



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

# 电磁场与微波技术综合实验课程

## 一半波偶极子天线与阵列仿真实验

李建星

电磁与信息技术研究所

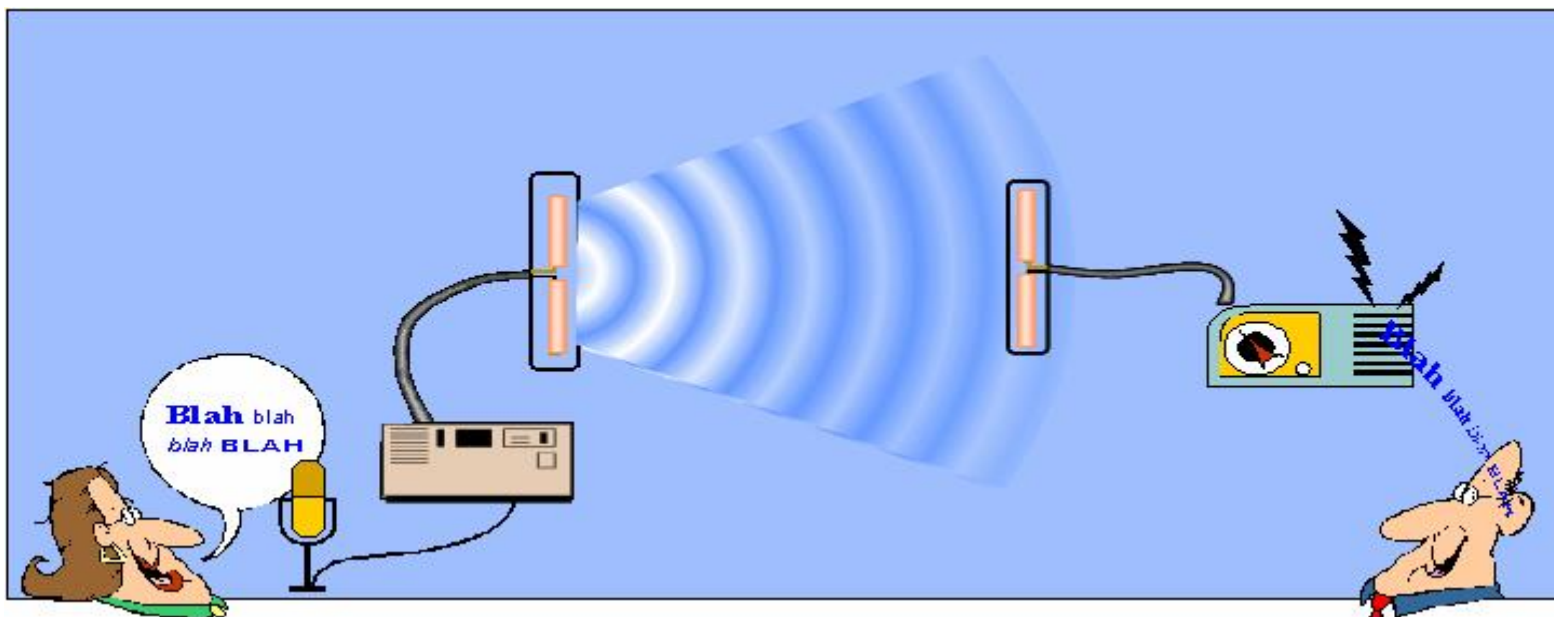
西安交通大学





# 天线的定义

- **发射天线**是将传输线中的高频电磁能转成为自由空间电磁波的装置
- **接收天线**是将自由空间电磁波转化成为传输线中高频电磁能的装置

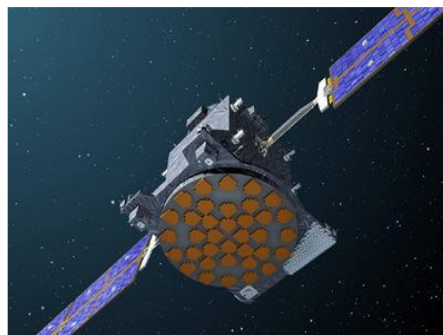


**天线本质：导行波与自由空间电磁波相互转换的换能器**



# 天线的用途

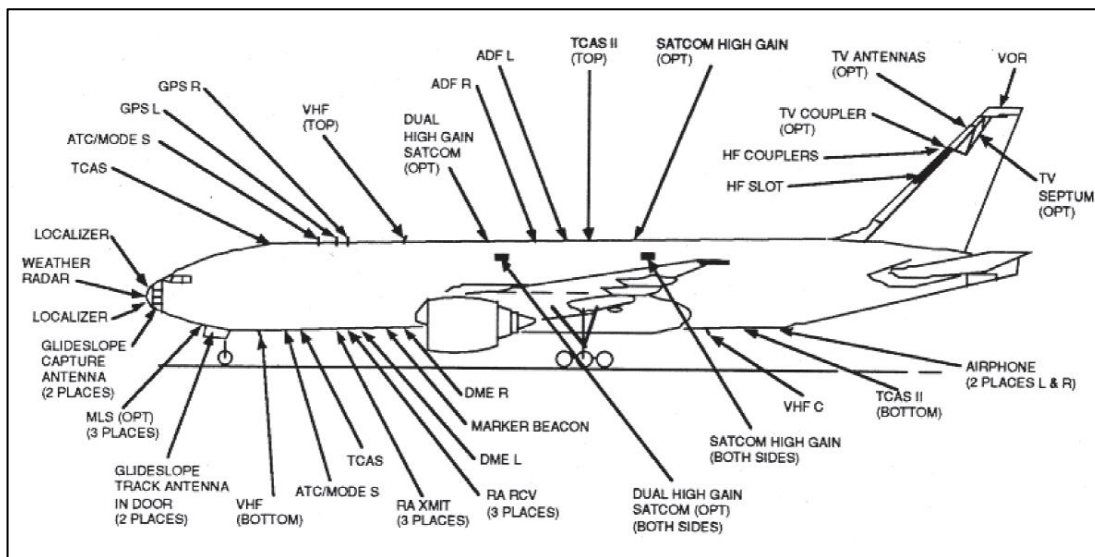
- 任何无线通信系统都需要利用无线电波传播信息。因此，**天线是无线通信系统不可或缺的关键部件。**





# 天线的用途

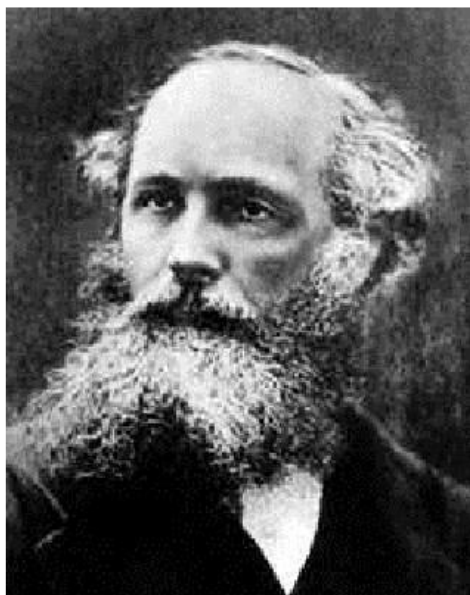
- 一架典型军用飞机的天线**多达上百种**：全球卫星定位系统、无线电高度表、微波着陆系统、气象雷达、甚高频全向信标、防撞系统、无线电话、测距机、自动方位搜寻系统、空中预警系统、模式应答机、卫星通信系统





