

逢甲大學學生報告 ePaper

都卜勒 UAV 尋波平台開發設計

Doppler-AoA Fusion for UAV-Based Signal Direction Finding

作者：江沛蓁、李彥陞、黎宸佑

系級：自控三乙

學號：D1252810、D1287510、D1287570

開課老師：黃清輝

課程名稱：機器人學

開課系所：自動控制工程學系

開課學年：114 學年度第一學期



中文摘要

針對 GPS 失效、高遮罩或強電磁干擾之極端環境，本研究開發一套「基於都卜勒效應之非合作式尋波定位系統」。該系統整合精密旋轉掃描機構與軟體定義無線電 (SDR) 接收架構，透過設計具備水平 360 度與俯仰 90 度掃描能力之平臺，並選用高轉速、高負載步進馬達 TK296D-04A，確保在 2.4 GHz 頻段下捕捉訊號之穩定性。技術核心在於利用無人機相對運動產生之都卜勒頻移，結合 SNR、RSSI 與頻譜距離因數 (SDF) 等多重物理層特徵指標，提升目標與背景雜訊之可分離性。

在演算法層面，本研究導入遞迴最小平方法 (RLS) 與最小二乘法，針對旋轉過程中產生的頻移曲線進行動態擬合，有效抑制多徑效應與瞬時雜訊干擾。實驗流程採先水平後垂直之二階段掃描，精準推算出無人機之水平方位角與俯仰角。結果顯示，本系統在發射功率未知且不依賴 GPS 數據的條件下，仍能維持高度的重現性與即時三維定位精度，為反制無人機、災後搜救及高遮罩環境監測提供一套低成本、高機動性且具備實用價值之尋波解決方案。

關鍵字：

1. 無人機追蹤 (UAV Tracking)
2. 無 GPS 定位 (GPS-independent Positioning)
3. 訊號尋波 (Signal Wave-finding)
4. 都卜勒效應 (Doppler Effect)
5. 抗干擾技術 (Anti-interference Technology)

Abstract

To address the challenge of GPS-deprived, high-shielding, or intense electromagnetic interference environments, this research develops a "Non-Cooperative Signal Source Localization System based on the Doppler Effect." The system integrates a precision rotary scanning mechanism with a Software Defined Radio (SDR) receiving architecture. By designing a platform with 360° horizontal and 90° pitch scanning capabilities—powered by the high-speed, high-torque TK296D-04A stepper motor—stable signal capture at the 2.4 GHz band is ensured. The technical core lies in utilizing the Doppler frequency shift generated by the relative motion of the UAV, combined with multiple physical layer feature indicators such as SNR, RSSI, and the Spectral Distance Factor (SDF) to enhance the separability of the target signal from background noise.

At the algorithmic level, this study implements Recursive Least Squares (RLS) filtering and Least Squares estimation to dynamically fit the frequency shift curves generated during rotation, effectively suppressing multipath effects and instantaneous noise interference. The experimental procedure follows a two-stage scanning process—horizontal followed by vertical—to accurately calculate the UAV's azimuth and elevation angles. Results demonstrate that the system maintains high reproducibility and real-time 3D positioning accuracy, even when the transmission power is unknown and GPS data is unavailable. This provides a low-cost, high-mobility, and practical wave-finding solution for anti-UAV systems, post-disaster search and rescue, and environmental monitoring in highly shielded areas.

Keyword :

UAV Tracking

GPS-independent Positioning

Signal Wave-finding

Doppler Effect

Anti-interference Technology

目錄

一、研究動機與目的.....	5
二、文獻探討與相關技術.....	6
2.1 現有對空尋波平臺分析.....	6
2.2 關鍵技術概述.....	7
三、機器人系統架構設計.....	8
3.1 系統總體功能方塊圖與邏輯鏈結.....	8
3.2 機械結構規劃與自由度分析.....	10
3.3 硬體介面控制與高解析度驅動技術.....	11
四、硬體元件選型與評估.....	15
4.1 控制器選用分析.....	15
4.2 動力驅動系統.....	16
4.3 感測系統與訊號處理.....	16
五、軟體演算法與控制邏輯.....	18
5.1 軟體開發環境與架構.....	18
5.2 核心控制演算法.....	19
六、結論與未來展望.....	21
七、元件規格型錄.....	22
八、參考文獻.....	24

圖目錄

圖 3-1 系統整體架構.....	9
圖 3-2 三維全域座標系.....	11
圖 3-3 全步進模式之相位電流.....	12
圖 3-4 1/16 微步之相位電流.....	13
圖 5-1 程式流程圖.....	19
圖 5-2 軟體架構圖.....	20

