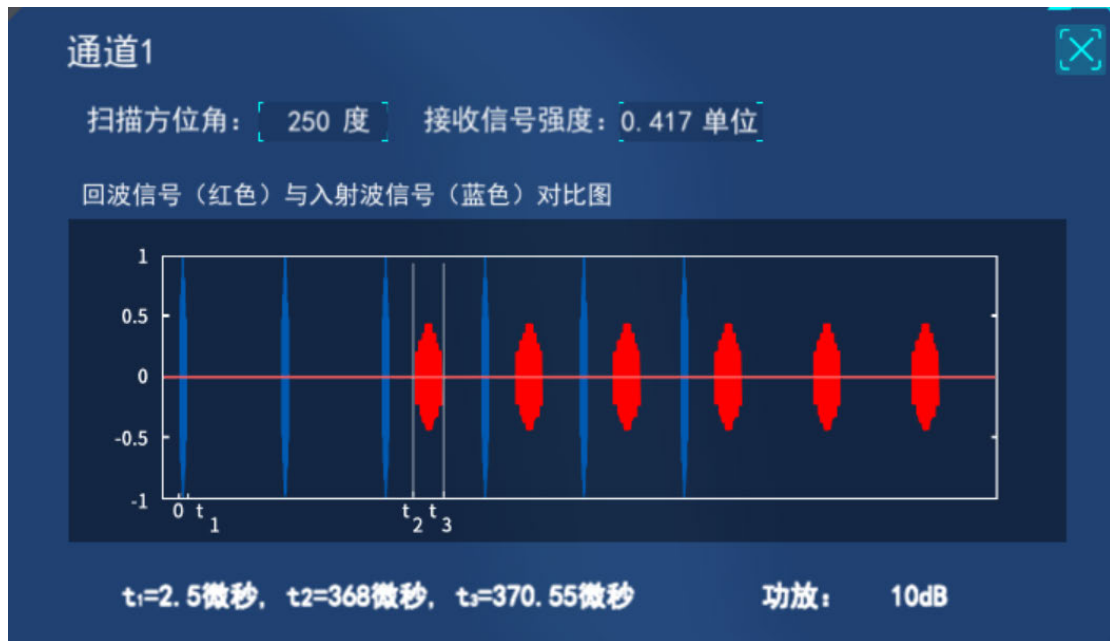


图 51: 雷达回波信号数据

根据上述得到的回波数据，结合预警机的飞行高度和姿态，以及之前实验过程中的雷达定标结果，可以计算出目标的方位角、俯仰角、距离、径向尺寸和雷达散射截面等参数，从而实现对目标的有效探测。由于后续仍需要多次实验，手动计算并不方便，因此可以编写一段 MATLAB 程序实现根据雷达机械扫描的探测结果对探测目标的上述参数进行计算，程序代码如下所示：

```
1. clear, clc
2. % 雷达机械扫描
3. % 雷达接收信息
4. beta = 250; % 天线扫描方位角 / 度
5. E = 0.417; % 接收信号强度 / 单位
6. gamma = 6; % 主瓣宽度 / 度
7. t0 = 0;
8. t1 = 2.5e-6; % t1 / s
9. t2 = 368e-6; % t2 / s
10. t3 = 370.55e-6; % t3 / s
11. PA = 10; % 功放
12.
13.
14. % 定标数据
15. dt0 = 33e-6; % 定标时延 / s
16. D0 = 1.5e3; % 标准体视距 / m
17. E0 = 1.5; % 定标强度 / 单位
18. PA0 = 10; % 功放 / dB
19. s0 = 0.088; % 雷达散射截面 / m²
```

```

20. c = 3e8;                % 光速
21.
22.
23. % 载机信息
24. h = 9000;                % 预警机升空高度
25. phi = 120;                % 预警机偏航角
26. alpha = 5;                % 预警机俯仰角
27.
28.
29. % 雷达机械扫描结果计算
30. if beta < 180
31.     beta1 = beta;
32. else
33.     beta1 = 360 - beta;
34. end
35.
36. Fazim = phi + beta;                % 方位角
37. if Fazim > 360
38.     Fazim = Fazim - 360;
39. end
40.
41. Felev = alpha - alpha * beta1 / 90;                % 俯仰角
42. Felev_range = gamma / 2;                % 俯仰角误差范围
43.
44. dt1 = t2 - t0;
45. dt2 = t3 - t1;
46. D = (dt1 - dt0) * c / 2 + D0;                % 距离
47. d = (dt2 - dt1) * c / 2;                % 径向尺寸
48. s = s0 * (E/E0) * (E/E0) * (10^((PA0 - PA)/10)) * (D/D0) * (D/D0);                % 雷达散射截面
49.
50.
51. % 输出结果
52. fprintf('雷达机械扫描结果为: \n');
53. fprintf('    方位角: %14.0f°\n', Fazim);
54. fprintf('    俯仰角: %15.1f°\n', Felev);
55. fprintf('    俯仰角误差范围: %5.0f°\n', Felev_range);
56. fprintf('    距离: %19.2fkm\n', D/1000);
57. fprintf('    径向尺寸: %13.1fm\n', d);
58. fprintf('    雷达散射截面%13.3fm²\n', s);

