

國立成功大學

電信管理研究所

碩士論文

以系統整合技術改善現有無人飛行載具搭載軟體
定義無線電之測向與定位方法

Improvement of Direction Finding and
Positioning with Unmanned Aerial Vehicle
Carrying Software-Defined Radio Receiver by
System Integration Technology

研 究 生：蘇冠艇

指導教授：陳文字 博士

中華民國一百零七年六月

國立成功大學

碩士論文

以系統整合技術改善現有無人飛行載具搭載軟體定義
無線電之測向與定位方法

Improvement of Direction Finding and Positioning
with Unmanned Aerial Vehicle Carrying
Software-Defined Radio Receiver by System
Integration Technology

研究生：蘇冠艇

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員：

林易泉 林福林
李威勳 陳文安

指導教授：陳文安

系(所)主管：廖俊雄

中華民國 107 年 6 月 13 日

摘要

隨著近年通訊科技的發達，頻譜的需求大增，更顯得頻譜管理的重要性，頻譜管理可分為規劃、建置以及監測三個方向，頻譜管理達成頻譜資源有效運用，同時藉由規劃無線電頻率，區分不同需求。而頻譜監測的功能在於規劃與建置後能夠有效地維持電波秩序，確保制定的規則能夠被徹底的執行。而本研究選用無人飛行載具的主因在於無人飛行載具能夠跨越地形與建築物障礙，同時，本研究藉由高彈性與開源式的自組式無人飛行載具來提升與軟體定義無線電所架構的偵測模組的相容性，研究中預計利用系統整合技術完善先前無人飛行載具搭載軟體定義無線電技術的監測裝置，並建立一個完整的空中頻譜監測站，解決先前無法在收訊後即時判斷方位、透過將無人機飛行位置資訊與軟體定義無線電裝置所偵測的場強訊號整合至機載電腦樹莓派中進行計算，同時取代人工判斷角度，並將計算結果及時回傳至地面站電腦上，以提高偵測的效率與即時性，以便讓未來在空中頻譜監測的使用者能夠更快、更簡便的得到結果。然而，兩者之連接仍有許多問題尚待解決，本研究利用撰寫 Python 程式擷取軟體定義無線電裝置與飛行控制板的各項資料進入樹莓派中進行運算，也嘗試使用了兩個不同的軟體定義無線電裝置，並且搭配不同取向的天線：指向天線與定向天線，透過兩種偵測方式，提升偵測模組的數據參考價值，改善過去對於空中頻譜監測的方式，並配合軟體定義無線電的優勢，建置一個容易適合不同地形環境、能夠監測多種不同類型的訊號的空中頻譜監測站。

關鍵字：軟體定義無線電、無人飛行載具、樹莓派、系統整合、電波監測、測向、頻譜

Improvement of Direction Finding and Positioning with Unmanned Aerial Vehicle Carrying Software-Defined Radio Receiver by System

Integration Technology

Kuan-Ting Su

Wen-Tzu Chen

Institute of Telecommunication Management, National

Cheng Kung University

SUMMARY

The development of communication technology has increased the demand of spectrum and shows the importance of spectrum management. Improving the efficiency of radio frequency and planning the allocation of spectrum resources have become critical issues in spectrum planning. This thesis selects unmanned aerial vehicle (UAV) since it can not only overcome the terrain obstacle but also simultaneously construct an aerial spectrum monitoring system. With open source autopilot controller, the monitoring system can easily communicate with software-defined radio (SDR) receiving module. One of the main purposes of this study is to construct an integrated system consisting of flight control module and software-defined radio receiving module as an aerial spectrum monitoring station. To properly overcome possible challenges of signal operating processes and receiving data calculation, the aerial spectrum monitoring therefore needs highly system integration. Furthermore, this thesis constructs a complete monitoring station including UAV, SDR receiver module, Raspberry Pi, and ground station. To meet the integration requirement, our approach is to simultaneously get the position and azimuth angle of UAV, and received signal power from SDR device. Hence, the controller of UAV, Pixhawk, and the SDR receiver need to send the above information to Raspberry Pi at the same time. In the Raspberry Pi, we develop Python code to perform the above approach. Meanwhile, two antennas and software-defined radio devices are used to detect the direction of radio wave and its signal strength respectively. Finally, we build an aerial spectrum monitor station to measure the position of a radio station.

Key Words: Software-Defined Radio, GNU Radio, Unmanned Aerial Vehicle, Raspberry Pi, System Integration, Spectrum Monitoring

INTRODUCTION

With the rapid development of communication technologies, radio spectrum become relatively rare resource. The demand of radio spectrum shows the importance of spectrum management. To formulate the rule of spectrum management, spectrum management can be roughly separated into three phases, namely planning, construction, and monitoring. Spectrum management can distinguish distinct needs by well frequency planning. Spectrum monitoring is to effectively maintain the radio order after planning and construction and to make sure that the established rules can be completely implemented. Spectrum is so precious resource that the regulator has the responsibility to actively control and regulate its use. Accordingly, this thesis focuses on the monitoring phase. Traditionally, bulky and complicated instrument is the shortcoming of radio wave detection system for mobile monitoring station. In order to resolve the problems mentioned, the thesis selects a suitable technology, software defined radio. It is an advanced radio technology compared to traditional hardware-based components (e.g. filters, mixers, amplifiers, modulators, demodulators, etc.). Additionally, software defined radio is portable because of the flexibility trait. In summary, the use of SDR is a better option to build an aerial spectrum monitoring station using UAV.

MATERIALS AND METHODS

In this research, a receiver module is constructed based on software defined radio. An Ettus USRP B200 mini and Realtek RTL2832U dongle are used as RF frontend devices. The frequency range of USRP B200 mini is from 70 MHz to 6 GHz with signal resolution of 12 bits per sample. Realtek RTL2832U dongle has a frequency range from 25MHz to 1750 MHz with 8 bits per sample resolution. Meanwhile, two antennas are used to detect the direction of radio wave and its signal strength respectively. Next, flight control board Pixhawk is applied to construct flight module. Pixhawk is an independent open-hardware flight control computer, including GPS module, compass, barometer, and central processing unit. In addition, Raspberry Pi 3 is employed as a companion computer, providing a system integration and data transmission function in the whole system. Eventually, the present study builds a six-axis copter to perform the spectrum monitoring missions.

This research aims to improve the approach of direction finding and positioning of radio wave by system integration method, enhancing the immediacy and accuracy of UAV radio spectrum system. Our approach is to simultaneously get the position and azimuth angle of UAV, and received signal power from SDR device. Moreover, Pixhawk and Raspberry Pi are connected by universal serial bus, and then the drone-kit

python package is installed in Raspberry Pi. We write python code to get Pixhawk's GPS information about UAV position and azimuth. Then, all information about signal strength power from SDR devices can be caught while installing UHD-python. The azimuth of radio wave can be calculated. As a result, the relation of UAV angel and signal strength power can be obtained. Through receiving two or more signal directions, the signal position can be estimated.

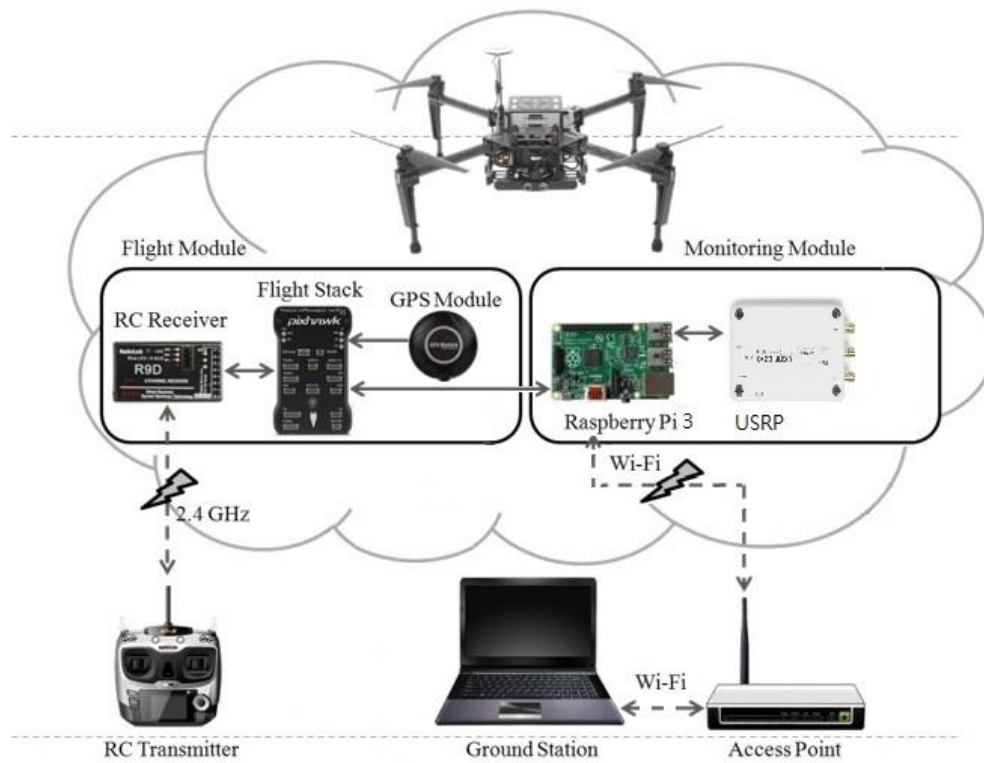


Figure 1. Architecture of the whole system

RESULTS AND DISCUSSION

The results indicate that the system integration makes signal detection operation close to real time. In general, previous research needs to manually check received data after the UAV lands to the ground. The proposed design can immediately receive position and direction of UAV when it is still in the sky. The characteristic of immediacy makes the whole system easy to use. From measurement result, we also found that the accuracy of radio direction is about 6° . The accuracy may be not enough for positioning. This is because the used Yagi antenna has 38° beam width. In addition, this thesis also deals with complex integration challenges, including the synchronization of Pixhawk and Raspberry Pi's time, and automatic processing data.

CONCLUSION

In this thesis, we use SDR technology and UAV to construct an aerial radio monitoring system. The proposed system can easily change monitoring mission through software. This thesis selects unmanned aerial vehicle (UAV) since it can not only overcome the terrain obstacle but also simultaneously construct an aerial spectrum monitoring system. The main challenge of the proposed design is to connect simultaneously Pixhawk, SDR, and Raspberry Pi. Accordingly, this study improves aerial spectrum monitoring by system integration technology to deal with signal operating processes and receive data calculation. To meet the integration requirement, our approach is to simultaneously get the position and azimuth angle of UAV, and received signal power from SDR device. Hence, the controller of UAV, Pixhawk, and the SDR receiver need to send the above information to Raspberry Pi at the same time. In the Raspberry Pi, we develop Python code to perform the above approach. Meanwhile, two antennas and software-defined radio devices are used to detect the direction of radio wave and its signal strength respectively. Finally, we build an aerial spectrum monitor station to measure the position of a radio station.

