

高頻雷達與氣象署觀測資料之比對驗證 -從資料品質控管到應用驗證

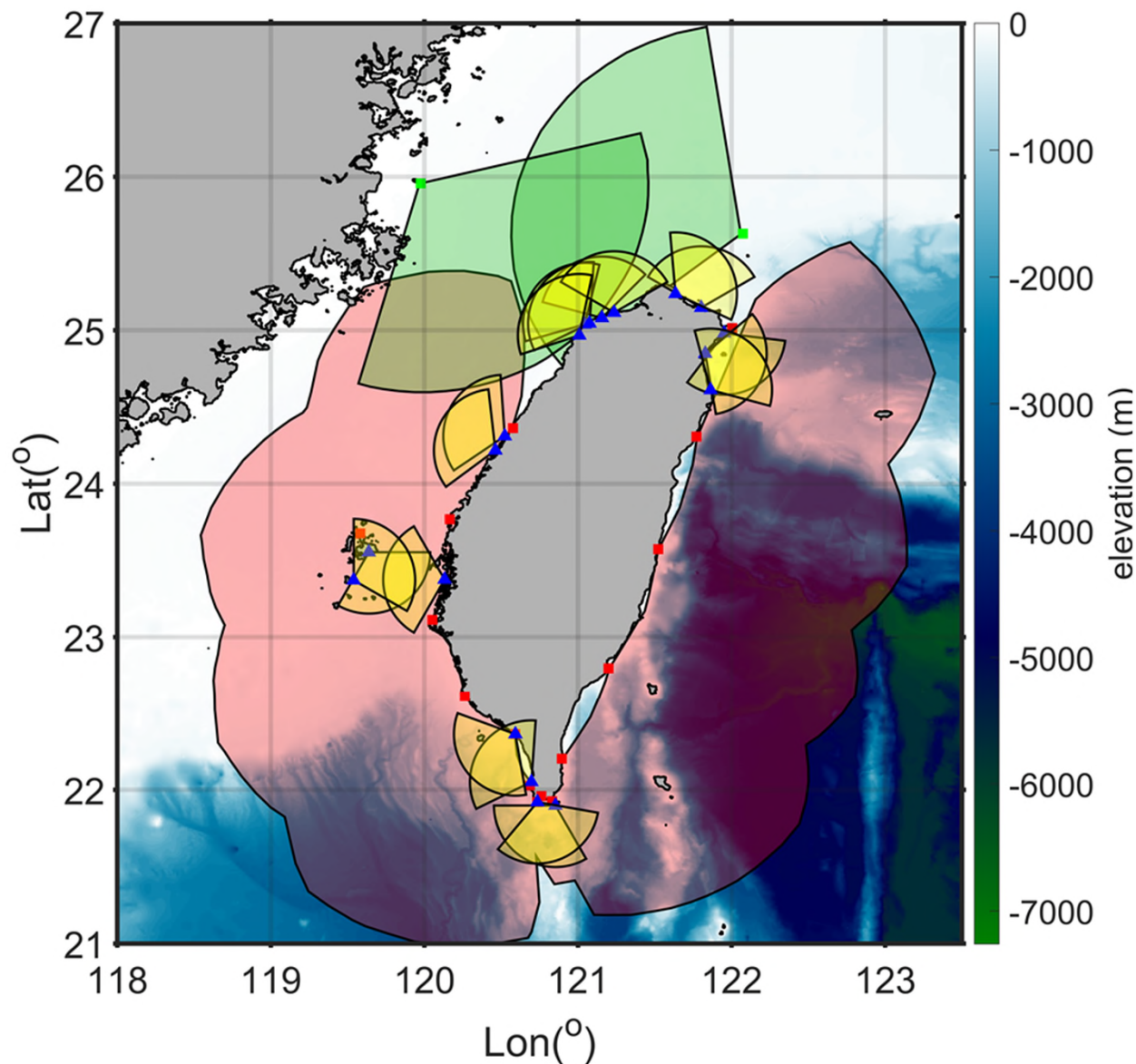
錢樺、鄭安、陳冠永、張煥盟、邱銘達、鄭皓元、尤心瑜、賴堅戊
國立中央大學地球科學前瞻應用研究中心



2025.09.03

報告內容大綱

- 台灣 HF 雷達建置的使命。
- 「我們以為只要找到乾淨頻帶、依據論文理論進行分析，就能有好資料產品，但現實是—RFI 永遠存在，該怎麼辦？」
- 心路歷程分享、提出資料品質策略、國際經驗與實際案例。



國家海洋研究院
National Academy of Marine Research

▲ 12 sites
LERA MKIII



▲ 5 sites
LERA MKIII



▲ 2 sites
LERA MKIII

TORI
NAR Labs 國家實驗研究院
台灣海洋科技研究中心
Taiwan Ocean Research Institute

■ 14 sites
CODAR



■ 2 sites
Linear Array

初期策略與經驗

- 初始假設：頻率掃描 → 找乾淨頻帶，保證資料品質。
- 硬體為優先原則：
 - 目的：確保敏感的雷達在理想的設計工作環境運轉。
 - 方法：收發射天線性能與場型檢測、相位調整、接地與電源隔離。
 - 纜線、防蝕、天線健康、供電環境 → 大量 troubleshooting。
- 現實挫折：探測距離不足、峰位不穩、RFI 無法消除。
- 轉折：從「避免 RFI」→「必須學會與 RFI 共存」。

如何與RFI共存？

美國 HFRNet / IOOS

- **QARTOD 手冊**：QC 測試中明列 *RFI* 偵測與移除，而且強調要在 **Doppler** 譜層執行（噪聲底、Bragg 峰偵測、電離層回波、船舶干擾等）【NOAA IOOS QARTOD】。
- **HFRNet 檔案規範**：內建品質旗標（Pass / Suspect / Fail），將「RFI 容忍 + 標記」制度化，讓使用者能判斷資料可信度【HFRNet Docs】。

歐洲 EuroGOOS / CMEMS

- **EuroGOOS HFR Task Team**：明訂 QA/QC 為推動歐洲網路的核心，強調與美國 QARTOD 對齊【Rubio et al., 2017】。
- **CMEMS HFR Node 標準**：規定即時資料 必須強制執行 **QC** 測試，不只是頻率管理【Mantovani et al., 2020】。

資料品質挑戰：針對RFI的QC

RFI, Radio Frequency Interference (射頻干擾)
為 **HF 雷達** 的最大挑戰

- 來源
 - 人造干擾：廣播、漁船通訊、發射塔雷達系統、船舶導航工業設備、電力線雜訊
 - 自然干擾：閃電、極光、太陽風暴
- 主要干擾型態
 - 窄帶：固定頻點干擾
 - 掃頻：斜向能量條紋
 - 脈衝：短暫強能量
 - 頻漂：長期偏移
- 影響
 - Bragg 峰淹沒消失、錯位、假流速、高雜訊

QC 策略：

1. 探究台灣區域RFI特性
 - DC能量、Bragg 峰清晰度、譜寬、峰位連續性。
 2. RFI 偵測與處理：
 - Swerling理論-譜峭度 (SK)、Guard band、遮罩、動態譜追蹤。
 3. 多站融合：透過空間一致性檢查提升可靠度。
- 核心概念：RFI 容忍 + 品質標記。

雷達品管流程的更新

L1品管		
項目	說明	門檻
SNR1 st	一階峰SNR	[10, 15] dB
SNR1 rLR	SNR左右差值	[6, 12] dB
SNR2 p2 / m2	二階峰最大及平均SNR	[3, 8]
Rp21	一二階峰強度比例	[5, 10]
rAv21	一二階峰平均能量比值	[1, 10]

L2品管		
項目	說明	時空變化量之上下限
Curr	海流參數範圍	[-1.2, 1.2]
Hs	波浪參數範圍	[0.05, 9]
Tm	週期參數範圍	[1.5, 30]
WS	風速參數範圍	[0.5, 40]

海流
波浪

L1 品管

L2 品管

L3 品管

L0 (原始訊號)

L1 (都卜勒譜)

L2 (參數計算)

L3 (網格化)

產品

IQ訊號閃爍Spectral flicker (類Scintillation) 甲

- Doppler譜的形狀
- 一階峰峰位對稱性
- SNR (一階峰、二階峰)

- **DC零頻能量**
 - **一階峰寬度**
- 乙

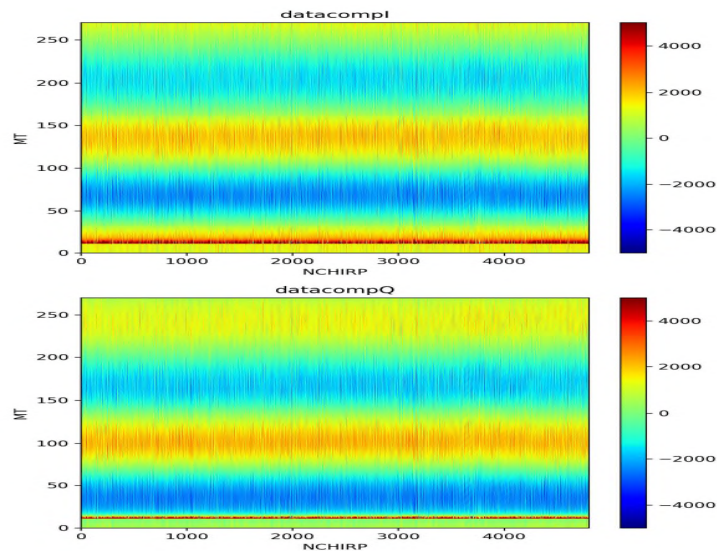
- GDOP (海流)
- 合理性：波高在微擾解的範圍內、流速範圍
- 連續性：波、流時變量與空間變異性在一定範圍