```

这段代码首先根据之前实验的结果设定雷达接收信号、定标数据以及载机的飞行高度和姿态等参数，然后根据雷达机械扫描的探测原理计算出探测目标的

相关参数，最后将计算所得结果输出出来。在每次实验探究时，可以将不同的测量参数直接输入程序进行计算，从而提高了探究效率，使用起来也更加方便。

对于此次的实验数据，得到的探测目标的相关参数计算结果如下图所示：

雷达机械扫描结果为：

方位角：	$10^{\circ}$
俯仰角：	$-1.1^{\circ}$
俯仰角误差范围：	$3^{\circ}$
距离：	51.75km
径向尺寸：	7.5m
雷达散射截面	$8.095\text{m}^2$

图 52：雷达机械扫描计算结果

将计算结果填入虚拟仿真实验系统如下所示，经系统核对，此次计算正确。

图 53：将计算结果填入系统



图 54：系统核验计算正确

观察上述计算结果，可以发现雷达机械扫描并不能准确探测目标的俯仰角，存在 $\pm 3^{\circ}$ 的偏差。这种情况是显然的，因为虚拟仿真实验中的雷达机械扫描无法

现垂直方向上的扫描，只能确定目标的俯仰角在天线主瓣的范围之内，导致探测结果出现偏差。

在完成雷达机械扫描的探测之后，根据实验结果可以总结出雷达机械扫描的部分特点，并于雷达电子扫描进行初步的比较，如下所示：

- 雷达机械扫描的馈电网络比较简单。因为雷达机械扫描是依靠机械结构的旋转实现空间的扫描，在扫描过程中天线阵的方向图和主瓣的相对方向不发生改变，不同阵元之间的相位差保持不变，因此在雷达机械扫描过程中馈电方式不改变，对馈电网络的要求也相对较低。而雷达电子扫描过程中机械结构不发生变化，依靠改变水平方向和垂直方向阵元的相位差，从而改变相控阵天线的方向图和主瓣方向实现全空间的扫描。因此相对于雷达机械扫描，雷达电子扫描需要更加复杂的馈电网络来精确控制不同阵元之间的相位关系。
- 雷达机械扫描会受制于机械故障。雷达机械扫描需要依靠机械结构的旋转，因此机械在使用过程中出现的各种故障会严重影响雷达系统的工作。而雷达电子扫描不需要机械结构的移动，只需要改变阵元的相位差即可实现扫描，因此对机械的强度和性能要求较低，不受制于机械故障的影响。
- 雷达机械扫描的空间扫描周期较长。雷达机械扫描由于需要机械结构的旋转，因此其扫描速度必定受制于机械强度和韧性。如果扫描速度过快，会导致机械结构的损伤从而影响雷达的正常工作。如果当目标的移动速度非常快，机械旋转的速度可能会跟不上目标的移动，从而影响目标的追踪。而雷达电子扫描依靠改变不同阵元的相位差实现全空间的扫描，从而摆脱了机械结构的限制。只要馈电相位差改变的速度足够快，相控阵天线的变化速度也足够快，从而实现快速的扫描。对于目前的电子元器件来说，实现馈电相位差的快速改变并不是一件非常困难的事情。因此雷达电子扫描可以实现快速的扫描，从而有利于目标的追踪。
- 雷达机械扫描的扫描探测范围受限。雷达机械扫描是依靠机械结构的旋转来实现空间的扫描，受限于机械结构，一般机械的旋转角度都是有限的，不可能做到 $360^\circ$ 的旋转，这会导致雷达机械扫描的探测范围受限。当遇到预警机所在的高度和探测目标相差较大等极端情况时，探测目标可能会处于雷达机械扫描的死角区域。而雷达电子扫描通过改变阵元之间的相位差实现全空间



的扫描，因此不受机械结构的限制，可以扫描到更大的空间范围。在进一步的实验中可以看出，当预警机所在的高度和探测目标相差较大时，雷达机械扫描探测不到目标，而雷达电子扫描就可以探测到，进一步说明了雷达电子扫描的探测范围要大于雷达机械扫描。