誌謝

很高興能夠進入成功大學的電信管理所就讀，這兩年來，受到各位老師、同學、朋友與家人的幫忙與鼓勵，研究所的求學過程轉眼即逝，本文能夠順利完成，承蒙眾多友人協助，謹以本文獻給各位師長與親友，由衷的表達我的感謝。

感謝指導教授陳文字老師，在學術領域與日常生活中都不厭其煩的教導我們，也將寶貴的經驗傳承給我們，傳授我們人生中如何取得平衡。同時也感謝本文的審查老師：李威勳老師、林易泉老師、林福林老師三人，在論文上給予寶貴的意見讓本論文更加完整。

感謝 LAB402 的大家，感謝學長們帶領我們、開闊人生的視野，學弟們在研究上提供協助。感謝我的同學：靖姿和子軒，感謝你們在這兩年的付出，不論是生活上或是學業上、不分誰的事情都盡心盡力的參與與討論，我很享受與你們相處的時光，感謝你們同甘與共苦，希望大家未來的路途一帆風順。

最後，感謝一路成長以來的所有老師，讓我能成為現在的我。也感謝在一路支持我的家人與女朋友，感謝你們的包容與鼓勵，讓我能夠在這兩年中精進自我並且體驗人生，在未來變成更好的人。

冠艇 謹誌

成功大學電信管理研究所

中華民國一〇七年七月

目錄

表目錄.....	ix
圖目錄.....	x
第一章 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機與目的	3
1.3 論文架構.....	4
第二章 背景技術與文獻回顧	6
2.1 無人飛行載具	6
2.1.1 旋翼式無人飛行載具的發展	6
2.2 軟體定義無線電	7
2.2.1 軟體定義無線電的發展	8
2.2.2 軟體定義無線電的架構	8
2.2.3 軟體定義無線電的硬體	8
2.3 無線電測向定位系統	9
2.4 文獻歸納小結	10
第三章 研究方法	12
3.1 研究硬體架構	12
3.1.1 無人飛行載具的組成	14
3.1.2 機載電腦的系統	16
3.2 系統整合方法	16
3.2.1 飛行控制板與樹莓派的整合	17
3.2.2 飛行控制板與軟體定義無線電的整合	17
3.2.3 系統整合.....	18
3.3 定位方法.....	19

3.4 研究方式與步驟	20
第四章 研究結果	22
4.1 實驗相關參數	22
4.1.1 發射站與天線規格	22
4.1.2 測向地點	23
4.2 第一次測向結果	24
4.3 第二次測向結果	26
4.4 定位結果	28
4.5 比對先前測向結果	30
4.6 研究結果與探討	30
第五章 研究結果	32
5.1 結論	32
5.2 未來研究建議	32
參考資料	34

表目錄

表 1、Pixhawk 感測器作用[5]	7
表 2、自組無人飛行載具規格	15
表 3、永康補隙站發射規格	22
表 4、DA-2620 天線規格	22
表 5、永康區忠孝運動公園第一次測向結果統整	24
表 6、永康區永康公園第一次測向結果統整	25
表 7、永康區忠孝運動公園第二次測向結果統整	26
表 8、永康區永康公園第二次測向結果統整	27
表 9、先前測向結果統整	30



圖目錄

圖 1、軟硬體整合平台	7
圖 2、軟體定義無線電架構	8
圖 3、Ettus Research B200 Mini.....	9
圖 4、RTL2832U Dongle	9
圖 5、現有硬體研究架構	12
圖 6、硬體研究架構變更	13
圖 7、硬體研究架構	13
圖 8、無人飛行載具的零配件	14
圖 9、自組無人飛行載具	15
圖 10、樹莓派整合飛行控制板實際拍攝圖	16
圖 11、透過遠端連線樹莓派讀取飛行控制板 GPS 數據.....	17
圖 12、Python 計算訊號功率程式.....	18
圖 13、實際飛行的資料收集	18
圖 14、飛行軌跡示意圖	19
圖 15、實際飛行測試	20
圖 16、台南市永康區忠孝運動公園地圖	23
圖 17、台南市永康區永康公園地圖	23
圖 18、永康區忠孝運動公園第一次測向結果	24
圖 19、永康區永康公園第一次測向結果	25
圖 20、永康區忠孝運動公園第二次測向結果	26
圖 21、永康區永康公園第二次測向結果	27
圖 22、第一次定位結果	28
圖 23、第二次定位結果	29

第一章 緒論

1.1 研究背景

二十世紀開始，人們為了通訊的方便，開始發展了通訊技術，在有限的頻譜資源中，嘗試並發展新的無線通訊技術。通訊技術發展至今，相比其他產業雖然只有一個世紀，卻已經成為一項生活中不可或缺的技术，也因為近年來無線通訊技術的蓬勃發展，各式各樣的無線技術紛紛問世，無線網路的相關產品在這些技術的應用下也成為日常生活相當普遍的存在。在無線通訊網路的技術發展下，原本有限的頻譜資源已經開始受到壓迫，我們逐漸因為受限於無線通訊的頻率限制，無線電頻率之使用日益擁擠，使得頻譜資源變得更加彌足珍貴，也引起各界對頻譜的資源需求日益殷切。在此情況下，提高無線電頻率的使用效率及妥善規劃分配使用頻譜資源，便成為頻譜規劃的關鍵課題。

頻譜的管理可分為規劃、建置以及監測，頻譜規劃是參照國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）的無線電規則分配規定以及國內通訊傳播產業的需要，將某一指定頻段，發配給各類無線電業務使用，此項規定是達成頻譜資源有效率利用的方法之一，同時藉由規劃無線電的頻率，區分出不一樣需求的運用，以利兼顧國家安全問題與經濟發展問題，並滿足持續增加的通訊傳播產業頻譜需求。

頻譜監測則是頻譜管理單位在規劃與建置之後必須持續進行的工作，因為要維持電波秩序，確保先前制定的規章能夠被徹底的實行，監管單位應該長期監控頻譜是否有非法使用或是有相互干擾的作用。而這些都需要透過建立電波監測系統以達成管理的目的。電波監測系統主要包含了兩種主要功能：一是掌握頻譜的使用狀況，二是關於無線電波間相互干擾的排除。傳統電波監測系統需要包含頻譜分析儀、天線和測向接收器。傳統的頻譜監測車雖然有機動性，但還是僅限於道路所能到達的區域，如果監測

地點距離道路比較延遠，監測車有可能會因為距離監測地點遙遠，導致監測的品質與強度不理想，且因為車輛高度限制，即使加上伸縮機構，高度也相當有限，如果在都市高樓大廈之中更是非常容易受到多重路徑的干擾，使得監測效率降低。不過，如果藉由無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) [1]與軟體定義無線電(Software Defined Radio, SDR) [2]建置一個整合式飛行監測平台，便可以克服以上所遭遇的困難，因為其具有體積相對較小、機動性高，飛行高度可達到數十公尺的優點，避開地形障礙後，監測相對容易，提供一個較優良的訊號精確度，進行訊號分析與後續改善建議。

無人飛行載具是近幾年來相當流行、普及化的一項移動工具。最早的概念是應用在軍事用途上，包括偵查、運輸等功能。隨著通訊技術的進步，無人飛行載具能夠具體實行的應用也逐漸多元化，能夠遙控的距離也相對地提升許多，目前無人飛行載具普遍被使用於氣象類型的觀察及偵測，還有其他用途，例如空中拍攝、紀錄等。近年來無人飛行載具能夠普及，即是因為其飛行成本大幅降低及使用彈性大。

軟體定義無線電則是將部分無線通訊的硬體以軟體實現的新概念，在 20 世紀末時由 J.Mitola 所提出，最早的概念是應用在軍事用途，在 21 世紀初逐漸轉為商用與研究用途。其中硬體只負責提供前端天線的傳輸與接收還有數位與類比間的轉換，接著使用軟體進行訊號處理，利用這個概念進行開發通訊系統，在前置作業時可以因為設計的更改直接更換程式碼，不需要改變硬體的架構，能夠以比較快的速度來修正系統，達成通訊系統的要求，減少原來利用硬體開發的系統所需要花費在配置的時間與金錢。軟體定義無線電的架構，可以分為 RF 射頻前端、IF 中頻以及 Baseband 基頻的三部分，射頻前端(RF Front-End)負責將訊號透過天線進行發送與接收，在接收訊號的部分是從射頻前端將訊號接受後傳入類比數位轉換器

(Analog to Digital Converter, ADC) 取樣後成為數位訊號，接著將數位訊號透過 DDC (Digital Down Converter, DDC) 將訊號降頻為中頻，最後進入電腦做基頻的訊號處理，而發射訊號的部分則是先由電腦產生基頻訊號，接著將訊號送入 DUC (Digital Up Converter, DUC) 升頻至欲發射頻率，然後訊號傳入數位類比轉換器 (Digital to Analog Converter, DAC) 後轉成類比訊號，最後把訊號透過 RF 前段與天線發送出去。

1.2 研究動機與目的

頻譜是國家的珍貴資源，國家有積極掌控與監管其使用狀況的責任。由於無線電波干擾可能發生在任何地點，因此我們必須有即時掌握干擾源與定位干擾源的能力，才能夠盡速處理。因此本研究選擇以無人飛行載具搭配軟體定義無線電組合成空中監測與地面基地的整合，方便即時使用，以維護無線電波秩序。

本研究使用無人飛行載具，無人飛行載具不需要搭載駕駛員進行飛行，而是藉由遠端操控或是自動飛行，同時操作無人飛行載具上的監測系統。搭載監測系統最大的優點就是能夠到達行動式監測車無法觸及的地形及區域，且其機動性高的優勢可以讓操控者在遠端即時掌控載具的飛行狀態及航向，操控者更能夠配合現場地形與天候即時做出反應及調整。另一方面，經過多年的技術開發，如今的無人飛行載具成本已經大幅降低，且在市面上已經可以購得。

雖然因應科技的進步，無人飛行載具已經有所突破，但是要結合無人飛行載具及頻譜監測系統仍是一項困難的任務，本研究採用軟體定義無線電為概念設計監測接收機，並同時搭配定向性天線與全向性天線，對特定的訊號發射源進行方向測量與強度測量，除了可以解決載重方面的困難，更能夠將頻譜監測的定位準確度提升。但從以前的研究發現，無人飛行載具的控制系統與頻譜偵測系統如果彼此獨立作業，對於收訊資料的時間會