# 天线的发展简史

- 1864年，麦克斯韦（James Clerk Maxwell）提出了著名的电磁场方程组，预示了电磁波的存在。



麦克斯韦

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (法拉第定律)}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \text{ (安培定律)}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \text{ (电高斯定律)}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (磁高斯定律)}$$



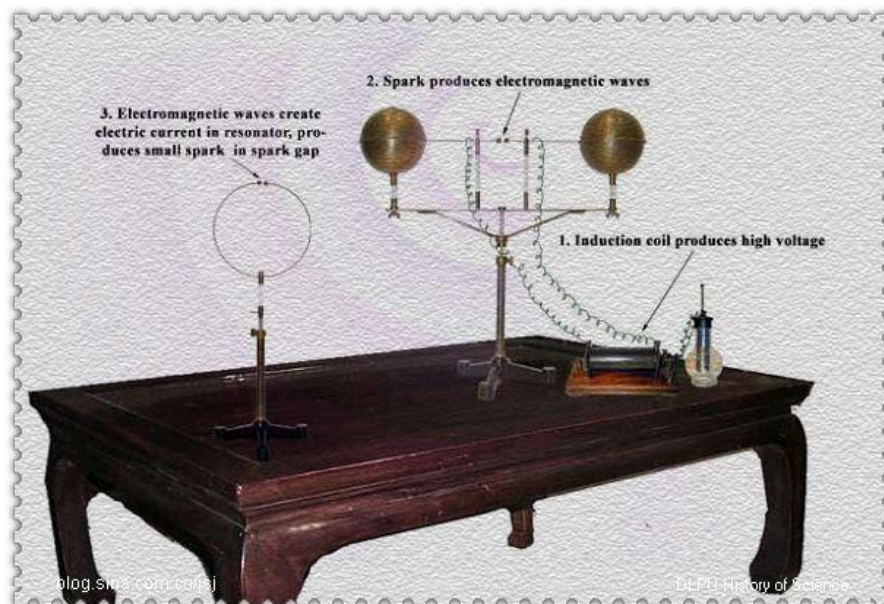


# 天线的发展简史

- 1865年，赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）采用电火花间隙发射机和环形天线，验证了电磁波的存在。



赫兹





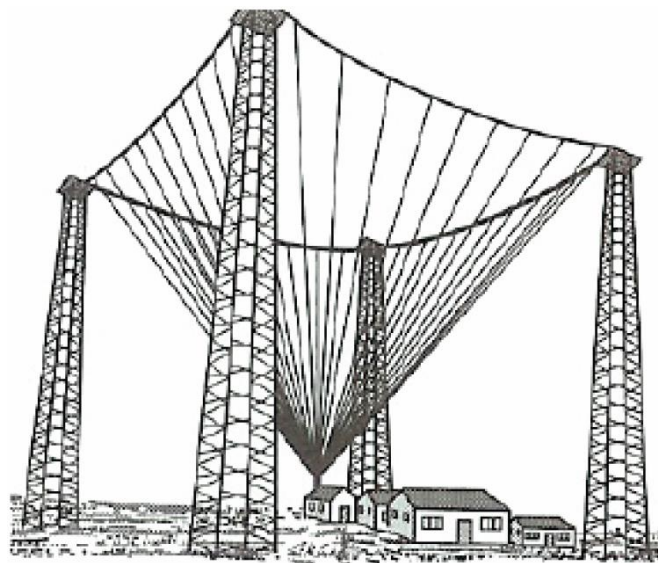
# 天线的发展简史

- 1901年，马可尼（Guglielmo Marconi）成功实现横穿大西洋（英国—加拿大）的无线电通信。

英国的**发射天线**由50根斜拉导线组成，用悬于60米高的木塔间的钢索支撑。位于加拿大的**接收天线**是200米长的导线，由风筝牵引。



马可尼





# 天线的发展简史

- 1980年，美国新墨西哥州世界第一个射电天文望远镜—超大抛物面天线阵列（VLA）

由27面直径为25米的抛物面按Y型方式排列组成，分辨率相当于36千米跨度的天线，灵敏度相当于直径为130米的碟型天线





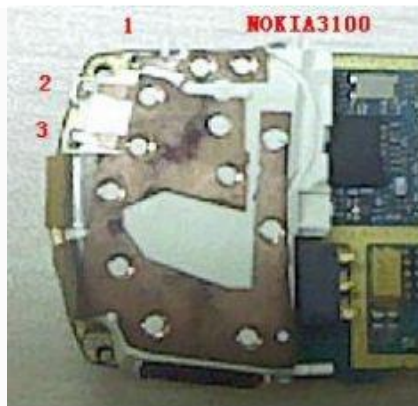


# 天线的发展简史

## ■ 2000年后，天线进入新的发展纪元

电磁数值计算方法的引入极大地推进了天线技术的发展，促进了天线分析和设计技术的逐渐成熟。

现代天线设计已经跨入一个整体系统级的设计阶段。天线正在朝向**小型化、宽频带、多频段、高频率、多功能**的趋势发展。





# 天线的发展简史

## ■ 八木-宇田天线 (Yagi-Uda Antenna)

高指向性天线

日本东北大学



八木秀次



宇田新太郎

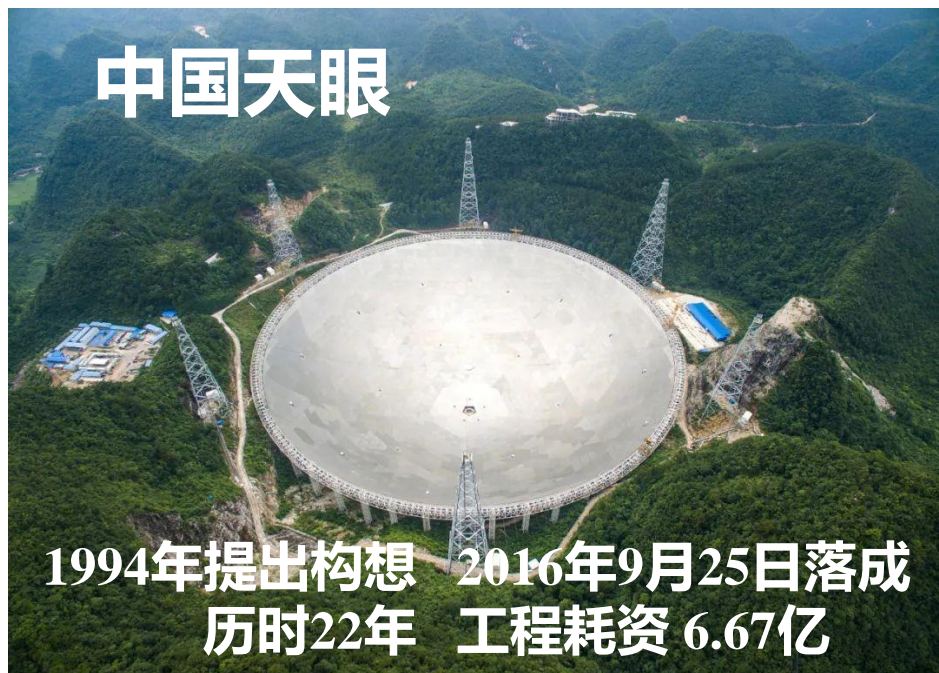


二战盟军使用八木-宇田天线  
阵列的探照灯控制雷达



# 天线的发展简史

- 500米口径球面射电天文望远镜 (Five Hundred Meters Aperture Spherical Telescope, FAST)