- **合成海流之分潮橢圓比**
 - **補遺與平滑(DINEOF)**
- 丙

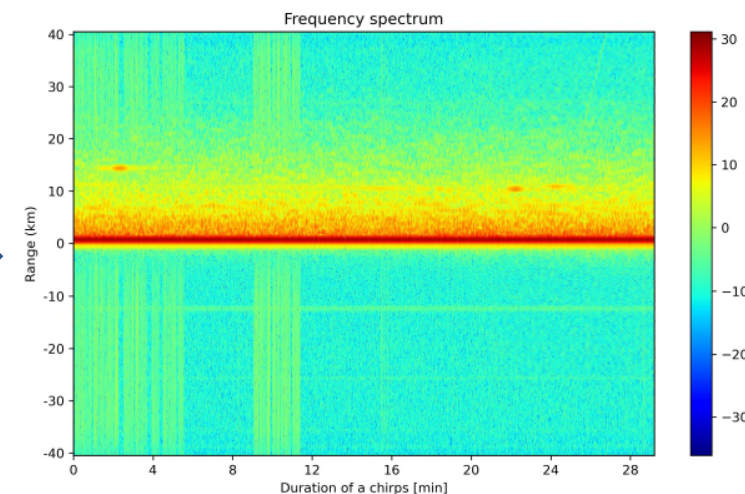
HF 雷達資料分析流程

Arrayed Antenna receiver system

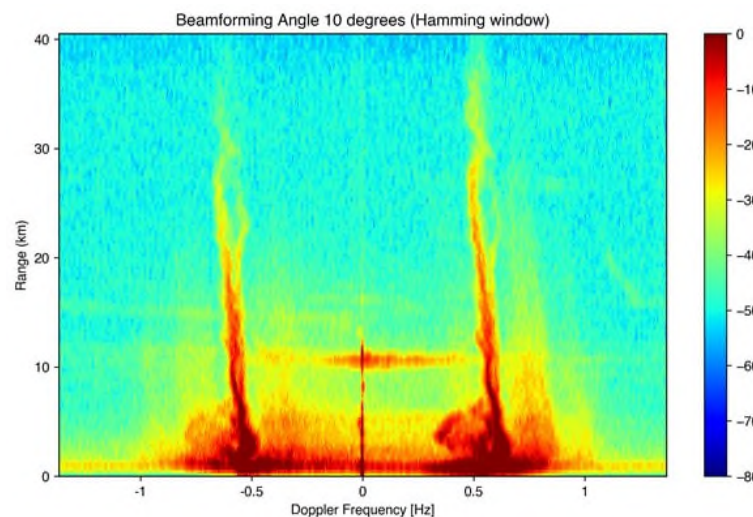
L0 I/Q 原始訊號



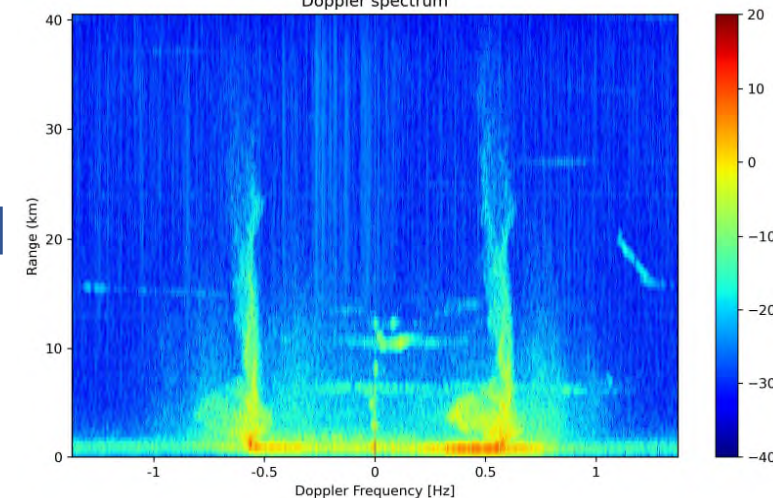
L1 時序列-距離譜



L1 方位角都卜勒距離譜



L1 天線都卜勒距離譜



L2 product
Radial Velocity
Wave parameters
Wind information

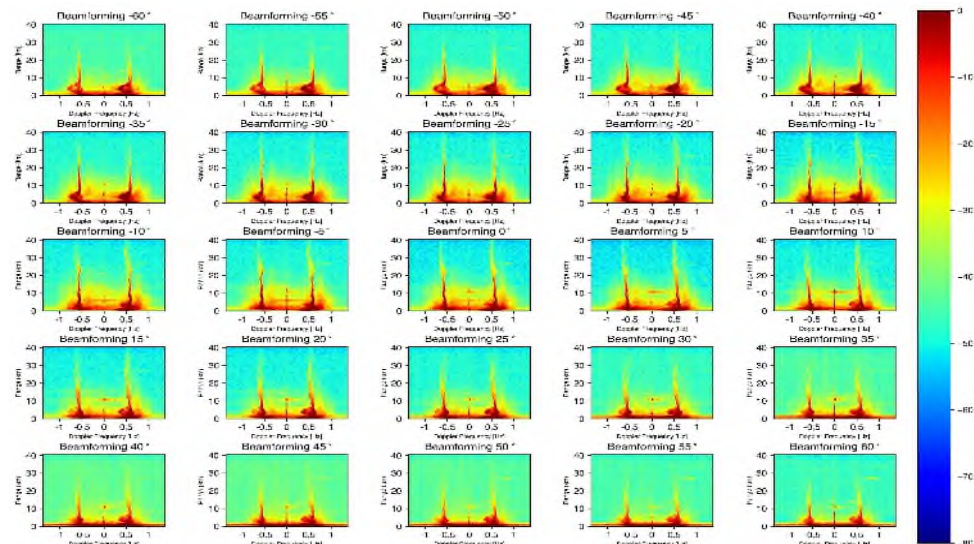
L3 product
Current Velocity
Etc....

>>每一層都可能受 RFI 影響

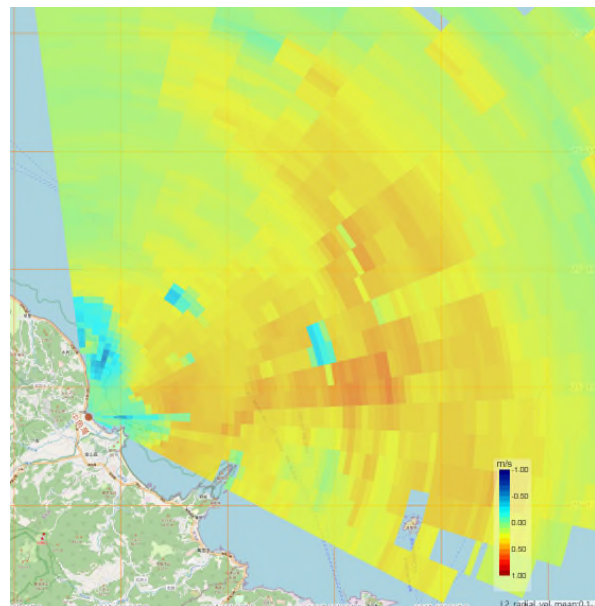
Level 1 to Level 2 Product

波束成形 (Beamforming)

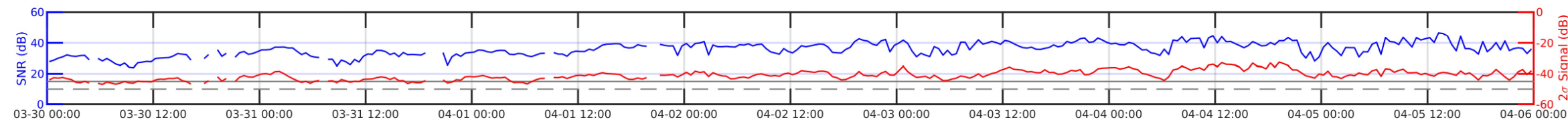
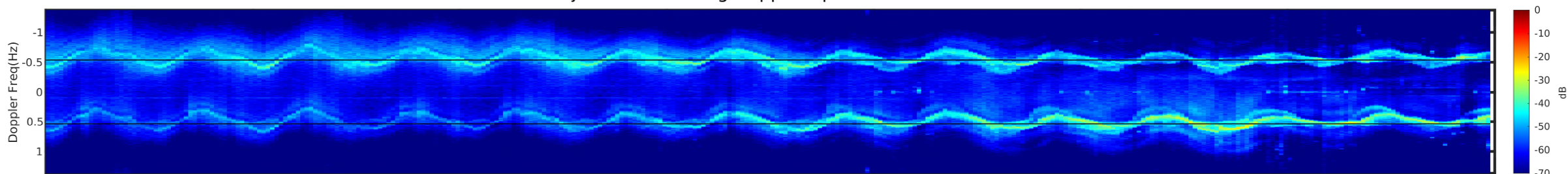
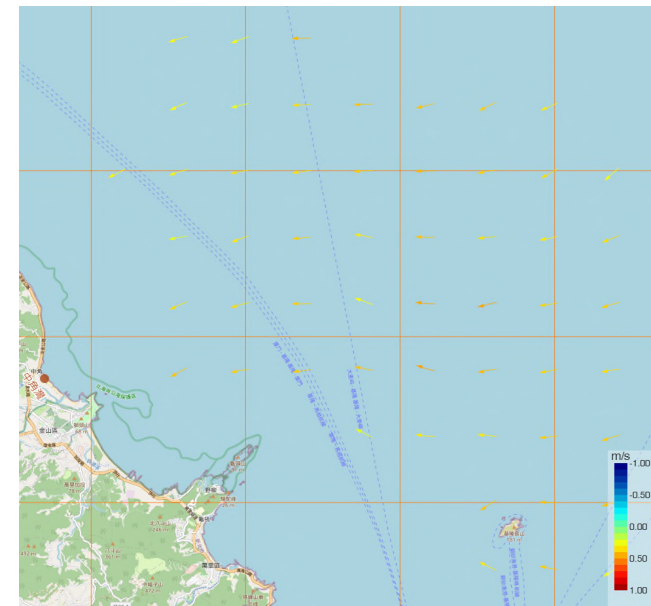
(4) 各方向都卜勒-距離譜能量分布 (Level 1)