出現不同步的狀況，尤其是頻譜偵測這類即時性相當高的資料如果無法同步的狀況下，依靠人工辨識對準資料來做測向實驗會別具困難。因此，如果無人飛行載具之控制系統能夠與頻譜偵測系統做一個整合，在此領域將會有重大的突破，故本研究的目的為：

1. 建立一無人飛行載具監測系統，包含六軸固定式無人飛行載具、樹莓派簡易電腦、軟體定義無線電模組，地面基站。
2. 結合定向天線與全向天線雙天線進行無線電發射源定位。
3. 對於無人飛行載具之飛行控制系統、樹莓派簡易電腦、軟體定義無線電模組與地面基站做一個整體性的系統整合，使其能夠同時進行飛行任務與無線電波即時偵測、回傳與分析，加強頻譜偵測的即時性與準確性。

1.3 論文架構

本研究的第一章已經先介紹了為什麼要使用無人飛行載具的原因，與使用無人飛行載具的作為電波監測的優點與缺點，本研究使用無人飛行載具的原因是避開來自地面端的干擾，但在空中監測的困難點在於無法隨時監看數據。也介紹了為什麼採用軟體定義無線電作為監測系統的優勢，因為其在僅僅需要更換天線的狀況下，能夠靈活的變換監測的頻段與調變方式，形成一套能夠適用在各種監測任務的系統。

在第二章中介紹了無人飛行載具與軟體定義無線電的技術規格、無線電測向的種類與方法，並針對之前使用無人飛行載具搭配機載電腦或是利用無人飛行載具進行電波監測的論文進行探討，尋找出研究中的不足與改善的方向。

第三章說明了整體的監測架構，並介紹了系統整合的方法，在 UNIX 架構下如何透過程式的撰寫來配合不同的硬體設備。像是本研究中所使用的軟體定義無線電裝置，飛行控制板等等，以及本研究的資料處理步驟，

就是為了將在空中監測的任務更接近即時，因為在頻譜監測的任務中，準確與即時是最必要的條件，一旦監測工具能夠迅速將偵測訊號來源定位，就可以快速找出干擾源，排除不明頻譜占用或是干擾。

第四章中使用了本研究所設計的硬體架構對於已知訊號源實做測向與定位的實驗，並對其所收集的數據做出計算，實測真實狀況下的誤差與實際使用情況，並將其記錄下來以便未來的更改與進步。

第五章則是將整個研究的過程做一個結論，並提及本研究的不足之處與未來的研究方向建議。



第二章 背景技術與文獻回顧

本章會將本研究所使用的相關技術做一個詳細的討論，包含無人飛行載具與軟體定義無線電兩大部分，最後再進行文獻統整，進而歸納出小結。

2.1 無人飛行載具

無人飛行載具的定義是不需要駕駛員在飛行物上進行實際操控，而是利用遠端遙控技術在地面基地站操作或是使用自動飛行技術的裝置。而在本研究中採用六旋翼式無人飛行載具。

2.1.1 旋翼式無人飛行載具的發展

以往無人飛行載具的控制只能依靠操控者手動操作，所以大多數旋翼飛行器只能採用比較簡易的單旋翼飛行器，但隨著近年來微晶片運算的能力增加，讓多旋翼無人飛行載具上比較困難的問題：平衡與姿態控制，出現了一個解決的希望。為了達成使無人飛行載具能夠自動飛行與長時間滯空的目標，飛行控制板的電子化勢必是一個極為重要的必備過程[3]。所以漸漸地開始有越來越多研究單位進行控制板的開發與研究，藉由單板電腦加上高度計、陀螺儀、GPS 等感測器如表 1，建構出一個無人飛行載具所需要的軟硬體平台如圖 3，此研究以執行實際飛行實驗來進行，其中包括了飛行資料的收集、分析、計算與儲存，為一個機載飛行電腦的雛形。

而現今市面上雖然因為利用多旋翼式無人飛行載具拍攝的產品變得相當熱門的關係，已經有許多商品化的無人飛行載具套裝，但本研究為了實施一個完整的規劃，並未購買一個完整套裝的無人飛行載具，取而代之的則是採用美國廠商 3DR 所產生的飛行控制板 Pixhawk[4]，利用開源式的 Pixhawk 飛行控制板來搭配無刷馬達，以市面上簡易能夠取得的材料為無人飛行載具的組裝配件，增加整個系統後續擴充的彈性與維修的簡易性。

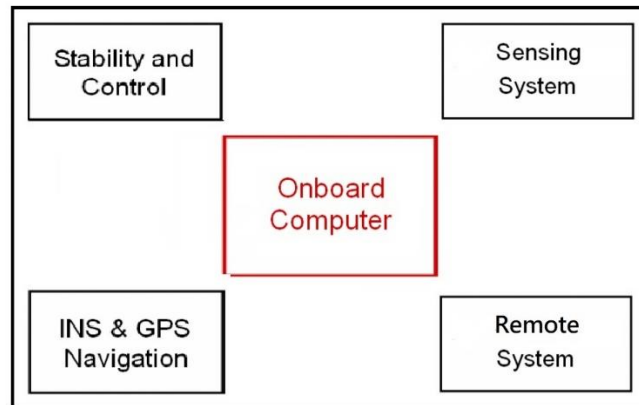


圖 1、軟硬體整合平台

表 1、Pixhawk 感測器作用[5]

溫度感測器	偵測電池溫度，防止系統與電池過熱。
電子羅盤	判斷機頭北方向，提供自動返航時的方向辨別。
電壓電流偵測模組	偵測電池電壓、電流、電量。同時提供回傳的電壓值。
氣壓感測器	判斷無人飛行載具的高度，缺點是精確度會受天氣干擾改變。
GPS	提供回傳的載具所在方位，配合懸停飛行模式定點停泊。
加速度感測器	偵測受到的外界干擾，回傳給系統並修正馬達，減少搖晃。
陀螺儀	用來感測水平、仰角，提供保持穩定與修正旋翼轉速的數據。

2.2 軟體定義無線電

軟體定義無線電是新興的通訊技術，藉由軟體的調整能夠省去傳統無線電中的電子元件，包括：濾波器、功率放大器等等，而這其中最大的好處就是軟體定義無線電以軟體決定其所有通訊規格與功能，例如：載波頻率、發射功率、接收增益與頻寬等等，如此一來只需要更改程式就能夠支援不同規格的通訊標準。

2.2.1 軟體定義無線電的發展

軟體定義無線電的開發動機主要是為了因應各種不同的協定標準，能夠在各種通訊規格中迅速切換。因為它是由軟體定義的，相較於硬體的更換，軟體能夠修改原本是硬體定義的通訊元件參數以適應當時當地的環境；也能夠在相同的平台中，依據使用者的需求不同，執行不同的通訊協定，因此最初軟體定義無線電被利用在的測試方面，測試新協定的參數設定值或是開發新協定。隨著電腦的進步，各研究單位也開始利用軟體定義無線電。

2.2.2 軟體定義無線電的架構

軟體定義無線電的觀念以及架構大多由 J.Mitola 所提出[6]，定義了其中軟體與硬體所負責的部分，訊號大部分在電腦中透過軟體處理，僅有類比數位訊號轉換與天線發射、接收由硬體負責，而軟體定義無線電的架構如圖 4 所示。

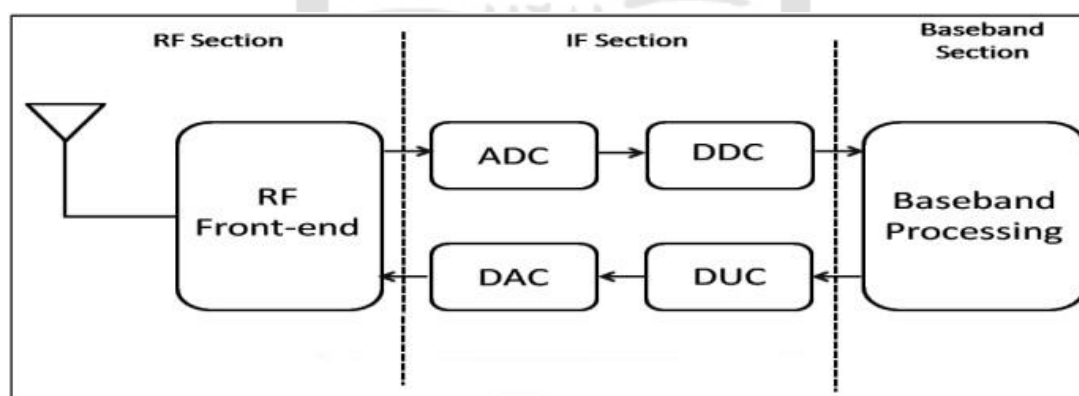


圖 2、軟體定義無線電架構

2.2.3 軟體定義無線電的硬體

軟體定義無線電的硬體設備根據溝通架構與資料流的處理分成通用軟體無線電周邊裝置 (Universal Software Radio Peripheral, USRP) [7]與簡易軟體無線電周邊裝置兩種 (Simple Software Radio Peripheral, SSRP) [8]，

而其中本研究選擇的是美國廠商 Ettus Research 所生產的通用軟體無線電周邊裝置 B200 Mini，如圖 5，搭配台灣廠商 Realtek 所生產的 DVB-T 電視棒 RTL2832U，雖然 RTL2832U 並非專業 SDR 器材，但透過 RTL-SDR 研究計畫使得 RTL2832U 可以將接收訊號轉為 I/Q Data，並依此作為 SDR 裝置使用。



圖 3、Ettus Research B200 Mini



圖 4、RTL2832U Dongle

2.3 無線電測向定位系統

測量距離定位法可以利用收訊時間 (time of arrival, ToA)、收訊時間差 (time different of arrival, TDoA)、收訊角度 (angle of arrival, AoA)、接

收訊號強度 (received signal strength indicator, RSSI) 等 4 種技術，先前的研究[9]實作無線電的測向，使用的就是指向性天線原地繞圈根據訊號強弱來判定電波方向，使用兩個或以上測試點來尋找其交叉位置以作為定位依據，如果有三個以上的測試點，則可以依據偵測到的電磁波時間差得知發射台位置。

本研究預計採用測向定位法與接收訊號強度法同步進行，可以彌補接受訊號強度法的估計值偏差較大的問題，同時也能夠降低誤差值，利用一段連續飛行時間，交叉比對方向及強度的變化，對於發射站台地點做一個推估，但目前因為無人飛行載具限制，發射站台的高度目前將不列入研究的範圍中。