**FAST之父—南仁东**

中国科学院国家天文台主导建设，具有我国自主知识产权、世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜，能够接收到137亿光年以外的电磁信号，观测范围可达宇宙边缘，有望搜索 15万光年内存在外星人。

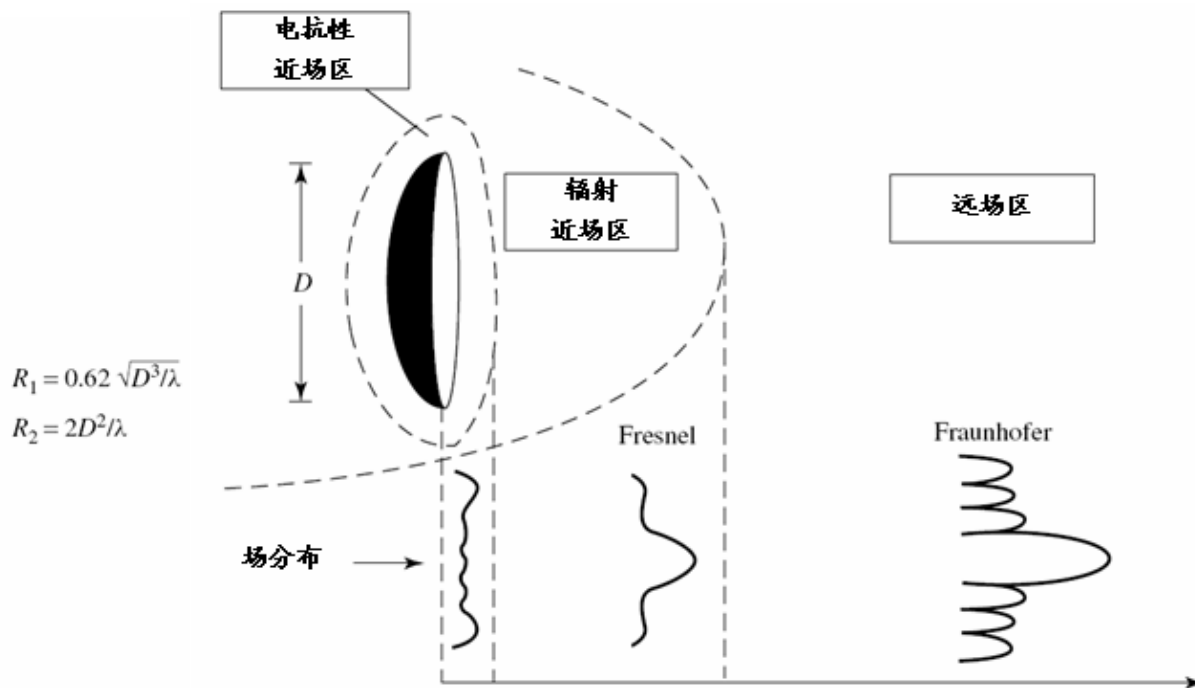
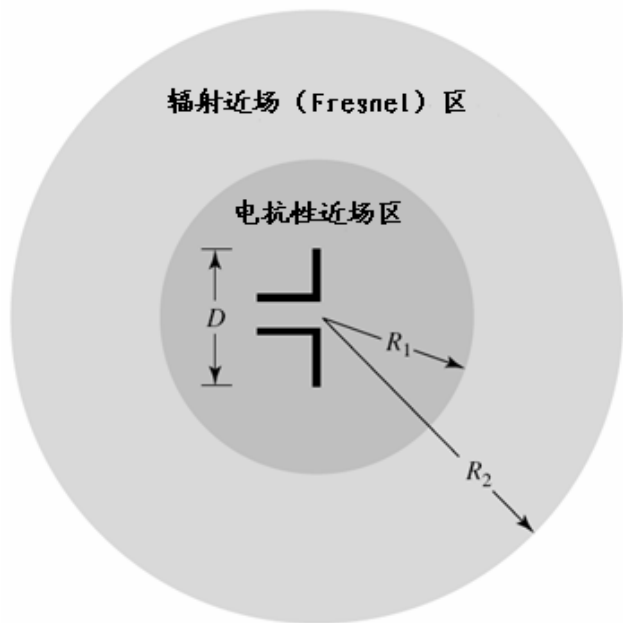


# 天线的辐射场

远场 (Fraunhofer) 区

辐射近场 (Fresnel) 区

电抗性近场区



- **电抗性近场区**：  $R < R_1$ ，天线与大部分能量的场相互作用
- **辐射近场(Fresnel)区**：  $R_1 \leq R < R_2$ ，场方向图随着半径变化，而且在传播方向上有场分量
- **远场(Fraunhofer)区**：  $R \geq R_2$ ，场方向图基本没有变化，传播平面波



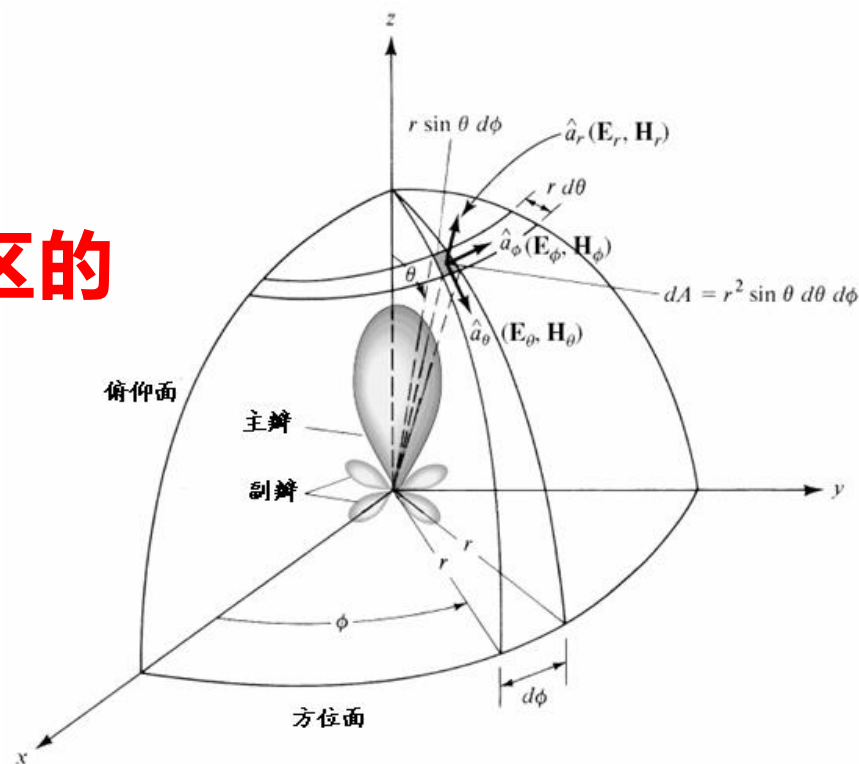


# 天线的电参数

## ■ 辐射方向图

天线的**辐射特性**是关于**空间坐标**的函数，在一个**固定距离**上，此函数通过**数学函数**或者**图形**描述，则得到的数学函数或者图形即为辐射方向图，简称方向图。