表目錄

表一 不同驅動模式之預期效能差異.....	14
表二 元件規格表.....	22

一、 研究動機與目的

隨著無人飛行載具 (UAV) 技術於救難、農業及物流領域的普及，其導航系統在 GPS 訊號受限或高干擾環境下的穩定性已成為關鍵技術瓶頸，現有基於接收訊號強度指標 (RSSI) 的定位法因極易受環境多徑效應與非視距傳輸 (NLOS) 影響，在發射功率未知時難以維持精度，本研究擬開發一套基於都卜勒效應 (Doppler Effect) 之尋波系統，透過精密旋轉機構產生之相對運動，精確捕捉 2.4 GHz 通訊頻段之動態頻移特徵，藉此建立高穩定度的被動式定位模型。本專題之核心目標在於建構具備水平 360 度與俯仰 90 度自由度、掃描轉速高且能承載 3 kg 負載之雙軸旋轉平臺。在實現此硬體目標的設計過程中，本小組特別針對驅動系統進行嚴謹篩選，透過對比多款 NEMA 23 規格步進馬達之定格力矩與電氣參數，詳實分析 TK296D-04A 馬達具備的低相位電感 (2.4 mH)、高額定電流與低阻抗特性，如何有效支持高頻換相下的瞬時扭矩維持，確保天線機構在高速旋轉時不因反電動勢導致失步，進而維持都卜勒頻譜取樣所需的物理恆定性。在軟體層面，本研究旨在藉由 MATLAB 平臺整合多重指標監測 (如 SNR、RSSI 及 SDF)，並導入具備時變參數更新能力的遞迴最小平方法 (RLS) 濾波器與最小二乘法進行頻移曲線擬合，動態濾除環境隨機雜訊，進而從非線性頻譜偏移中推算出目標之精確水平方位角與俯仰角，最終達成於無 GPS 支援下實現被動式三維空間即時定位。此研究深度整合了精密機械、無線電通訊與數位訊號處理之跨領域實踐，不僅能提供一套兼具成本效益與穩定性的非合作式定位方案，更透過「由物理需求推導規格、由型錄數據驗證設計」的嚴謹學術態度，為反制無人機、災後搜救與電磁干擾環境監測提供具備高度參考價值的技術典範。

二、文獻探討與相關技術

2.1 現有對空尋波平臺分析

隨著無人機 (UAV) 在物流、農業與國防領域的普及，其導航與定位技術的可靠性至關重要。目前的對空尋波與定位平臺主要分為依賴全球定位系統 (GPS) 的合作式定位，以及基於訊號特徵的非合作式定位。本節將針對現有技術架構進行分析與比較。

2.1.1 傳統 GPS 定位之限制

現行的無人機導航系統高度依賴 GPS 訊號。然而，GPS 系統至少需要與四顆衛星進行通訊才能解算出準確的三維座標。在以下情境中，GPS 定位極易失效：

- 建築物遮蔽與多徑效應：城市峽穀或室內環境會阻斷衛星訊號。
- 惡劣天氣與通訊中斷：訊號衰減導致數據無法回傳基地。
- 人為干擾：在國防或高安全需求區域，GPS 訊號常受到電子干擾壓制。

鑑於上述限制，開發不依賴 GPS 且能自主搜尋訊號源的「被動式定位系統」已成為減少無人機迷航與經濟損失的關鍵解決方案。

2.1.2 各類非合作式定位技術比較

針對無 GPS 環境下的非合作式訊號源 (Non-cooperative Signal Source) 定位，現有文獻主要探討以下三種主流技術路徑：

1. 接收訊號強度 (RSSI)：

- 特點：利用訊號衰減模型推算距離。Stefano Moro 證實其在 2.4 GHz 頻段的可行性。
- 限制：對發射功率變動與多徑效應高度敏感，在未知環境中穩定性不足。

2. 到達方向角 (AoA)：

- 特點：利用天線陣列相位差辨識角度。Tarkowski 結合 ESPAR 天線與 SVM 模型，顯著提升辨識精度。
- 限制：硬體天線結構複雜，運算成本高。

3. 都卜勒頻移：

- 特點：利用相對運動產生的頻率偏移定位。Jan M. Kelner 指出此法無需預設訊號模型，對雜訊具良好抗性。
- 優勢：適合被動式定位，即使在非視距 (NLOS) 條件下，仍能維持穩定的方向估測。

2.2 關鍵技術概述

本研究整合機械掃描與訊號處理演算法，核心技術如下：

2.2.1 都卜勒效應與特徵強化

- 原理：透過接收器與波源的相對運動（接近頻率升、遠離頻率降）推算方位。
- 技術應用：參考 Szczepanik 的研究，透過數位訊號處理（如頻譜次方運算）強化 BPSK/QPSK 等調變訊號中的都卜勒頻移特徵，提升可辨識度。

2.2.2 遞迴最小平方 (RLS) 濾波器

- 目的：解決 2.4 GHz 頻段嚴重的自干擾與非線性雜訊問題。
- 方法：採用 Hua Zhang 提出的 RLS 架構，透過「遺忘因數」機制快速適應動態環境，從雜訊中提取微弱的目標載波。

2.2.3 最小二乘法曲線擬合

- **目的：** 消除機械掃描過程中的隨機測量誤差。
- **方法：** 對掃描數據進行正弦曲線擬合，藉由最小化殘差平方和，精確定義頻移最大值所對應的物理夾角，實現高精度定位。

