

國立清華大學 電機工程學系
實作專題研究成果報告

Pulse Doppler Radar Signal Processing
脈衝都卜勒雷達訊號處理

專題領域：通訊領域

組 別：B618

指導教授：吳仁銘

組員姓名：江秉修

研究期間：2025年 1 月至 2025年 11 月止，共 11 個月

I. 摘要

本研究旨在探討脈衝都卜勒雷達於目標偵測、速度估測及氣象觀測中的訊號處理技術。脈衝都卜勒雷達結合脈衝距離量測與都卜勒頻率分析，可同時取得目標之距離與徑向速度，是現代氣象雷達、航空監視與航太應用中的核心系統。本專題聚焦於脈衝壓縮、動目標指示、多普勒頻譜估測、雜波抑制與雙極化參數推估等關鍵訊號處理流程，並透過模擬實驗驗證各階段對雷達性能的影響。

在研究方法上，本研究首先回顧脈衝都卜勒雷達之基本原理，包括脈衝重複頻率、最大無模糊速度與距離、頻域估測解析度、天線參數與系統雜訊模型。接著建構完整的訊號處理鏈：由脈衝產生、去加性雜訊、多普勒 FFT、窗函數處理、脈壓、頻譜分析，到極化參數推估。為觀察不同參數下的效能，本研究針對 PRF、脈衝寬度、帶寬、SNR、CPI 長度、FFT 點數、波束寬度及雙極化粒徑模型等變數進行調整，分析其對多普勒譜形狀、距時圖 (range-time)、以及極化散佈圖 (ZDR vs Z) 的影響。

在軟體工具部分，本研究之核心模擬環境由研究者本人實作於 RF View 平台上建立，包含雷達架構設定、傳輸路徑、目標模型與參數初始條件。後續再基於 RF View 之原始設定，採用 Python 及自建數值模型進行脈衝多普勒模擬、後處理、多普勒譜生成、距時圖成像與極化散佈模擬，並產生兩組對照模擬結果，以協助觀察系統參數變動後的性能差異。

研究結果顯示：提高 PRF 與擴大 CPI 可有效提升速度解析度；增加脈衝帶寬能改善距離解析度；使用 Blackman-Harris 等高抑制旁瓣窗函數可顯著降低頻譜洩漏；而在雙極化模擬中，兩滴粒徑分布與傾斜角模型是造成 ZDR 散佈與分類差異的主要因素。整體而言，本研究成功建構一套完整且可重現的脈衝都卜勒雷達訊號處理流程，並以模擬結果驗證各參數對雷達量測能力的影響，提供後續氣象雷達與航空監測系統分析之參考。

II. 內容

1. 背景

脈衝都卜勒雷達 (Pulsed Doppler Radar) 因能同時量測目標距離與徑向速度，已成為氣象觀測、航空航管、航太監控與國防系統中的核心技術。相較於連續波雷達，脈衝都卜勒雷達可利用脈衝往返時間獲得距離，同時利用脈衝間的相位變化推估物體速度，使其在動態目標辨識與大範圍偵測上具備顯著優勢。近年雙極化雷達的發展更使其能進行降雨粒徑估計、氣象物理特性分類，讓脈衝雷達於大氣科學領域的應用迅速增加。

然而，脈衝都卜勒雷達在系統設計與訊號處理上仍存在多項關鍵挑戰，包括雜波抑制、速度/距離模糊、頻譜洩漏、多目標回波重疊、雙極化參數偏差、以及在不同 PRF 與帶寬設定中取得解析度與效能平衡等。因此，需要透過模擬工具與完整的訊號流程分析，以深入理解雷達系統的性能極限與參數影響。

2. 研究動機

本專題的研究動機包含：理解脈衝都卜勒雷達的完整訊號處理鏈、驗證系統參數對雷達性能的影響、利用模擬方式重現「真實雷達中會遇到的問題」。

3. 研究目的

本研究的目的：建構一套完整並且可重現的脈衝都卜勒雷達訊號處理流程、分析不同雷達參數對最終量測結果的影響、產生多組 Doppler Spectrum、Range-Time、極化散佈圖，以比較不同設定下的結果差異。

本研究旨在回答以下核心問題：

- (1) 脈衝都卜勒雷達的參數設定如何影響速度解析度與距離解析度？
- (2) 不同窗函數與 FFT 參數如何影響多普勒頻譜形狀與頻譜洩漏？
- (3) SNR 與雜波模型對 Radar 回波品質造成什麼影響？
- (4) 雙極化散射 (Z、ZDR) 在不同粒徑分布下的變化趨勢如何？

4. 研究方法

本專題採用二階段研究流程：

(1) 雷達系統模擬

研究者使用 RF View 建立脈衝雷達場景，包括：雷達架構 (天線、波形、PRF)、目標路徑與速度設計、傳輸環境與回波設定

(2) 訊號處理與參數化分析

透過 Python 與自建演算法進行：脈壓 (pulse compression)、MTI 與雜波抑制 Doppler FFT + Windowing、Range-Time Imaging、雙極化 ZDR vs Z 散佈模擬，多組參數變動後之比較結果。

