

现代无线通信

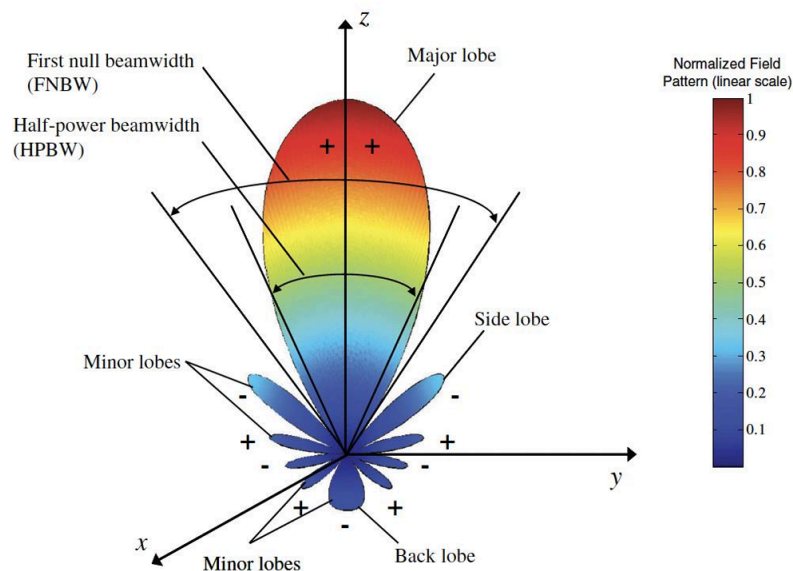
1. 天线与传播

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_{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 50Ω), 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 73Ω (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:
 - a. 已知: 谐振频率 f_r , 介质介电常数 ϵ_r , 基板高度 h
 - b. 贴片宽度 W :

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

- c. 有效介电常数 ϵ_{reff} :

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

- d. 长度延伸量 ΔL :

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

e. 实际长度 L :

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L$$

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

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

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) :

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