2.2.4 高速掃描硬體選型

- **SDR 接收器：** 選用 LimeSDR Mini 2.0，頻寬覆蓋 10 MHz 至 3.5 GHz，滿足 2.4 GHz 訊號捕捉需求。
- **步進馬達 (TK296D-04A)：**
 - **選型依據：** 針對 5 rps 高轉速與 3 kg 高負載需求。
 - **關鍵參數：** 選用低電感(2.4 mH)與低阻抗(0.55 Ω)型號，確保電流在高速切換時能迅速建立，維持 25 kg·cm 高轉矩而不失步。

三、 機器人系統架構設計

本系統旨在構建一套具備物理層感知與精密機械響應的閉迴路偵測平臺。為了在無 GPS 環境下達成高精確度的三維定位，架構設計區分為硬體實體層、控制傳輸層與演算法運算層，確保高頻訊號取樣與機構旋轉角度具備嚴格的時序同步性。

3.1 系統總體功能方塊圖與邏輯鏈結

系統整體架構(如圖 3-1 所示)以高效能運算平臺作為核心，整合軟體定義無線電(SDR)前端與雙軸步進控制機構，形成完整的非合作式訊號定位鏈路。

3.1.1 訊號獲取鏈路 (Signal Chain)

- **前端感測端：** 由定向高增益天線被動捕捉目標無人機發射之 2.4 GHz 原始 RF 訊號。
- **SDR 接收核心：** 選用 LimeSDR Mini 2.0 (CS-LIME-26) 模組，其具備 10 MHz 至 3.5 GHz 的寬頻掃描能力，負責將類比訊號進行下變頻

(Down-conversion) 與數位化取樣。

- **資料傳輸協定**：透過 USB 3.0 高速介面傳輸 I/Q 取樣資料，確保在 2.4 GHz 高頻取樣下資料不失真，為後續都卜勒頻移運算提供物理基礎。

3.1.2 指令控制鏈路 (Control Chain)

- **致動元件選型**：採用 TK296D-04A 雙極步進馬達 作為雙軸平臺之驅動核心。
- **驅動邏輯優化**：運算平臺發送步進脈衝 (PWM) 與方向 (Direction) 訊號至馬達驅動器，透過 1/16 微步電流控制，將基本步距角 1.8° 細化至 0.1125° ，以抑制高速旋轉下的機械震動。
- **機械聯動機制**：驅動 TK296D-04A 帶動精密旋轉平臺，實現水平 360° 與俯仰 90° 的全空間掃描。

3.1.3 回授處理與演算法核心

- **物理特徵監測**：系統透過 MATLAB 即時整合接收端之信噪比 (SNR)、接收訊號強度指標 (RSSI) 與頻譜距離因數 (SDF)。
- **數據對齊與擬合**：將物理指標與馬達即時角度進行時間戳記對齊，並導入 遞迴最小平方法 (RLS) 與 最小二乘法 進行頻移曲線擬合，動態濾除多徑效應與瞬時雜訊，最終建立精確的方位-頻譜映射模型。

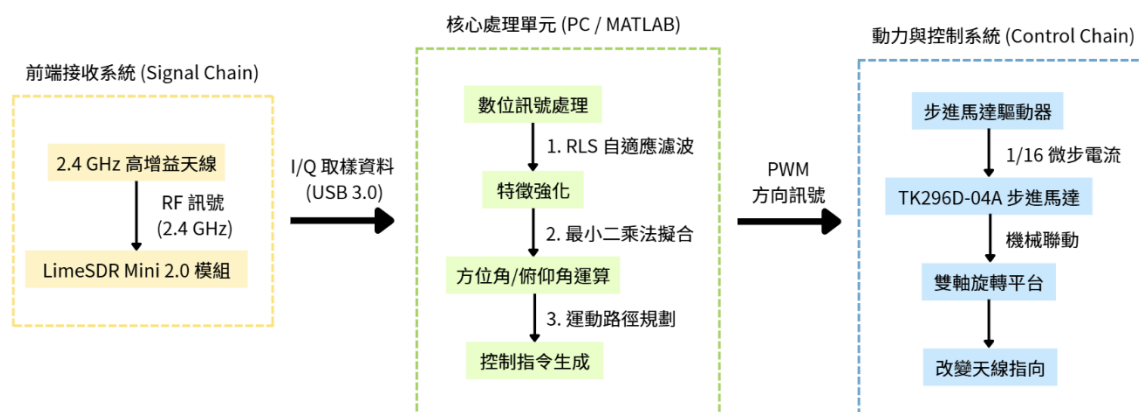


圖 3-1 系統整體架構

3.2 機械結構規劃與自由度分析

本節針對系統之物理實體進行詳細規劃，並針對其運動範圍進行自由度分析，確保天線機構能達成全空間之訊號捕捉。

3.2.1 機械結構規劃

為了達成被動式尋波任務，本系統設計了一套雙軸旋轉平臺：

- **水平旋轉機構**：由 TK296D-04A 步進馬達直接驅動，負責執行水平方位角的掃描。該機構需承載約 3 kg 之負載（包含 SDR 模組與天線架構），並能在每秒 5 圈（300 RPM）的高速下維持穩定旋轉。
- **俯仰掃描機構**：負責執行俯仰角的調整。此機構確保接收器能針對不同高度的無人機目標進行鎖定。