2.4 文獻歸納小結

無人飛行載具最近十年來經由微型電腦的發展，無人飛行載具在人所難以觸及的空中衍伸出相當多的運用，除了偵測敵情外，也開始擴展至民生用途，如：救災、建築勘查等等，而與本研究較相關的論文有[10]，是同時使用樹莓派與軟體定義無線電，透過 TCP 協定遠端控制接收 FM 訊號，實現了無線電遠端接收的雛形，文獻[11]則是於無人飛行載具搭載自製天線，針對發射站進行偵測，不過其僅可辨別訊號的頻率。除此之外，文獻[12]使用無人飛行載具搭載軟體定義無線電，初步實現了空中頻譜監測的可能性。相關的研究還有[13]，利用無人飛行載具搭載軟體定義無線電並在繞圈飛行同時對 FM 發射站台做一個接收訊號強度實驗，利用無人飛行載具與站台的相對位置以及收集的訊號強度推測出與發射站之間的距離，但是其精確度在距離發射站 250 公尺時出現了 5 度左右的誤差。而在後續的研究[9]中，搭載定向天線的無人飛行載具，嘗試對無線電發射站測向實驗進行交叉比對。但是以上的這些研究尚未做到系統整合，僅利用飛行後無人飛行載具的飛行數據紀錄與軟體定義無線電所收到之數據使用人工

進行時間的對比，製成表格並劃出圖形，這項過程不僅無人飛行載具需要降落至地面，且後端數據處理需取出飛行控制板中的記憶卡，接著透過兩者的時間記錄一筆一筆資料比對，不僅耗費人力且過程繁複容易出錯，而本研究預計使用 Dronekit-Python 與 UHD-Python 結合飛行控制系統與軟體定義無線電的偵測系統，進行系統整合，目標是在空中就能夠透過地面站進行即時資料偵測、回傳、顯示以及運算等功能，以強化無人飛行載具在電波偵測的易用性與功能性。



第三章 研究方法

先前的研究指出，無人飛行載具在空中測向是有其優勢的，能夠避免地面建築物干擾，避開多路徑干涉，進一步的提升測向的準確率，並且研究中也提出，如果能夠向上提升各方面硬體設備，準確率應該會有更顯著的改善，而此章中，分為四大部分，第一部分是比較先前的硬體架構；第二部分是本研究的系統整合方法；第三部分是本研究的定位方法；最後一部分是本研究規劃的研究方式與步驟。

3.1 研究硬體架構

現有研究架構將分成無人飛行載具的組成與機載電腦兩部分，彼此相互獨立運作，如圖 5。

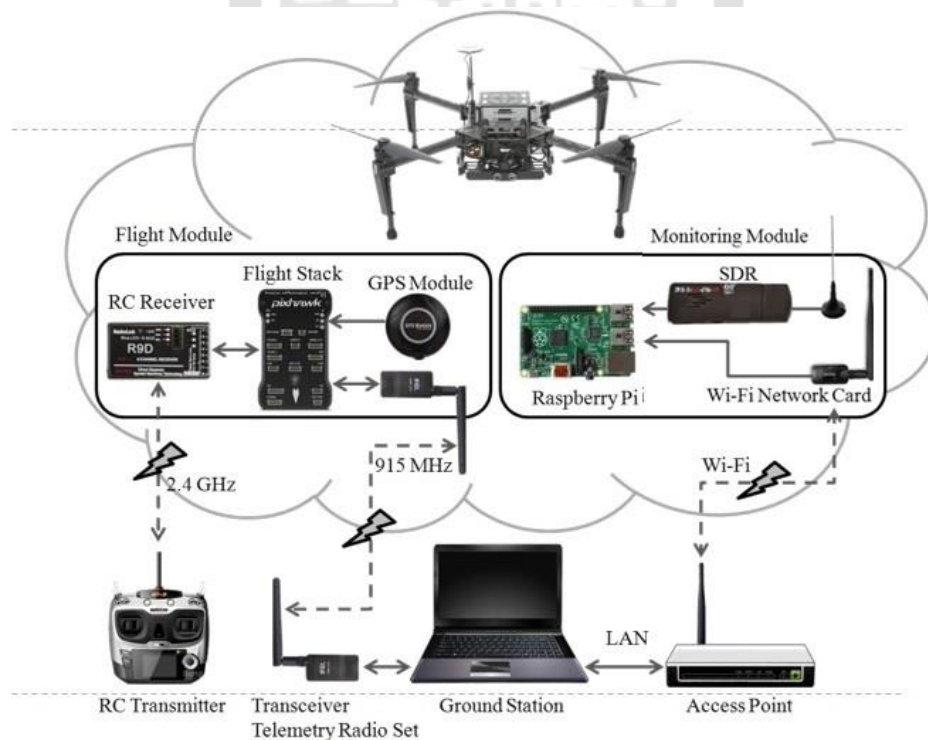


圖 5、現有硬體研究架構

本研究預計改善飛行控制板、樹莓派與頻譜偵測模組的整合性，由於飛行資料能夠藉由飛行控制板透過通用序列匯流排將資料傳遞給樹莓派，再由樹莓派透過 2.4GHz 無線網路與地面基站通訊，所以先前研究所用之

915MHz 數據傳輸模組便可以省略掉，不僅節省成本也節省頻譜使用率，而由於新一代 Raspberry Pi 3 已經內建 Wi-Fi 傳輸模組，因此外接 Wi-Fi 網路卡也可以省略掉，如圖 6。

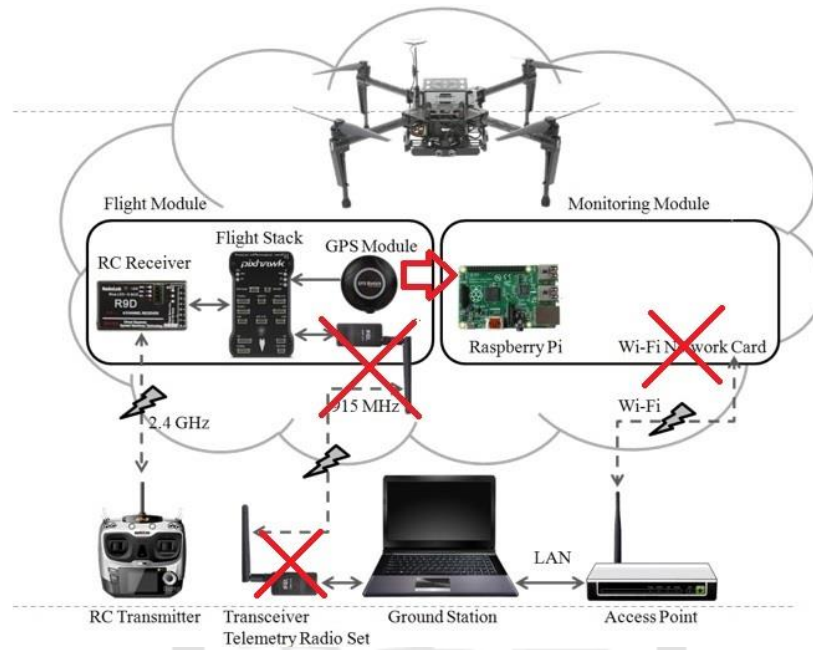


圖 6、硬體研究架構變更

總結以上硬體架構的變更，本研究所有硬體架構應該會如圖 7 所示。

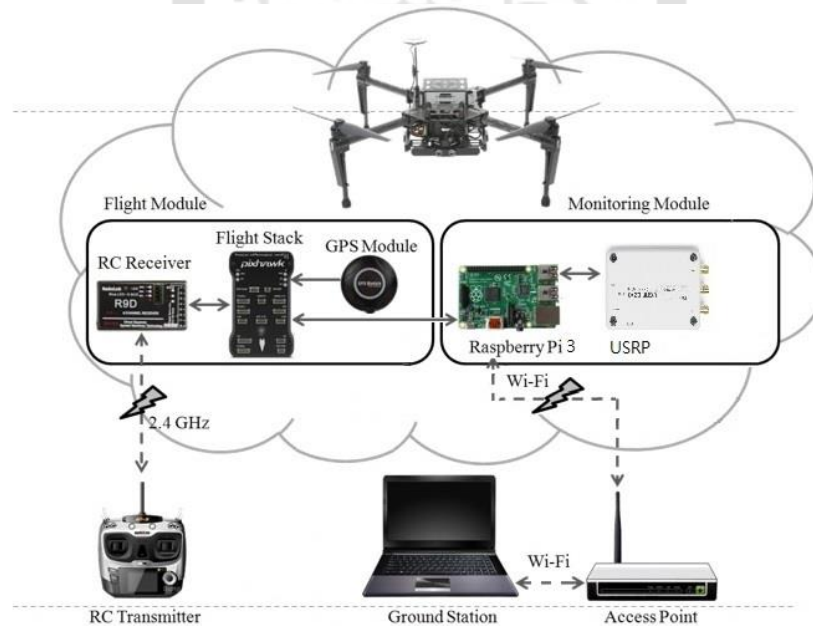


圖 7、硬體研究架構

3.1.1 無人飛行載具的組成

本研究採用基於 Linux 的開源式飛行控制板[14]，搭配自行組裝的碳纖維機架、GPS 模組、電子變速器、無刷馬達、碳纖維螺旋槳、鋰離子聚合物電池、配套的遙控器與接收機，組成六旋翼式無人飛行載具，原始空重約 3 公斤，最大荷重能達到 5 公斤。



圖 8、無人飛行載具的零配件



圖 9、自組無人飛行載具

表 2、自組無人飛行載具規格

碳纖維機架	本研究使用 ZD850 碳纖維六旋翼式機架，軸長 850mm。
GPS 模組	本研究使用 u-blox M8N GPS 模組，其 CEP (Circular error probable, CEP) 為 2M
電子變速器	為了平衡六顆馬達的轉速的裝置，本研究使用 ZTW Spider 30A 之電子變速器。
無刷馬達	本研究使用的馬達規格為 3508/380KV，為了增進飛行品質同時施做了動平衡。
碳纖維螺旋槳	本研究使用直徑 15 英吋，螺距 4.5 英吋的 1545 正反螺旋槳。
鋰離子聚合物電池	本研究使用 ELLMAX 22.2V 6S 5800mAh 鋰離子聚合物電池。
遙控器與接收機	本研究使用 RadioLink 生產之 AT9S 遙控器與 RD9S 接收機，在 2.4Ghz 頻段使用 DSSS 技術 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 進行遙控。