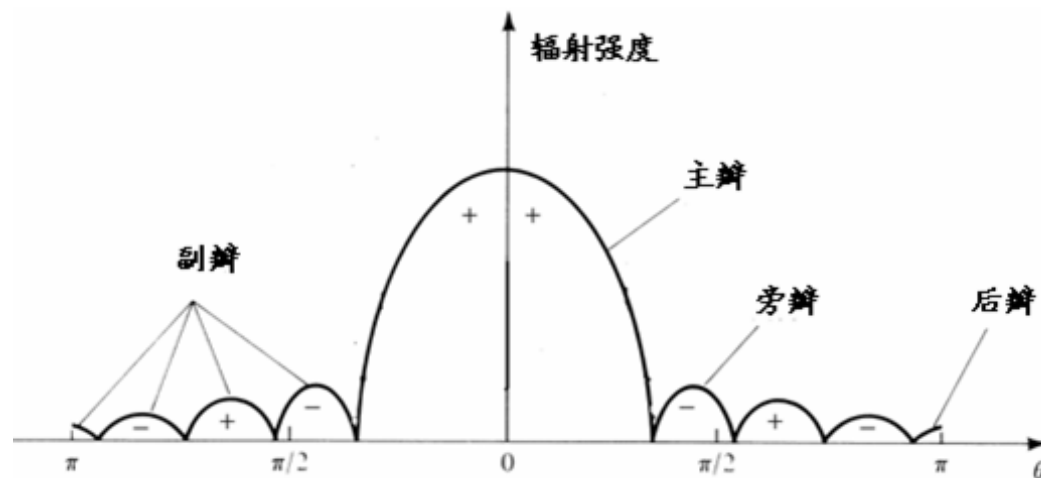
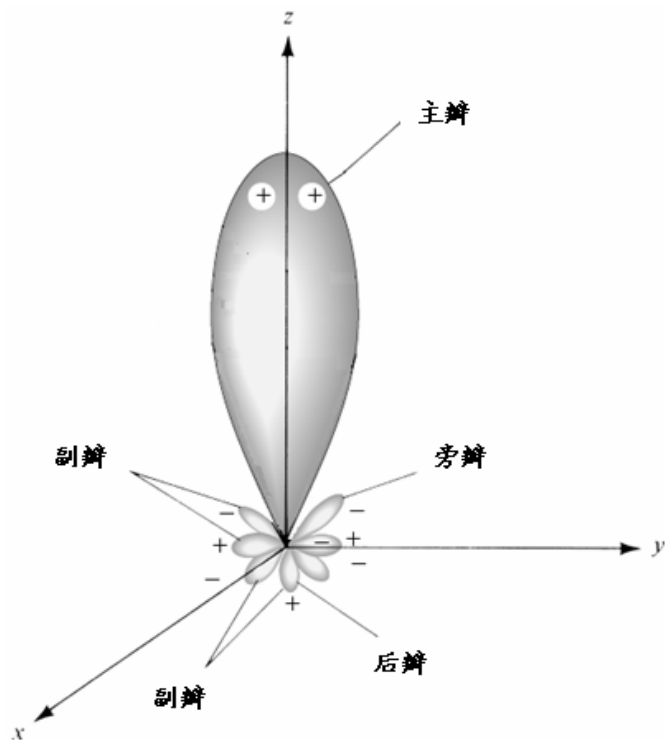
**辐射方向图是指天线在远场区的方向图，与半径距离无关。**





# 天线的电参数

## ■ 辐射方向图波瓣



**主瓣**是指包含最大辐射方向的波瓣，其余叫**副瓣**，与主瓣相反方向上的副瓣叫**后瓣**

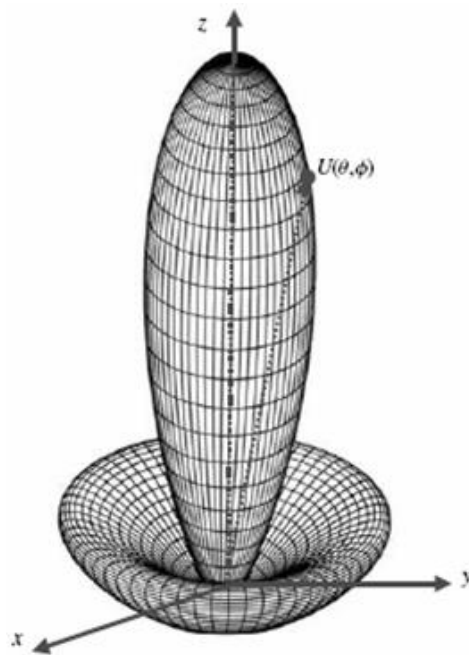


# 天线的电参数

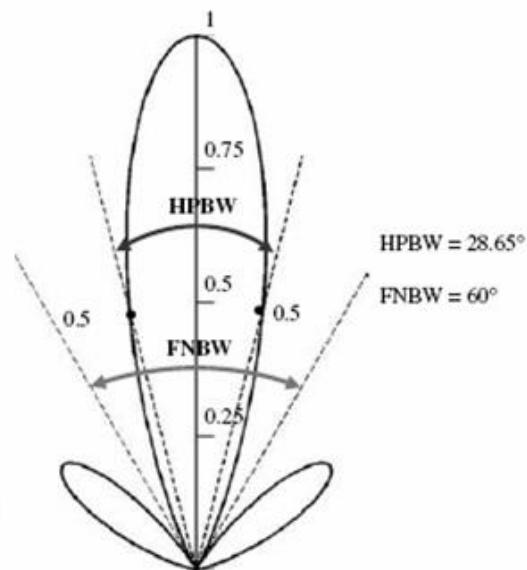
## ■ 波瓣宽度

**半功率波瓣宽度：**主瓣最大值两边场强等于最大场强的0.707倍（最大功率密度的0.5倍）的两辐射方向之间的夹角，表示为 $2\theta_{0.5}$

**零功率波瓣宽度：**主瓣最大值两边两个零辐射方向之间的夹角，表示为 $2\theta_0$



(a) 三维功率方向图



(b) 二维功率方向图



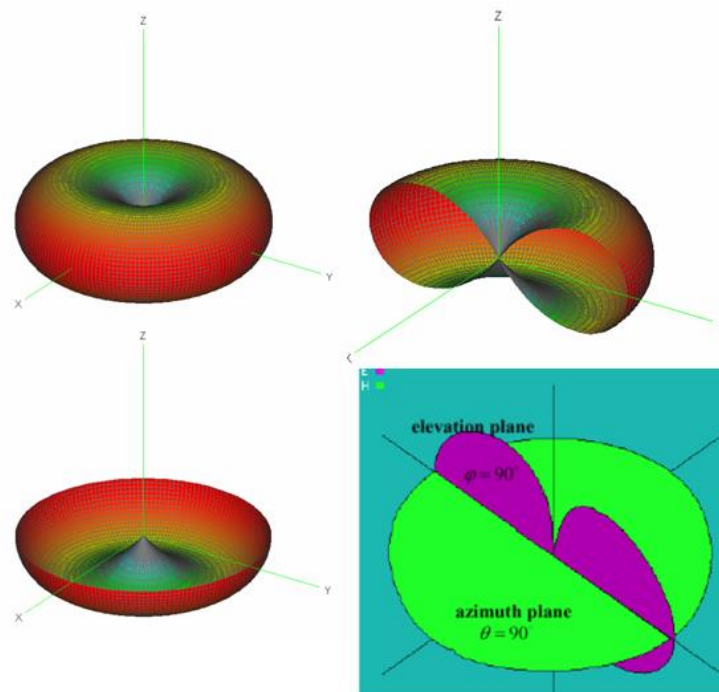
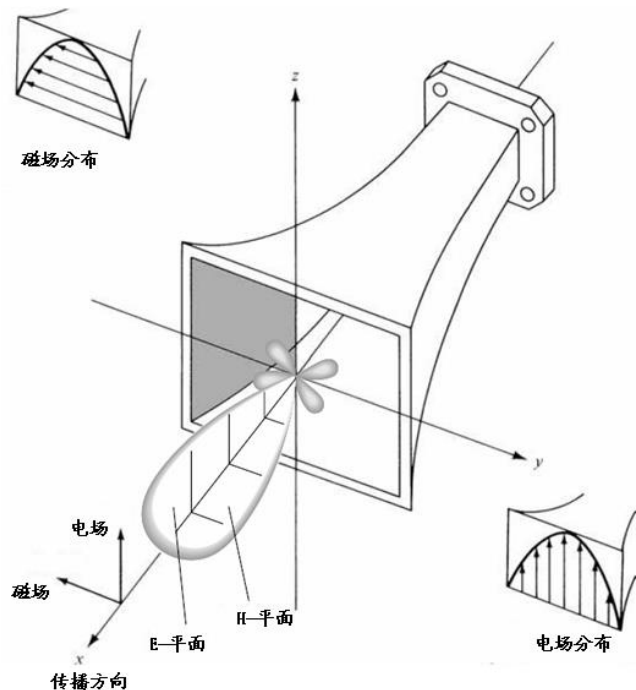
# 天线的电参数