3.2.2 自由度 (DOF) 分析

根據機器人學之定義，本系統具備兩個主動旋轉自由度（2-DOF）：

1. 水平偏轉角 (φ)：旋轉範圍為 360° 連續旋轉，提供方位定位能力。
2. 垂直俯仰角 (θ)：旋轉範圍為 0° 至 90° ，提供高度定位能力。

透過此二自由度的正交配置，本系統可涵蓋上半球體的完整掃描範圍。

3.2.3 運動學座標系與幾何關係

為了量化上述自由度的運動對都卜勒頻移的影響，本研究建立了三維全域座標系 $G(X, Y, Z)$ （如圖 3-2 所示）。

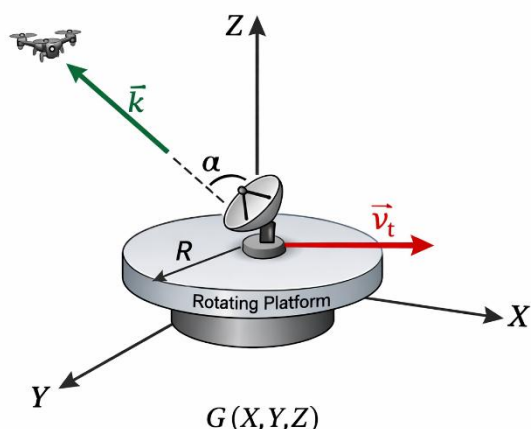


圖 3-2 三維全域座標系

● 參數定義：

- 旋轉半徑：天線相位中心至旋轉軸心的距離。
- 切線速度：由步進馬達驅動天線產生的瞬時運動向量。
- 入射波向量：定義由目標無人機指向接收端之單位向量。
- 相對夾角： V_t 與 k 之間的幾何夾角。
- 都卜勒頻移公式證明：

根據都卜勒效應物理定義，接收端觀測到的瞬時頻移量 f_D 與相對速度投影成正比：

$$f_D = f_0 \frac{V_t \times \cos\alpha}{c}$$

其中 c 為光速， f_0 為原始載波頻率。此幾何模型證明，透過量測掃描過程中的 f_D 最大值與最小值點，即可精確鎖定無人機之方位角 φ 俯仰角 θ 。

3.3 硬體介面控制與高解析度驅動技術

本系統之定位精度高度依賴於天線旋轉速度的「物理恆定性」。由於都卜勒頻移 f_D 與切線速度 V_t 直接相關，任何機械抖動都會在頻域中產生相位雜訊。因此，本研究針對馬達驅動技術進行了深度的優化與分析。

3.3.1 傳統驅動模式之振動雜訊分析

如圖 3-3 所示，傳統的「全步進模式 (Full-Step Mode)」在相位電流控制上呈現不連續的階梯狀方波。

- **電流跳變特性：**相位電流在換相瞬間產生劇烈變化，導致磁場切換過於突兀，進而誘發馬達轉子的機械共振。
- **對定位之影響：**這種震動 (Vibration Noise) 會造成天線瞬時速度不穩定，使都卜勒頻移曲線產生相位抖動 (Jitter)，顯著降低最小二乘法在曲線擬合時的信賴區間。
- **失步風險：**在每秒 5 圈的高速運轉下，全步進模式較易因脈動轉矩不均而導致馬達失步。

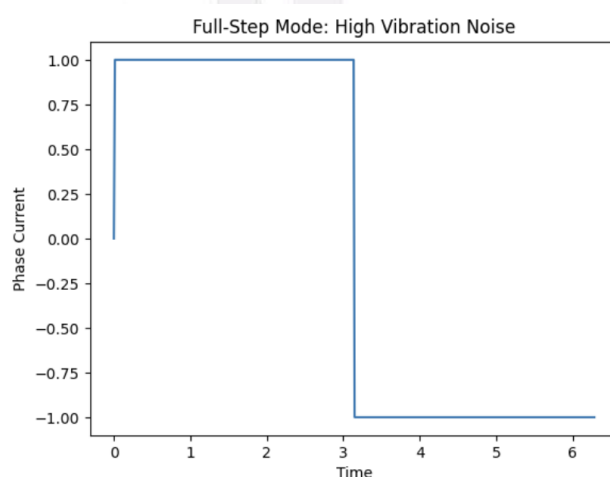


圖 3-3 全步進模式之相位電流

3.3.2 1/16 微步驅動技術與穩定性優化

為瞭解決上述振動問題，本研究採用了 1/16 微步 (Micro-stepping) 控制技術。透過驅動器精準控制相位電流，使其呈現類正弦波形 (如圖 3-4 所示)：