(5) 單站雷達網格海氣參數空間分布 (Level 2)

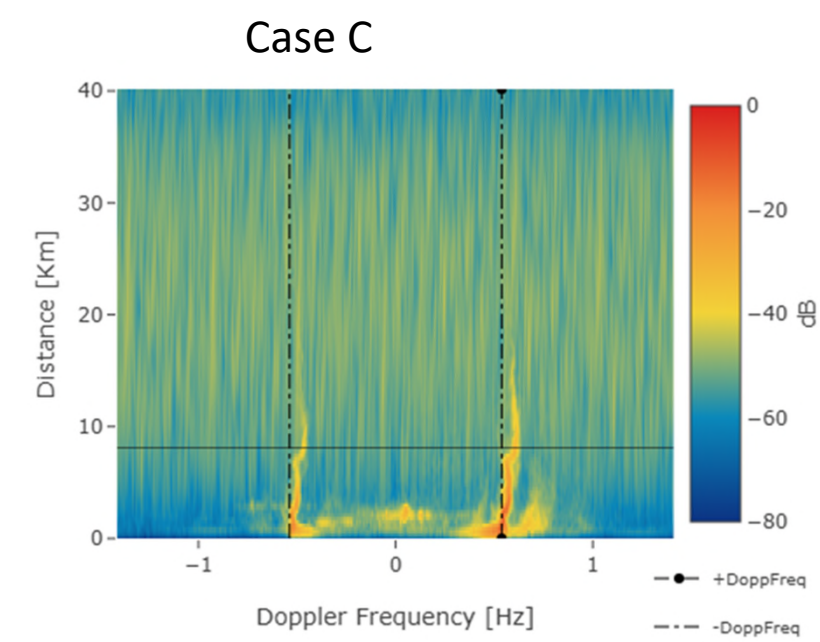
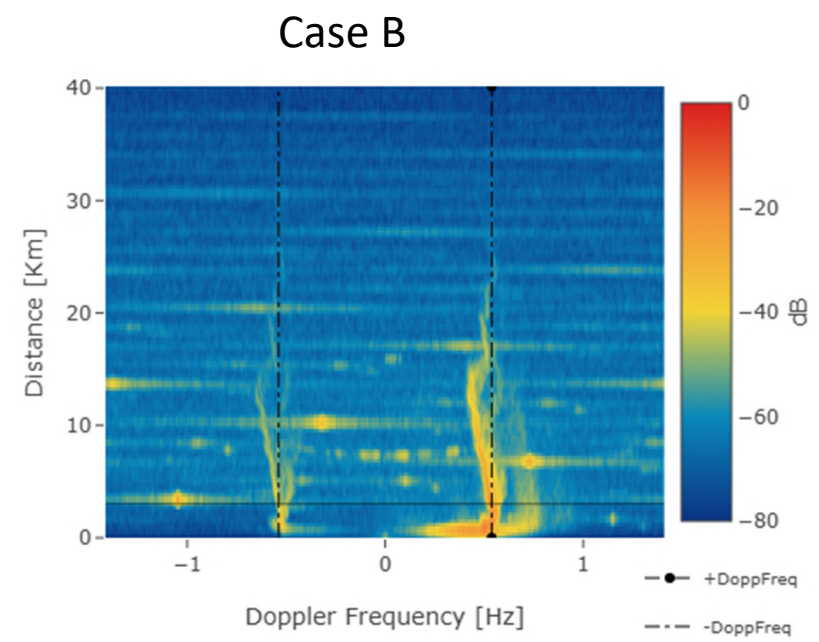
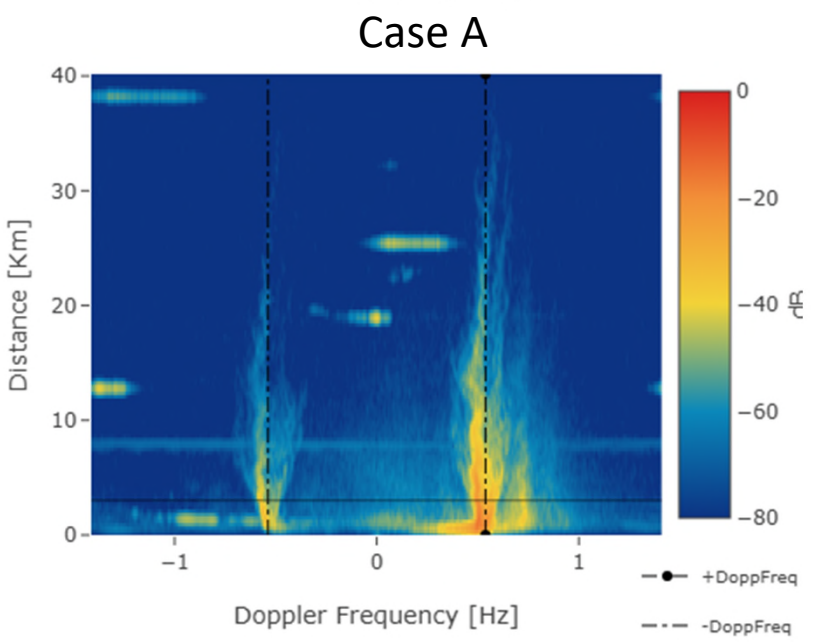
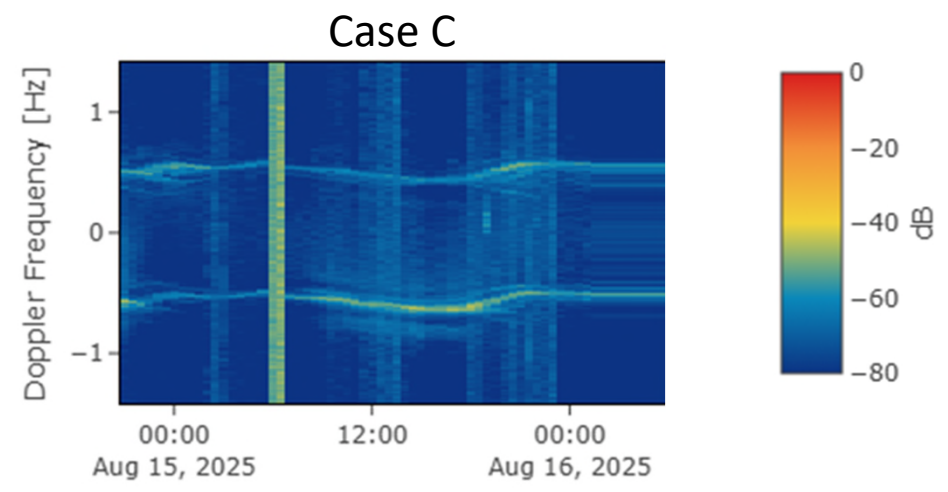
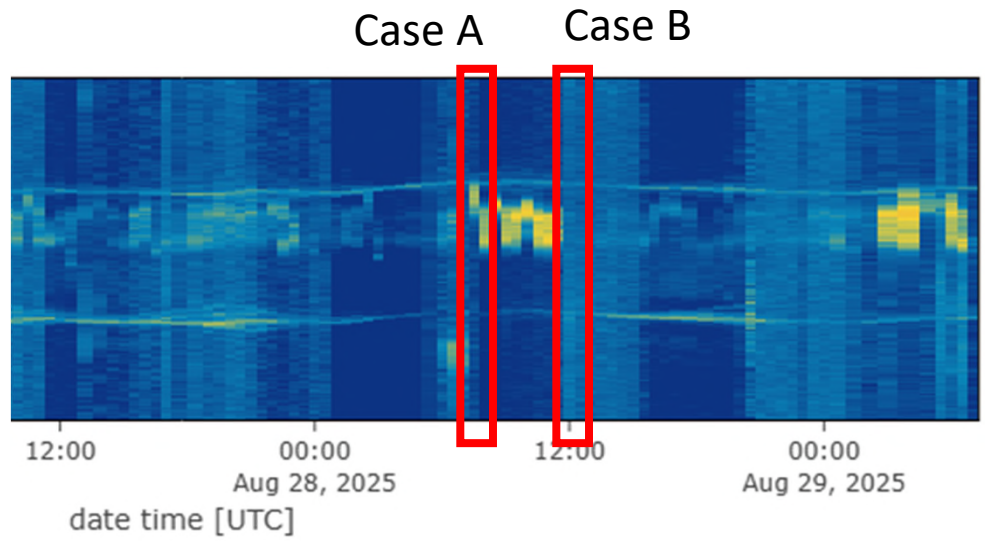


(6) 雙/多站雷達網格海氣參數空間分布 (Level 3)