综上所述，答题板的第一题应当选择 B、C、D、F 项，如下图所示：

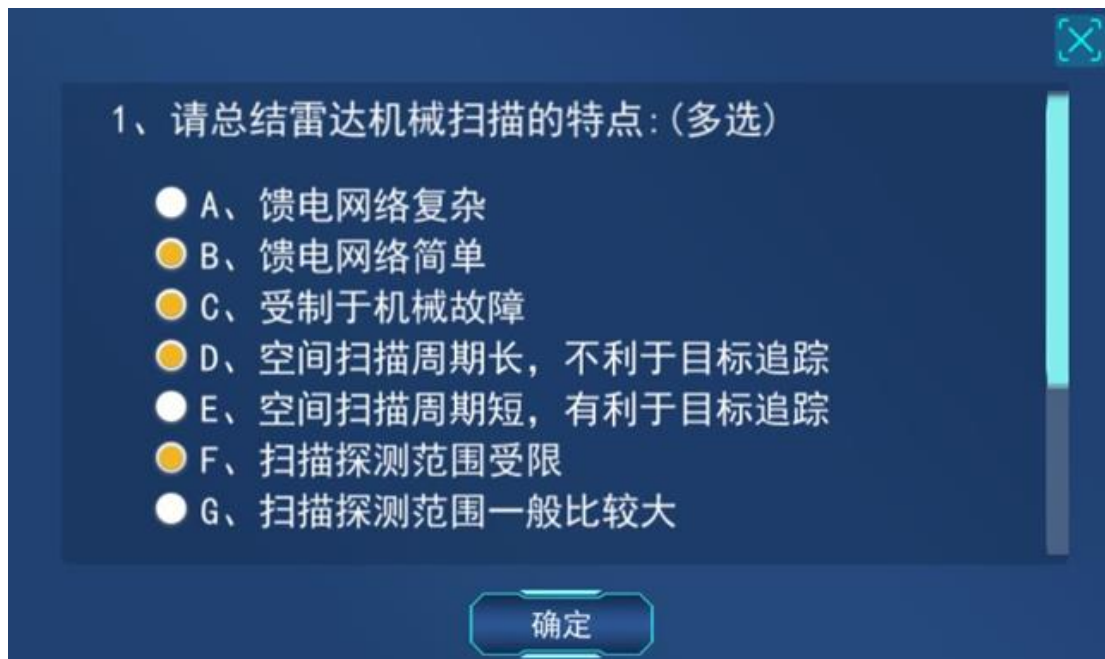


图 55：雷达机械扫描的特点

根据上述论述，尽管雷达电子扫描馈电网络相对复杂，但如今相控阵天线的设计和扫描技术已经比较成熟，并且雷达电子扫描具有不依赖机械结构、空间扫描周期短、探测范围比较大等优点，因此预警机雷达应当选用电子扫描方式。

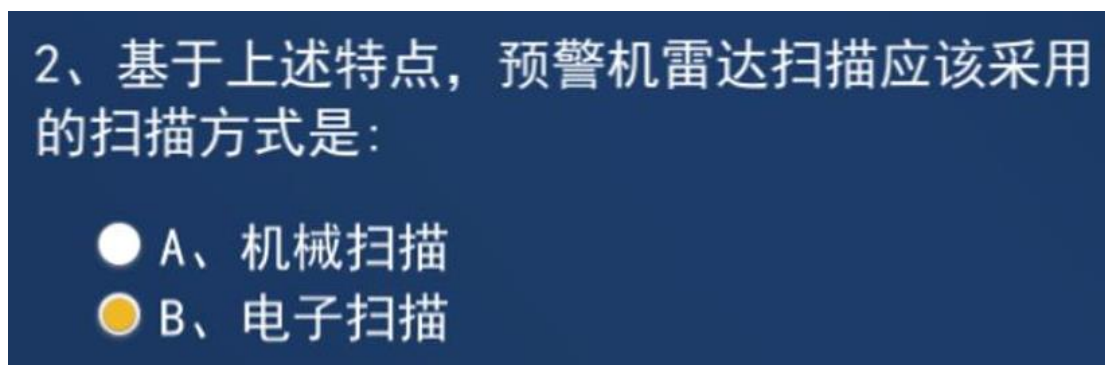


图 56：预警机雷达扫描方式的选择

## (10) 雷达电子扫描

通过上述分析，选择电子扫描作为预警机雷达的扫描方式，接下来使用雷达电子扫描进行目标的探测。首先打开虚拟仿真实验系统右侧的帮助文档对雷达电子扫描探测目标的原理进行学习。雷达的测距原理及公式、测量目标雷达散射截面的原理和公式、测量目标径向尺寸的原理及公式均与雷达机械扫描一致，雷达电子扫描测量目标方位角、俯仰角原理和公式如下图所示：

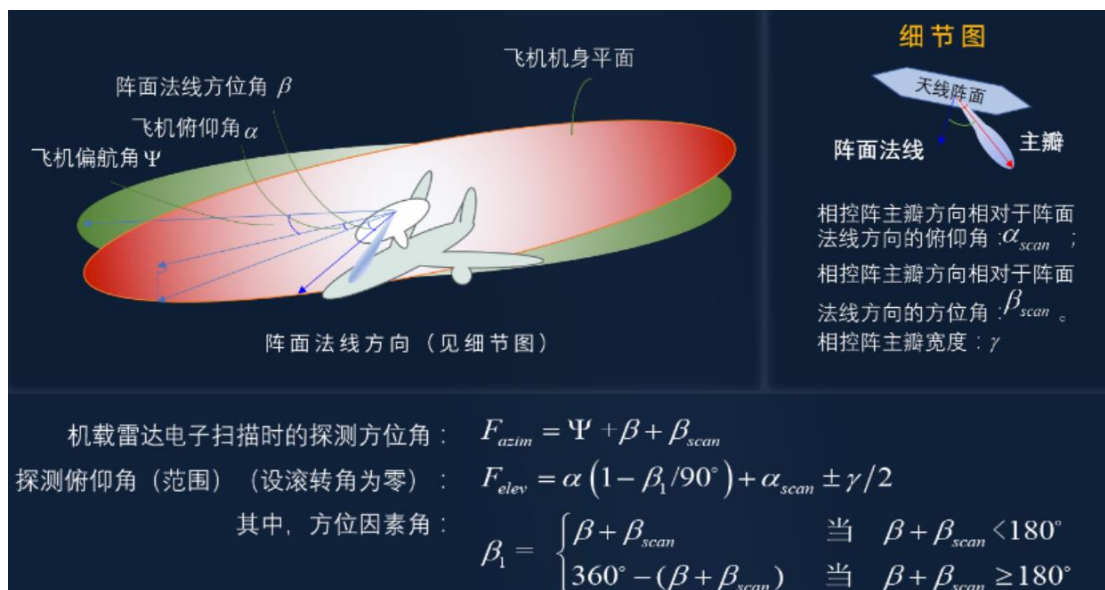


图 57：雷达电子扫描的测向原理

观察上述公式可以发现，雷达电子扫描的探测方位角计算公式同样存在雷达机械扫描中存在的问题，仍需利用公式(5)对其进行修正。

在完成对雷达电子扫描原理的学习后，就可以在虚拟仿真实验系统中利用雷达电子扫描探测目标了。打开电源和信号源，功放选择 10dB，转动旋钮选择面扫模式，预警机雷达系统就开始电子扫描，雷达开始接收到回波信号，如下图所示：