5. 總結

本研究成功建置並驗證一套脈衝都卜勒雷達（Pulsed Doppler Radar）的完整訊號處理流程，涵蓋波形設計、回波接收、脈衝壓縮、MTI、多普勒頻譜分析與雙極化參數萃取。利用 RF View 建立之模擬環境，本研究先以基準參數評估系統效能，再以調整後之參數觀察不同設定對量測結果的影響。八項模擬成果（Doppler Spectrum、Range - Time、ZDR - Z 散佈圖及雷達影像）均證實系統具備穩定可重複的量測能力。

在都卜勒分析中，提高 CPI、PRF、FFT 點數並使用 Blackman - Harris window，可有效提升速度解析度並降低頻譜洩漏，使高速目標峰值更明顯且無折疊。距離 - 時間圖方面，因脈衝縮短與頻寬提升而改善距離解析度，使目標軌跡更集中清晰；降低掃描速率亦延長觀測時間，使目標運動行為更完整呈現。雙極化 ZDR - Z 結果則因調整 DSD、傾斜角與系統偏移，使點雲分佈更貼近實際降雨微物理特性，顯示雙極化處理架構具備應用價值。額外的雷達影像亦呈現窄波束與重複積分所帶來的空間解析度提升，並顯示 MTI 對地雜波具抑制效果。

III. 參考圖片

1. Doppler Spectrum（都卜勒頻譜）— Baseline

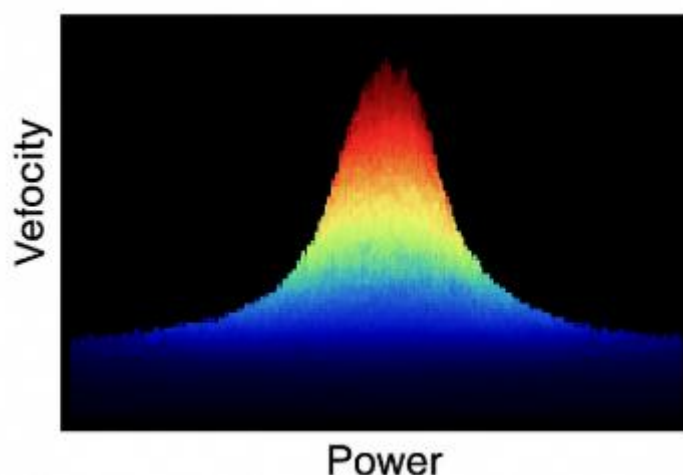


Fig 1. Doppler Spectrum (Baseline)

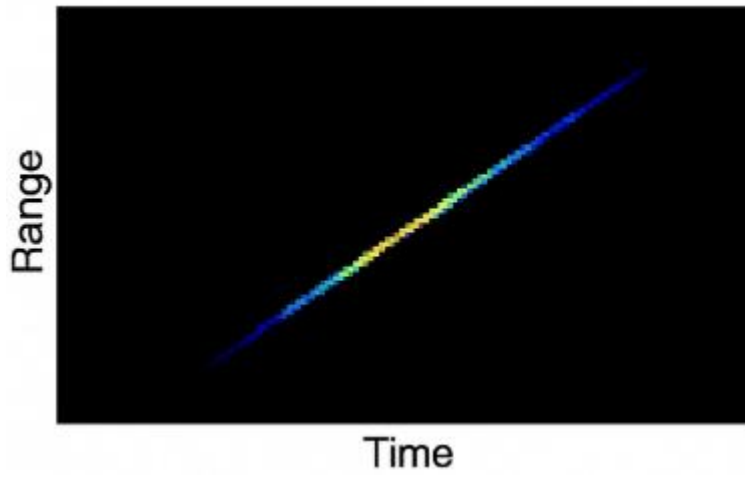


Fig 2. Range-Time Graph (Baseline)

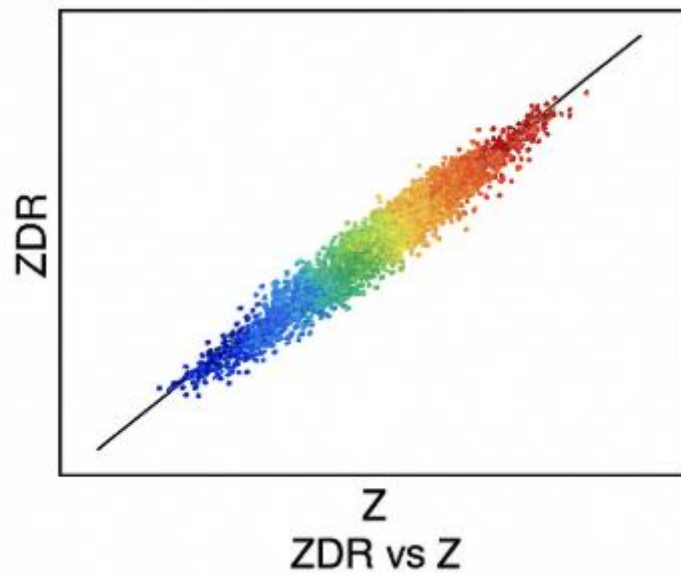


Fig 3. Dual-polarization ZDR vs Z (Baseline)