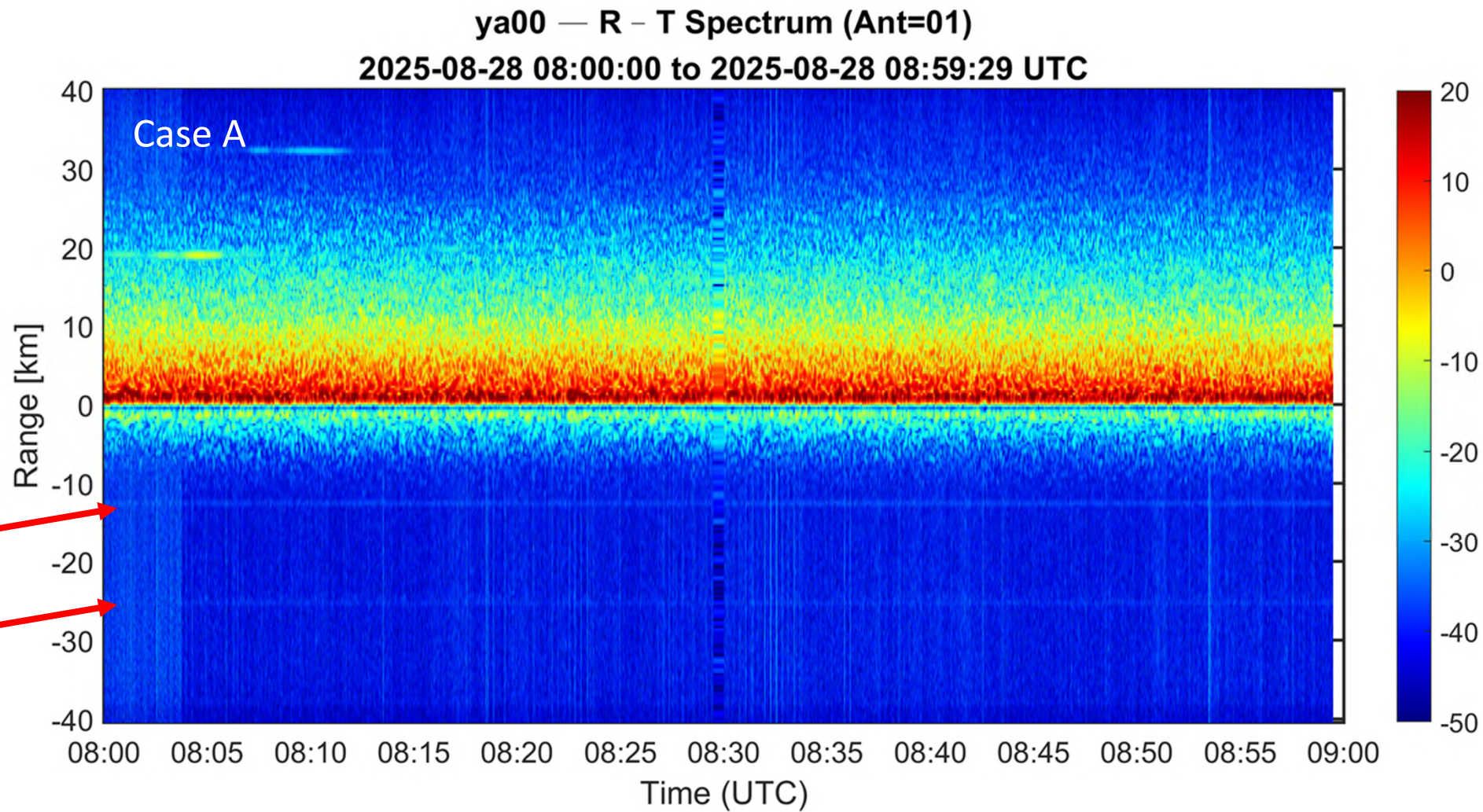


missing data : 011 / 336 OBS rate : 097%

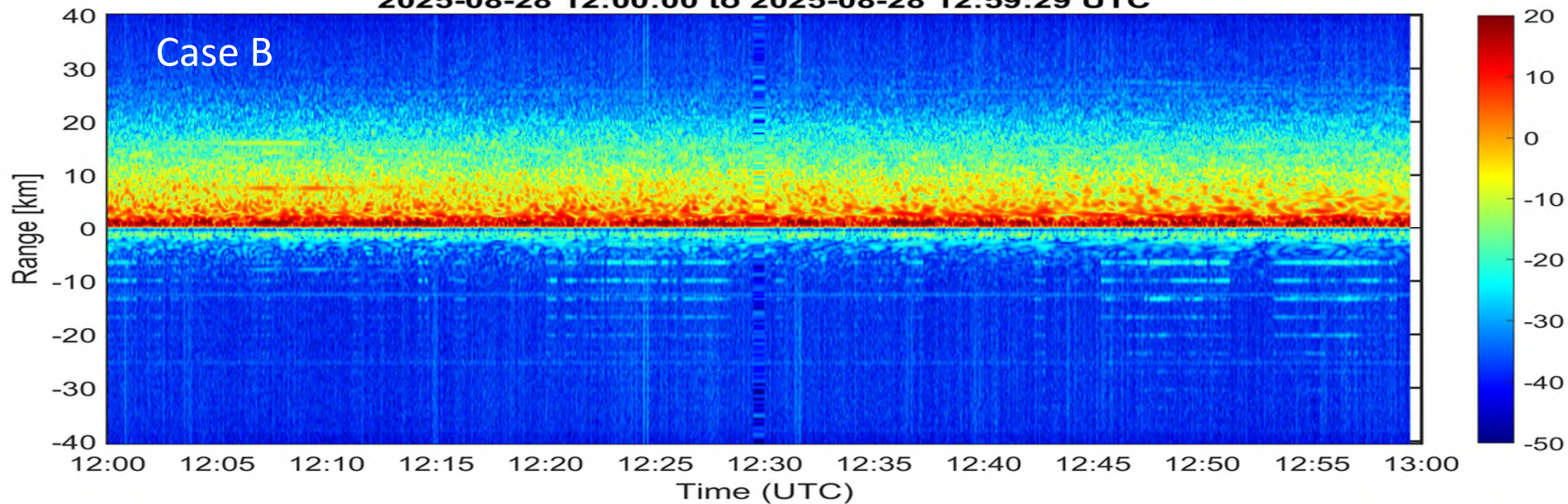
甲、Level 0的RFI造成的IQ閃爍：三個例子



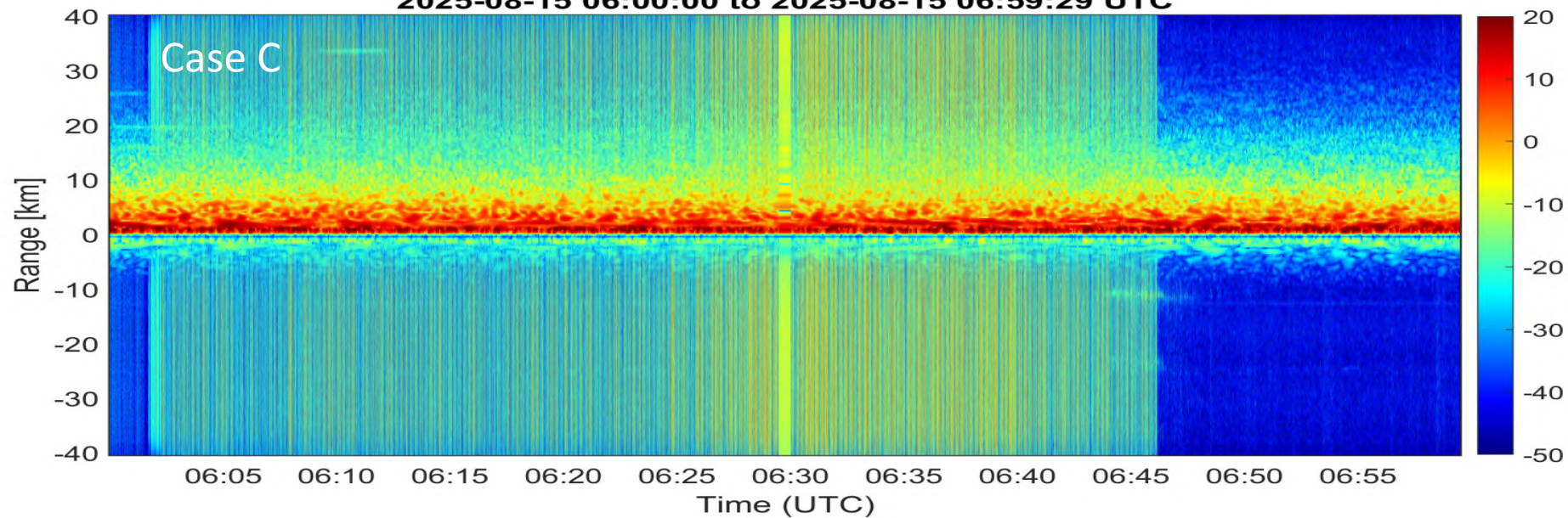
• **Dynamic spectrum**：觀察 IQ 振幅/相位隨時間與頻率的演化。



