

# Radio Interference Analysis

## 無線電干擾分析

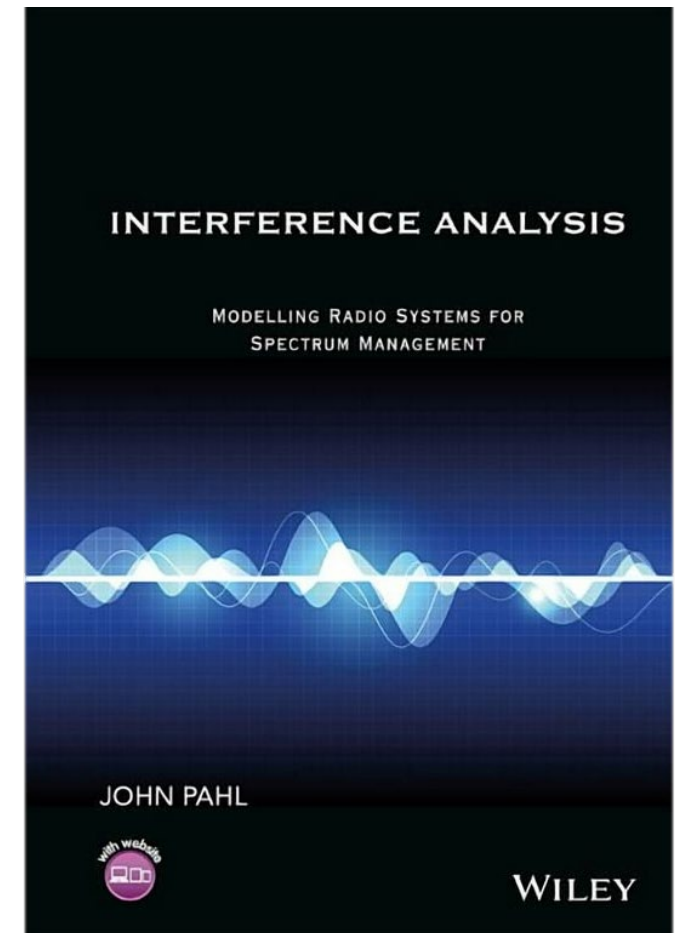
114-2 ADSP

M11402264 許應詒

Dept. of Electronic and Computer Engineering

# 參考書籍

- *Interference Analysis: Modelling Radio Systems for Spectrum Management*
- 作者：John Pahl
- 出版：Wiley, 2016 (ISBN 978-1-119-07788-2)
- 頻譜管理／干擾分析領域資深工程師
- 創立 Transfinite Systems，開發頻譜共存分析軟體 Visualyse
- 長期參與 ITU-R、CEPT 頻譜共存研究



# Outline

- 什麼是無線電干擾？
- 為什麼要做干擾分析？
- 國際組織與規範 ITU & 3GPP
- 常見干擾場景
- 干擾計算框架與參數
- 干擾分析方法
- 結論
- Reference

# 什麼是無線電干擾？

- 氣功波對撞類比：每道波代表一個系統發出的訊號。
- 本質：非預期能量進入他人接收機的工作頻帶，使期望訊號品質下降。
- 頻譜為共用資源；各系統同時增大功率或佔用頻寬，整體環境劣化。
- 目標：確認干擾低於可接受門檻，而非追求零干擾。

