

# 现代无线通信

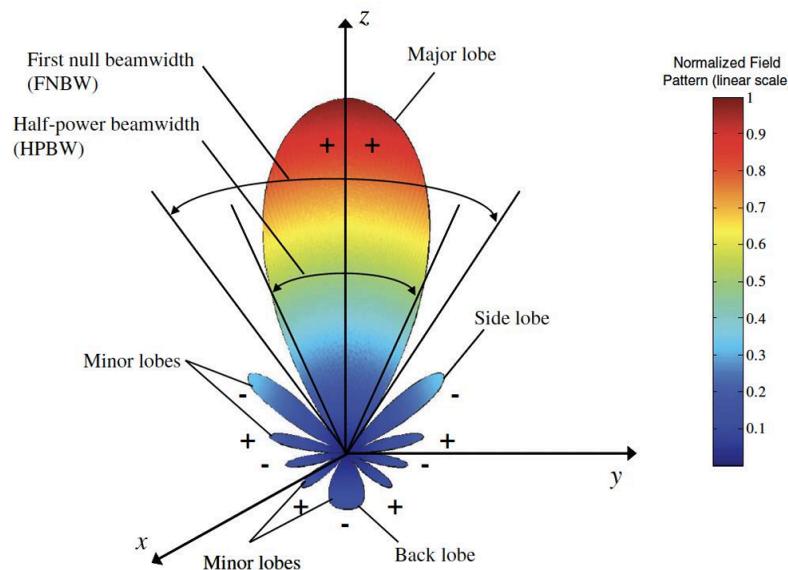
## 1. 天线与传播

### 1.1 天线基础

- 天线 (Antenna): 将电信号转换为电磁波 (发射) 或反之 (接受) 的过渡器件 (An antenna is a device that converts electrical signals into radio waves (for transmission) and vice versa (for reception).)
- 传输线 (Transmission line): 连接射频源与天线的专用电缆或波导 (A specialized cable or waveguide that connects the radio transmitter or receiver to the antenna)
  - 同轴电缆
  - 平行线
  - 波导

### 1.2 天线参数

- 天线辐射图:
  - 主瓣 (Major lobe): 辐射最强的方向
  - 旁瓣 (Side lobe): 非主方向的辐射
  - 波束宽度 (Beamwidth): HPBW & FNBW



- 场区划分：
  - 反应近场区 (Reactive near-field): 紧邻天线，电磁场以储能为主，适用于NFC、RFID等

$$R < 0.63\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

- 辐射近场区 (Radiating near-field): 又称菲涅尔 (Fresnel) 区，辐射开始形成

$$0.63\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < R < \frac{2D^2}{\lambda}$$

- 远场区 (Far-field): 又称夫琅禾费 (Fraunhofer) 区，辐射完全形成，用于大多数通信系统

$$\frac{2D^2}{\lambda} < R$$

- 方向性 (Directivity,  $D$ ): 远场参数，描述天线收束能量的能力
  - 各向同性天线 (Isotropic antenna): 理想均匀辐射模型 (球形，基本模型)
  - 全向天线 (Omnidirectional antenna): 水平面均匀辐射 (面包圈型)
  - 定向天线：将能量聚集到特定方向，方向性越大，波束越窄
- 增益 (Gain,  $G$ ): 考虑天线效益后，相对于各向同性天线的定向辐射能力
  - 公式： $e_{\text{tot}}$  为总效率

$$G = e_{\text{tot}} \cdot D$$

- 单位：dBi (相对于各向同性天线)、dBd (相对于偶极子)
- 同一天线，波束越窄，增益越大
- 阻抗 (Impedance): 天线输入端的电流与电压之比
  - 公式：

$$Z = R + jX$$

- R: 电阻部分，消耗或辐射能量
- X: 电抗部分，储存能量
- 阻抗匹配 (Impedance matched): 天线阻抗应与传输线阻抗匹配 (通常为 $50\Omega$ )，以实现最大功率传输
- 反射系数 (Reflection coefficient): 反映阻抗失配产生的能量反射
  - 公式：

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

- 回波损耗 (Return loss): 反射系数的对数形式 (通常要求其大于10dB)
  - 公式:

$$RL = -20 \log_{10}(|\Gamma|)$$

- 反射的功率:

$$P_r = 10^{-\frac{RL}{10}}$$

## 1.2 天线类型与设计

- 天线类型: 鞭状/单极子、偶极子、八木、环、喇叭、反射阵列、微带贴片、反射面 (碟形) 、MIMO、相控阵等
- 半波偶极天线 (Half-wave dipole antenna):
  - 总长度:

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

- 馈电阻抗 (Feed-point impedance): 约  $73\Omega$  (自由空间)
- 微带贴片天线 (Microstrip antenna):
  - 结构: 辐射贴片 (Patch) + 介质基板 (Substrate) + 接地板 (Ground plane) + 微带馈线 (Microstrip feed line)
  - 设计步骤:
    - 已知: 谐振频率  $f_r$ , 介电常数  $\epsilon_r$ , 基板高度  $h$
    - 贴片宽度  $W$ :

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

- 有效介电常数  $\epsilon_{refl}$ :

$$\epsilon_{refl} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}$$

- 长度延伸量  $\Delta L$ :

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{ref} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{ref} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

e. 实际长度  $L$ :

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{ref}}} - 2\Delta L$$

f. 根据  $Z_0 = 50\Omega$  计算馈带宽度  $W_f$  ( $t$  是贴片厚度) :

$$W_f = \frac{7.48 \times h}{e^{Z_0 \frac{\sqrt{\varepsilon_r} + 1.41}{87}}} - 1.25 \times t$$

g. 确定接地板尺寸

$$L_g = L + 6h$$

$$W_h = W + 6h$$

- 特点:

- 贴片形式多种多样
- 低剖面，易制造，成本低
- 端射 (Broadside) 辐射模式

## 1.3 传播方程

- 弗里斯传播方程 (Friss Transmission Equation):

- 描述自由空间中发射与接收功率的关系:

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

- 对数形式:

$$P_r(\text{dB}) = P_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) + G_t(\text{dB}) - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

- 假设条件: 自由空间, 无阻挡

## 1.4 卫星通信天线

- 组成
  - 空间段：卫星本身及星载天线
  - 地面段：地面站发射/接收天线
- 地面段天线类型：
  - 抛物面反射天线：高增益、窄波束
  - 馈电方式：卡塞格伦 (Cassegrain)、格雷戈里 (Gregorian)、前馈 (Front feed)、偏馈 (Offset feed)等
- 星载天线类型：
  - 反射面天线、喇叭天线、相控阵天线、反射阵列天线、贴片天线等

## 1.5 5G与MIMO天线

- 5G：
  - 第五代通信技术，支持增强移动宽带 (eMBB)，大规模机器通信 (mMTC)，超可靠低时延通信 (URLLC)
  - 频谱：
    - 低频段 (<1 GHz)：覆盖广
    - 中频段 (1~6 GHz)：平衡覆盖与容量
    - 高频段 (>24 GHz)：高速短距
- MIMO：
  - 天线配置：
    - SISO
    - SIMO
    - MISO
    - MIMO
  - MIMO信道模型：
    - 接受信号向量 (方程) :  $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W}$
    - $\mathbf{H}$ 为信道矩阵， $\mathbf{W}$ 为噪声矩阵
  - 空间分集 (Spatial diversity)：
    - 通过多个独立信道发送相同数据，提高可靠性 (分集增益 = 发射天线数 × 接收天线数) (Diversity Gain，理论上分集增益与分集路径相等)
  - 空间复用 (Spatial multiplexing)
    - 通过多个信道发送独立数据流，提高数据率 (复用增益)
- 大规模MIMO：

- 大规模MIMO (Massive MIMO): 基站部署大量天线 (数十至数百) , 提升频谱和能量效率
- 波束成形 (Beamforming): 通过调整天线阵列相位, 将波束指向特定用户, 增强信号并减少干扰
- 波分多址 (Beam Division Multiple Access, BDMA): 将波束分配给不同用户, 实现多址接入, 适用于5G高密度场景
- 波束导向 (Beam Steering): 通过电子相位控制动态改变波束方向, 用于跟踪移动目标
- 相控阵天线 (Phased Array Antenna):
  - 由多个天线单元组成, 通过电子控制相位实现波束扫描
  - 阵列增益公式 ( $N$ 为单元数,  $G_e$ 为单元增益,  $L$ 为损耗) :

$$\text{Array Gain} = 10 \log_{10}(N) + G_e - L_{ohmic} - L_{scan}$$