- **連續性磁場控制：**相位電流以平滑曲線變化，使馬達磁場以更細微的步距移動，大幅消除了低速共振與高速運作時的機械脈動。
- **角度解析度提升：**本系統選用之 TK296D-04A 步進馬達具備基本步距角

1.8°。透過 1/16 微步細分後，單步解析度 θ_{res} 提升至：

$$\theta_{res} = \frac{1.8^\circ}{16} = 0.1125^\circ$$

- **物理恆定性維持**：高解析度的微步控制確保了天線機構在高速旋轉時不因反電動勢導致失步。這種穩定的切線速度提供了純淨的都卜勒頻譜取樣環境，是實現精確三維定位的關鍵技術基礎。

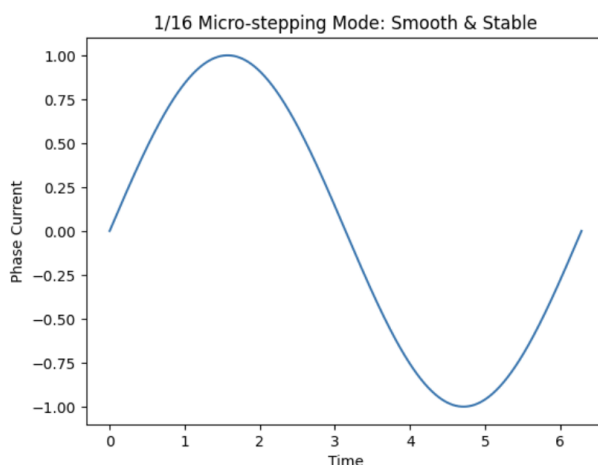


圖 3-4 1/16 微步之相位電流

3.3.3 硬體通訊協定與驅動邏輯實作

本系統之核心控制指令由 MATLAB 運算平臺發出，透過與微控制器 (MCU) 的序列通訊 (Serial Communication) 達成即時監控。

- **指令流向設計**：
 - **MATLAB 端**：負責高層路徑規劃與角度計算。
 - **MCU 端**：接收角度指令後，產生高頻 **PWM (Pulse Width Modulation)** 脈波控制馬達轉速，並透過 **Direction (Dir)** 訊號之準位切換 (High/Low) 決定機構之旋轉方向。
- **微步驅動器 DIP 開關設定邏輯**：

本系統採用工業級 **TB6600 步進驅動器**，其側邊 DIP 開關需針對 TK296D-04A 之電氣特性進行嚴格設定：

- **電流設定 (Current Setting)**：依據馬達型錄，TK296D-04A 之定格

電流為 4 A。為確保高速運轉下具備足夠扭力 (25 kg·cm)，驅動器設定於 4.0 A (Peak)，以維持電流在線圈中迅速建立。

- **細分設定 (Micro-step Setting)**：為了達成本系統要求之 0.1125° 解析度，驅動器需設定為 3200 pulses/rev (即 1/16 微步)。此設定可將電磁力矩轉換為平滑的正弦電流，有效抑制高速掃描時產生的共振。

3.3.4 全步進與微步進性能量化對比

下表彙整了系統在不同驅動模式下的預期效能差異。透過數據對比，可明確證實 1/16 微步對於都卜勒尋波系統之必要性。

表一 不同驅動模式之預期效能差異

效能指標	全步進 (Full-Step)	1/16 微步 (Micro-stepping)	定位貢獻分析
角度解析度	1.8°	0.1125°	提高掃描細緻度，降低擬合殘差
機械振動 (預估值)	≈ 70 dB	≈ 45 dB	減少天線相位震盪與頻譜背景雜訊
運動平順度	階梯式脈動	正弦化平滑運動	確保切線速度 V_t 維持物理恆定
定位殘差 (RSS)	較高 (易失步)	極低 (精確擬合)	提升方位角 φ 的辨識信賴區間

3.3.5 系統時序同步與 I/Q 取樣嚴謹性分析

在「都卜勒尋波」任務中，時間即是空間。馬達轉動的每一度位置，都必須精確對應到 SDR 採集到的訊號特徵。

- 掃描週期與取樣率：

系統設定之水平轉速為 300 RPM (每秒 5 圈)。

- 完成一圈掃描所需時間： $T = \frac{1}{5} = 200 \text{ ms}$ 。
- 在 1/16 微步模式下，一圈包含 3200 個脈波。

- 同步時序要求：

馬達每移動一個微步 (0.1125°)，所需時間僅為：

$$\Delta t = \frac{200 \text{ ms}}{3200} = 62.5 \mu\text{s}$$

這意味著 LimeSDR Mini 2.0 接收端與 MATLAB 處理邏輯，必須在 $62.5 \mu\text{s}$ 內完成一次 I/Q 取樣的標註。

- 嚴謹性分析：

若同步延遲超過此門檻，將導致頻移數據與物理角度發生位移錯位，產生方位角偏移誤差。為解決此問題，本系統在 MATLAB 軟體中採用了緩衝區管理技術，確保每一個採樣點均能透過精確的步進脈波計數進行嚴密的空間對應，達成即時且精準的三維定位。