**核心問題：多個系統共用有限頻譜時，如何判斷能否安全共存？**

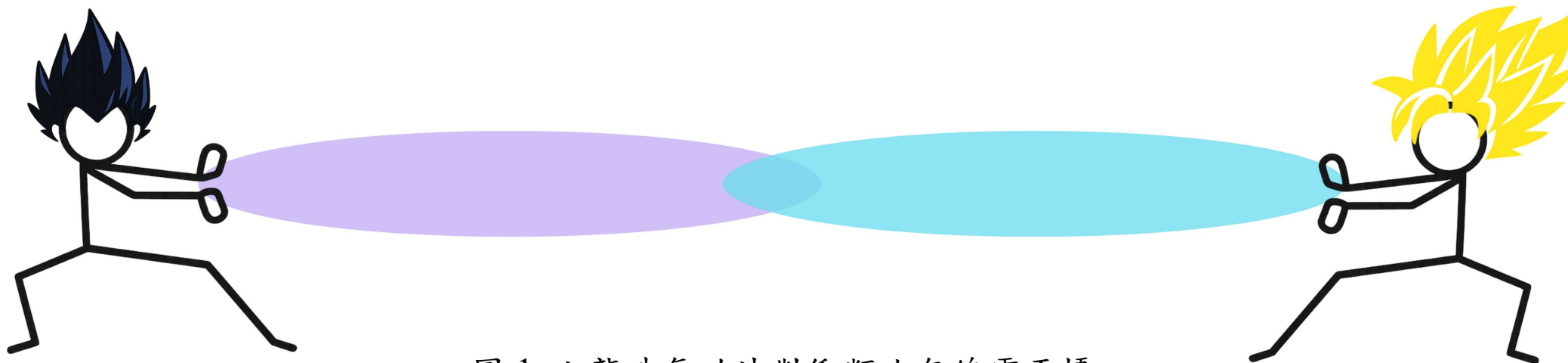
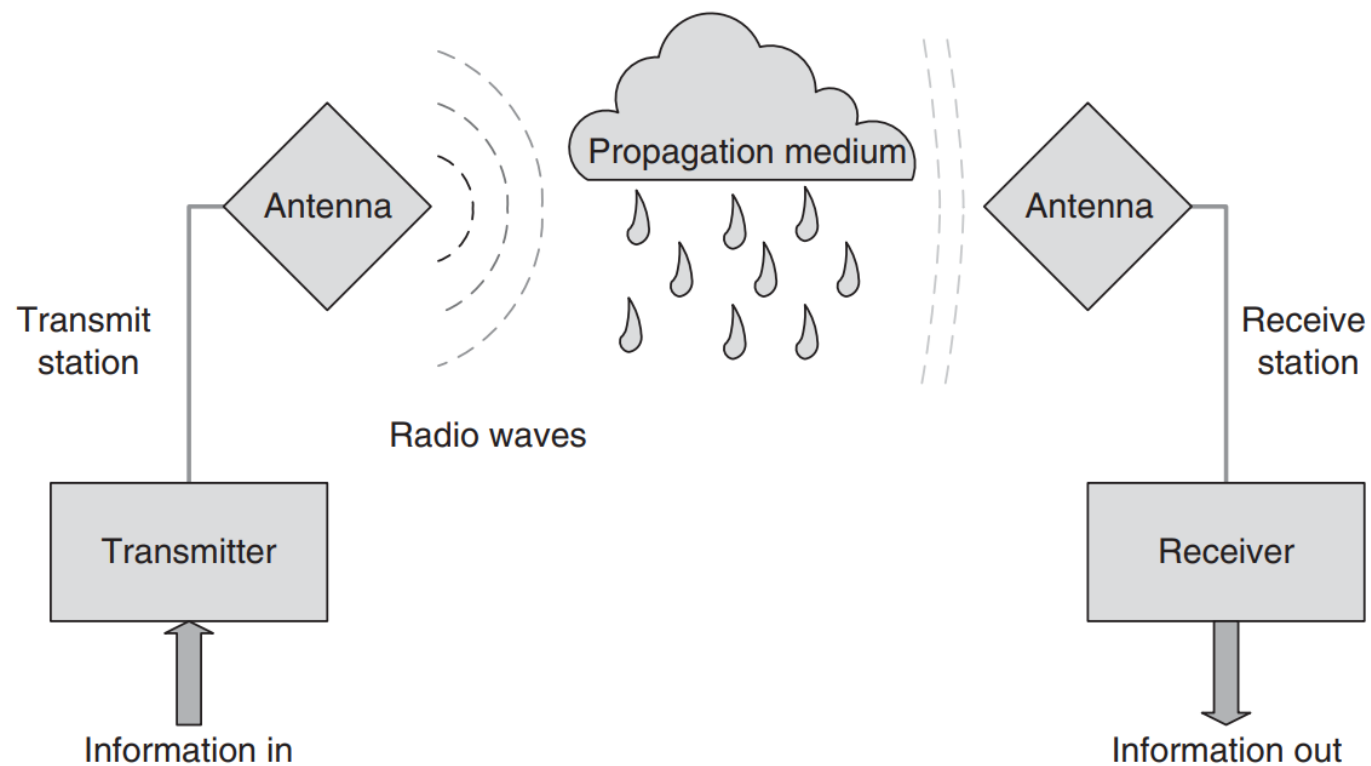


圖 1. 七龍珠氣功波對衝類比無線電干擾

# 無線通訊系統方塊圖

鏈路：Tx → 天線 → 傳播介質 → 天線 → Rx

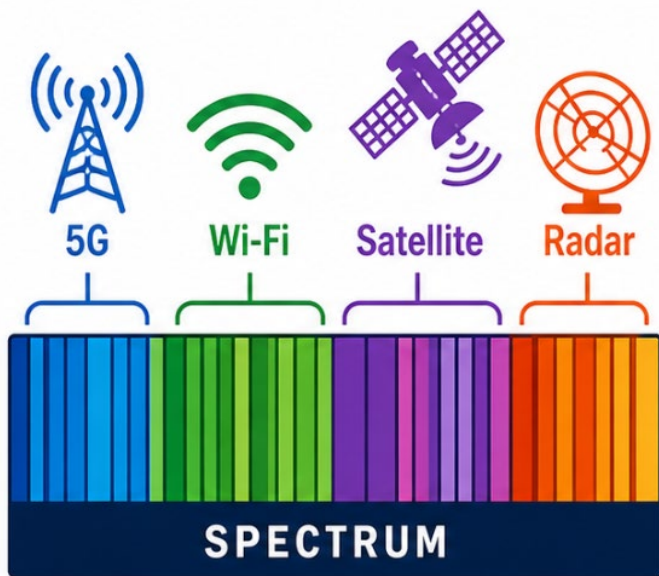
- Transmitter (Tx)：產生射頻訊號
- Antenna：訊號輻射／接收為無線電波
- Propagation medium：自由空間、大氣、雨衰、地形遮蔽
- Receiver (Rx)：還原資訊輸出



# 為什麼要做干擾分析？

1. 頻譜匱乏：頻率為有限資源；「又適合、又不影響既有系統」的頻段有限。
2. 保護既有業務：新系統進入同／鄰頻前，須證明不造成有害干擾。
3. 執照與協調：頻率核配、執照審查、跨國協調的技術依據。

## Spectrum Allocation



## Incumbent Service



## Coordination



# 中華民國頻率分配圖 FREQUENCY ALLOCATIONS OF REPUBLIC OF CHINA



圖 4. 中華民國頻率分配圖

# 國際組織與規範 ITU & 3GPP

參數與判定標準須引用國際規範，分析結果才會有可比較性與可信度。

表 1. ITU 與 3GPP 角色比較

項目	ITU	3GPP
全名	International Telecommunication Union	3rd Generation Partnership Project
性質	聯合國專門機構	行動通訊產業標準組織
負責範疇	頻譜分配、保護條件、跨國協調	行動系統設計 (BS/UE 規格)
常見文件	Radio Regulations、ITU-R Rec. / Report	Technical Spec. (TS)、Technical Report (TR)
分析用途	頻譜分配、傳播模型、共存研究	IMT 系統參數、射頻特性、通道模型



