

# 第 4 章 2：RF 射頻電路

射頻（Radio Frequency）電路是無線通訊的基石：手機、Wi-Fi、藍牙、雷達都離不開它。

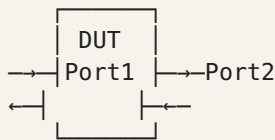
## 一、RF 頻段

| 頻段           | 範圍            | 應用             |
|--------------|---------------|----------------|
| LF           | 30–300 kHz    | 長波廣播           |
| MF           | 0.3–3 MHz     | AM 廣播          |
| HF           | 3–30 MHz      | 短波             |
| VHF          | 30–300 MHz    | FM 廣播、TV       |
| UHF          | 300 MHz–3 GHz | 4G、Wi-Fi 2.4G  |
| SHF          | 3–30 GHz      | 5G、Wi-Fi 5G、衛星 |
| EHF (mmWave) | 30–300 GHz    | 5G 毫米波、雷達      |

## 二、RF 設計的「三大量測量」

### 1. S 參數（Scattering Parameters）

最重要的 RF 量測量：



- S11：Port1 反射係數
- S21：Port1 → Port2 傳輸（增益/衰減）
- S12：Port2 → Port1 反向傳輸（隔離）
- S22：Port2 反射係數

dB 表示： $S21_{dB} = 20 \log |S21|$

## 2. 駐波比 (VSWR)

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

VSWR = 1：完美匹配 VSWR = 2：13.3% 反射 VSWR =  $\infty$ ：完全反射

## 3. 損耗回波 (Return Loss)

$$RL = -20\log|\Gamma|$$

RL  $\geq$  10 dB：可接受 RL  $\geq$  20 dB：好

---

## 三、史密斯圖 (Smith Chart)

阻抗匹配的視覺工具：

- 圓座標系，標準化阻抗
- 順時針：往源端
- 逆時針：往負載

任何複雜阻抗都可在圖上找到，加電容/電感/傳輸線可移動到中心（匹配）。

學會用 Smith Chart 是 RF 工程師的基本功。

---

## 四、阻抗匹配

### 為什麼要匹配？

- 最大功率傳輸
- 避免反射損失
- 防止干擾源頭電路（特別 PA、LNA）

### L 型匹配網路

兩個元件 (L+C)：- 串聯 + 並聯 - 計算簡單但頻寬窄

### Pi 型 / T 型

3 個元件，控制更精細，可調 Q。

## $\lambda/4$ 變壓器

特定頻率，傳輸線阻抗變換。

## 工具

- ADS (Keysight)
- Microwave Office (Cadence)
- Smith chart 軟體
- Python skrf 套件 (免費)

## 五、RF 系統架構

### 接收機 (Superheterodyne)

```

[Antenna] — [BPF] — [LNA] — [Mixer] — [IF Filter] — [ADC/Demodulator]
                    |
                    [LO]
  
```

- LNA：低雜訊放大器
- Mixer：頻率轉換
- LO：本地振盪器
- IF：中頻

### 發射機

```

[DAC/Modulator] — [Mixer] — [BPF] — [PA] — [Antenna]
                    |
                    [LO]
  
```

- PA：功率放大器

### 直接轉換 (Zero-IF)

不用中頻，I/Q 訊號直接基頻：- 結構簡單 - 用於現代手機 / SDR

### Direct RF Sampling

直接用高速 ADC 取樣 RF：- 簡化前端 - 數位處理多頻段 - 用於 5G 大量 MIMO、SDR

## 六、RF 元件

---

### 1. LNA (Low Noise Amplifier)

- 低 NF ( $< 1$  dB)
- 適中增益 (10–20 dB)
- 元件：HEMT、SiGe HBT

### 2. PA (Power Amplifier)

- 大功率
- 高效率
- 線性度 (OFDM 訊號需高線性)
- 元件：GaAs HBT、GaN HEMT、CMOS (小功率)

