

浙江大学

本科实验报告

偶极子天线阵列仿真

课程名称:	天线理论与设计
姓名:	湛梓轩
学院:	信息与工程学院
专业:	电子科学与技术
学号:	3210105209
指导老师:	王浩刚

November 3, 2023

目 录

一、实验目的	3
二、阵列天线原理	3
三、偶极子阵列天线理论计算	3
四、建模与仿真步骤	4
1. 基本参数设置	4
2. 天线 3D 建模	4
3. 激励端口设置	5
4. 辐射边界设置	5
5. 天线阵列设置	5
6. 仿真设置	6
五、数据后处理与仿真分析	6
1. xz 平面辐射方向图	6
2. xy 平面辐射方向图	6
3. 3D 辐射方向图	7
4. 仿真分析	7
六、总结与感想	7

一、 实验目的

1. 理解阵列天线原理
2. 根据要求得到天线理论参数
3. 通过 HFSS 仿真进行验证

二、 阵列天线原理

单一天线的方向性是有限的，为适合各种场合的应用，将工作在同一频率的两个或两个以上的单个天线，按照一定的要求进行馈电和空间排列构成天线阵列，也叫天线阵。构成天线阵的天线辐射单元称为阵元。

天线阵的工作原理可以看成是电磁波（电磁场）的叠加。对几列电磁波来讲，当它们传到同一区域时，按照叠加原理，电磁波将产生矢量叠加。叠加结果不仅与各列电磁波的振幅大小有关，而且与它们在相遇区间内相互之间的相位差有关。

电磁波的相位组成包含三部分：时间相位，空间相位，初相位。就初相位来讲，当发射天线和工作频率确定后，其初相位就是确定的，而在几列电磁波相遇的时刻，时间相位也是确定的，只有空间相位可能发生变化，因为组成天线阵列的各单元天线位置不同，各自发出的电磁波传到同一接收区域时所走的空间路径不同，这样就会造成空间相位的数值大小不相同。正是由于位于不同位置上的发射天线所发出的电磁波传到同一接收区域造成的空间相位出现差别，必然引起几列电磁波在相遇区域形成同相位叠加，总场强增强，反相位叠加，总场强削弱。若总场强的增强和削弱区域在空间保持相对固定，就相当于用天线阵改变了单个天线的辐射场结构，这就是天线阵改变辐射场大小和方向性的原理。

三、 偶极子阵列天线理论计算

对于本次设计的偶极子天线阵列，其为直线阵列，可以通过位函数计算电磁场分布。电场分布与磁矢位和电标位之间的关系为：

$$E_e = -\nabla\phi - j\omega A$$

代入麦克斯韦方程组可得到波动方程：

$$\nabla^2\phi + k^2\phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla^2\phi + k^2\phi = -\mu_0 J$$

求出中间变量的空间分布后，利用“E”、“H”与中间变量的关系，即可求解出空间中电磁场的分布。远场区 $R \gg \lambda$ 为小量， ϕ 近似省略，因此有 $E = -j\omega A$ 。矢量位与“Z 轴”平行，远场区电场只有“ θ ”方向分量（电场远区封闭，“r”方向分量趋于 0），则有：

$$E_\theta = -j\omega \sin\theta \frac{\mu}{4\pi} \int J(r') \frac{e^{-jkR}}{R} ds'$$

据此，由于任意形式单元天线的远区辐射场可以统一表示为一下形式：

$$E_n = A_n f_0(\theta, \phi) \frac{e^{-jkR_n}}{R_n}$$

阵列的辐射总场可以简单的表示为各天线单元辐射场的叠加，即为：

$$E_T = \Sigma E_n = f_0(\theta, \phi) \Sigma A_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n}$$

天线单元的馈电部分可以表示为“复数”形式，则总场可以化简为：

$$E_T = \frac{e^{-jkr}}{r} f_0(\theta, \phi) S(\beta)$$

对于均匀直线阵，利用欧拉公式，阵因子可以化简为：

$$S(\beta) = I_0 \frac{\sin(Nu/2)}{\sin(u/2)}, u = kd \cos \beta + \alpha$$

当 u 趋近于 0 时，利用无穷小理论， $S(\beta) = NI_0$ 取最大值，为方向图的主瓣方向，主瓣指向可以利用 β_m 进行确定：

$$\beta_m = \arccos\left(-\frac{\alpha}{kd}\right)$$

通过该理论分析，我们可以根据题目所给参数进行相应参数的计算。当 $\theta_0 = 60^\circ$ 时，阵因子取最大值，则可得：

$$\beta = -\frac{\pi}{\lambda}d$$

同时，当 $-2\pi < \phi < 2\pi$ ，不会出现栅瓣，所以， d 应当要满足 $d < \frac{2}{3}\lambda$ 。

对于均匀线性阵，其激励幅度为 I ，相位差为 $\beta = -\frac{\pi}{\lambda}d$ ，在 d 取 $\lambda/2$ 时，天线单元间的步进相位为： $\beta = -\frac{\pi}{\lambda}d = -\pi/2$ ，故天线阵的单元激励为：

$$I_m = Ie^{jm\beta} = Ie^{-jm\beta\pi/2}$$

已知该天线阵列的半波带宽为 13° ，则：

$$\theta_h = \arccos\left[\cos \theta_0 - 0.443 \frac{\lambda}{L+d}\right] - \arccos\left[\cos \theta_0 + 0.443 \frac{\lambda}{L+d}\right] = 13$$