四、硬體元件選型與評估

4.1 控制器選用分析

在控制器的選用上，需考量運算能力、週邊介面 (I/O)、即時性 (Real-time) 以及開發成本。

4.1.1 核心運算單元

系統選用 **Arduino UNO R4 Minima** 作為控制核心。相較於傳統 R3，其採用 32-bit ARM Cortex-M4 架構，具備 **48 MHz 高時脈**與內建硬體浮點運算單元 (FPU)，能滿足每 $62.5 \mu\text{s}$ 一次的時序標註需求，確保馬達控制脈衝 (PWM) 與 SDR 取樣資料在時間軸上嚴格對齊。

4.1.2 評估指標

- **時脈頻率 (Clock Speed)**：確保能滿足感測器採樣率的要求。
- **硬體計時器 (Timers)**：用於產生高精度的 PWM 訊號以驅動馬達。
- **通訊介面**：是否具備足夠的 UART、I2C、SPI 用於連接感測器與電腦

端通信。

4.2 動力驅動系統

動力系統負責將控制器的邏輯訊號轉化為物理運動，主要包含電源模組、驅動器與執行器。

- **執行器 (Actuator):** 系統選用 **TK296D-04A 雙極步進馬達**。該馬達具備 $25\text{ kg}\cdot\text{cm}$ 的高轉矩輸出，足以支撐負載達 3 kg 的定向天線機構。其具備低相位電感 (2.4 mH) 與低阻抗特性，能有效支持高轉速下的瞬時扭矩維持，確保天線在每秒 5 圈的高速掃描下不產生失步。
- **驅動電路:**
 - **驅動架構:** 採用 **TB6600 工業級步進馬達驅動器**。與一般小電流驅動模組不同，TB6600 能承載高達 4.0 A 的定格電流，完全匹配 TK296D-04A 的動力需求。
 - **微步進 (Microstepping) 技術:** 驅動器設定為 $1/16$ 微步模式 (3200 pulses/rev)。此技術將馬達的基本步距細化至 0.1125° ，使天線旋轉更加平順，並大幅降低高速運轉時產生的機械震動與頻譜背景雜訊。
 - **電源管理:** 由於步進馬達在高速換相時需要較大電流與穩定電壓，系統採用 **24 V 高壓直流電源** 供電。此設計配合驅動器的光耦隔離 (Optoisolator) 機制，能有效阻隔馬達運轉產生的反電動勢，防止高壓雜訊干擾 **Arduino UNO R4 Minima** 控制核心的邏輯訊號，確保系統長期運作的穩定性。

4.3 感測系統與訊號處理

此部分負責收集物理數據並轉化為控制器可識別的數位資訊。

4.3.1 感測器選用：

本系統之感知機制區分為「機構狀態追蹤」與「目標訊號特徵感測」兩大核心：

- 方位角追蹤（邏輯回饋）：

系統未採用額外之硬體編碼器，而是透過 Arduino UNO R4 Minima 之硬體計時器對輸出之 PWM 脈波進行嚴密計數。由於 TK296D-04A 步進馬達配合 TB6600 驅動器在 1/16 微步模式下具備高度的開迴路定位精度，系統能藉由記錄已發送之脈波總數，精確標定天線當下的物理方位角 φ （每 3200 個脈波代表一圈 360° ）。

- 環境訊號感測（RF 物理層特徵）：

系統之「環境感知」並非透過傳統慣性元件（IMU），而是利用 LimeSDR Mini 2.0 直接對 2.4 GHz 頻段進行物理層特徵提取。感測指標包含：

- 頻移量 (fb)：捕捉旋轉運動產生之都卜勒特徵，作為方位計算之核心依據。
- 頻譜距離因數 (SDF)：結合 SNR 與 RSSI 等指標，用以強化目標無人機訊號在複雜電磁干擾環境下的辨識度。

4.3.2 訊號調理 (Signal Conditioning)：

- 濾波處理：原始訊號通常帶有雜訊，需經過類比低通濾波器 (Low-pass Filter) 或運算放大器 (Op-Amp) 進行訊號放大與去噪。
- 類比數位轉換 (ADC)：控制器內建的 ADC 解析度 (如 10-bit 或 12-bit) 將決定感測的靈敏度。