ya00 — R - T Spectrum (Ant=01)
2025-08-28 12:00:00 to 2025-08-28 12:59:29 UTC

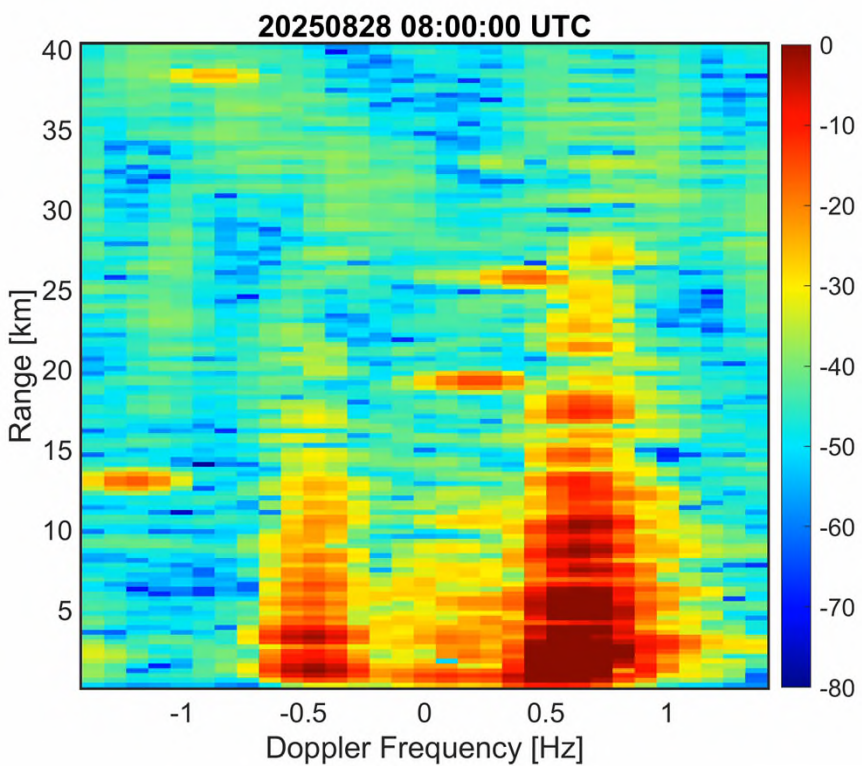


ya00 — R - T Spectrum (Ant=01)
2025-08-15 06:00:00 to 2025-08-15 06:59:29 UTC

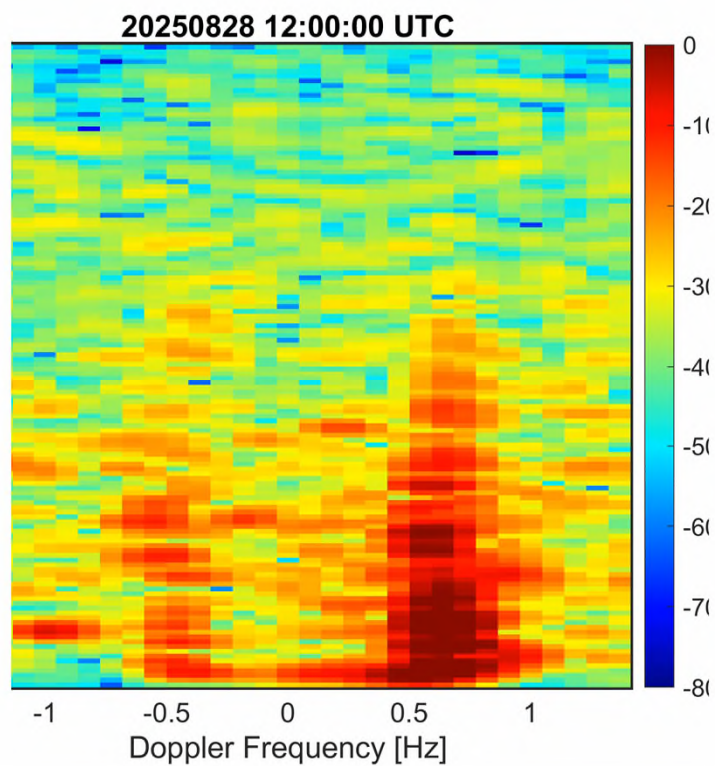


• **Dynamic spectrum** : 觀察 IQ 振幅/相位隨時間與頻率的演化。

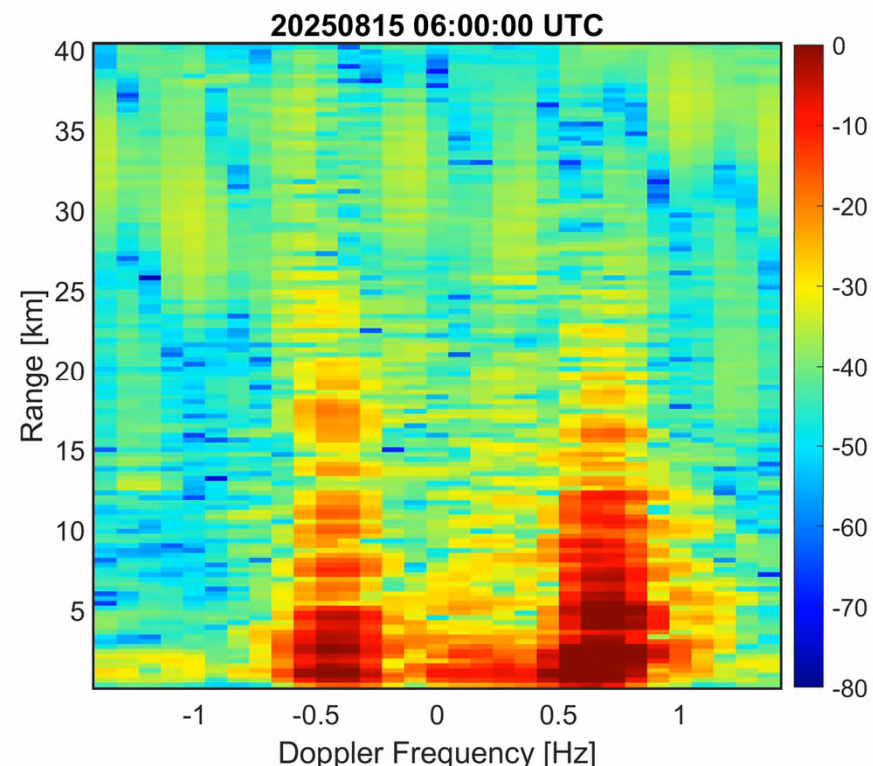
Case A: RFI 弱



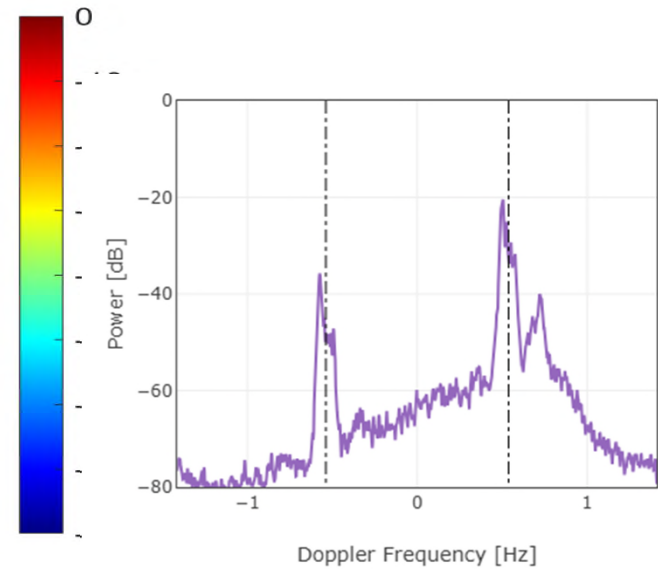
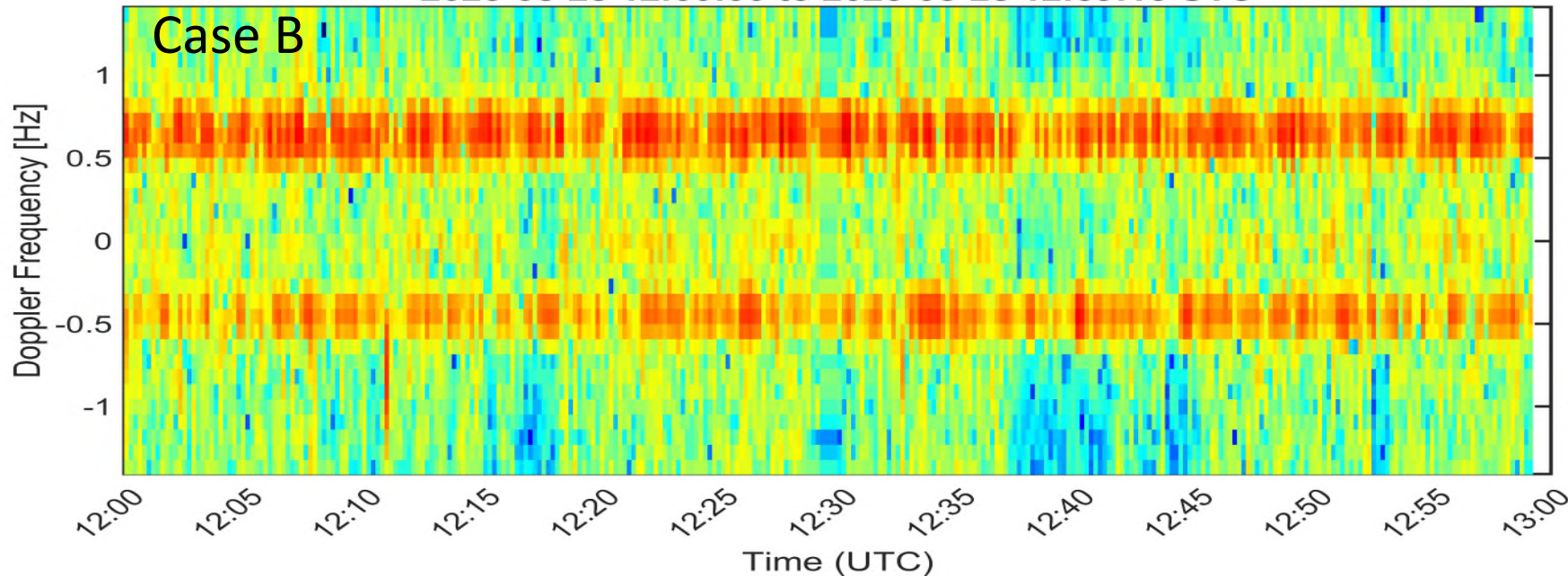
Case B: RFI 中