A GLOBAL INITIATIVE

# ITU 規範

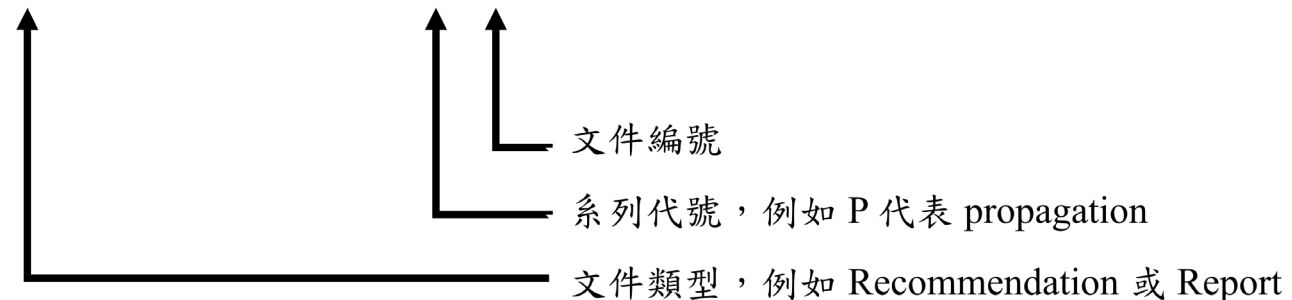
干擾分析主要引用 ITU-R (無線電通訊部門)。

- 三部門：ITU-T (標準化)、ITU-R (無線電通訊)、ITU-D (發展)

表 2. 干擾分析常見 ITU-R 文件系列

系列	主題	用途
P	Radiowave propagation	傳播模型 (自由空間、繞射、雨衰)
M	Mobile / radiodetermination / satellite	行動、雷達、定位、IMT
F	Fixed service	固定微波鏈路
S	Fixed-satellite service	固定衛星、地球站保護
RA	Radio astronomy	射電天文接收保護
SM	Spectrum management	頻譜管理與干擾評估

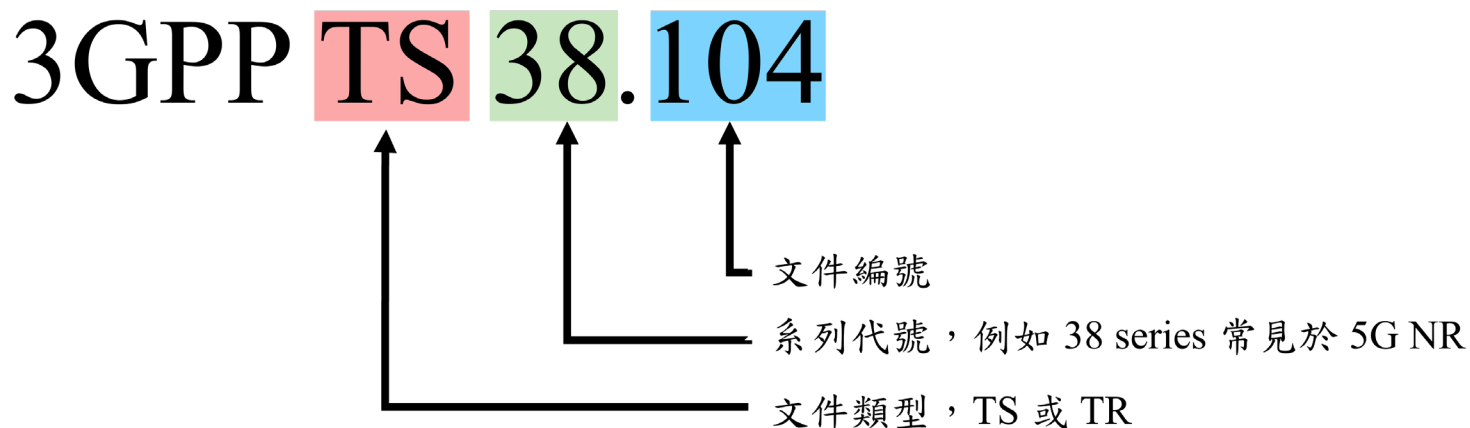
Recommendation ITU-R P.452



# 3GPP 規範

ITU-R 定義頻譜共存；3GPP 定義行動系統本身的射頻規格。

- 常用參數：BS／UE 發射功率、channel bandwidth、SEM、ACLR、ACS、blocking、receiver sensitivity、通道模型。
- TS（Technical Specification）：設備須符合的正式規格，如 TS 38.104（NR BS）。
- TR（Technical Report）：研究／評估，如 TR 38.901（通道模型）。



# 干擾分析的基本要素

- Interferer：干擾源（發出能量者）。
- Victim：受害接收機。
- Wanted link：受害者原本欲接收的鏈路。
- Interference path：干擾訊號進入受害接收機的路徑。