3.1.2 機載電腦的系統

本研究之機載電腦選擇的也是基於 Linux 的微型電腦，樹莓派 (Raspberry Pi, RPi)。它由英國的樹莓派基金會所開發，目的是以低價硬體及自由軟體促進學校的基本電腦科學教育。本研究中所使用的是樹莓派 3，搭載博通 BCM2837 四核心、1GB 記憶體、802.11n 網路卡，而本研究不同於之前的相關研究的地方是，先前的研究只使用樹莓派來作為軟體定義無線電的偵測平台，但本研究預計使用樹莓派整合飛行控制板，在飛行時讀取 GPS 參數與無人飛行載具的姿態，作為判斷無人飛行載具的位置與狀態依據，在空中即時偵測分析訊號並計算電波來向，透過 Wi-Fi 連線傳回地面站，同時也能夠替代無人飛行載具專用的數據傳輸模組的功能，將無人飛行載具的飛行狀態透過樹莓派傳送回來，降低整體系統的負擔。

3.2 系統整合方法

本研究利用 USB 標準接口進行有線傳輸將飛行控制板、USRP B200 mini、RTL2832U 連接在樹莓派上，如圖 10 中所見，樹莓派除了連接著兩個 SDR 裝置外也連接至飛行控制板上。而本研究會將所有設備透過樹莓派運行在 Ubuntu Mate 作業系統中。

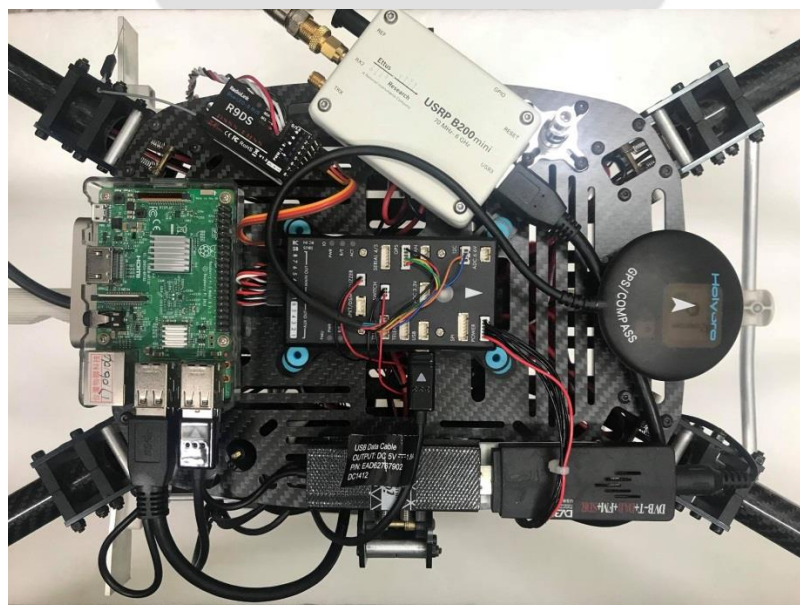
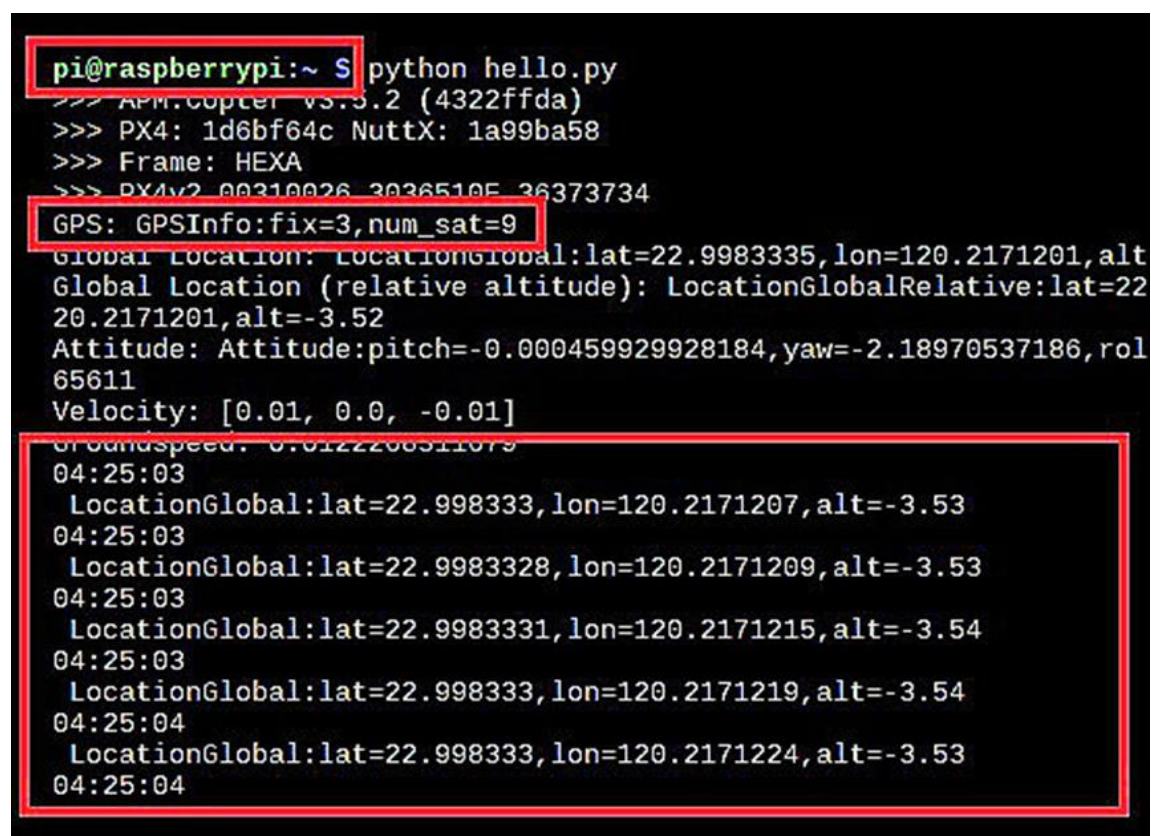


圖 10、樹莓派整合飛行控制板實際拍攝圖

3.2.1 飛行控制板與樹莓派的整合

本研究使用 Dronekit Python 來撰寫飛行控制板與樹莓派間的通訊整合程式，Dronekit Python 是 Python 的套件，在通訊過程中會使用樹莓派的第一個 USB port(/Dev/ttyACM0)作為溝通渠道，透過 Mavlink 協議讓飛行控制板上的資料能夠傳輸至樹莓派中，圖 11 為本研究中所需要的 GPS 資料與飛行狀態，已經能夠即時回傳至樹莓派中，除了更方便後續的運算之外，更能夠少用一個數據傳輸模組(915MHz)來將飛行數據回傳至地面站。不僅快速、更節約了成本與頻寬。



```
pi@raspberrypi:~$ python hello.py
>>> APM:copter v3.3.2 (4322ffda)
>>> PX4: 1d6bf64c NuttX: 1a99ba58
>>> Frame: HEXA
>>> PX4v2 00310026 3036510F 36373734
GPS: GPSInfo:fix=3,num_sat=9
Global Location: LocationGlobal:lat=22.9983335,lon=120.2171201,alt
Global Location (relative altitude): LocationGlobalRelative:lat=22
20.2171201,alt=-3.52
Attitude: Attitude:pitch=-0.000459929928184,yaw=-2.18970537186,rol
65611
Velocity: [0.01, 0.0, -0.01]
Groundspeed: 0.0122200311079
04:25:03
  LocationGlobal:lat=22.998333,lon=120.2171207,alt=-3.53
04:25:03
  LocationGlobal:lat=22.9983328,lon=120.2171209,alt=-3.53
04:25:03
  LocationGlobal:lat=22.9983331,lon=120.2171215,alt=-3.54
04:25:03
  LocationGlobal:lat=22.998333,lon=120.2171219,alt=-3.54
04:25:04
  LocationGlobal:lat=22.998333,lon=120.2171224,alt=-3.53
04:25:04
```

圖 11、透過遠端連線樹莓派讀取飛行控制板 GPS 數據

3.2.2 飛行控制板與軟體定義無線電的整合

本研究中除了上個小節提到的飛行控制板與樹莓派間的通訊整合，訊號與飛行數據也需要統整，透過程式自動比對數據，並且做計算、平均角度，但其中飛行控制板需要樹莓派的時間來同步，而且為了能夠同步，

USRP B200 mini 必須使用 UHD Python，而不能使用 GNURadio 這類型的應用程式，所以這部分是利用 Python 將讀取的原始資料透過取對數計算訊號功率。

```

if timestamp == 0:
    timestamp = time.time()
    centerfreq = m.center_freq
if m.center_freq < centerfreq:
    sys.stderr.write("scanned %.1fMHz in %.1fs\n" % ((centerfreq - m.center_freq)/1.0e6, time.time() - timestamp))
    timestamp = time.time()
    centerfreq = m.center_freq

for i_bin in range(bin_start, bin_stop):
    center_freq = m.center_freq
    freq = bin_freq(i_bin, center_freq)
    #noise_floor_db = -174 + 10*math.log10(tb.channel_bandwidth)
    noise_floor_db = 10*math.log10(min(m.data)/tb.usrp_rate)
    power_db = 10*math.log10(m.data[i_bin]/tb.usrp_rate) #- noise_floor_db

    if (power_db):
        print "power_db", power_db
        print time.strftime("%H:%M:%S", time.localtime())