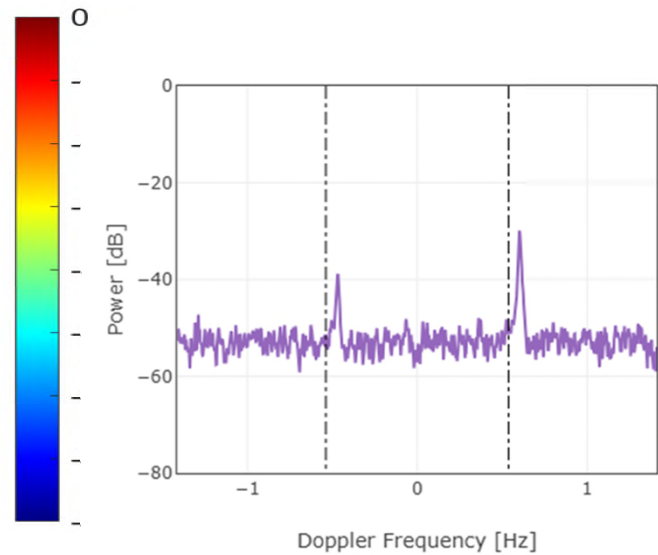
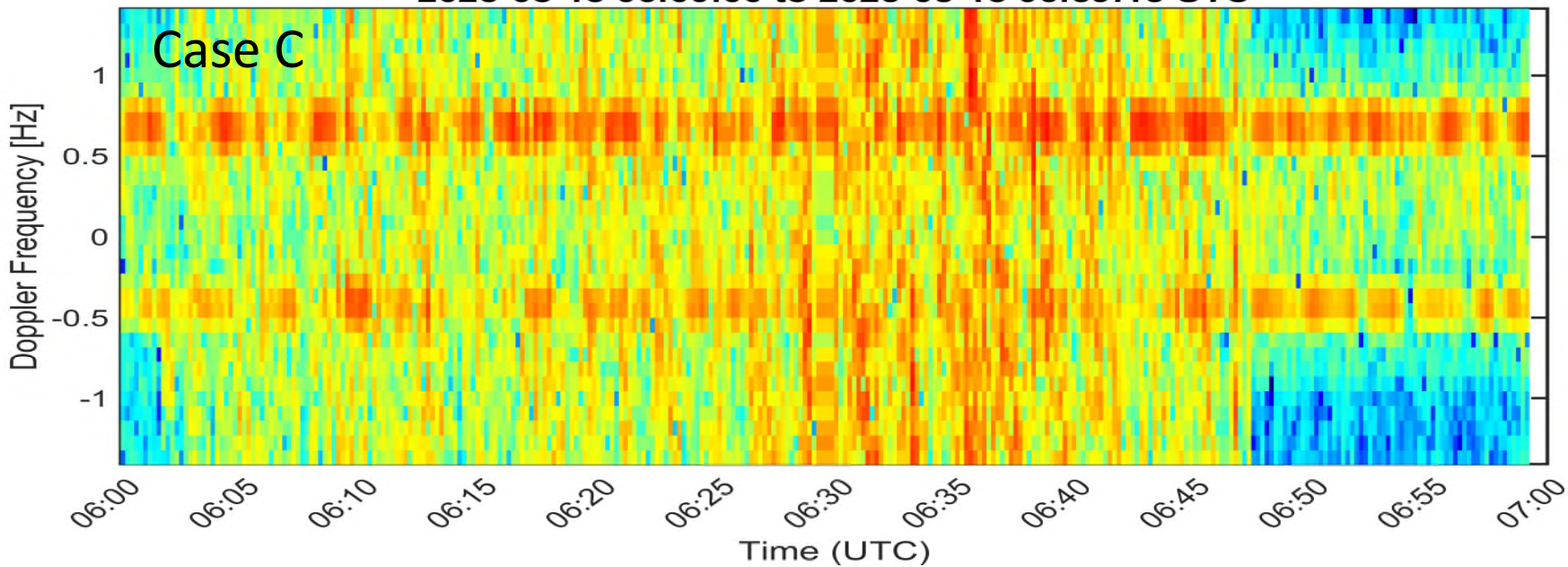
Case C: RFI 強



ya00 — D-T Spectrum ($\theta=00^\circ$, range=14.8353 km)
2025-08-28 12:00:00 to 2025-08-28 12:59:15 UTC

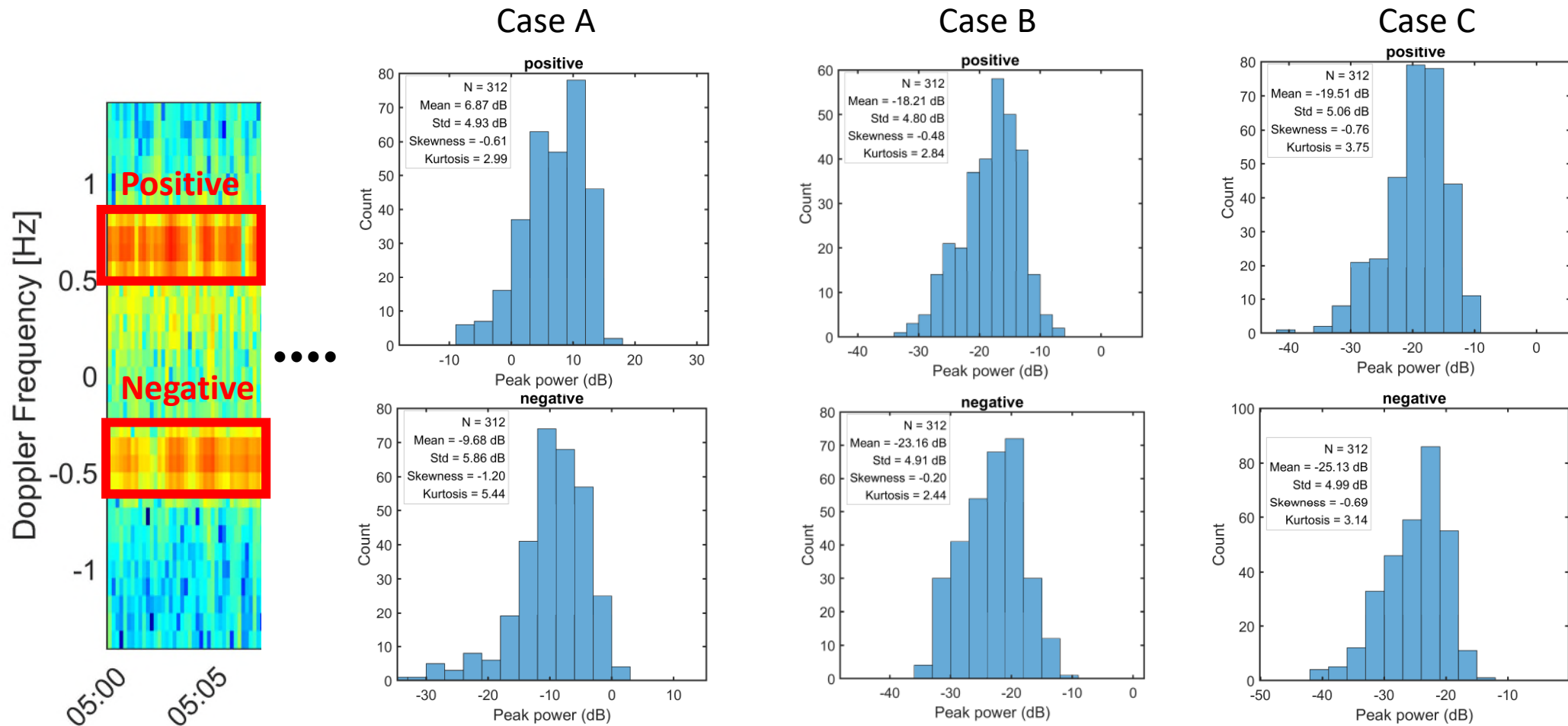


ya00 — D-T Spectrum ($\theta=00^\circ$, range=14.8353 km)
2025-08-15 06:00:00 to 2025-08-15 06:59:15 UTC



