

國立成功大學

電信管理研究所

碩士論文

以軟體定義無線電實作數位行動無線電系統

Implementation of Digital Mobile Radio by

Software Defined Radio



研究生：周鈺傑

指導教授：陳文字 博士

中華民國一百一十一年一月

國立成功大學

碩士論文

以軟體定義無線電實作數位行動無線電系統
Implementation of Digital Mobile Radio by Software Defined
Radio

研究生：周鈺傑

本論業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員： 林福林
李威勳
陳文

指導教授： 陳文
單位主管： 郭子禎

中華民國 111 年 1 月 6 日

摘要

近年來，多種無線通訊技術已被廣泛部署以增強行動通訊。從最初的第一代行動通訊到第五代行動通訊，無線通訊不斷地進步。這些技術的發展正在改變這個社會。通過這些創新與應用，它將改變我們的生活型態。一般而言，我們在生活中常見的無線通訊就是手機和基地台之間的信息傳輸。數位行動無線電 DMR (Digital Mobile Radio)，由歐洲電信標準協會 ETSI (European Telecommunications Standards Institute)制定的一種數位行動無線電標準。基於安全與保密的原因，無線電訊號通常在傳輸之前進行加密。訊號附加的信息可能包含有「訊號的調變方式、無線電設備 ID 號碼、聲音以及傳送時間」等資訊。本研究試圖分析台灣警察和消防部門使用的 DMR 系統。目前，有許多解決方案來接收和解碼數位無線電通訊系統。為了解決系統整合上的問題，本研究利用名為 GNU Radio 的 SDR (Software Defined Radio)開發平台和大量所需的通訊模塊，設計了 Linux 操作系統下的 DMR 接收系統。本論文的主要目標是解碼 DMR 系統中的無線電設備 ID 號碼。獲得對講機 ID 後，可通過軟體開發輕鬆設計其它增值應用。

關鍵字：軟體定義無線電、數位行動無線電、無線電、GNU Radio、RTL-SDR

Implementation of Digital Mobile Radio by Software Defined Radio

Yu-Jie Chou

Wen-Tzu Chen

Institute of Telecommunication Management,
National Cheng Kung University

SUMMARY

In recent years, several kinds of wireless communication technology have been widely deployed to enhance mobile communication. From the first generation of mobile communication to the fifth generation of mobile communication, wireless communication technology is constantly improving. The development of these technologies is changing the society. Through these innovations and applications, our daily life will be changed. In general, the common wireless communication in our life is the information transmission between mobile phones and base stations. A typical digital communication system called DMR (Digital Mobile Radio) is a digital mobile radio standard developed by ETSI (European Telecommunications Standards Institute). For security and confidentiality reasons, radio signals are usually encrypted before being transmitted. The information attached to the signal may include information such as "the modulation method of the signal, the ID number of the radio equipment, the sound and the transmission time". This study attempts to analysis the DMR system used by police and firefighter sectors in Taiwan. At present, there are many solutions to receive and decode digital radio communication systems. In order to solve the problem of system integration, this research uses the SDR (software-defined radio) development platform, named GNU Radio, and a lot of required communication modules to design a DMR receiving system under Linux operating system. The main goal of this thesis is to decode the radio equipment ID number in the DMR system. After obtaining the radio ID, other value-added applications can be easily designed via software development.

Key Words: Software-Defined Radio, Digital Mobile Radio, Radio, GNU Radio, USRP, RTL-SDR, DMR, SDR

INTRODUCTION

With the increasing evolution of wireless communication technology, radio walkie-talkies are becoming more and more convenient. However, with the economic development, the public demand for wireless communication has increased, making the radio walkie-talkies gradually open to civilian use, such as camping, mountaineering, department stores, concert venues, etc. From analog technology to digital technology, traditional radio has greatly improved its voice quality, communication security and spectral efficiency. Digital technology has many advantages over analog technology.

However, the implementation of digital wireless communication still needs to completely rely on hardware design. In general, hardware-based design needs to invest a lot of money.

With the widely adopted radio communication applications, the problem of spectrum resources has become more prominent. At the same time, the needs of users are also increasing, and users are more and more inclined to use digital products. Hence, they face the problem of replacing a large number of hardware devices. DMR (Digital Mobile Radio) is a digital mobile radio standard developed by ETSI (European Telecommunications Standards Institute). For security and confidentiality reasons, radio signals are usually encrypted before being transmitted. The information attached to the signal may include information such as "the modulation method of the signal, the ID number of the radio equipment, the sound and the transmission time". This study attempts to analysis the DMR system used by police and firefighter sectors in Taiwan. At present, there are many solutions to receive and decode digital radio communication systems. To solve the problem of system integration, this research uses the SDR (software-defined radio) development platform, named GNU Radio, and a lot of required communication modules to design a DMR receiving system under Linux operating system. The main goal of this thesis is to decode the radio equipment ID number in the DMR system.

MATERIALS AND METHODS

We implemented the DMR receiver using the GNU Radio real-time signal processing framework, which is open source software. As figure 1 shown, for all experiments, we used an RTL-SDR as RF receiver. An open sourced software develop environment, GNU Radio, is used in this study. GNU Radio is user-friendly for user to easily adjust the primary parameters in a digital mobile radio receiver.