```

圖 12、Python 計算訊號功率程式

3.2.3 系統整合

實際飛行所收集的資料，分別為 X、Y、Z 三軸的姿態、時間、訊號強度與 GPS 位置，透過這個回傳的資料我們便可以在空中直接觀察數據的大小與飛機目前的狀態，必要時能夠依照回傳訊號的強度邊走邊操控飛機尋找訊號源。

```

2 Attitude:pitch=0.0123485112563,yaw=-3.06150102615,roll=0.0172262303531
3 21:23:14 -105.102662147 LocationGlobal:lat=22.9983341,lon=120.2173236,alt=-0.29
4 Attitude:pitch=0.0123640121892,yaw=-3.06151342392,roll=0.0172539874911
5 21:23:16 -105.785836879 LocationGlobal:lat=22.9983338,lon=120.217324,alt=-0.28
6 Attitude:pitch=0.0123533476144,yaw=-3.06147003174,roll=0.0172891337425
7 21:23:18 -105.688054987 LocationGlobal:lat=22.9983336,lon=120.2173237,alt=-0.28
8 Attitude:pitch=0.0122995544225,yaw=-3.0614566803,roll=0.0172827169299
9 21:23:20 -104.480639716 LocationGlobal:lat=22.998333,lon=120.2173246,alt=-0.29
10 Attitude:pitch=0.012344956398,yaw=-3.06143498421,roll=0.01722355932
11 21:23:22 -104.230046597 LocationGlobal:lat=22.9983333,lon=120.2173252,alt=-0.29
12 Attitude:pitch=0.01238824334,yaw=-3.06142020226,roll=0.0172075033188
13 21:23:24 -104.754138993 LocationGlobal:lat=22.9983329,lon=120.2173251,alt=-0.3
14 Attitude:pitch=0.0124538056552,yaw=-3.061439991,roll=0.0171708818525
15 21:23:26 -105.491859201 LocationGlobal:lat=22.998332,lon=120.2173254,alt=-0.3
16 Attitude:pitch=0.0124766835943,yaw=-3.06141829491,roll=0.0170937813818
17 21:23:28 -103.948159038 LocationGlobal:lat=22.9983319,lon=120.217325,alt=-0.3
18 Attitude:pitch=0.0125450249761,yaw=-3.0614259243,roll=0.0171247795224
19 21:23:30 -104.784973241 LocationGlobal:lat=22.9983316,lon=120.2173222,alt=-0.31
20 Attitude:pitch=0.0125470533967,yaw=-3.06142473221,roll=0.0171664785594
21 21:23:32 -104.5330432 LocationGlobal:lat=22.9983317,lon=120.2173216,alt=-0.31
22 Attitude:pitch=0.0125578343868,yaw=-3.06141400337,roll=0.0171553064138
23 21:23:34 -105.624107291 LocationGlobal:lat=22.9983312,lon=120.2173206,alt=-0.3
24 Attitude:pitch=0.0125516206026,yaw=-3.06144690514,roll=0.017125621438
25 21:23:36 -105.182696117 LocationGlobal:lat=22.9983316,lon=120.2173214,alt=-0.3
26 Attitude:pitch=0.0125285703689,yaw=-3.06144452095,roll=0.01709873043
27 21:23:38 -106.007389914 LocationGlobal:lat=22.9983316,lon=120.217321,alt=-0.29
28 Attitude:pitch=0.0125350747257,yaw=-3.06140446663,roll=0.017135605216

```

圖 13、實際飛行的資料收集

3.3 定位方法

本研究的軟體無線電視透過使用通用軟體無線電周邊裝置中 Ettus Research 生產的 B200 mini，在軟體平台 GNURadio 上實現，偵測過程使用定向性天線偵測無線電的電波角度，同時 RTL2832U 使用全向性天線進行偵測其無線電的電波強度，無人飛行載具裝載偵測模組進行移動加上自轉的飛行如圖 10，此時定向性天線因為自轉的原因能夠偵測其一整圈的訊號強度，便能夠判斷無線電電波來源方向，又因為飛行器同時在移動，全向性天線會接受到無線電電波的強度梯度變化，透過兩者數據結合無人飛行載具所在 GPS 位置，能夠初步判斷無線電電波的來向，並估計其離測試地點的距離，而透過這兩組數據去做一個交叉比對，會比單一定向性天線或是全向性天線來的更加準確與迅速。

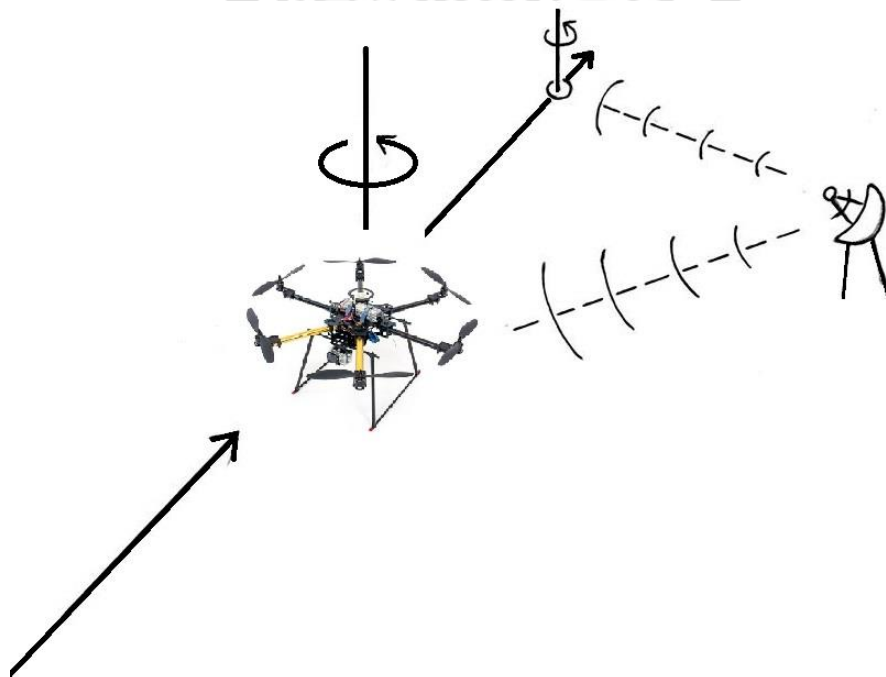


圖 14、飛行軌跡示意圖

3.4 研究方式與步驟

本研究需要一個地面基地站，在此使用筆記型電腦為地面站，在無人飛行載具起飛前先將樹莓派與筆記型電腦連線至同一區域網路，透過 VNC server 或是遠端桌面建立起連線，藉由地面站端的筆記型電腦遠端控制樹莓派上的終端機，等待連線成功後，確認無人飛行載具的狀態，在確認所有裝置良好後可以準備起飛，接著需要解除起飛安全鎖定而後起飛。

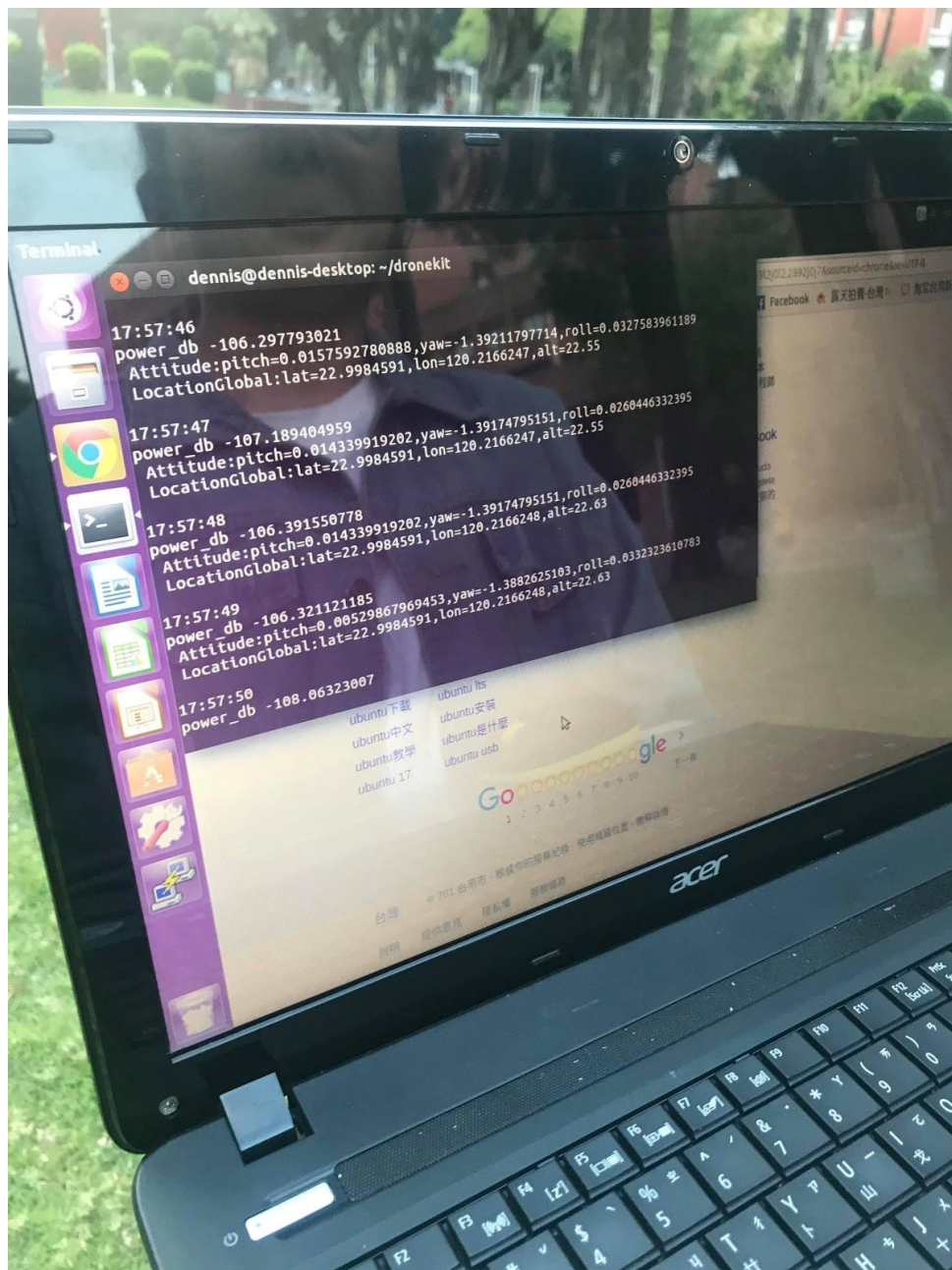


圖 15、實際飛行測試

當飛機順利起飛後，透過指令開啟預先寫好的 Python 程式，此 Python 程式主要控制樹莓派與飛行控制板的連接，起飛後遠端操作上方樹莓派，載入預先寫好的 Python 程式讀取無人飛行載具的狀態、GPS 位置與訊號位置，接著我們切換飛行模式進入繞圈，飛機會依照預先設定好的半徑繞行原點，同時透過手動自轉繞圈，可以達成公轉加上自轉的繞行軌跡，此時在地面基地站載入另一支 Python 程式將收到的紀錄檔繪製成圖表，並分析資料，然後取每圈的最大角度平均，我們可以透過此方式即時去讀取無人飛行載具上的偵測資料結果，並根據數據顯示的方向手動控制無人飛行載具前進，除了進一步驗證發射源是否正確外，若發射源相當接近，甚至能直接操作無人飛行載具直至找到發射源，此操作方式如果相比先前的研究，最大的優點就是不需要等待降落後才能讀取數據，能夠相當快速的依照回傳資料做出判讀與移動，在空中就能夠直接依照訊號所顯示的方向去追尋，如果使用在偵測干擾源的效率會大幅提升，達到所謂近即時(Near Real Time,NRT)的偵測模式。

第四章 研究結果

本章將會說明本研究所得之 NRT 偵測系統在短時間內進行兩次測向結果，並將資料透過 Python 程式進行分析，自動取得訊號角度與最大強度值，同時藉由兩次測向結果運算出一個定位值。

第二種方式則是透過無人飛行載具搭配全向性天線，將收到的訊號強度配合飛行控制板上回傳的 GPS 位置，找出訊號強度與經緯度的相關性，最後透過程式處理得出一個最佳角度。