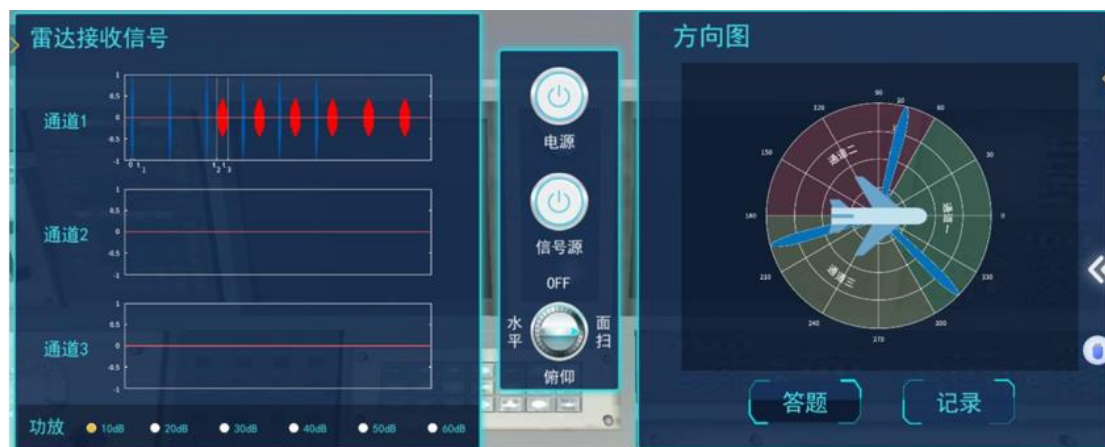


图 58：回波信号的接收

实验过程中可以注意到，雷达电子扫描的速度明显比雷达机械扫描要快很多，对目标的探测也更加稳定，进一步显示了雷达电子扫描的优势。记录到雷达接收到的回波信息如下图所示：