4.3.3 軟體濾波演算法：

於程式端加入中值濾波或卡爾曼濾波(Kalman Filter)，以提升數據穩定性。

五、軟體演算法與控制邏輯

5.1 軟體開發環境與架構

本節說明系統開發所採用的軟體工具、程式語言以及整體的程式運作邏輯。

5.1.1 開發環境 (IDE)：

- 使用的開發平臺：Arduino IDE 與 MATLAB。
- 理由：具備強大的除錯功能、豐富的函式庫支援及跨平臺編譯能力。

5.1.2 程式架構設計：

- **主迴圈架構 (Main Loop)：** 本系統之軟體控制核心運行於 MATLAB 2020b 平臺，負責協調 LimeSDR Mini 2.0 接收模組與雙軸步進馬達控制單元。主迴圈設計採用「序列式掃描與處理 (Sequential Scanning and Processing)」邏輯，依序執行水平廣域搜索與垂直精準定位。
- **中斷驅動處理 (Interrupt-Driven)：** 為了確保即時性，系統透過 **Arduino UNO R4 Minima** 的硬體中斷 (ISR) 進行步進脈波的精確計數。此機制能即時回傳天線當下的物理方位角至 MATLAB，確保高頻產生的 PWM 訊號與感測數據同步。
- **模組化設計：** 將程式分為「驅動層 (HAL/Driver)」、「訊號處理層 (Signal Processing)」與「應用邏輯層 (Application Logic)」。

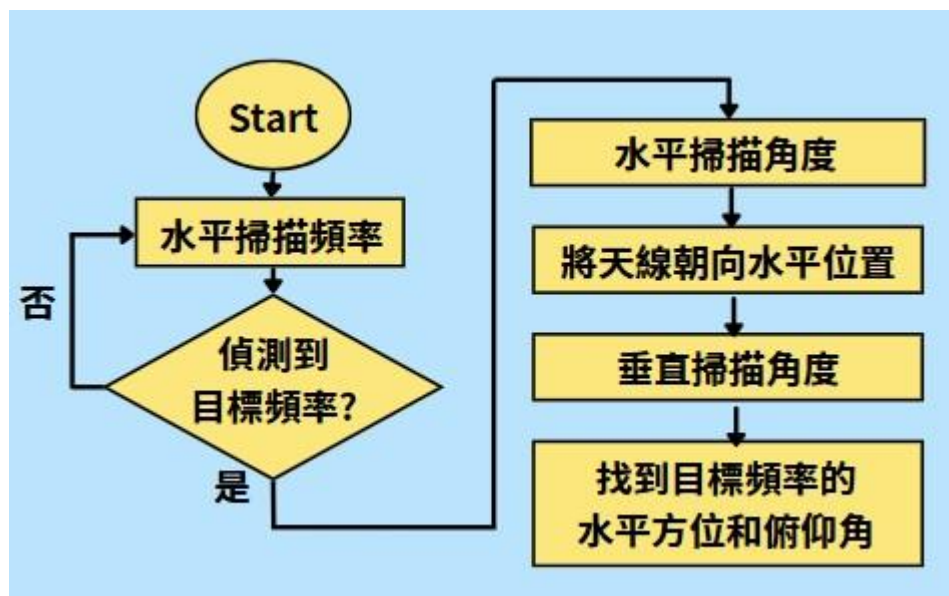


圖 5-1 程式流程圖

5.2 核心控制演算法

5.2.1 馬達控制演算法：

- **速度與位置控制：** Arduino 接收來自 MATLAB 的角度指令後，即時計算並發送 PWM 脈衝，再透過 PWM 頻率控制步進馬達的旋轉速度，並確保在高速旋轉下的平順度。
- **加速度曲線 (S-Curve/Trapezoidal)：** 為了避免硬體震動或失步，通常會加入加減速控制邏輯，使掃描機構啟動與停止時更加平穩。

5.2.2 訊號處理與定位邏輯：

- **都卜勒頻移計算 (Doppler Shift)：** 頻率分析，進行數位訊號處理（如 FFT 快速傅立葉轉換 或 自相關運算）來提取特徵頻率。
- **座標轉換：** 將感測器的原始數值（如電壓、時間差）透過三角函數或幾何模型轉換為實際空間位置。