4.1 實驗相關參數

頻譜監測的任務目的最重要的是即時，並且迅速能夠將訊號源定位。本研究為了在實驗期間有一個穩定的訊號源作為定位依據，會以一個已知的無線電發射站作為收訊目標，並且根據實際測試結果進行分析。

4.1.1 發射站與天線規格

本研究選用民視無線電視台永康補隙站，其發射站台資訊如下表：

表 3、永康補隙站發射規格

發射功率	600W
調變方式	64QAM
使用頻段	554MHz~560MHz
中心頻率	557MHz
地理位置	23°00'988"N, 120°23'275"E

本研究選擇大城科技 DA-2620 天線，其規格如下表：

表 4、DA-2620 天線規格

Model	DA-2620
Frequency	UHF:470 ~ 862MHz, VHF:174~230MHz, FM:88~108MHz
Gain	11dB
Output	75Ω, F-FEMALE CONNECTOR
Receiving Material	DVB-T2、ATSC 3.0、ISDB-T、DTMB

4.1.2 測向地點

本研究之測向地點一為 23.012644, 120.242186(台南市永康區永康忠孝運動公園)，距離民視無線電視台永康站 1.03 公里，方位角約-104 度。



圖 16、台南市永康區忠孝運動公園地圖

本研究之測向地點二為 23.003002, 120.244087(台南市永康區永康公園)，距離民視無線電視台永康站 1.45 公里，方位角約-54 度。

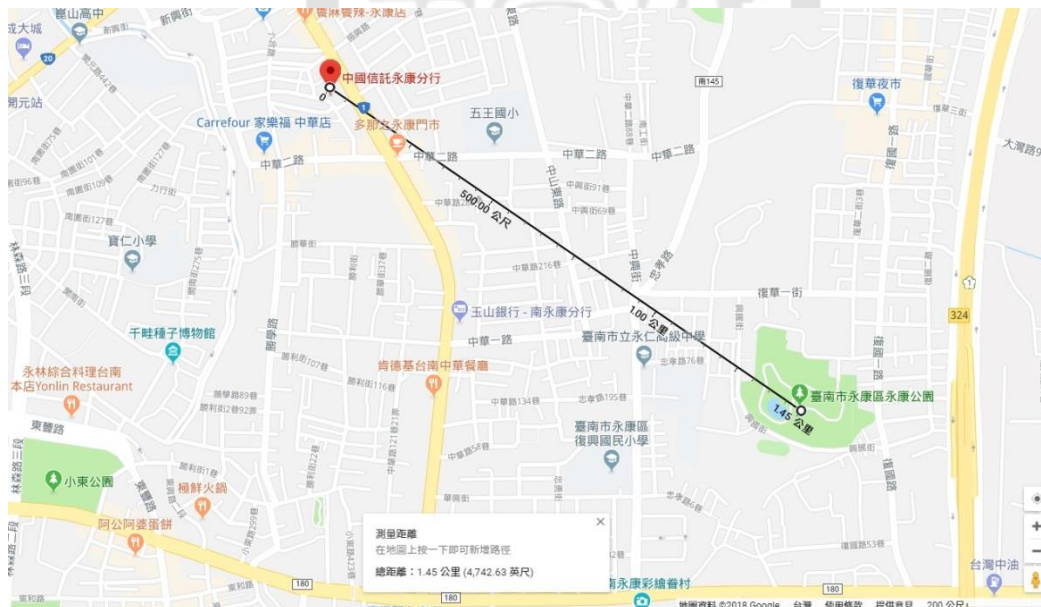


圖 17、台南市永康區永康公園地圖

4.2 第一次測向結果

```
dennis@dennis-desktop: ~/final
檔案(F) 編輯(E) 檢視(V) 搜尋(S) 終端機(T) 求助(H)
dennis@dennis-desktop:~$ cd final
dennis@dennis-desktop:~/final$ sudo python singlecircle.py
[sudo] password for dennis:
Every circle maxmium angle is -101.166012147
Every circle maxmium angle is -102.369878067
Every circle maxmium angle is -97.8556557805
Every circle maxmium angle is -104.693687374
Every circle maxmium angle is -111.731906347
Final angle is -103.563427943
```

圖 18、永康區忠孝運動公園第一次測向結果

測向結果顯示無人機自轉的五圈中偵測到最大強度的角度分別為 -101.166012147、-102.369878067、-97.8556557805、-104.693687374、-111.731906347。

而這五圈角度平均是-103.563427943 度，與實際角度-104 度偏差為 0.436572057 度。因此可得知本次實驗的測向結果為表 5。

表 5、永康區忠孝運動公園第一次測向結果統整

測試點 X 軸	120.242186
測試點 Y 軸	23.012644
經度座標	$120.242186 - A \sin(76.436572^\circ)$
緯度座標	$23.012644 - A \cos(76.436572^\circ)$

```
dennis@dennis-desktop: ~/final
檔案(F) 編輯(E) 檢視(V) 搜尋(S) 終端機(T) 求助(H)
dennis@dennis-desktop:~$ cd final
dennis@dennis-desktop:~/final$ sudo python singlecircle.py
[sudo] password for dennis:
Every circle maxmium angle is -52.6469751762
Every circle maxmium angle is -56.2374177925
Every circle maxmium angle is -72.9086220653
Every circle maxmium angle is -58.4369948375
Every circle maxmium angle is -57.342866834
Every circle maxmium angle is -64.6456504531
Final angle is -60.3697545264
```

圖 19、永康區永康公園第一次測向結果

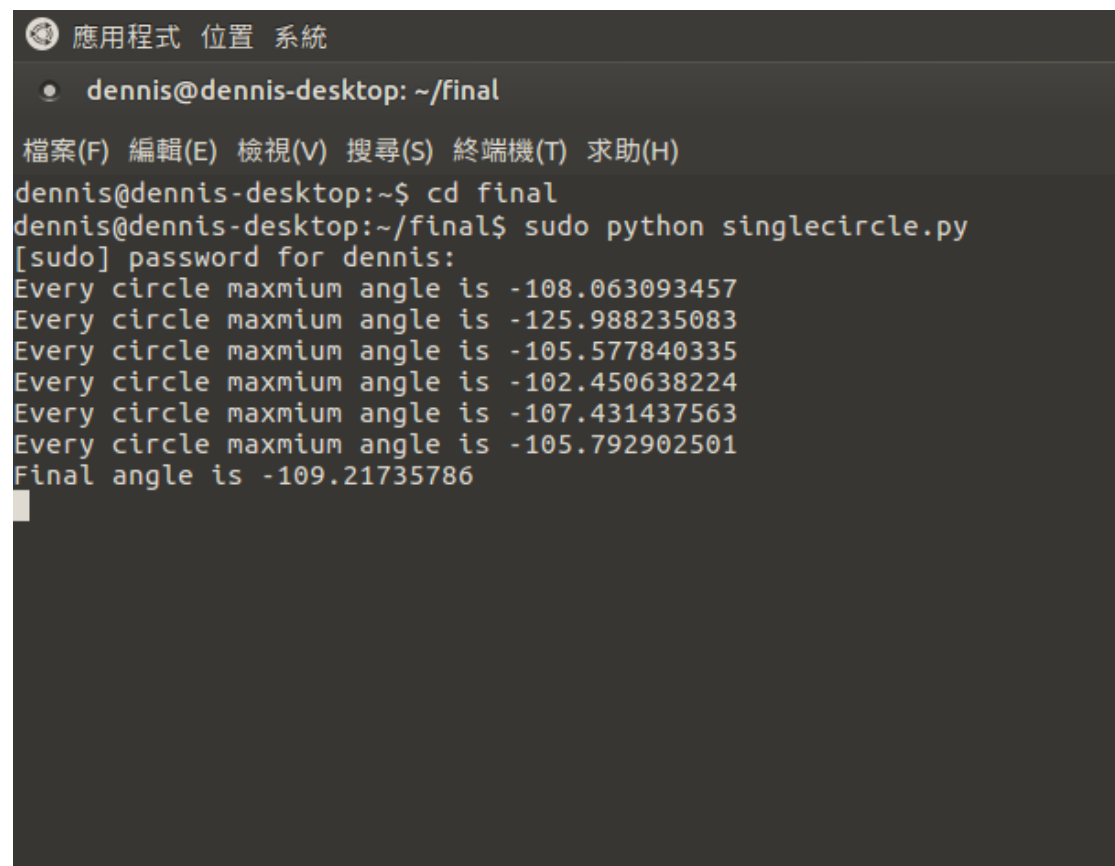
測向結果顯示無人機自轉的六圈中偵測到最大強度的角度分別為 -52.6469751762、-56.2374177925、-72.9086220653、-58.4369948375、-57.342866834、-64.6456504531。

而這六圈角度平均是 -60.3697545264 度，與實際角度 -54 度偏差為 6.3697545264 度。因此可得知本次實驗的測向結果為表 6。

表 6、永康區永康公園第一次測向結果統整

測試點 X 軸	120.244087
測試點 Y 軸	23.003002
經度座標	$120.244087 - B \sin(60.3697545264^\circ)$
緯度座標	$23.003002 + B \cos(60.3697545264^\circ)$

4.3 第二次測向結果



```
應用程式 位置 系統
dennis@dennis-desktop: ~/final
檔案(F) 編輯(E) 檢視(V) 搜尋(S) 終端機(T) 求助(H)
dennis@dennis-desktop:~$ cd final
dennis@dennis-desktop:~/final$ sudo python singlecircle.py
[sudo] password for dennis:
Every circle maxmium angle is -108.063093457
Every circle maxmium angle is -125.988235083
Every circle maxmium angle is -105.577840335
Every circle maxmium angle is -102.450638224
Every circle maxmium angle is -107.431437563
Every circle maxmium angle is -105.792902501
Final angle is -109.21735786
```

圖 20、永康區忠孝運動公園第二次測向結果

測向結果顯示無人機自轉的六圈中偵測到最大強度的角度分別為 -108.063093457、-125.988235083、-105.566840335、-102.450638224、-107.431437563、-105.792902501。

而這六圈角度平均是-109.21735786 度，與實際角度-104 度偏差為 5.21735786 度。因此可得知本次實驗的測向結果為表 7。

表 7、永康區忠孝運動公園第二次測向結果統整

測試點 X 軸	120.242186
測試點 Y 軸	23.012644
經度座標	$120.242186 - A \sin(70.782643^\circ)$
緯度座標	$23.012644 - A \cos(70.782643^\circ)$

```
應用程式 位置 系統
● dennis@dennis-desktop: ~/final

檔案(F) 編輯(E) 檢視(V) 搜尋(S) 終端機(T) 求助(H)
dennis@dennis-desktop:~$ cd final
dennis@dennis-desktop:~/final$ sudo python singlecircle.py
[sudo] password for dennis:
Every circle maxmium angle is -56.4300018063
Every circle maxmium angle is -55.2557420239
Every circle maxmium angle is -52.8779038721
Every circle maxmium angle is -55.587163293
Every circle maxmium angle is -55.7175379438
Final angle is -55.1736697878
```