所以， $L+d = 5\lambda$ ，可得： $N=10$ 。

四、 建模与仿真步骤

1. 基本参数设置

根据以上理论计算，我们可以得到天线阵列的基本参数，其设置如图 1 所示：

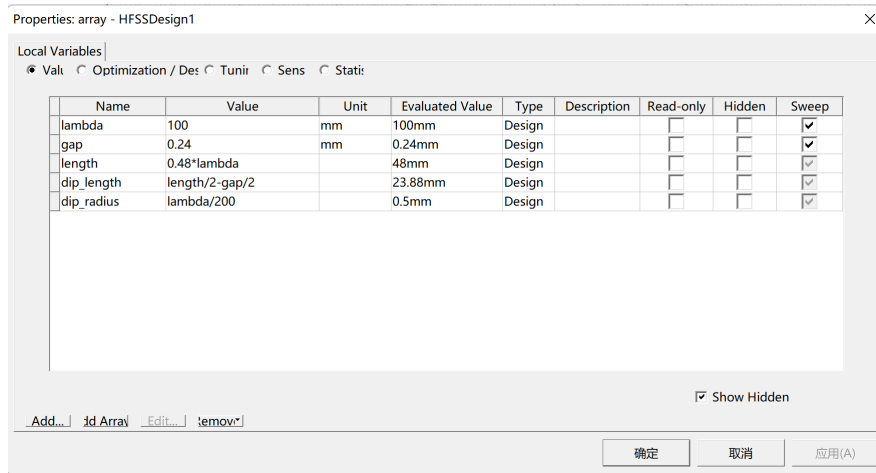


Figure 1: 基本参数设置

2. 天线 3D 建模

将工作平面设置在 XZ 平面，并沿 Y 轴绘制圆柱，中心点设置在 $(0, \text{gap}/2, 0)$ 处，半径和高度分别设置为 dip-radius 和 dip-length。最后通过关于 x 旋转 180° 得到单个偶极子天线。

3. 激励端口设置

将工作平面更改为 XY 平面，绘制一个矩形，并设置其中心点在原点，长宽分别为 dip-radius 和 gap，并将其设置为 lumped port，设置如图 2 所示的激励积分路径。

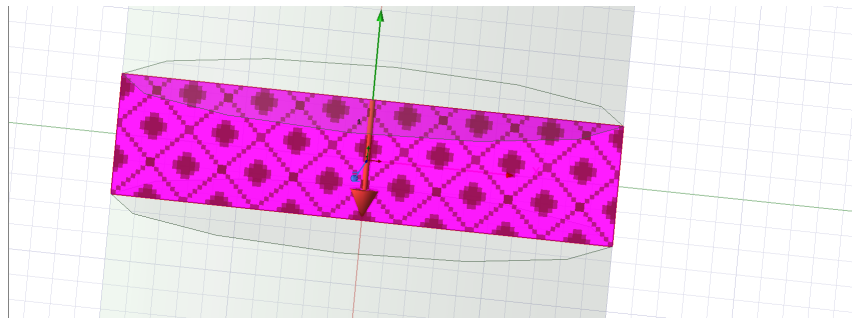


Figure 2: 激励端口设置

4. 辐射边界设置

通过 draw reign, 设置其为 absolute offset, value 为 $\lambda/4$ 获得方形边界，并设置边界模式为 radiation，最终得到单个偶极子天线的辐射边界。

5. 天线阵列设置

在工程树的 radiation 处选择 array set, 并设置其沿 z 轴拓展，拓展个数为 10 个，即间隔为 0.5 个 λ ，最终获得天线阵列，如图 3 所示。

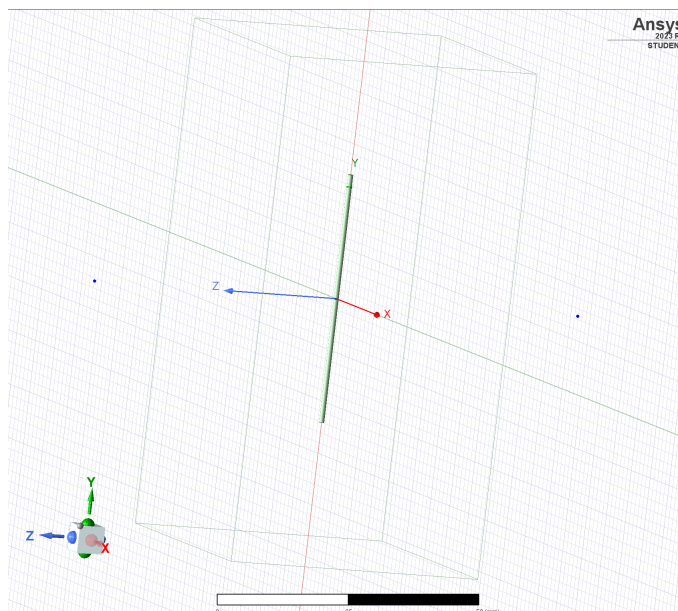


Figure 3: 偶极子天线阵列建模

6. 仿真设置

在工程树下的 analyze 中添加仿真设置，设置仿真频率为 3GHz，输入阻抗为 73.9Ω ，并线性扫描 2.5 到 3.5GHz 范围内的 1000 个点。