布拉格頻率訊號強度之統計分布

- **Spectral kurtosis (SK)**：直接檢測非高斯性，偏離Swerling 模型，標記 RFI 或突發異常。



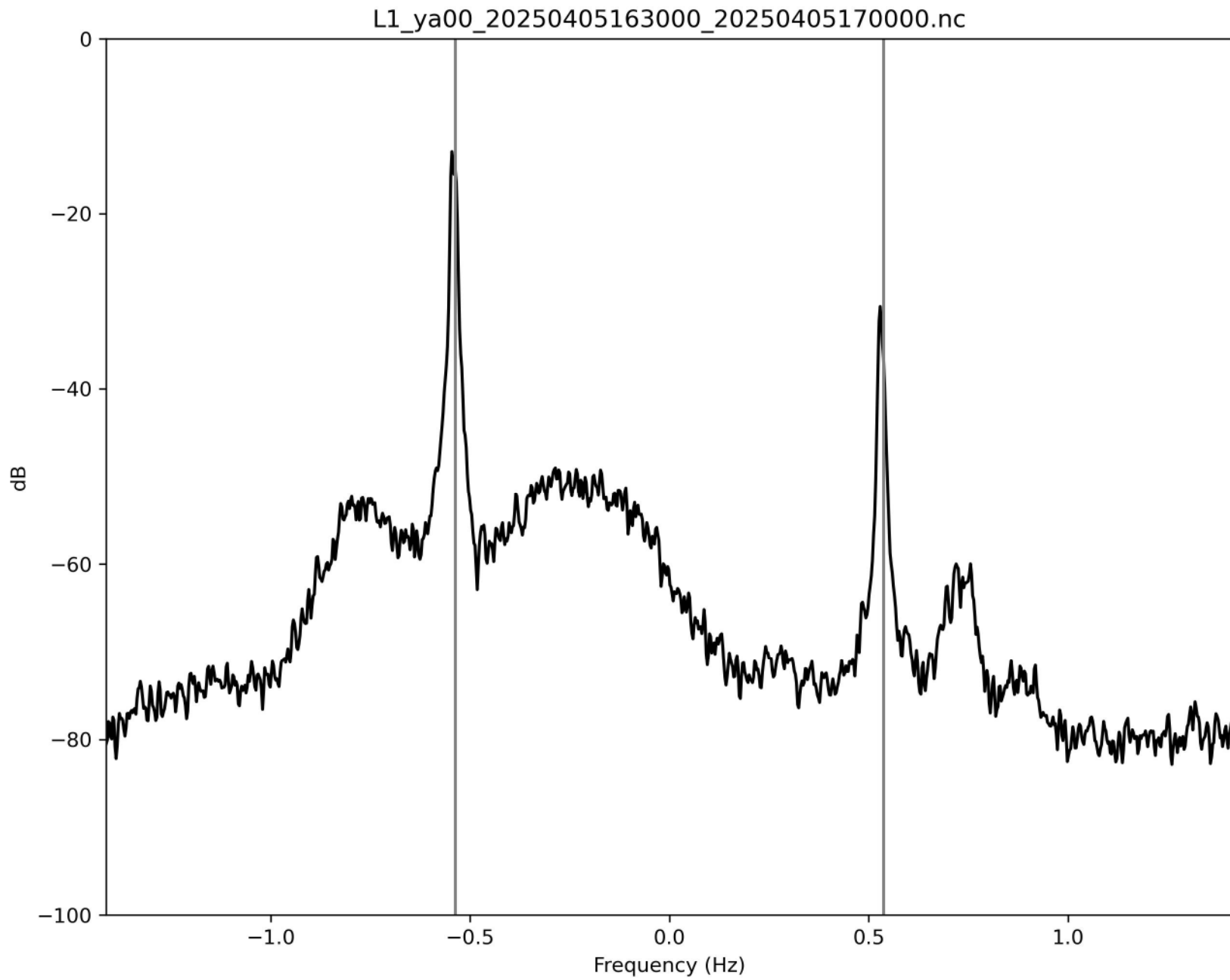
使用機率分布指標：平均、標準差、偏度、峰度，進行布拉格頻率強度之統計

新的Level 0 QC 步驟-

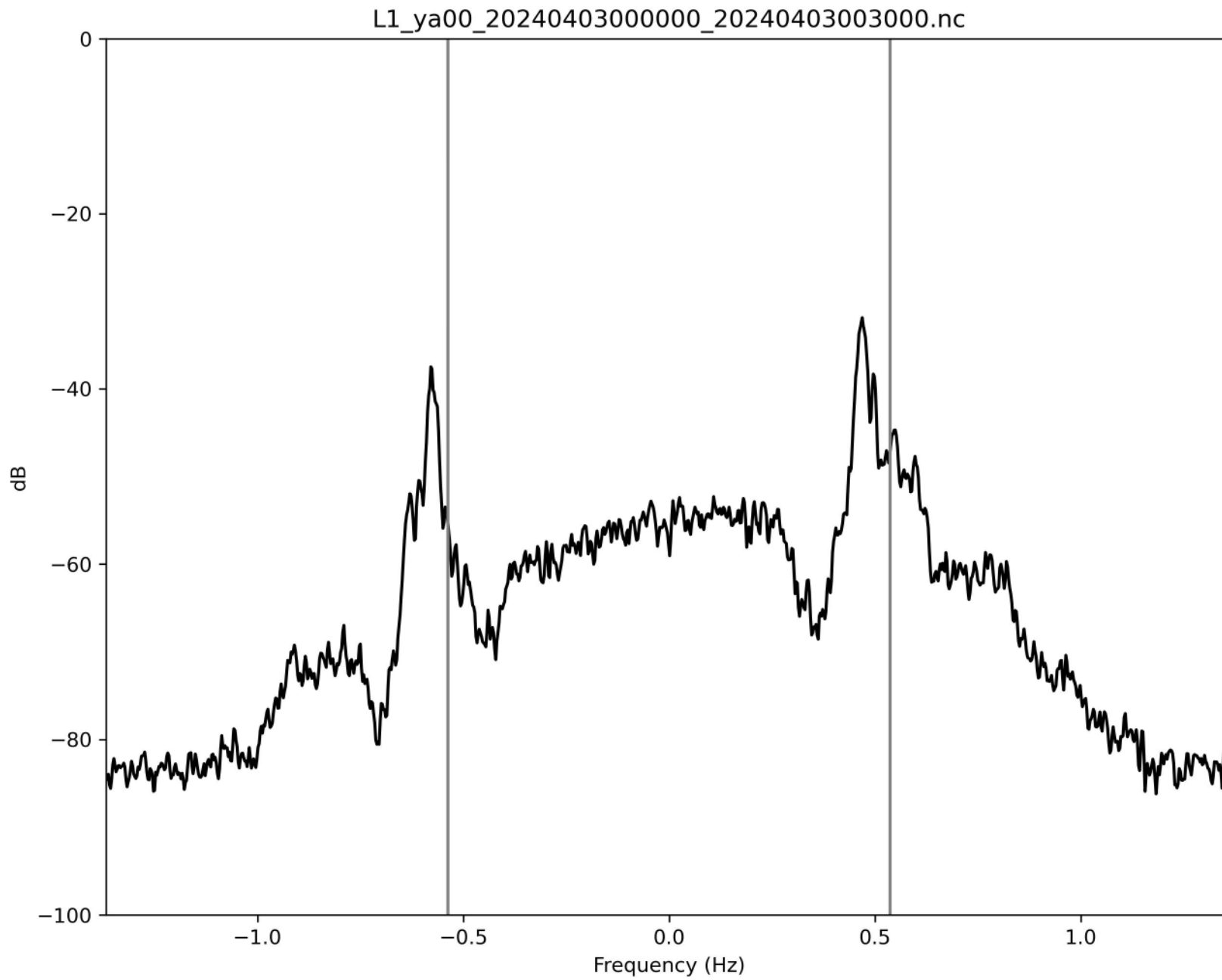
Spectral Kurtosis (SK) 偵測 + masking

1. 把 **Spectral Kurtosis (SK)** 計算結果投影到 時間 × 頻率平面上
2. 對動態頻譜的每個時頻點計算 SK，標記偏離高斯的干擾 → 在解算前標記。
3. 紀錄每個 Doppler 峰「可信 / 可疑 / 棄用」等級，於合成流速向量時MV加權。若遮罩比例過大 (>30%)，整筆資料標為「低可信度」不予納入計算。
4. 重新估算 **Doppler spectrum** → 對剩下頻率 bin 做峰值檢測。