## ■ E面、H面方向图

以E平面和H平面为主平面的二维方向图叫做E-面和H-面方向图。

E-平面：通过**最大辐射方向与电场矢量方向**构成的平面。

H-平面：通过**最大辐射方向与磁场矢量方向**构成的平面。



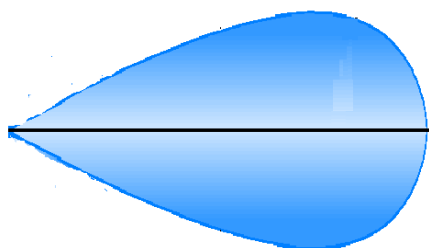
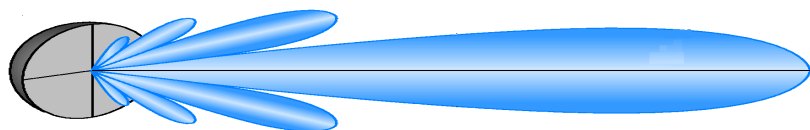




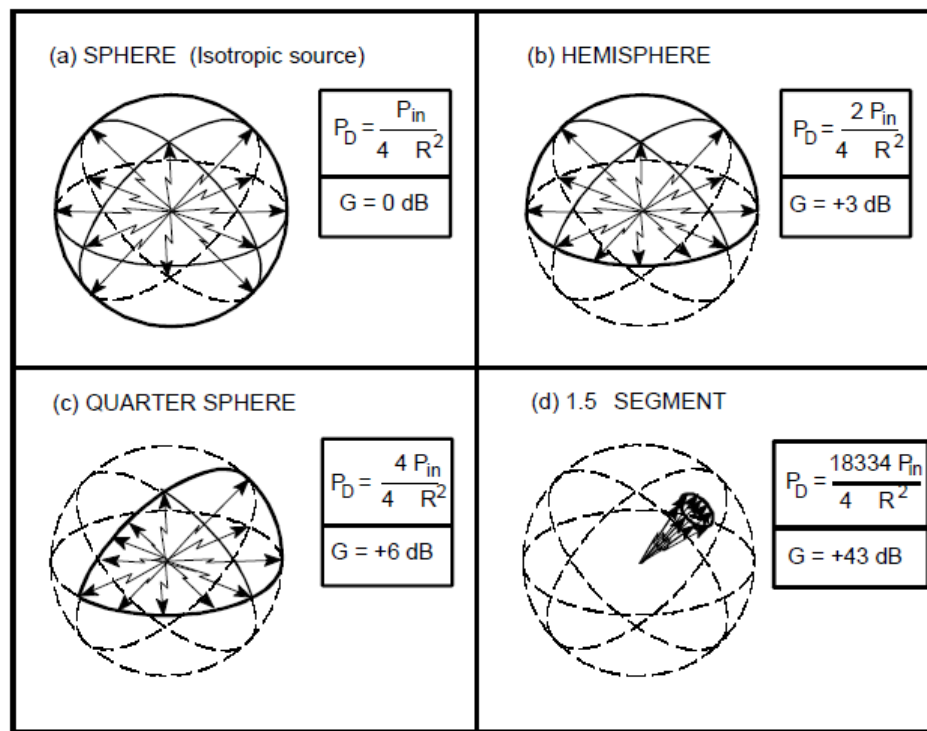
# 天线的电参数

## ■ 方向图系数

方向性系数是定量表示天线辐射的**电磁能量集中程度**以描述方向特性的一个参数。



***D: Directivity***

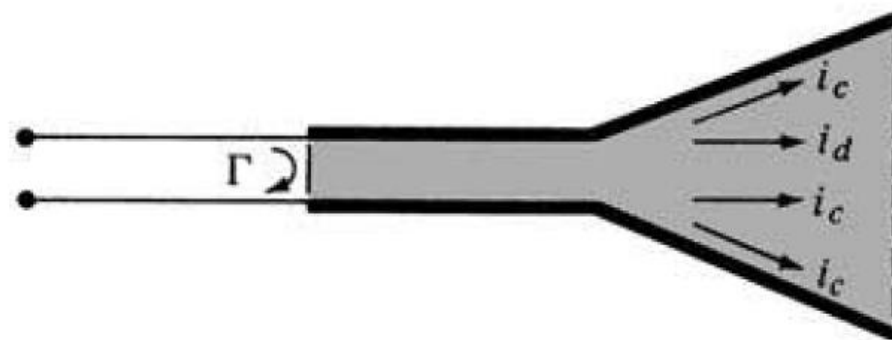
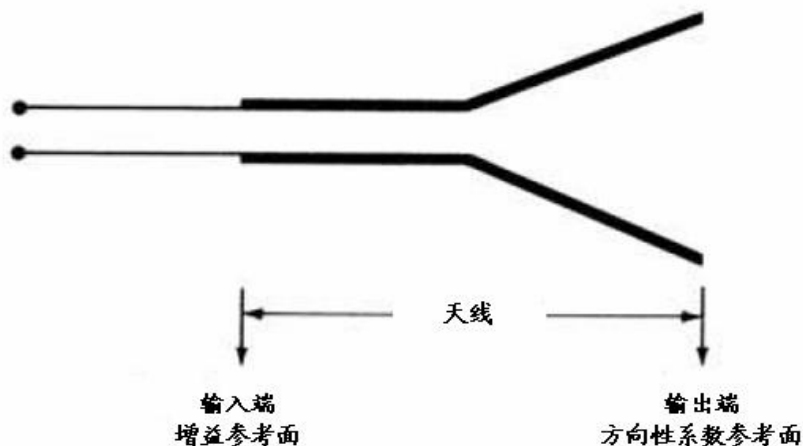