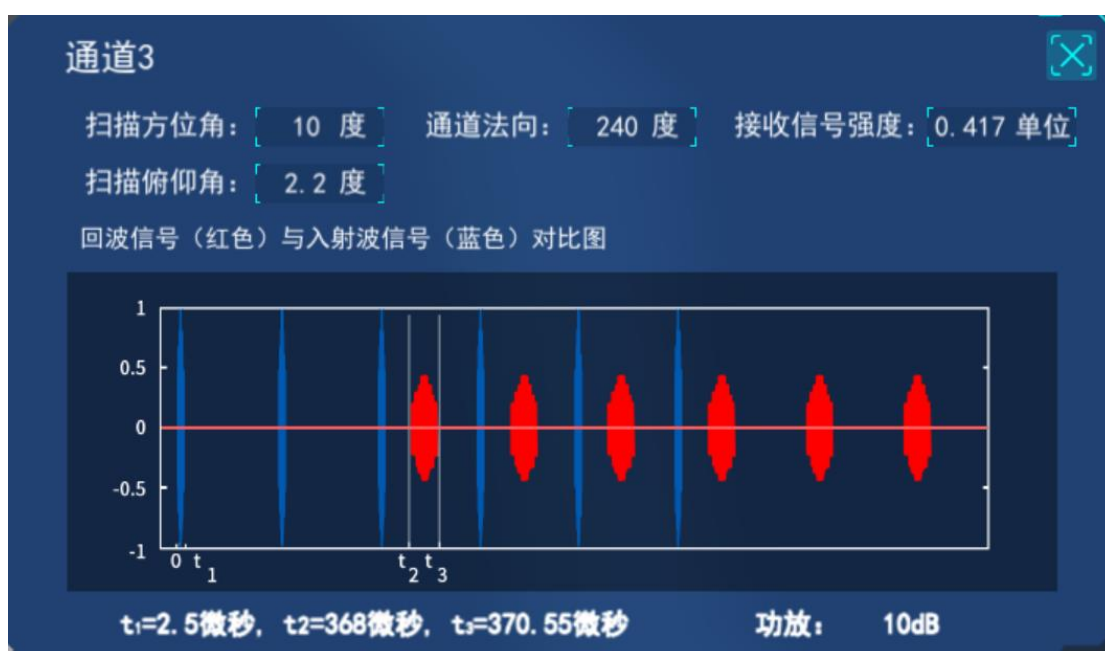


图 59：雷达回波信号数据

根据上述得到的回波数据，结合预警机的飞行高度和姿态，以及之前实验过程中的雷达定标结果，可以计算出目标的方位角、俯仰角、距离、径向尺寸和雷达散射截面等参数，从而实现对目标的有效探测。由于后续仍需要多次实验，手动计算并不方便，因此可以编写一段 MATLAB 程序实现根据雷达电子扫描的探测结果对探测目标的上述参数进行计算，程序代码如下所示：

```
1. clear, clc
2. % 雷达电子扫描
```

```

3. % 雷达接收信息
4. beta_scam = 10;      % 天线扫描方位角 / 度
5. beta = 240;          % 天线阵面法线方向 / 度
6. E = 0.417;           % 接收信号强度 / 单位
7. alpha_scam = 2.2;    % 天线扫描俯仰角 / 度
8. gamma = 6;           % 主瓣宽度 / 度
9. t0 = 0;
10. t1 = 2.5e-6;         % t1 / s
11. t2 = 368e-6;         % t2 / s
12. t3 = 370.55e-6;      % t3 / s
13. PA = 10;            % 功放
14.
15.
16. % 定标数据
17. dt0 = 33e-6;         % 定标时延 / s
18. D0 = 1.5e3;          % 标准体视距 / m
19. E0 = 1.5;            % 定标强度 / 单位
20. PA0 = 10;            % 功放 / dB
21. s0 = 0.088;          % 雷达散射截面 / m²
22. c = 3e8;             % 光速
23.
24.
25. % 载机信息
26. h = 9000;             % 预警机升空高度
27. phi = 120;            % 预警机偏航角
28. alpha = 5;            % 预警机俯仰角
29.
30.
31. % 雷达电子扫描结果计算
32. if (beta + beta_scam) < 180
33.     beta1 = beta + beta_scam;
34. else
35.     beta1 = 360 - (beta + beta_scam);
36. end
37.
38. Fazim = phi + beta + beta_scam;          % 方位角
39. if Fazim > 360
40.     Fazim = Fazim - 360;
41. end
42.
43. Felev = alpha * (1 - beta1 / 90) + alpha_scam;          % 俯仰角
44. Felev_range = gamma / 2;          % 俯仰角误差范
    围
45.

```

```

46. dt1 = t2 - t0;
47. dt2 = t3 - t1;
48. D = (dt1 - dt0) * c / 2 + D0; % 距离
49. d = (dt2 - dt1) * c / 2; % 径向尺寸
50. s = s0 * (E / E0) * (E / E0) * (10^((PA0 - PA) / 10)) * (D / D0) * (D / D0);
    % 雷达散射截面
51.
52.
53. % 输出结果
54. fprintf('雷达电子扫描结果为: \n');
55. fprintf('  方位角: %14.0f°\n', Fazim);
56. fprintf('  俯仰角: %15.1f°\n', Felev);
57. fprintf('  距离: %19.2fkm\n', D / 1000);
58. fprintf('  雷达散射截面%13.3fm²\n', s);
59. fprintf('  径向尺寸: %13.1fm\n', d);

```

这段代码基本组成部分与之前雷达机械扫描的计算代码类似，首先根据之前实验的结果设定雷达接收信号、定标数据以及载机的飞行高度和姿态等参数，然后根据雷达机械扫描的探测原理计算出探测目标的相关参数，最后将计算所得结果输出出来。在每次实验探究时，可以将不同的测量参数直接输入程序进行计算，从而提高了探究效率，使用起来也更加方便。

对于此次的实验数据，得到的探测目标的相关参数计算结果如下图所示：

雷达电子扫描结果为：

方位角：	10°
俯仰角：	1.1°
距离：	51.75km
雷达散射截面	8.095m <sup>2</sup>
径向尺寸：	7.5m

图 60：雷达电子扫描计算结果

将计算结果填入虚拟仿真实验系统如下所示，经系统核对，此次计算正确。



图 61：将计算结果填入系统

与雷达机械扫描相比，雷达电子扫描可以精确测定目标的俯仰角。因为雷达电子扫描可以实现水平方向和垂直方向的扫描，具有更大的扫描范围，因此探测结果也更精确。

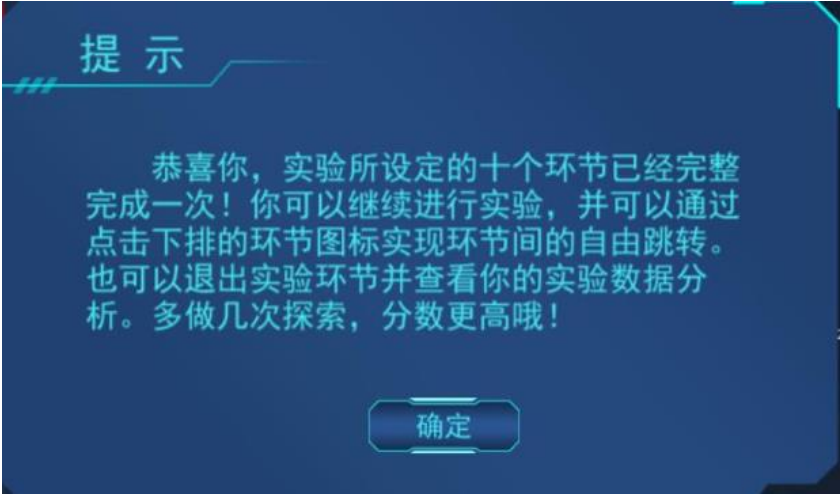


图 62：系统核验计算正确

至此，预警机雷达虚拟仿真实验已经全部完成。

(11) 重复实验探究

经过上述十个步骤，预警机虚拟仿真实验已经全部完成。为了加深对预警机雷达探测原理的理解，根据图 62 所示的系统提示，可以分别设置不同的探测目标位置和预警机飞行姿态，探究不同情况下预警机雷达的探测效果。

为了方便后续计算和分析，实验中设定预警机飞行高度为 5000m，偏航角 0°，俯仰角为 0°，重复试验的结果如下面两张表所示(标记为“-”的表格代表接收不到回波信号)：