干擾強弱取決於兩者的幾何、頻率關係、天線方向與傳播損耗的綜合。

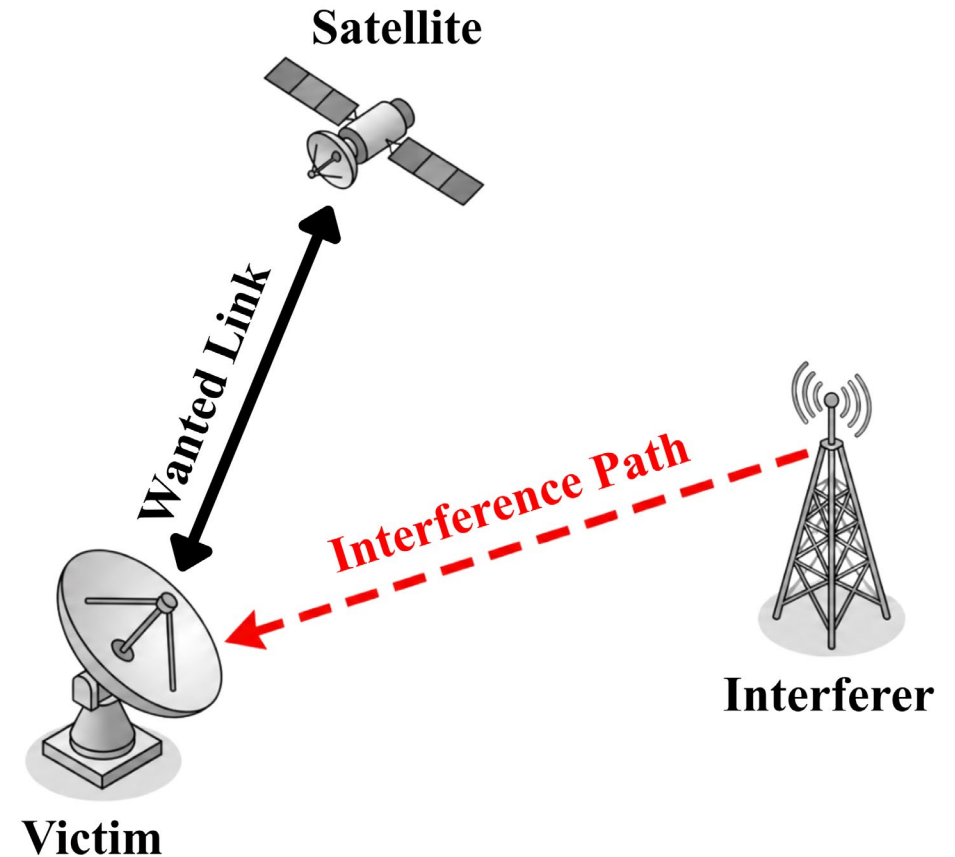
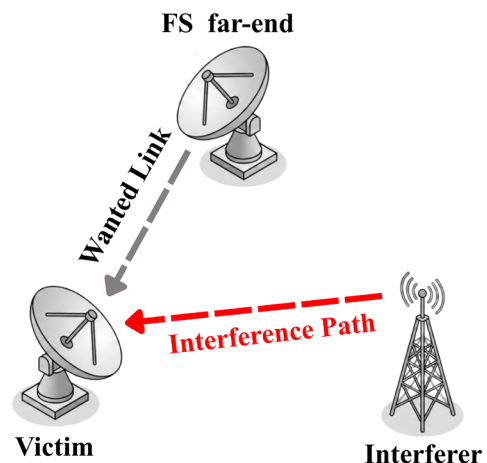


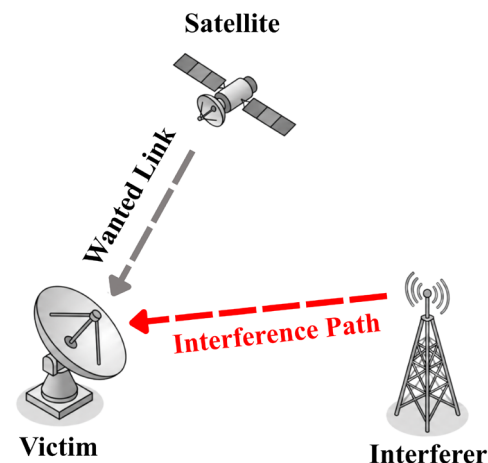
圖 7. 干擾場景的基本角色與路徑關係

# 常見干擾場景分類

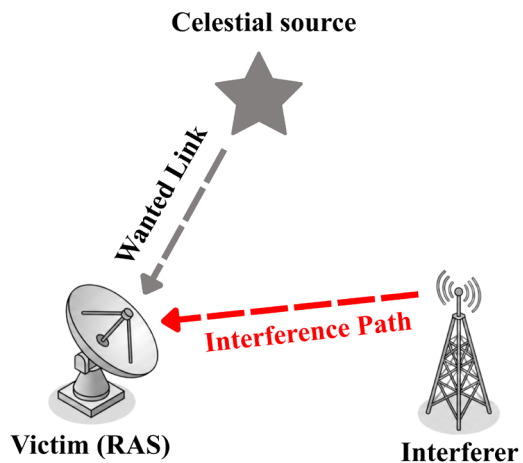
四大類常見場景；先判定誰干擾誰、同頻或鄰頻、單一或聚合干擾。



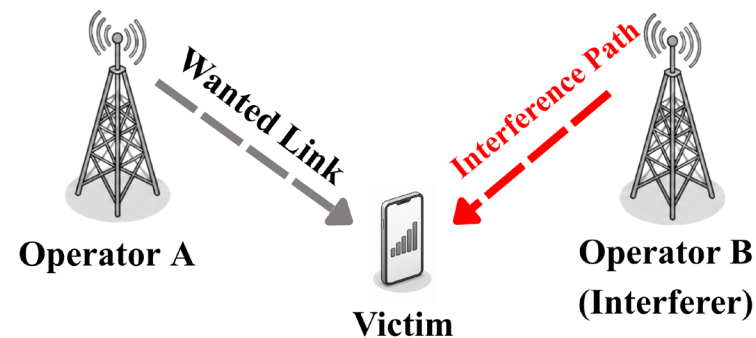
(a) IMT 與地面服務 (IMT BS ↔ FS / 雷達)