# 天线的电参数

## ■ 辐射效率

表征天线将**导波能量转化为无线电波能量**的有效程度。天线的辐射效率为天线的辐射功率与天线净输入功率之比。



$\eta$



# 天线的电参数

## ■ 增益

在相同的净输入功率条件下，天线在给定方向上的辐射强度与理想点的辐射强度之比。

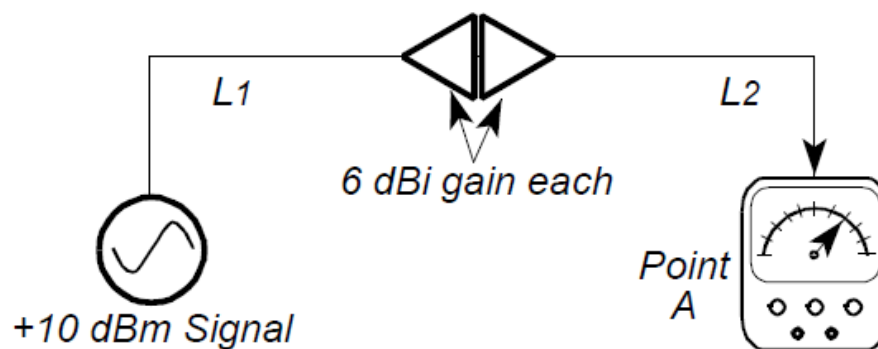
*G: Gain*

$$G = \eta D$$

Example Problem: If the two antennas in the drawing are “welded” together, how much power will be measured at point A?  
(Line loss  $L_1 = L_2 = 0.5$ , and  $10\log L_1$  or  $L_2 = 3$  dB)

Multiple choice:

- A. 16 dBm      b. 28 dBm      c. 4 dBm      d. 10 dBm      e. < 4 dBm





# 天线的电参数

## ■ 输入阻抗

天线作为负载，在输入端口呈现出的阻抗，包含实部和虚部：

$$Z_{in} = Z_A = R_A + jX_A \quad \text{频率的函数}$$

输入阻抗的实部一般分成为**辐射电阻**和**损耗电阻**两部分，即：

$$R_A = R_r + R_L$$

**反射系数**是表征天线输入阻抗与馈电线阻抗匹配程度的参数：

**反射系数**  $\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$

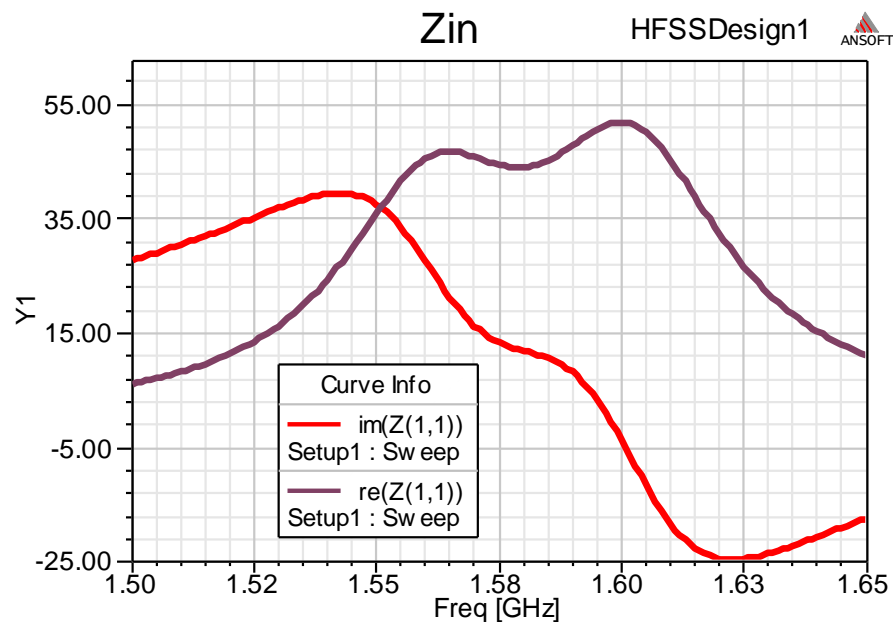
**驻波比**  $VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$