圖 21、永康區永康公園第二次測向結果

測向結果顯示無人機自轉的五圈中偵測到最大強度的角度分別為 -56.4300018063、-55.2557420239、-52.8779038721、-55.5871632930、-55.7175379438。

而這五圈角度平均是-55.7175379438 度，與實際角度-54 度偏差為 1.7175379438 度。因此可得知本次實驗的測向結果為表 8。

表 8、永康區永康公園第二次測向結果統整

測試點 X 軸	120.244087
測試點 Y 軸	23.003002
經度座標	$120.244087 - B \sin(55.7175379438^\circ)$
緯度座標	$23.003002 + B \cos(55.7175379438^\circ)$

4.4 定位結果

將 4.2 節中所測得之測向結果進行交叉分析處理，當兩條測向線相交時，將能夠推測訊號源的所在位置。

永康區忠孝運動公園的測向結果如下：

經度座標： $120.242186 - A \sin(76.436572^\circ)$

緯度座標： $23.012644 - A \cos(76.436572^\circ)$

永康區永康公園的測向結果如下：

經度座標： $120.244087 - B \sin(60.3697545264^\circ)$

緯度座標： $23.003002 + B \cos(60.3697545264^\circ)$

因此數學運算式為：

$$\begin{cases} 23.012644 - A \cos(76.436572^\circ) = 23.003002 + B \cos(60.3697545264^\circ) \\ 120.242186 - A \sin(76.436572^\circ) = 120.244087 - B \sin(60.3697545264^\circ) \end{cases}$$

透過運算後可以得知 $A=0.0109$ 、 $B=0.0143$ ，反推回去經度與緯度座標為 $23.0100877, 120.2315902$ ，偏差原始發射站的距離為 92.2 公尺，而此 GPS 座標在地圖上的地點如圖 22 所示。



圖 22、第一次定位結果

將 4.3 節中所測得之測向結果進行交叉分析處理，當兩條測向線相交時，將能夠推測訊號源的所在位置。

永康區忠孝運動公園的測向結果如下：

經度座標： $120.242186 - A \sin(70.782643^\circ)$

緯度座標： $23.012644 - A \cos(70.782643^\circ)$

永康區永康公園的測向結果如下：

經度座標： $120.244087 - B \sin(55.7175379438^\circ)$

緯度座標： $23.003002 + B \cos(55.7175379438^\circ)$

因此數學運算式為：

$$\begin{cases} 23.012644 - A \cos(70.782643^\circ) = 23.003002 + B \cos(55.7175379438^\circ) \\ 120.242186 - A \sin(70.782643^\circ) = 120.244087 - B \sin(55.7175379438^\circ) \end{cases}$$

透過運算後可以得知 $A=0.0086$ 、 $B=0.0121$ ，反推回去經度與緯度座標為 23.0098176, 120.234089，偏差原始發射站的距離為 166.5 公尺，而此 GPS 座標在地圖上的地點為如圖 23 所示。



圖 23、第二次定位結果

4.5 比對先前測向結果

依照先前測向結果[9]所示，在未整合的狀況下，測向結果如表 9 所示，而本次測向結果平均誤差角度為 0.44、6.37、5.22、1.72，相較於先前測向結果的準確度並沒有顯著的提升，但先前所進行之測向實驗需要透過飛行器降落後再取出記憶卡，將數據透過人工比對後匯出成圖片，過程緩慢與複雜，本研究能夠直接在空中得知測向角度，大幅簡化測向實驗所耗費的時間與流程，雖然沒有對於準確性有更高一步的提升，但卻能夠有效地提升偵測的效率。

表 9、先前測向結果統整

南沙崙飛場			
	第一圈	第二圈	第三圈
測向結果方向角	327.26°	329.19°	328.25°
誤差角度	4.12°	6.05°	8.11°
平均誤差角度	6.13°		
和順寮壘球場			
	第一圈	第二圈	
測向結果方向角	189.92°	187.73°	
誤差角度	5.92°	3.73°	
平均誤差角度	4.82°		

4.6 研究結果與探討

本研究探討無人飛行載具搭載軟體定義無線電，如何在空中對訊號源進行測向與定位的方法。其中包含了不同系統的整合、時間的同步以及收訊資料的自動處理，從 3.2 節開始可以看到系統整合的三個部分，其中 Python 的撰寫是研究中比較困難的部分，必須確認資料的正確性，以及不

同型態的資料紀錄與運算耗時造成的時間差異，一旦其中有一個出錯便會使得紀錄檔中的檔案出現問題，訊號強度、飛行位置以及現在時間必須同步寫入，否則這個紀錄檔會失準，便會使得這次紀錄毫無價值。

而從 4.2 節開始，本研究做了兩次同地點的測向實驗，並在 4.4 將測向實驗的結果推測定位位置，4.2 節中的測向實驗為了避開台南市區為禁航區，將實驗地點選至永康區，在 50 公尺左右的高空進行繞圈測向實驗，同時能夠在不間斷的情況下，透過連線機載電腦持續監控訊號源強度變化，也能夠連續進行兩次測向實驗，搭配現場的即時數據處理，能夠接近即時的分析訊號源位置，而最後的測向誤差能夠比相同器材在地面端來的精確，證明使用無人飛行載具，能夠避開地面的多路徑干擾與建築物阻擋，提升電波監測的精準性。



第五章 研究結果

5.1 結論

軟體定義無線電這套系統是屬於自由度比較高的通訊系統，能透過軟體更改來達成不一樣通訊方式，相當適合運用在現場解決即時發生的問題上，而本研究使用的無人飛行載具，是希望透過短暫離開地面來取得某些因為地形或是建築物的阻礙所無法量測的訊號源，本研究希望改善現有無人飛行載具搭載軟體定義無線電因設備間無法彼此相連，導致頻譜監測效率低落的問題。

本研究為了使兩者能夠彼此溝通，必須先整合樹莓派與飛行控制板，嘗試透過樹莓派 GPIO 介面、通用序列匯流排介面進行資料串流，而本研究中最後選擇通用序列匯流排介面，加上 Python 進程式撰寫，將飛行資料傳輸至樹莓派中。同時，將軟體定義無線電的程式碼也整合進同一支程式中，利用樹莓派為整合中心，將兩者傳輸過來的資料做一個整理，取出飛行器經緯度、飛行器姿態、訊號強度、現在時間後，進行計算後，得出一個角度，再利用程式將平均角度算出，以上整個過程透過程式整合在樹莓派後，以後進行測向實驗只需要呼叫程式，就能夠完成整個實驗，也能夠讓軟體無線電的優勢能夠凸顯出來，在空中能透過修改程式更換監測頻率，更提升及時監測的效率。

5.2 未來研究建議

本研究中發現在遠端遙控機載電腦的通道上，使用 Wi-Fi 作為溝通橋樑是一個暫時性的選擇，因其距離最大僅至 140 公尺，以及飛行載具本身的遙控器採用 2.4GHz 的展頻與跳頻作為通訊方式，容易對 Wi-Fi 通道產生干擾的狀況，導致在數據的回傳會有些許延遲，對於即時傳輸會有些許影響，但由於本研究仍處於實驗性質，並未讓無人飛行載具長距離進行收

訊動作，而是在視線距離內進行實驗性質的偵測與數據分析，未來如果想將偵測範圍延伸至 1 公里或以上，必須更換機載電腦與地面站的通訊方式，例如：4G 通訊上網。

本研究對於分析數據僅使用 Python 檔進行處理，透過紀錄檔的資料比對顯示出最大訊號角度，並透過數學計算定位出干擾源的經緯度位置，僅提供簡易的文字介面，若未來要強化其易用性與方便性，可以透過映射至 Google 地圖與建立 GUI 介面來完善整個系統的監控介面。

本研究在 4.5 節中，比對於先前研究結果，發現誤差相差不大，起因可能因為相同的天線收訊模組，導致角度相差有限，若要求得更詳細的角度，可能需要更換更精準的指向天線，同時也要對軟體定義無線電的參數重新調整，以求得最佳效果。



參考資料

- [1] 內政部國土測繪中心，“無人飛行載具系統簡介，” [Online]. Available: https://www.nlsc.gov.tw/UAS/2-1_UASintroduce.html.
- [2] J. Mitola, “Software radio architecture,” IEEE Communications Magazine, vol. 33, no. 5, pp. 26–38, 1995.
- [3] 楊政城，“無人飛行載具自動飛行機載電腦平台開發，” 碩士論文，航空太空工程學系碩博士班，國立成功大學，2002.
- [4] Pixhawk.org, “Pixhawk Autopilot Introduction.” 2017. [Online]. Available: <https://www.pixhawk.org/modules/pixhawk>.
- [5] Dronecode.org, “Sensor Selection.” [Online]. Available: https://docs.px4.io/en/getting_started/sensor_selection.html.
- [6] J. Mitola, "Software radios-survey, critical evaluation and future directions," [Proceedings] NTC-92: National Telesystems Conference, Washington, DC, 1992, pp. 13/15-13/23.
- [7] Ettus Research LLC., “About Ettus Research,” [Online]. Available: <https://www.ettus.com/about>.
- [8] Dcarr, “Simple Software Radio Peripheral ,” [Online]. Available: <http://oscar.dcarr.org/ssrp/>.
- [9] 趙冠豪，“以無人飛行載具搭載軟體定義無線電實作測向與定位，” 碩士論文，電信管理研究所，國立成功大學，2017.
- [10] R. Danyamol, T. Ajitha and R. Gandhiraj, "Real-time communication system design using RTL-SDR and Raspberry Pi", 2013 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, 2013.
- [11] I. Llamas-Garro, K. Lukin, M. T. de Melo and J. M. Kim, “Frequency and angular estimations of detected microwave source using unmanned aerial vehicles,”

2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC), Puerto Vallarta, 2016, pp. 1-3.

[12] W. Chen and C. Ho, “Spectrum monitoring with unmanned aerial vehicle carrying a receiver based on the core technology of cognitive radio – A software-defined radio design,” *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 1-12, 2017.

[13] 何承勳, “以無人飛行載具搭載軟體定義無線電建置空中頻譜監測站,” 碩士論文, 電信管理研究所, 國立成功大學, 2016.

[14] H. Lim, J. Park, D. Lee and H. J. Kim, “Build Your Own Quadrotor: Open-Source Projects on Unmanned Aerial Vehicles,” in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 33-45, Sep. 2012.