目标			雷达机械扫描						
类型	高度/m	方位角/°	功放/dB	方位角/°	俯仰角/°	俯仰角误差/°	距离/km	径向尺寸/m	雷达散射截面/m <sup>2</sup>
飞机	9000	90	30	-	-	-	-	-	-
飞机	9000	180	30	-	-	-	-	-	-
飞机	8000	90	30	-	-	-	-	-	-
飞机	8000	180	30	-	-	-	-	-	-
气球	6000	30	30	30	0	±3	155.94	3	4.143
气球	6000	60	30	60	0	±3	155.94	3	4.143
气球	5000	30	30	30	0	±3	155.94	3	4.143
气球	5000	60	30	60	0	±3	155.94	3	4.143
鸟类	3000	45	40	45	0	±3	263.25	1.5	1.379
鸟类	3000	135	40	135	0	±3	263.25	1.5	1.379
鸟类	2000	45	40	45	0	±3	263.25	1.5	1.379
鸟类	2000	135	40	135	0	±3	263.25	1.5	1.379

表 1：雷达机械扫描重复实验结果

目标			雷达电子扫描					
类型	高度/m	方位角/°	功放/dB	方位角/°	俯仰角/°	距离/km	雷达散射截面/m <sup>2</sup>	径向尺寸/m
飞机	9000	90	10	90	4.4	51.75	8.095	7.5
飞机	9000	180	10	180	4.4	51.75	8.095	7.5
飞机	8000	90	10	90	3.3	51.75	8.095	7.5
飞机	8000	180	10	180	3.3	51.75	8.095	7.5
气球	6000	30	30	30	0.4	155.94	4.143	3
气球	6000	60	30	60	0.4	155.94	4.143	3
气球	5000	30	30	30	0	155.94	4.143	3
气球	5000	60	30	60	0	155.94	4.143	3
鸟类	3000	45	40	45	-0.4	263.25	1.379	1.5
鸟类	3000	135	40	135	-0.4	263.25	1.379	1.5
鸟类	2000	45	40	135	-0.7	263.25	1.379	1.5
鸟类	2000	135	40	135	-0.7	263.25	1.379	1.5

表 2：雷达电子扫描重复实验结果

通过分析上述两个表格中的实验数据，可以发现以下规律：

- 雷达机械扫描和雷达电子扫描都可以探测到待测物体的位置信息。通过观察上述两个表格中的数据，在都能接收到回波的情况下，两种扫描方式计算出的距离、雷达散射截面、径向尺寸等参数是一致的。这种情况是在一定程度上是合理的，因为在这两种扫描方式下雷达系统的结构和组成以及预警机的位置没有改变，探测结果不应存在较大差异。实际情况下两种扫描方式探测结果会存在一定偏差，但一定會在误差允许的范围內。
- 雷达机械扫描的探测范围小于雷达电子扫描。从上述表格中可以观察到，当探测的目标位于 8000m 时，预警机和目标的高度相差过大，雷达机械扫描无法探测到目标，此时必须采取雷达电子扫描。由于雷达机械扫描依靠机械结构的旋转实现对空间的扫描，而在本实验中，雷达的机械结构只能在水平方向上进行旋转，因此当预警机和目标高度相差过大时，雷达机械扫描的天线主瓣探测不到目标。雷达电子扫描由于可以通过控制水平方向和垂直方向阵元的相位差实现对水平方向和垂直方向的扫描，因此具有更大的探测范围。
- 雷达电子扫描对目标俯仰角的探测精度要明显高于雷达机械扫描。对于目标方位角来说，由于两种扫描方式都能进行水平方向的扫描，因此只要能接收到回波信号，两种扫描方式的探测结果不会存在很大偏差。但是雷达机械扫描无法进行垂直方向上的扫描，只能大致确定目标的俯仰角在天线主瓣宽度范围之内，存在 $\pm 3^\circ$ 的误差，雷达电子扫描则可通过垂直方向上的扫描精确确定目标俯仰角的具体数据。