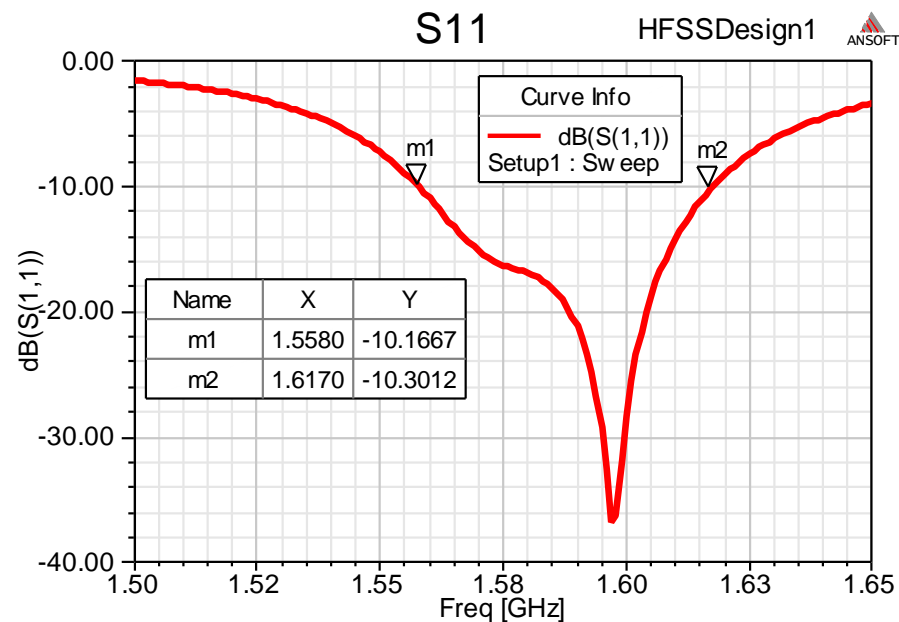


# 天线的电参数

## ■ 输入阻抗



输入阻抗



反射系数



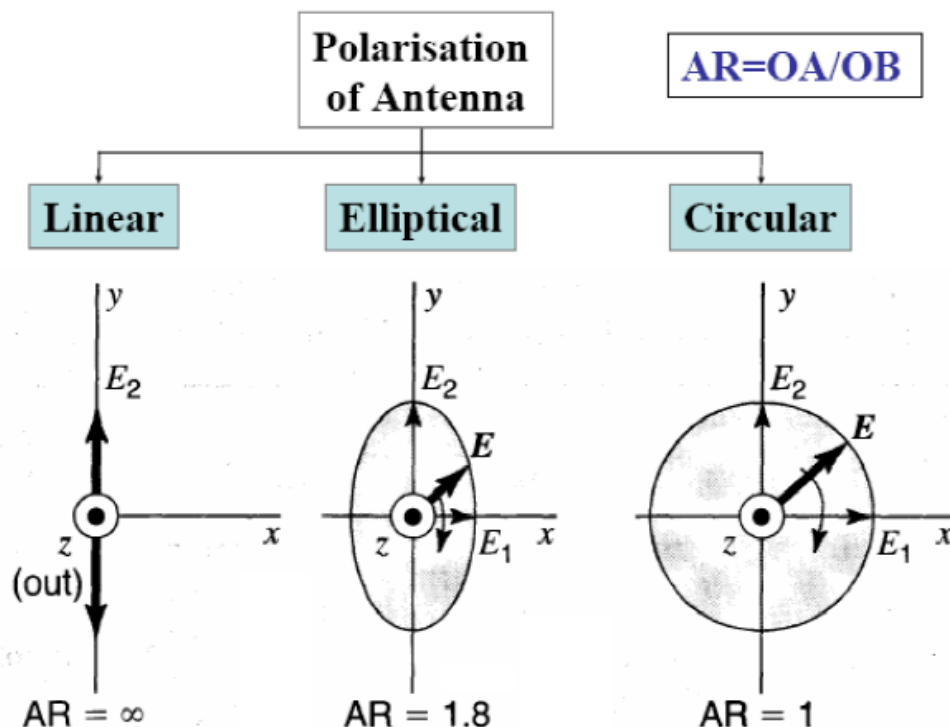
# 天线的电参数

## ■ 天线极化

**发射天线**：天线在某方向所辐射电波的极化；

**接收天线**：天线在该方向接收获得最大接收功率（极化匹配）时入射平面波的极化。

不存在理想的线极化天线和理想的圆极化天线





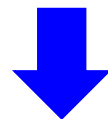
# 天线的全波电磁仿真

## ■ 主流的全波电磁仿真软件

### 电磁数值计算方法

频域方法：有限元法（FEM）、矩量法（MoM）、有限差分法（FDM）、边界元法（BEM）、传输线法（TLM）

时域方法：时域有限差分法（FDTD）、时域有限积分法（FITD）



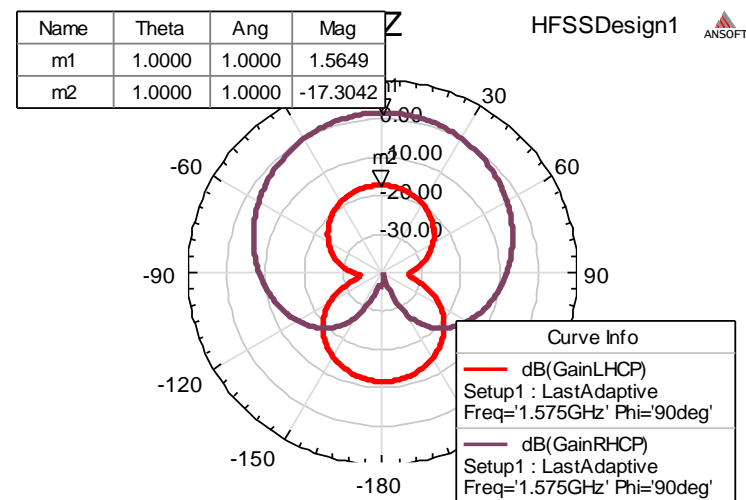
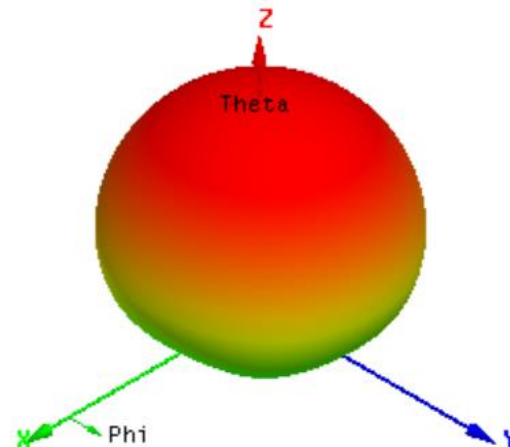
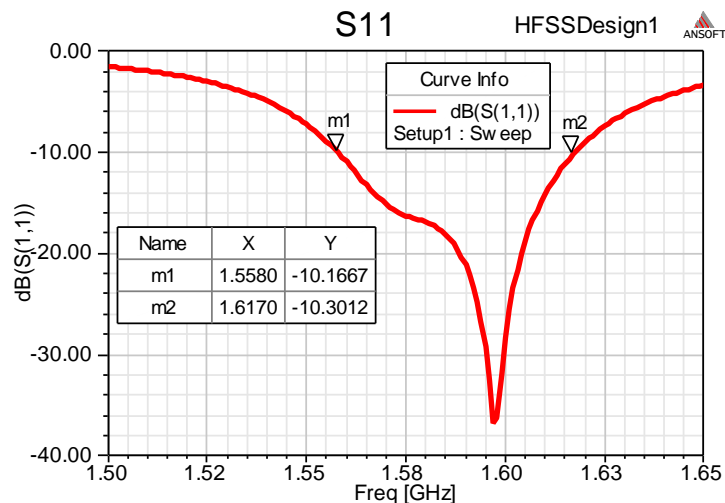
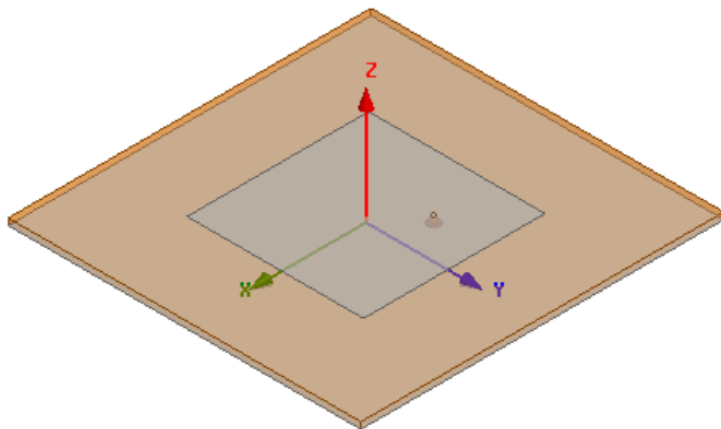
### 商业软件

**ANSYS-Ansoft HFSS CST Microwave Studio FEKO XFDTD**  
IE3D ADS ...



# 天线的全波电磁仿真

## ■ 以ANSYS-Ansoft-HFSS为例

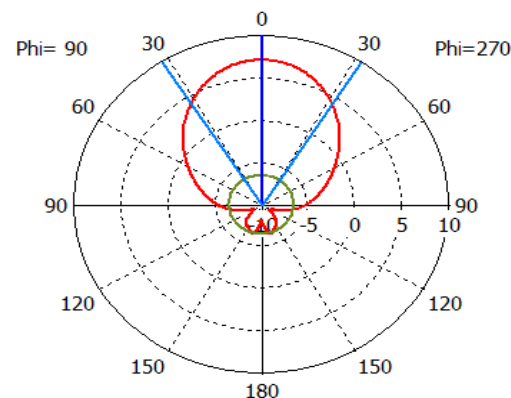
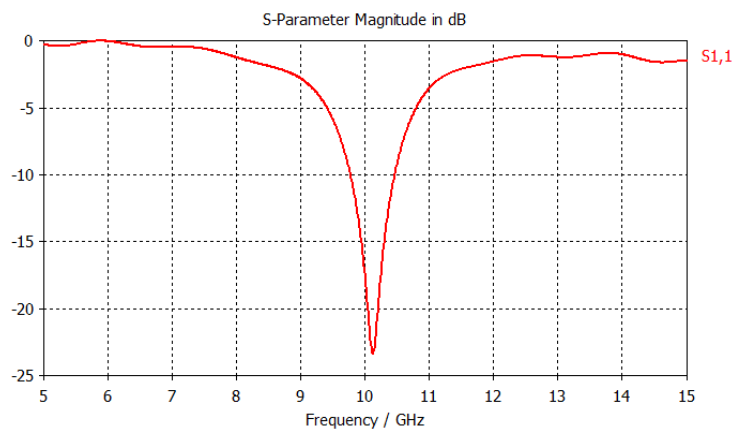
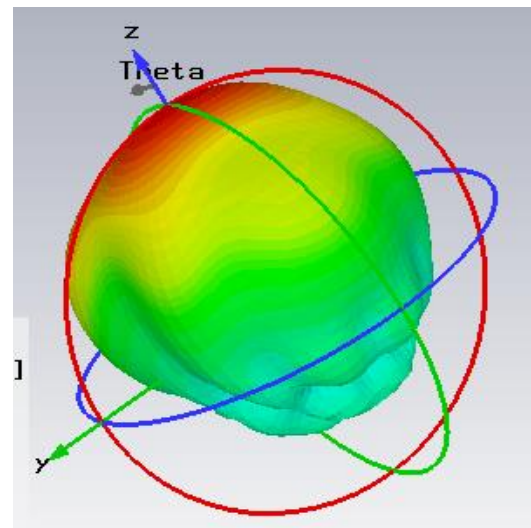
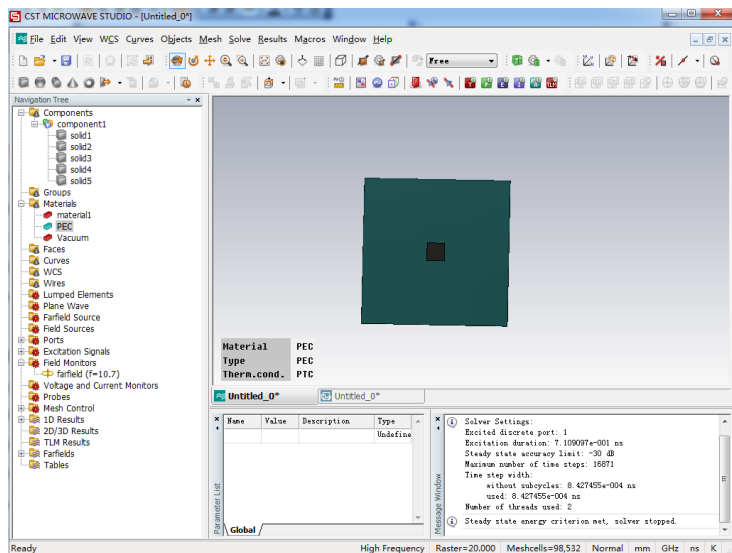