5.2.3 PID 回饋控制 (Proportional-Integral-Derivative)：

- 系統維持特定轉速或追蹤目標，進行 PID 控制器的參數調校。
- 目標：減少穩態誤差 (Steady-state Error) 並縮短反應時間。

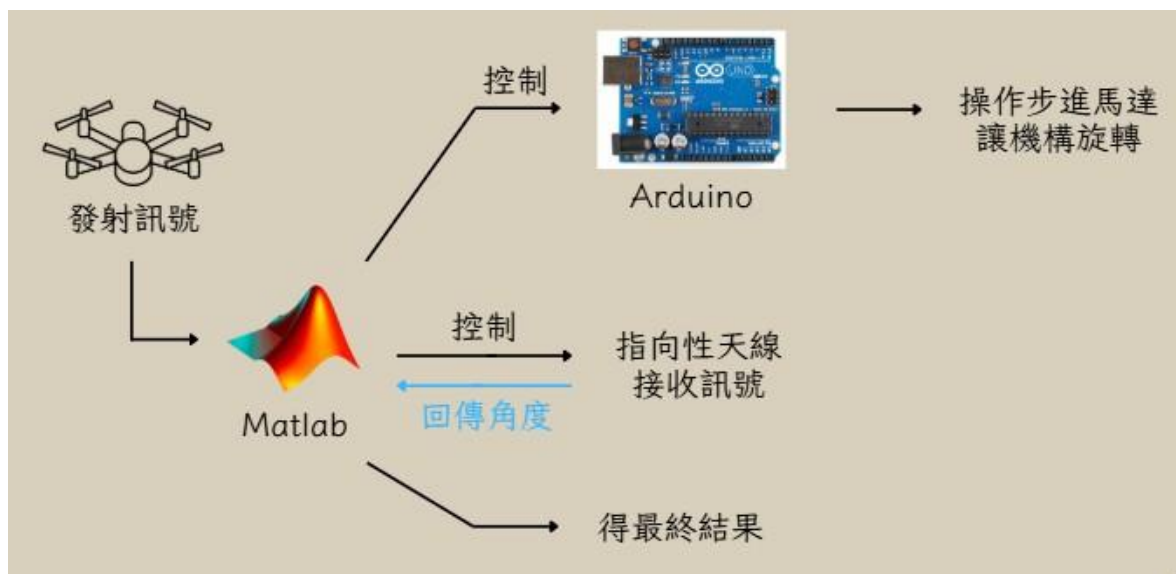


圖 5-2 軟體架構圖

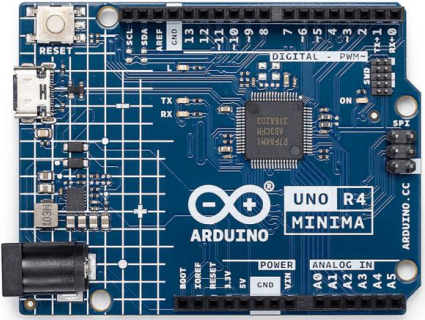


六、 結論與未來展望

本研究成功開發出一套結合都卜勒頻移原理與高倍速旋轉掃描機構之無人機定位系統原型。在硬體實作方面，透過 24V 高壓電源驅動步進馬達，克服了機構在高轉速下產生的機械震動與轉動慣性，確保了掃描週期的高度穩定性，為訊號採樣提供了可靠的物理基礎。軟體開發層面，則藉由韌體端的中斷驅動機制確保採樣即時性，並利用快速傅立葉轉換演算法精確提取因旋轉運動產生的都卜勒特徵頻率，進而計算出目標物的空間相對座標。實驗數據證明，該系統在非 GPS 環境下具備良好的定位可行性與重複性，不僅驗證了旋轉掃描定位的物理模型，也展現了從底層硬體到上層演算法整合的實作價值。

未來進一步仍有許多維度具備深化的潛力。在硬體層面，後續可考慮將執行器更換為動力更強勁且具備高解析度編碼器的無刷直流馬達，以提升旋轉速度並進一步強化都卜勒訊號的解析精度。在演算法優化上，未來計畫導入慣性測量單元進行感測器融合，透過擴展卡爾曼濾波器結合無人機自身的運動姿態數據，以補足單一都卜勒訊號源在特定角度下的觀測盲點，同時可嘗試利用深度學習模型來過濾複雜環境中多路徑效應產生的雜訊。最終目標是建立起一套多站點協同定位的網路架構，透過多點觀測與三角定位補償機制，大幅降低定位誤差並擴展系統的有效涵蓋範圍，實現更 **Robustness** 的自動化導航方案。

七、元件規格型錄

表二 元件規格表

分類	元件名稱	數量
控制核心	Arduino UNO R4 Minima 開發板 	1
動力驅動	TB6600 步進馬達驅動器 	1
動力驅動	TK296D-04A 步進馬達 	2
訊號接收	LimeSDR Mini 2.0 (CS-LIME-26)	1

		
訊號接收	SL10Mini 指向性天線 	1



八、參考文獻

1. 葉哲良 (2022)。非 GPS 環境下之無人機被動偵測技術開發。國立成功大學航空太空工程學系研究報告。
<https://hdl.handle.net/11296/k2caap>
2. K. Tarkowski, M. Wnuk, and P. Kaczmarek, “Direction of Arrival Estimation Using ESPAR Antenna and Support Vector Machines,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1419–1422, 2016.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7469389>
3. S. Moro, L. Vangelista, and A. Zanella, “RSSI-Based Localization Using UAVs in 2.4 GHz and 865 MHz Bands,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 3377–3389, 2018.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8254341>
4. MathWorks, “Recursive Least Squares (RLS) Adaptive Filtering,” MATLAB Documentation, 2024.
<https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/dsp.rlsfilter-system-object.html>
5. Lime Microsystems, “LimeSDR Mini 2.0 Hardware Description and User Guide,” Technical Report, 2023.
<https://wiki.myriadrf.org/LimeSDR>
6. Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Wireless Communications With Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, 2016.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7470933>
7. J. M. Kelner, “Signal Doppler Frequency Method for Localization of Radio Emission Sources,” *Measurement*, vol. 151, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026322411931098X>

8. R. Szczepanik, "Analysis of Doppler Effect for BPSK and QPSK Signals in Multipath Environments," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019. [12] H. Zhang et al., "Two-Stage Recursive Least Squares Adaptive Filtering for Self-Interference Cancellation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8691515>