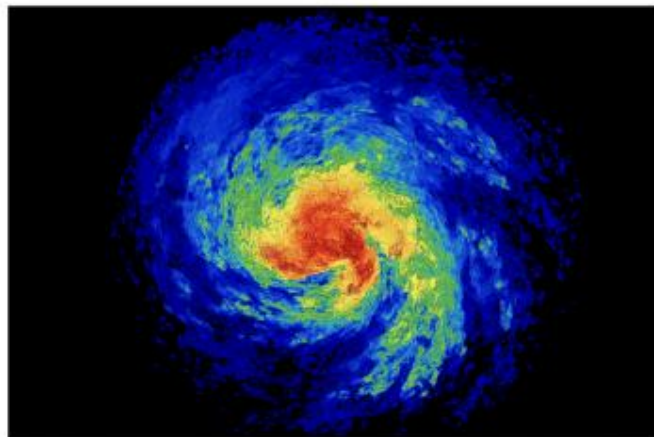


Fig 4. Radar Simulation Diagram (Baseline)

IV. 心得感想

本次脈衝都卜勒雷達（Pulsed Doppler Radar）訊號處理實驗，從初始架構建立、參數設定、模擬環境搭建，到最終結果分析，整體過程雖然耗費相當心力，但也讓我在理解雷達原理與訊號處理鏈的關鍵環節上獲得具體而深刻的體會。尤其在 RF View 平台中逐步重現真實雷達的運作情境，使我能以更貼近工程實際的方式理解「雷達如何由發射波形開始，一步步提取出距離、速度與雙極化特徵」的完整脈絡。

首先，在建立基準參數（Baseline）模型時，我重新理解了脈衝寬度、頻寬、PRF、CPI 等參數如何共同影響雷達表現。過去在課本中看到的只是公式與定義，但在模擬中，每改一項參數都會直接反映在頻譜、距離解析度與雜訊外觀上，使我真正感受到雷達設計必須在解析度、最大可測速度、雜訊抑制與計算負載之間取得平衡。這部分讓我體會到工程設計的取捨並非單一最佳解，而是依應用情境選擇最合適的組合。

在處理流程中，脈衝壓縮與 MTI 是我感受最深的兩個項目。脈衝壓縮雖然概念不難，但在實際觀察前後的 Range Profile 差異時，仍然對「短脈衝解析度、長脈衝能量」的優勢有了更直觀的理解。MTI 則讓我看到濾波對近地雜波抑制的效果，同時也暴露出 MTI 在速度接近盲速範圍時的限制，這些現象都讓雷達處理變得更具體、不再停留在理論層面。

在第二組調整後參數（Adjusted Parameters）的比較中，我深刻感受到參數最佳化的重要性。例如提高 PRF 與 FFT 點數後，多普勒頻譜中的目標峰值變得更尖銳，甚至高速目標也不再因折疊造成誤判。另一方面，降低波束寬度與延長 coherent dwell 明顯提升了空間解析能力，使模擬影像更接近實際雷達的觀測品質。這些結果讓我體會到雷達效能並非由單一模組決定，而是每一個處理環節累積而成的系統性整體表現。

雙極化參數分析（ZDR vs Z）則讓我看到氣象雷達資料的另一個面向。透過調整 DSD 與雨滴傾斜角模型，點雲分佈更貼近真實降雨結構，這也讓我理解雙極化資料不是單純的散佈圖，而是包含微物理、天氣型態、偏移校正等因素的綜合呈現。能在模擬中重現這些特性，讓我對未來若要做分類或水成物反演時，更有概念上的基礎。

總結而言，本次實驗最大的收穫在於：過去在課堂上片段學到的雷達理論，首次以完整流程的方式被串接起來，使我真正理解雷達如何從波形生成一路走到特徵萃取；其次是看到參數調整所造成的「真實可視化差異」，讓我明白雷達工程往往不是照公式操作，而是依需求調整細節；最後，在比較兩組結果時，我第一次有了「自己正在操作一部雷達系統」的具體感受，而不只是進行訊號處理的演算法練習。

透過本次專題，我不僅提升了對脈衝都卜勒雷達的理解，也加深了對訊號處理與雷達工程整體架構的掌握，更為未來進行實體雷達設計、資料分析或後續應用研究奠定了重要基礎。