### 3. Mixer

- 兩信號相乘  $\rightarrow$  頻率和差
- 主動 / 被動
- 雙平衡 / 雙重平衡

### 4. VCO / Synthesizer

- 產生本地振盪訊號
- 相位雜訊關鍵

### 5. 濾波器

- 帶通 / 帶阻
- LC、晶體、SAW、BAW、Cavity

### 6. Switch

- T/R 切換
- PIN diode、MEMS、CMOS

### 7. Coupler / Splitter

- Wilkinson divider
- Branch line coupler
- Hybrid

---

## 七、雜訊與失真

---

### 1. 雜訊指數 (NF)

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

級聯 NF (Friis)：

$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

→ 第一級 LNA 的 NF 主導全系統。

### 2. IIP3 / OIP3 (三階交調截點)

放大器非線性會產生交調產物，3 階最重要。高 IIP3 → 高線性度。

### 3. 1 dB 壓縮點 (P1dB)

放大器增益下降 1 dB 時的輸出功率，定義線性區上限。

### 4. 動態範圍

從最小可偵測訊號（雜訊地板）到最大不失真訊號的範圍。

---

## 八、調變與解調

---

### 類比調變

- AM (振幅調變)
- FM (頻率調變)
- PM (相位調變)

### 數位調變

- ASK / FSK / PSK
- QPSK / 8PSK
- QAM (16/64/256/1024 QAM)：高 SNR 下高效率

## OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

把高速資料分到多個正交子載波：- 抗多徑 - Wi-Fi、4G/5G、DVB-T 都用

## 九、現代無線標準

| 標準              | 頻段             | 速率              |
|-----------------|----------------|-----------------|
| Bluetooth 5     | 2.4 GHz        | 2 Mbps          |
| Wi-Fi 6         | 2.4/5 GHz      | 9.6 Gbps        |
| Wi-Fi 6E / 7    | + 6 GHz        | 30 Gbps+        |
| 4G LTE          | 700 MHz–6 GHz  | 100 Mbps–1 Gbps |
| 5G NR           | 600 MHz–60 GHz | Gbps 級          |
| Zigbee / Thread | 2.4 GHz        | 250 kbps        |
| LoRa            | sub-GHz        | low             |
| NB-IoT          | LTE            | low             |
| GPS             | 1.575 GHz      | —               |

## 十、PCB 與封裝

### RF PCB 材料

| 材料               | Dk   | Df     | 用途        |
|------------------|------|--------|-----------|
| FR4              | 4.5  | 0.02   | < 1 GHz   |
| Megtron 6        | 3.4  | 0.005  | < 5 GHz   |
| Rogers RO4350B   | 3.66 | 0.0037 | < 30 GHz  |
| Rogers RT/duroid | 2.2  | 0.0009 | mmWave    |
| 陶瓷 (LTCC)        | 變化   | low    | mmWave、衛星 |

### 走線結構

- Microstrip

- Coplanar Waveguide (CPW)
- Stripline
- 共面波導 + 接地 (GCPW)

## 接地

RF 設計接地極關鍵： - 大量 via stitching - 連續地平面（不切割） - 多層 PCB 至少 4 層

## 封裝

- QFN、LGA：mmWave 不適用
- LCC（陶瓷）
- Flip-Chip
- AiP（Antenna in Package）：5G mmWave 主流

---

# 十一、天線基礎

## 天線參數

- 增益 (dBi)
- 方向性 (Directivity)
- 頻寬
- 極化（垂直 / 水平 / 圓極化）
- VSWR / Return Loss
- 效率

## 常見天線

- Dipole：偶極，全向
- Patch：PCB 補丁，方向性
- Yagi：方向性高，UHF/VHF
- Helical：螺旋
- PIFA：手機常用
- Chip Antenna：藍牙 / Wi-Fi 模組

## Phased Array

多個小天線控制相位 → 電子束控（5G mmWave、雷達）。

## 十二、實務工具

---

### 模擬軟體

- HFSS (Ansys)：3D EM 模擬
- CST (Dassault)
- ADS (Keysight)：電路 + EM
- Sonnet：平面 EM
- OpenEMS (免費 / 開源)

### 量測

- VNA (網路分析儀)
- 頻譜分析儀
- 訊號分析儀
- 雜訊指數分析儀

---

## 十三、本章總結

---

✅ 您應該掌握：

- [x] RF 頻段範圍與應用
- [x] S 參數、VSWR、Return Loss
- [x] 阻抗匹配 (Smith Chart、L/ $\pi$ /T 網路)
- [x] RF 系統架構 (superheterodyne、direct conversion)
- [x] LNA / PA / Mixer / VCO / Filter
- [x] 雜訊指數 (Friis 方程式)
- [x] 數位調變 (QAM、OFDM)
- [x] PCB 材料與封裝
- [x] 天線基礎

---

## 下一章

---

03-??PI.md — Power Integrity。