(b) IMT 與衛星 / 太空服務 (IMT BS ↔ FSS ES)



(c) IMT 與科學服務 (IMT ↔ RAS)



(d) 服務內干擾 (intra-service) : IMT ↔ IMT

# 干擾指標

本報告以  $I/N$  作為後續計算與判定的基礎。

表 4. 三種常見干擾判定指標

指標	意義	用途
$C/I$	期望訊號相對干擾之比	解調性能分析
$C/(N+I)$	同時計入雜訊與干擾	接近實際接收品質
$I/N$	干擾相對接收機雜訊底之比	頻譜共享、保護門檻

$$\boxed{C/I = C - I \text{ (dB)}} \quad (1)$$

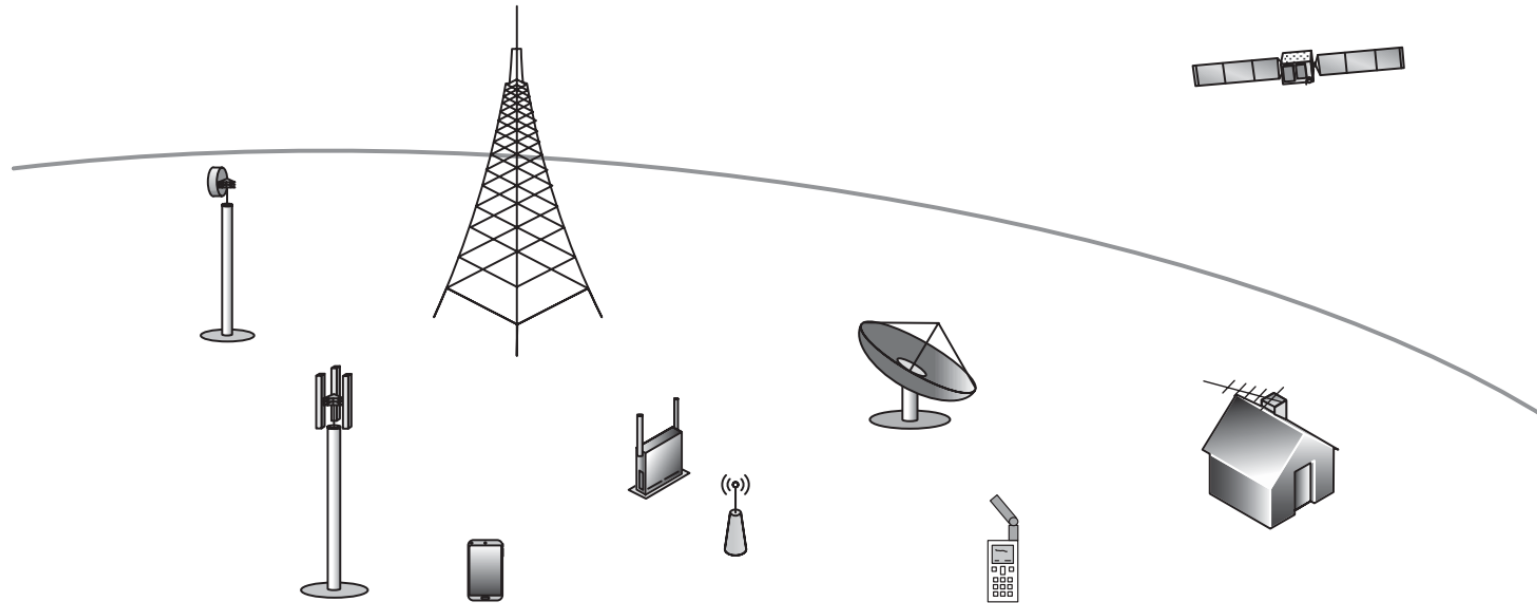
$$\boxed{I/N = I - N \text{ (dB)}} \quad (2)$$

$I/N$  低  $\rightarrow$  干擾遠小於雜訊； $I/N$  高  $\rightarrow$  接收底噪明顯抬升

# 天線

天線方向性決定干擾鏈路之 $G_{TX}$ 、 $G_{RX}$ 。

- 全向：增益低，常見於終端、感測器。
- 扇形：行動基地台用，含天線下傾（Downtilt）。
- 碟形：高增益、強方向性；旁瓣特性對干擾關鍵。
- 陣列／beamforming：5G massive MIMO，波束動態指向。



# 如何選擇天線方向圖？

採用 ITU-R 標準化參考方向圖，描述偏軸角的增益衰減。

- F.699：包絡線型，描述旁瓣峰值上界，偏保守 → worst-case。
- F.1245：平均型，接近統計實況 → aggregate / Monte Carlo。