五、 数据后处理与仿真分析

1. xz 平面辐射方向图

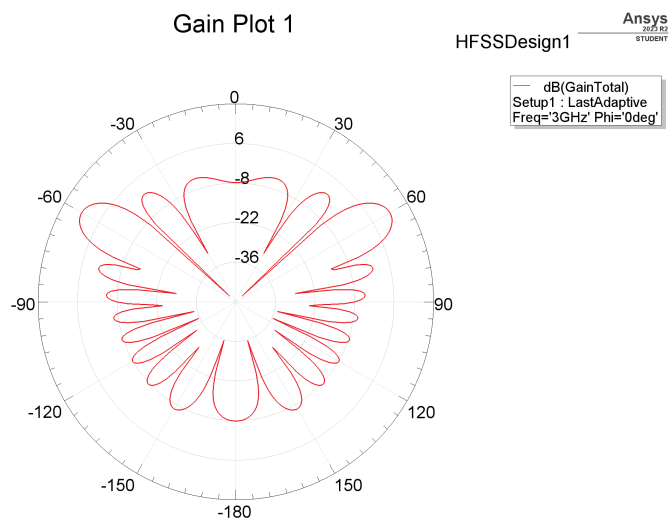


Figure 4: xz 平面辐射方向图

2. xy 平面辐射方向图

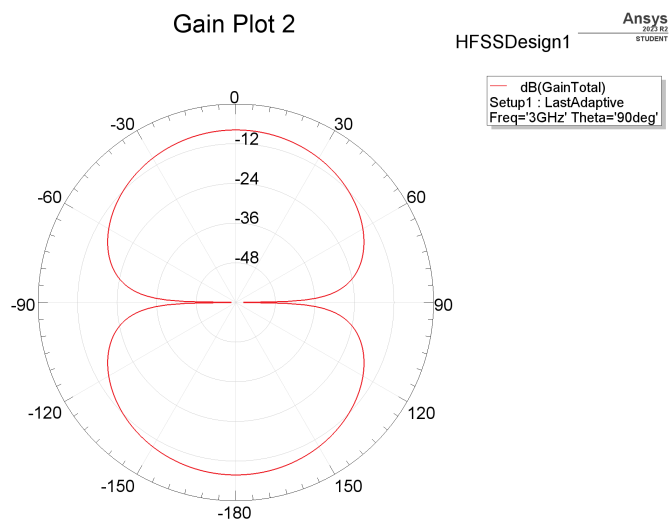


Figure 5: xy 平面辐射方向图

3. 3D 辐射方向图

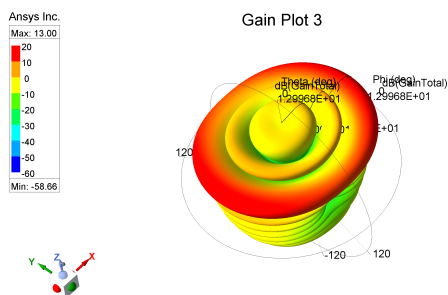


Figure 6: 辐射方向图顶面

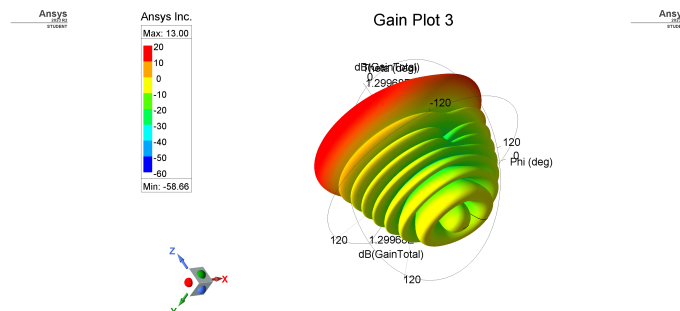


Figure 7: 辐射方向图底面

4. 仿真分析

从 XZ 平面的辐射方向图中，可以看出，其辐射增益最大时， $\theta = 60 \text{ deg}$ ，最大值为 13dB，同理论分析相差不远，符合题目的要求。同时，从天线辐射增益中可以看出，其在 Z 方向和 y 方向上都有高度的对称性。最后，从 3D 图中可以看出，偶极子天线阵列的方向性较好，在上半平面增益较大，下半平面增益很小。

六、 总结与感想

在本次的仿真实验中，是先根据设计要求，通过理论计算得到天线参数，再进行仿真验证，同实际天线设计的流程更为相似，我从中收获颇多。不仅对天线阵列的原理有了更加深入的了解，也了解到理论计算和仿真以及实际天线中还是存在一定的差距。