# 天线的全波电磁仿真

## ■ 以CST Microwave Studio为例

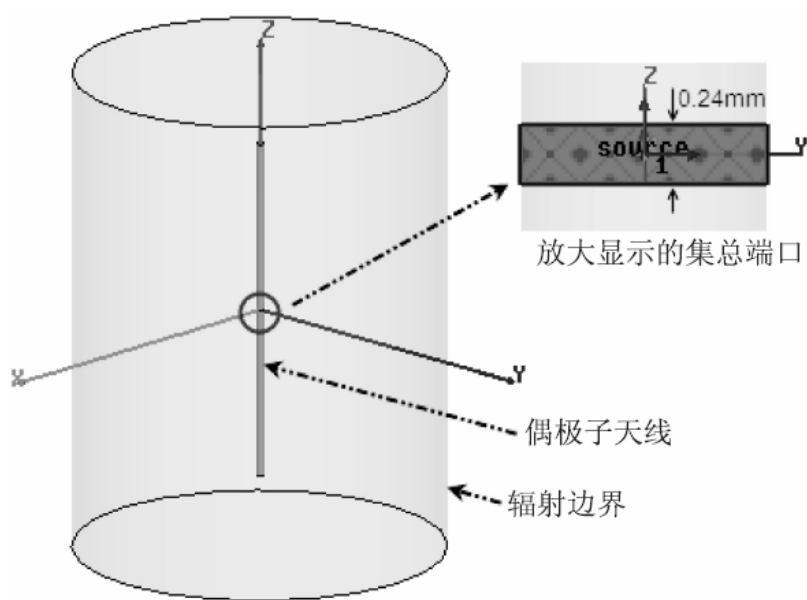




# 半波偶极子天线与阵列仿真实验（1）

## ■ 半波偶极子天线仿真

设计一个中心频率3GHz的半波偶极子天线，天线材质使用理想导体，总长度 $0.48\lambda$ ，半径为 $\lambda/200$ ，集总端口馈电，端口距离 $0.24\text{mm}$ ，辐射边界和天线距离 $\lambda/4$ 。**试仿真天线的反射系数、输入阻抗和辐射方向图。**

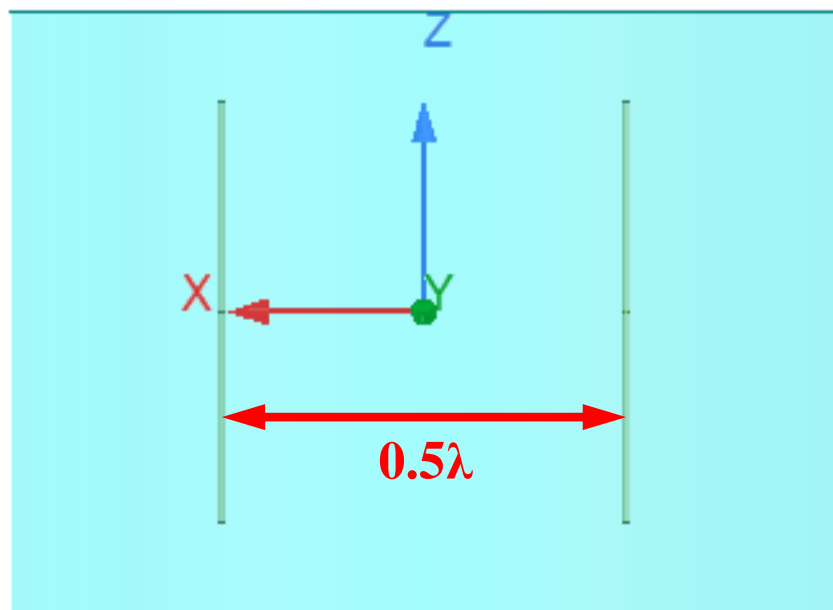




# 半波偶极子天线与阵列仿真实验（2）

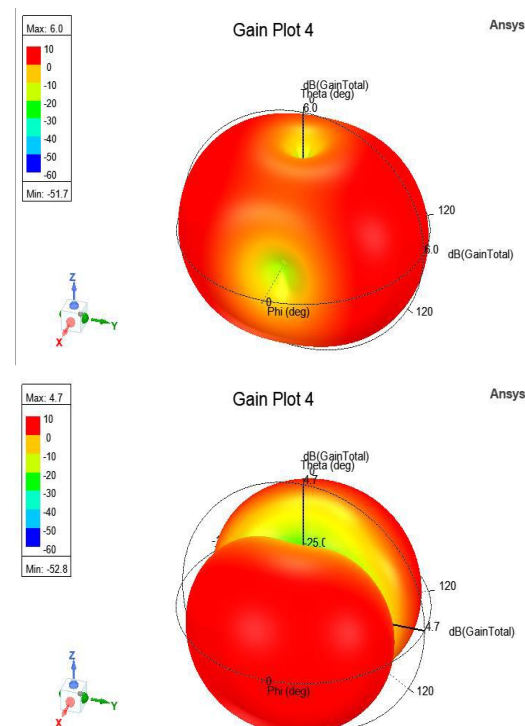
## ■ 半波偶极子天线阵列仿真

利用上述半波偶极子天线，组成二元阵，阵元中心间距 $0.5\lambda$ ，**仿真二元阵的方向图**；改变阵元的激励相位，观察阵列方向图的变化情况。



等幅同相

等幅反相





# 实验报告提纲

1. 实验目的，实验内容；（10分）
2. 简述描述天线性能的电参数及其物理含义；（20分）
3. 半波偶极子天线性能参数的仿真结果；（30）
4. 半波偶极子阵列性能参数的仿真结果；（30）
5. 分析不同激励相位下，半波偶极子阵列方向图差异的原因；（10）
6. 注意事项：报告可打印，同时注明同组实验同学姓名。