### 3. 数据统计分析

在实验完全结束后可以查看实验最终得分以及能力分析，如下图所示：

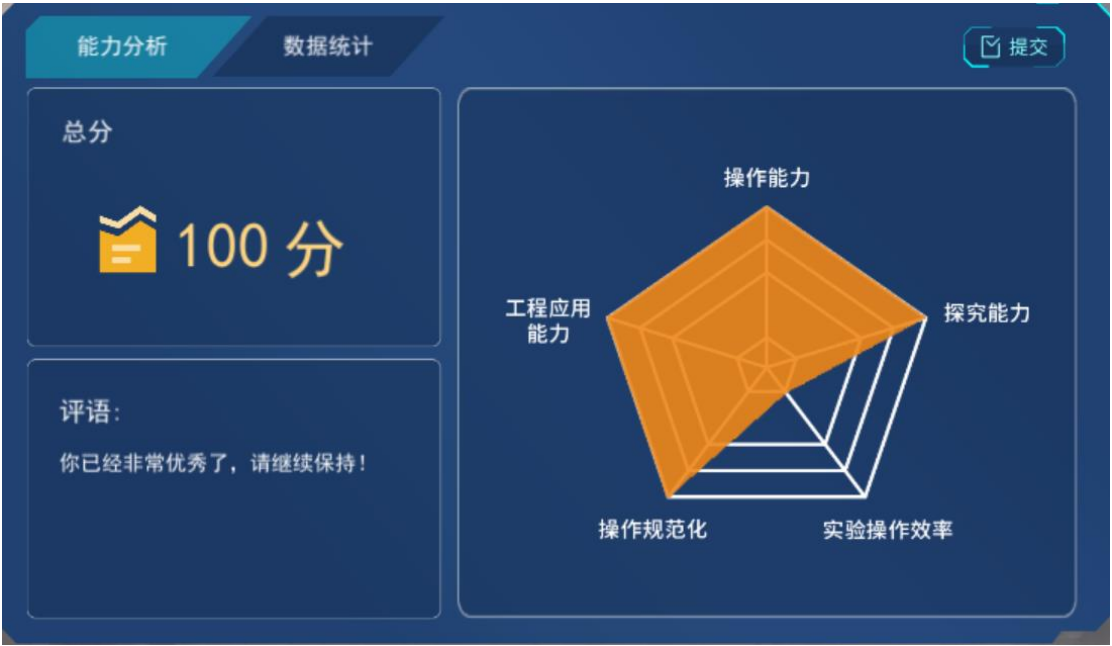


图 63：实验最终得分及能力分析

我最终的实验成绩为 100 分，除实验操作效率各项指标均为最优。实验操作效率较低是因为实验过程中途休息，导致实验用时过长。与此同时在数据统计处可以看到自己各个环节的操作次数、操作时长以及得分情况。



图 63：实验数据统计

## 二、我的实验探究心得

完成《预警机载相控阵雷达目标精确探测》虚拟仿真实验后，我不仅系统掌握了预警机雷达探测的基本原理与实操技能，更获得了全新的学习体验，对工程技术的学习和探究有了更深刻的认知。

在知识与技能层面，这次的虚拟仿真实验从雷达的制造原理到雷达应用技术，完整介绍了预警机雷达的相关知识和探测目标的操作方式。通过实验，我深入理解了雷达目标探测的基本原理，清晰掌握了雷达信号的传输方式。在

“仿真实验操作”模块中，我一步步完成了相控阵雷达的组装设计、馈电方案探究、雷达定标，直至通过机械扫描与电子扫描探测空中目标。最重要的是，我学会了根据回波信号提取关键数据（如时延、信号强度），结合定标数据与载机姿态，计算目标的方位角、俯仰角、距离、径向尺寸及雷达散射截面，真正将理论知识转化为解决实际问题的能力。

这次实验更让我感受到沉浸式学习的魅力，彻底改变了我对传统教学模式的认知。以往的课程多是“老师讲、学生听”，课堂上似乎理解了知识点，但课后很快遗忘，对抽象概念的理解不够深刻。而本次实验中，老师仅用少量时间讲解预警机雷达的基础原理与操作细节，更多知识则需要我们在虚拟操作中自主探索。比如学习波导辐射特性时，我通过旋转观察方向图、采集主瓣数据，直观理解了“主瓣宽度与方向性”的关系；探究扫描方式差异时，对比机械扫描（依赖机械结构的结构旋转、存在探测死角）与电子扫描（通过不同阵元相位差控制、扫描速度快且范围广）的探测效果，原本抽象的相控阵天线扫描原理瞬间变得具体。这种“做中学”的模式，让知识与实验流程深度融合，不仅记得牢，更能理解知识背后的逻辑。

虚拟仿真技术的应用，更是解决了传统实验难以突破的瓶颈。雷达实验涉及的知识体系复杂，且现实中搭建相控阵雷达、模拟不同高度与方位的目标探测，不仅成本极高，还受场地、设备限制，难以组织大规模实验。而本次虚拟仿真实验，以极低的时间与金钱成本，还原了接近真实的实验场景——从波导的三维动态工作示意图，到载机姿态调整、空中目标设置，每一个环节都贴近

工程实际。这种方式既实现了理论与实践的结合，又为我们提供了反复尝试的机会，极大提升了学习效率。

实验背后老师们的付出也让我深受触动，从波导电磁场的动态建模、雷达扫描场景的精细化布置，到实验数据的实时记录与图像绘制，每一处细节都能体现老师们的心血。在线下授课过程中，[ ]老师为我们详细讲解了电磁场的辐射原理、天线的分析与设计以及相控阵天线的扫描原理等理论知识，这是我们能够顺利完成实验的基础。在实验中遇到各种问题时，老师们也总能耐心解答。在此，我想向[ ]老师及虚拟仿真实验团队的所有老师表达由衷的感谢，是他们的付出，让我们能接触到如此精妙的实验，在轻松的氛围中掌握复杂的工程知识。

这次实验不仅是一次知识的学习，更是一次学习方法的创新和突破，为我提供了深刻的思考与启迪。我深刻体会到理论与实际相结合是学习应用工程技术的核心方法，在未来我还将继续努力，在其他专业课的学习和工程应用实践中取得更大的成绩！

## 三、虚拟仿真实验评价与优化改进方案

### 1. 实验评价

《预警机载相控阵雷达目标精确探测》虚拟仿真实验是北京理工大学一门深度融合电磁理论与工程实践的优质课程，依托高精度电磁仿真科研数据与虚拟现实技术，突破实体实验成本高、操作难度大的局限，以低成本、高效率的方式帮助学生系统掌握预警机雷达核心原理与应用，堪称新时代高校工程人才培养的典范项目。