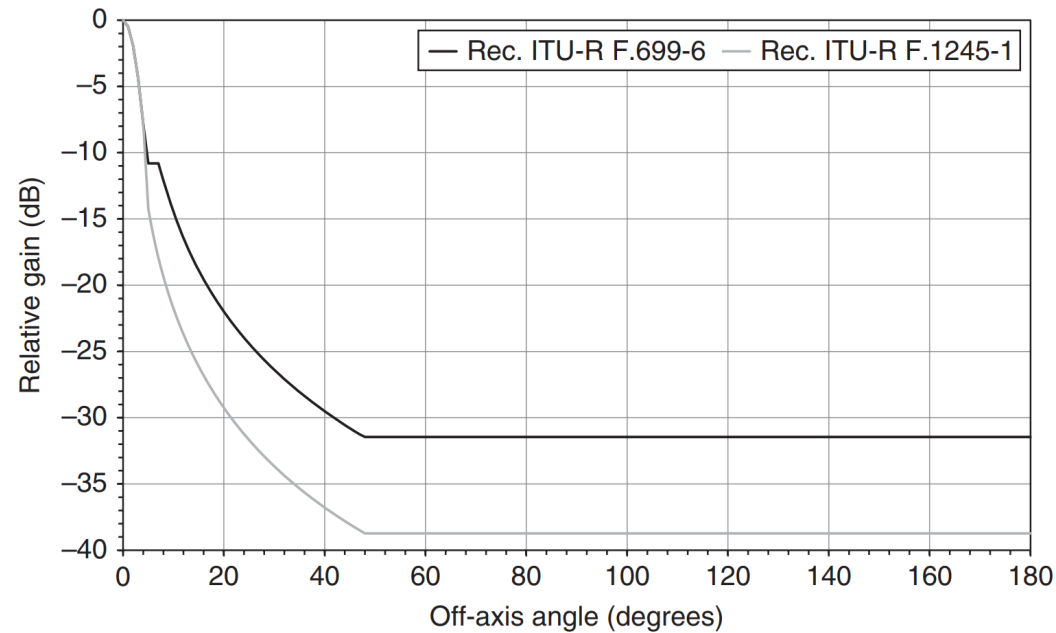
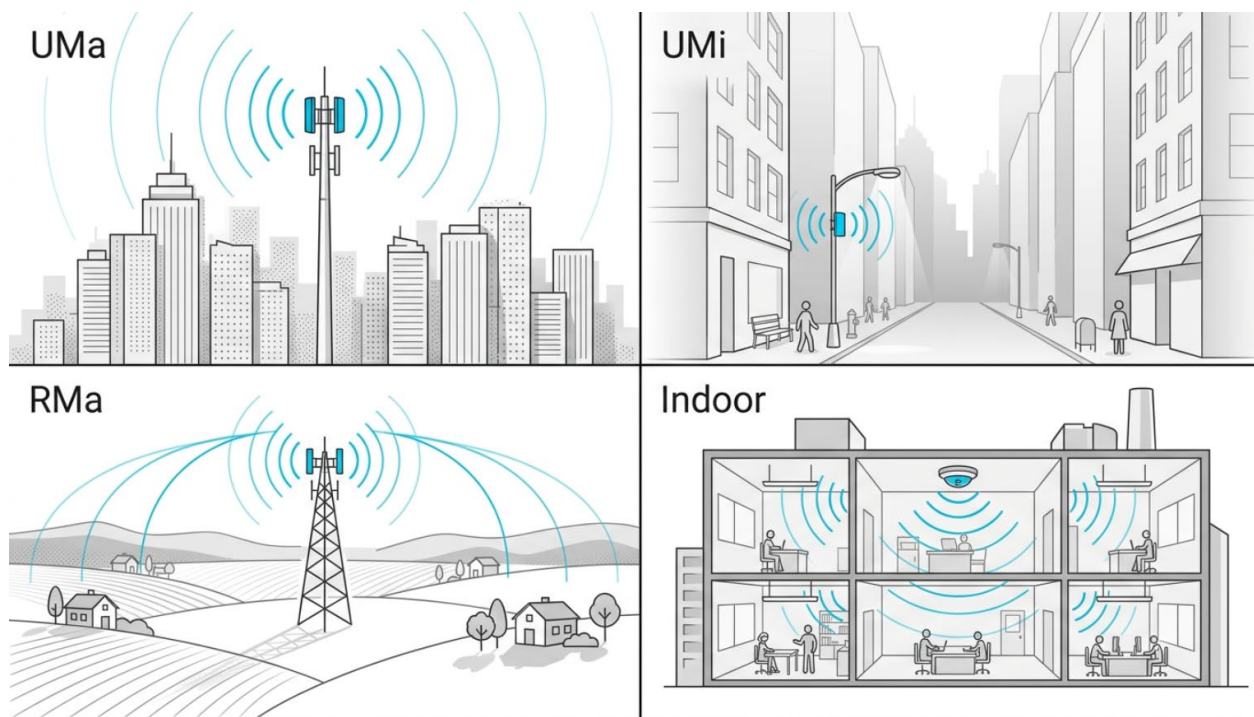


