

電磁輻射原理與能量傳遞 (Electromagnetic Radiation and Energy Propagation)

1. 在真空中，輻射功率是否會被路徑消耗？

在自由空間 (vacuum) 中，沒有任何導電或吸收介質，因此輻射功率不會被路徑消耗。總輻射功率 P_{rad} 在空間中保持恆定，只是因為波前展開而導致功率密度減少。

對於等向輻射源 (isotropic radiator)：

$$S(r) = \frac{P_{\text{rad}}}{4\pi r^2}, \quad |\mathbf{E}(r)| \propto \frac{1}{r}.$$

這表示功率密度隨距離平方衰減，並非能量損失，而是能量分佈於更大的球面上。

若有吸收性介質（例如空氣、水或介電材料），則會出現衰減項：

$$|\mathbf{E}(r)| \propto \frac{e^{-\alpha r}}{r},$$

其中 α 為 attenuation constant (Np/m)。在真空中， $\alpha = 0$ ，因此能量不被消耗。

2. 電流分佈如何成為輻射功率？

時變電流密度 $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 會在空間中激發電磁場。在頻域下，magnetic vector potential 為：

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-j\beta R}}{R} dV', \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|.$$

於遠場 (far field) 下可近似為：

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) \approx \frac{\mu_0 e^{-j\beta r}}{4\pi r} \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{j\beta \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}'} dV'.$$

此式顯示遠場的角向分佈與電流分佈的傅立葉變換 (Fourier transform) 有關。

輻射功率密度由 Poynting vector 給出：

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\},$$

並且總輻射功率為：

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S(r, \theta, \phi) r^2 \sin \theta d\theta d\phi.$$

由此可見，電流分佈決定了輻射方向圖與功率輸出。

3. 在空氣中，輻射功率如何被消耗？

空氣並非完全無損，而具有微小導電率 $\sigma \approx 10^{-14} \text{ S/m}$ 及複介電常數：

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''.$$

因此，波在空氣中會有非常小的吸收與衰減。傳播常數：

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)}.$$

功率密度隨距離衰減為：

$$P(r) = P_0 e^{-2\alpha r}.$$

情況 (Case)	介質 (Medium)	功率變化 (Power Behavior)
理想真空 (Vacuum)	Lossless	功率完全守恆，只因球面擴散而密度降低。
乾燥空氣 (Dry Air, <10 GHz)	微弱導電	幾乎無耗損，可視為真空近似。
潮濕空氣或毫米波區 (Humid Air / mmWave)	含氧氣與水氣吸收	發生分子吸收，部分能量轉為熱能。
霧或雨 (Fog / Rain)	散射 + 吸收	顯著衰減，功率明顯減少。

在一般通訊頻段（1-10 GHz），空氣吸收極小，因此可認為 **radiation power 幾乎不被空氣消耗**。

4. 電流如何變成輻射 (How Current Becomes Radiation)

(1) 從 Maxwell's Equations 出發

時變電流 $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ 會產生變化的磁場與電場：

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

變化的磁場誘發電場，變化的電場又產生新的磁場，形成**自我維持的傳播鏈 (self-sustaining chain)**。

(2) 輻射區域分類

區域 (Region)	場的性質 (Field Type)	說明 (Description)
近場 (Reactive Near Field)	Reactive field (儲能型)	能量在天線與場之間往返振盪，無淨功率流向無限遠。
遠場 (Radiation Zone / Far Field)	Radiating field (傳播型)	電場與磁場同相，能量持續向外傳遞。

(3) 物理過程

1. 射頻電壓 (RF voltage) 使導體中電荷**加速** (accelerate)。
2. 加速電荷產生**變化的電場與磁場**。
3. 變化的場依據 Maxwell 方程互相激發。
4. 電場與磁場形成**自我傳播的電磁波** (self-propagating wave)。
5. 能量脫離天線，無法回收，即為**電磁輻射** (electromagnetic radiation)。

(4) 功率觀點

坡印廷向量：

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\},$$

描述能量流密度。其曲面積分為總輻射功率：

$$P_{\text{rad}} = \oint_S \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A}.$$

5. 總結 (Summary)

步驟 (Step)	概念 (Concept)	意涵 (Meaning)
1	時變電流 (Time-varying current)	電荷加速產生變化場
2	變化的場互相耦合	根據 Maxwell 方程形成波動
3	場脫離天線形成自我傳播	產生輻射
4	坡印廷向量表示能量流	功率離開天線傳入空間

Accelerating charges produce time-varying fields that sustain each other, and detach from the antenna, forming electromagnetic waves propagating in space.

Poynting Vector (坡印廷向量)

Poynting vector 表示電磁場的功率流密度 (power flow density)，亦即電磁能量通過單位面積的速率與方向。

其數學表達式為：

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

其中：

- \mathbf{E} 為電場向量 (electric field vector)
- \mathbf{H} 為磁場向量 (magnetic field vector)
- \mathbf{S} 為坡印廷向量 (Poynting vector)，代表能量傳遞的方向與強度