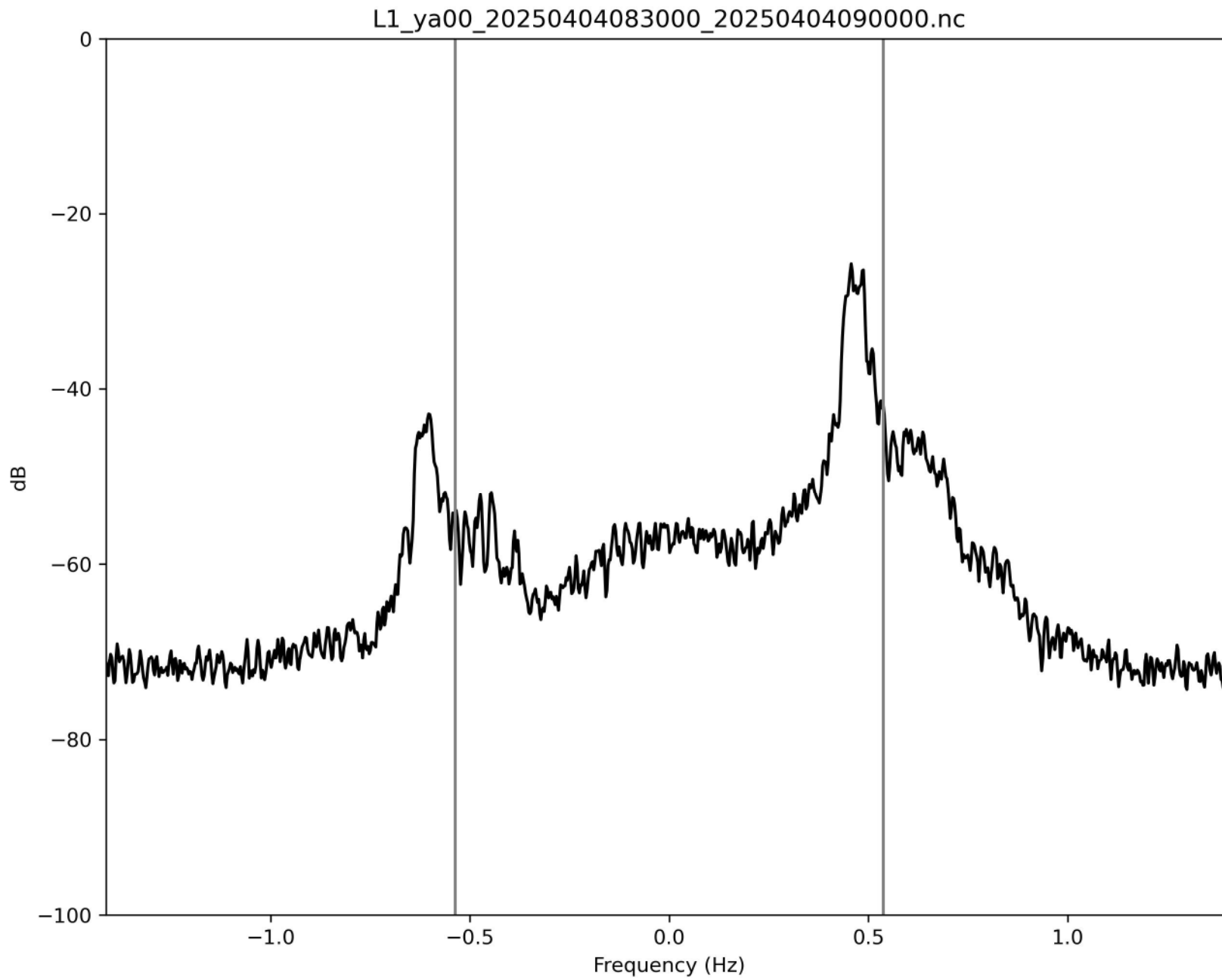
理想的一階峰



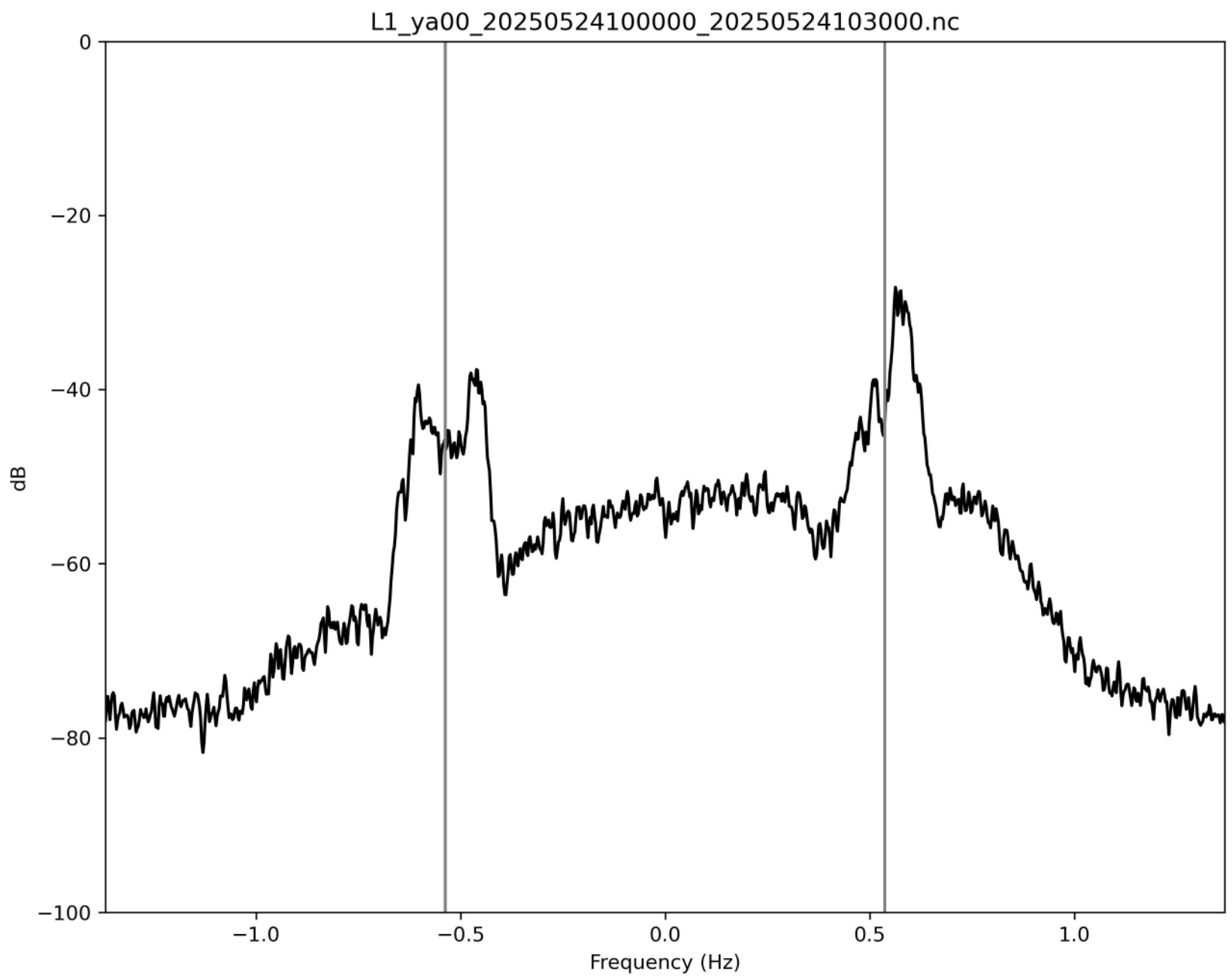
一階峰較寬



一階峰分界不清楚
(右邊)

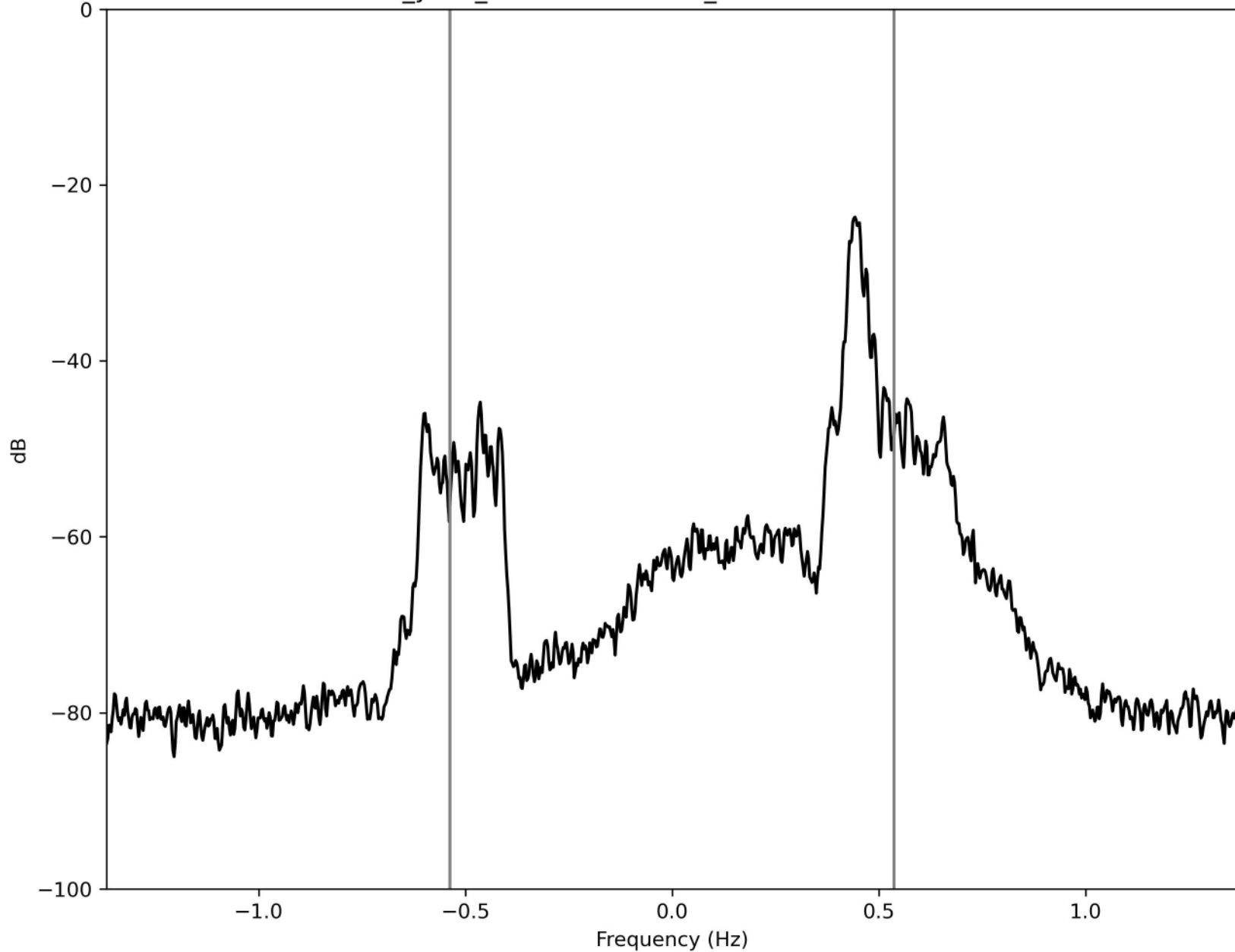


一階峰過寬



一階峰過寬且分界不清楚

L1_ya00_20240401103000_20240401110000.nc



機制的建立是核心

- RFI 為 HF 雷達 QC 的首要議題
- 建立 QC → 驗證 → 整合流程，可提升產品可信度
- 未來：
 - 自動化 RFI 偵測與 QC 平台
 - 與氣象署資料持續交叉驗證
 - 與衛星遙測、GNSS-R、AIS 結合，形成綜合觀測網