圖 10. F.699 與 F.1245 比較

# 傳播模型（一）：環境

$L_{\text{path}}$  為干擾鏈路中最關鍵項；模型選擇影響結果保守度。

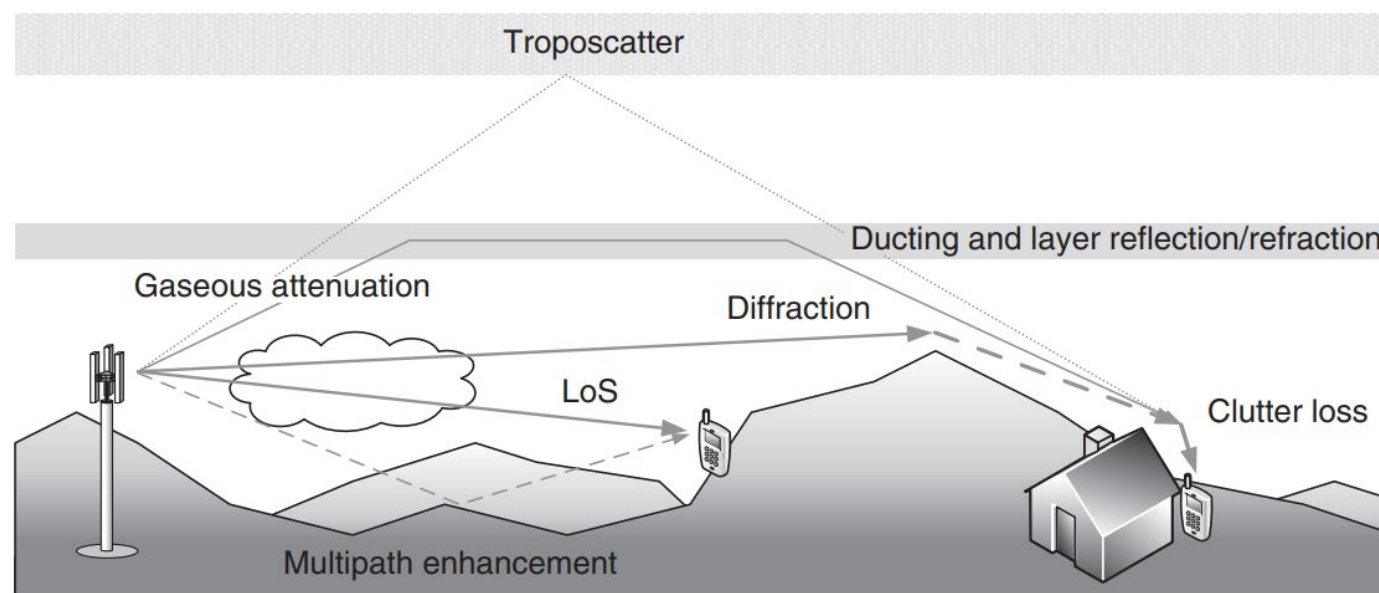
- 影響因素：距離、頻率、地形、建築、大氣、雨衰、繞射、多路徑。
- 部署環境：UMa（都市巨型）、UMi（都市微型）、RMa（鄉村）、InH（室內）、InF（工廠）。
- LoS 損耗低、干擾易傳；NLoS 損耗高，但高增益／長距離下仍可能成立。



## 傳播模型（二）：常用模型

$$L_{FSPL} = 32.45 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) \quad (3)$$

- FSPL (P.525)：理想自由空間，建立基本直覺，地面環境通常不足。
- ITU-R P.452：地面長距離干擾常用，含繞射、對流層散射、ducting、雨衰、雜亂損耗、時間百分比。
- 3GPP TR 38.901：5G（UMa/UMi/RMa/InH/InF）



# 如何選擇傳播模型？

- 判定要素：距離、遮蔽（LoS/NLoS）、頻率、時間百分比（50% vs 1%/20%）、單一路徑 vs 統計部署。
- 初步 / worst-case → FSPL；地面長距離 → P.452；5G 系統模擬 → TR 38.901；地球站-衛星 → P.618。
- 須明確記錄：適用場景、時間百分比、模型限制。

# 干擾計算（一）：鏈路公式

將前述天線、傳播等參數組成一條干擾鏈路，求受害端干擾功率。

$$I = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{path} + G_{Rx} - L_{extra} \quad (4)$$

- $I$ ：受害端干擾功率
- $P_{Tx}$ ：干擾源發射功率
- $G_{Tx}$ ：發射天線朝受害方向增益
- $L_{path}$ ：傳播損耗
- $G_{Rx}$ ：接收天線朝干擾源方向增益
- $L_{extra}$ ：饋線／極化／濾波等額外損耗
- 干擾為整條路徑的耦合結果，非單看發射功率。
- 受害端落於主波束 → 干擾大；落於旁瓣／背瓣 → 顯著降低

## 干擾計算（二）：以 I/N 為核心

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} \quad (5)$$

$$N_{dBm} = -174 + 10 \log_{10}(B) + NF \quad (6)$$

$$I/N = EIRP + G_{Rx} - L_{path} - L_{extra} - N \quad (7)$$

- 四類資訊：interferer 端、victim 端、傳播／幾何、頻率關係。
- $EIRP$ ：發射功率與天線增益合成。
- $N = kTB$ ：接收機熱雜訊；頻寬越大、雜訊越大。
- 判定條件： $I/N \leq (I/N)_{th}$ 。