虚拟仿真教学实验系统设计构架如下：



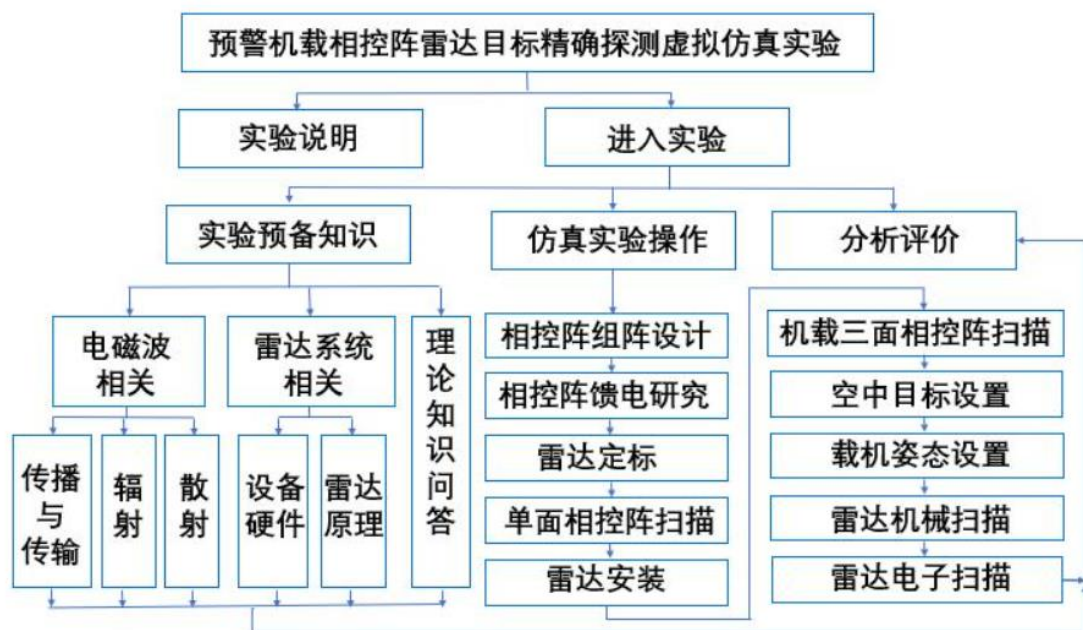


图 63：本虚拟仿真教学实验系统设计构架

在实验内容设计上，实验构建了“理论-实操-分析”的完整闭环：“实验预备知识”模块通过电磁波辐射、传播、散射及预警机雷达系统理论学习与答题考核，夯实学生知识基础；“仿真实验操作”模块涵盖相控阵组装设计、馈电方案探究、雷达定标、雷达机械/电子扫描探测等 10 余个核心环节，引导学生自主完成目标方位、距离、径向尺寸及雷达散射截面的测算；“数据统计分析”模块则助力学生复盘实验数据，深化认知。整套内容兼具系统性与探究性，能有效激发学生的钻研兴趣。

在实验教学效果上，实验设计符合学生认知规律，从理论铺垫到实操探索再到数据复盘，层层递进培养学生的自主创新能力与工程综合应用能力。实验过程中的即时反馈（如答题纠错、操作提示、数据核验），保障了知识传递的正确性与有效性，同时引导学生从工程视角分析载机姿态、馈电模式对雷达探测的影响，推动学生对预警机雷达探测原理的深入思考。

与此同时，实验还融入了价值观引领。通过预警机这一国防关键装备的探究，结合我国自主研发背景，让学生深刻认识雷达技术在国家安全领域的重要性，激发科技自信与“科技报国”的爱国情怀，实现知识传授、能力培养与价值塑造的有机统一。

## 2. 实验优化改进方案

从总体上来说，预警机雷达虚拟仿真实验系统已经相当完善。不过实验过程中我依然发现了一些小问题，现提出如下并给出我的改进方案

- **虚拟仿真实验系统没有存档功能。**这是我认为实验系统存在的最大一个问题。我在进行实验中就遇到了中途电脑死机，实验记录无法保存而必须从头进行实验的问题。没有存档功能意味着实验结束就必须从头实验，实验数据无法保存。与此同时虚拟仿真实验的主要探究部分主要在后半段，这就意味着要想在实验完成且退出系统后再想进行后面环节的探究就必须从头开始实验，增加了许多不必要的工作。为此，我强烈建议实验团队增加实验存档功能，可以保存之前的实验记录，使得下一次实验可以从上一次未做完的部分继续进行。
- 实验部分操作不够简便。在实验过程中我发现，所有涉及到带有滚动条的页面，如理论知识测试、部分答题板、安全手册阅读等截面，实验系统对于鼠标滚轮的反应比较迟钝，需要利用鼠标左键才能有效拖动页面。建议实验团队可以优化系统，提升对鼠标滚轮响应的灵敏度。第二个问题就是实验中许多重要的参数，如方向图主瓣的信息等，必须先采集再返回最后点击记录按键才能记录数据。我认为这个操作过程有点繁琐，并且如果忘记点击记录键时会影响后续实验的进行，建议实验团队增加采集数据后自动记录的功能。
- 帮助文档中雷达机械扫描和雷达电子扫描的计算公式存在一点小问题，相关修正意见已在公式(5)说明，在此不再赘述。
- 实验预备知识的介绍不够详细。在理论知识学习这一部分，主要通过图片和视频的方式演示，缺少必要的文字说明和公式推导。学生在学习完可能只对相关物理现象有一个直观上的感觉，而缺乏深层次的理解。与此同时，理论测试的题量过少且题目固定，对理论知识的检测和复习作用没有充分体现。为此我建议实验团队增加对理论知识的文字说明与公式推导，并且增大理论知识测试的题库容量，每次测试可随机抽取 10 道题进行，以此提高对理论知识的掌握和理解程度。