# 干擾分類：同頻干擾 Co-channel Interference

Interferer 與 victim 使用相同／重疊頻率，干擾全落於受害頻帶內。

$$I_{co} = EIRP + G_{Rx} - L_{path} - L_{extra} \quad (8)$$

$$I_{co}/N \leq (I/N)_{th} \quad (9)$$

- 抑制手段：空間隔離、天線方向性、功率限制、時間隔離（TDD）。

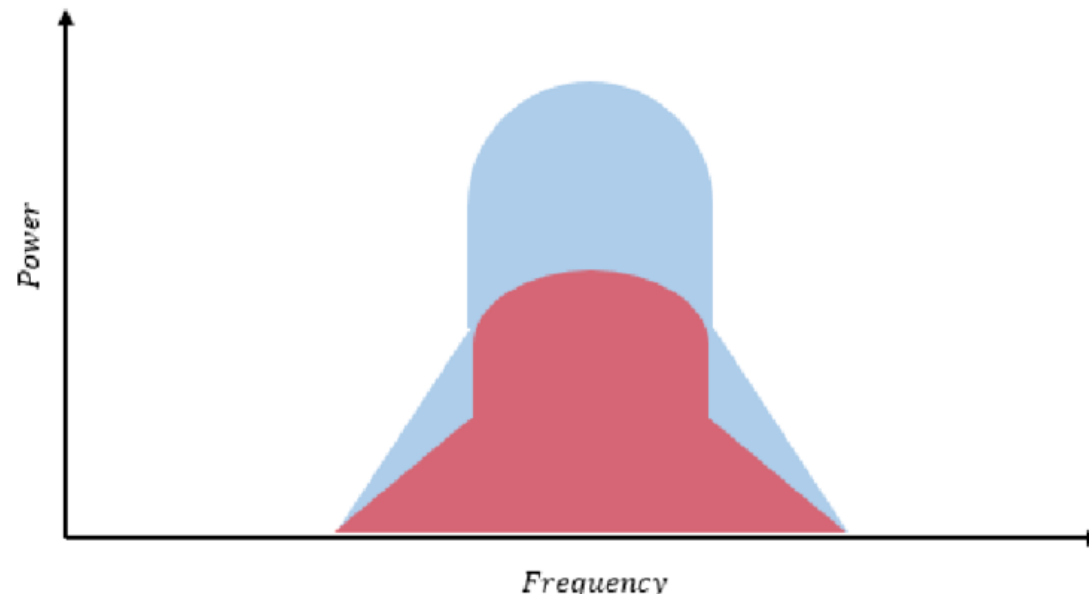


圖 13.同頻干擾：頻譜重疊

# 干擾分類：鄰頻干擾 Adjacent-channel Interference

使用相鄰頻段；經發射外溢與接收選擇性不足兩機制造成干擾。

1. 發射端帶外發射 (OOBE) → ACLR / SEM

$$I_{adj} = I_{co} - A_{ACIR} \quad (10)$$

2. 接收端選擇性不足 → ACS / blocking。

$$\frac{1}{A_{ACIR}} = \frac{1}{A_{ACLR}} + \frac{1}{A_{ACS}} \quad (11)$$

- 相較同頻多出頻域隔離自由度：guard band、ACLR、ACS、SEM、receiver filtering。

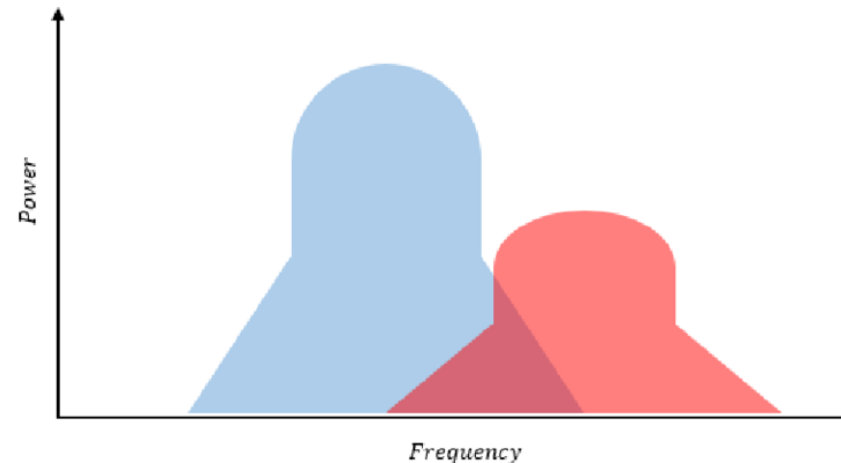


圖 14. 鄰頻干擾：頻譜部分重疊

# 干擾分析方法總整

四種方法由簡單保守至複雜真實；原則為方法與問題匹配。

表 5. 四種干擾分析方法比較

方法	核心	適合情境
Static	固定參數直接計算	初步、worst-case
MCL	反推所需最小隔離	guard zone、初篩
Dynamic	計入時間變化	雷達、TDD、移動
Monte Carlo	隨機場景統計	聚合、機率式共存



圖 16. 分析方法複雜度與真實性比較

# 干擾分析方法：最小耦合損失分析 MCL Analysis

求：使干擾不超門檻所需的最小總損耗（coupling loss）。

$$I_{max} = N + (I/N)_{th} \quad (12)$$

$$L_{req\_path} = EIRP_I + G_{Rx} - I_{max} \quad (13)$$

$$MCL = P_{Tx} - I_{max} \quad (14)$$

- 常用於反推：所需距離、天線隔離、最大允許 EIRP。
- 優點：簡單、保守。
- 限制：不反映位置分布、活動率、動態波束、傳播統計。

# 干擾分析方法：蒙地卡羅分析 Monte Carlo Analysis

隨機產生大量場景並統計，貼近實際部署的機率行為。

$$PoI = P[I/N > (I/N)_{th}] \quad (15)$$

- 流程：定義輸入分布 → 抽樣 snapshot → 計算 I/N → 重複多次 → 統計超標比例。
- 輸出統計量：超標機率、95th percentile I/N、聚合 I/N 之 CDF。
- 本質為 Static 計算外包一層「輸入隨機變化 + 重複」。



# 結論

- 本質：於有限頻譜下判斷系統能否可靠共存；目標為干擾低於門檻。
- 方法搭配問題：Static 評估嚴重度 → MCL 反推隔離 → Monte Carlo 評估統計風險。
- 結論可工程化：轉換為所需距離、頻率隔離、功率限制等條件。

**干擾分析 = 清楚定義的場景 + 可引用參數 + 配對問題的方法 + 可實作結論。**

# Reference

- [1] J. Pahl, *\*Interference Analysis\**. Wiley, 2016.
- [2] ITU, *\*Radio Regulations\**, 2024.
- [3] Rec. ITU-R P.452-18, 2023.
- [4] Rec. ITU-R P.525-5, 2024.
- [5] Rec. ITU-R P.618-13, 2017.
- [6] Rec. ITU-R F.699-8, 2018.
- [7] Rec. ITU-R F.1245-3, 2019.
- [8] 3GPP TS 38.104 (NR BS).
- [9] 3GPP TR 38.901 (channel model 0.5–100 GHz).
- [10] NCC, Taiwan, "Frequency Allocations of the R.O.C.," 2023.