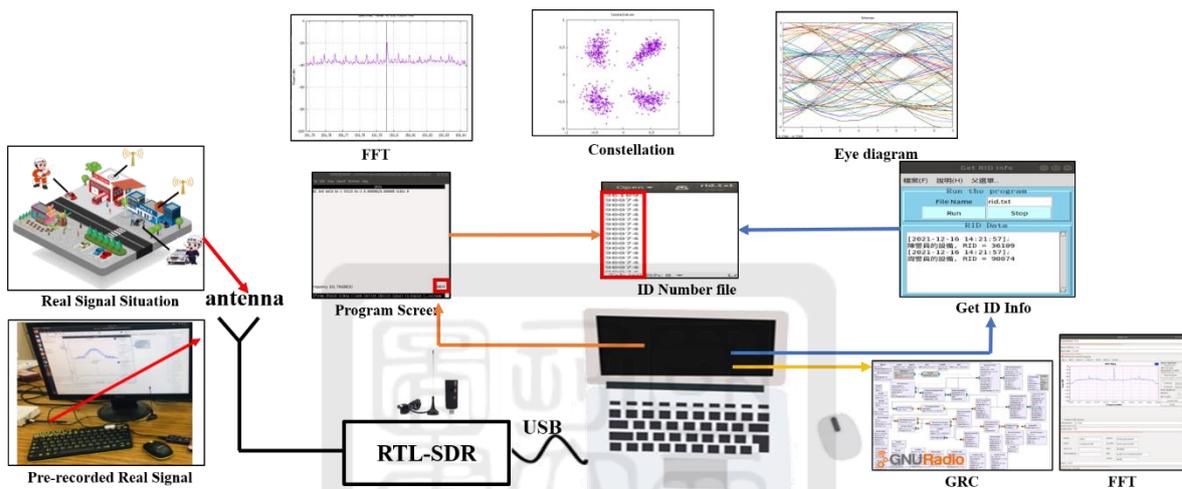


Figure 1. Architecture of the integrated system diagram

This study will use a laptop computer with an RTL-SDR dongle for signal reception. It is expected to receive the DMR radio signals transmitted by the police station or the firefighter station through the antenna. Then we can use GNU Radio to design the DMR receiver to decode some useful information such as radio ID. After obtaining the radio ID, other value-added applications can be easily designed via software development.

EXPERIMENT RESULTS

Based on the research results, the problems and limitations encountered in real-time reception of digital mobile radio signals are discussed. We need stable DMR radio signals to receive and decode in Linux operation environment. Since the specifications of each

communication module are different, we need to integrate them via an open source platform such Linux, GNU Radio, and software defined radio. The real signal radiated from police station or firefighter station is unstable. Hence, we recorded two DMR radio waves through RTL-SDR in a police station. Two radio IDs are encoded in the two DMR waves, respectively. We can stably radiate the two signals via SDR device in our lab and conduct a lot of experiments to analysis and decode the DMR signals. The measurement results from this study show that we can successfully receive and decode the radio ID encoded in DMR signals by using our proposed SDR-based design.

CONCLUSION

In this thesis, we implemented the digital mobile radio by the software-defined radio architecture to receive the radio signals. The DMR receiver designed by the software-defined radio architecture can not only be implemented at a low cost but also be easily modified and added. SDR technique is more flexible and expandable as compared with hardware-based design. Therefore, we don't need expensive hardware equipment due to the low cost of software-defined radio devices. A major advantage is that we can adjust the overall communication structure by software, according to the different needs of different communication systems. At the same time, we can use open source tool kits to integrate a variety of different digital communication systems. Advance dispatch system for police or firefighter agencies can be easily designed via our proposed method in this study.

誌謝

在電信管理研究所學習的這幾年，學到的不僅是書上的內容，更多的是書外的知識。從電腦通訊工程轉入商管領域，遇到了許多難題與挑戰，除了課業上的不同，學習新的思維方式也是帶給我很大的改變。由於跨領域的轉變，在面試工作時也常被提起說，為什麼你選擇一個與以往不同的領域讀研究所？若是當時還沒進入商管領域的我，或許只會回答：我想跟別人不一樣。在經過時間的洗禮後，懂得要如何去包裝你要說的話，怎麼去行銷你這個人？怎麼建立好自己的品牌與口碑？怎麼好好地述說一段故事，讓別人聽的印象深刻！

本論文順利完成的最終階段，非常感謝我的指導教授，陳文字老師！不管在研究或是生活上遇到的難題都能給予我好的建議與幫助，教導我如何公平公正的待人處事，一日為師，終生為父，師父領進門，修行在個人。也感謝論文審查教授李威勳老師與林福林老師，給予諸多寶貴的意見，使我的論文更加完善。謝謝 Lab402 的大家！謝謝子軒學長跟文字老師一樣不斷地在我低潮的那陣子給予我莫大的鼓勵與動力。也謝謝昱德、祺裕、奕霆、昭屏、思翰、明勳、亦萱、子安、沛蓁、昱璋和辰亦在我碩班時期，陪我渡過不少難關。研究室有可愛的學妹(冠嫻、辰亦與郁紋)與可靠的學弟(立晨、柏鈞和勝楠)，感謝你們讓我能自在地做研究，祝大家未來都會順利！感謝陪伴我一起打排球和羽球紓解壓力的朋友們，士哲、凱帆、珮淇、馨專、佳倫、哲維、宇廷、維澤、依佳、郁珊、雅筑、偵庭和思傑，謝謝你們讓我的碩士生活更加精采豐富。

最後，感謝成功大學電管的所有老師、電腦教室的莊先生以及系辦的助教、雅婷姊與鳳靖，讓我受益良多。也感謝支持我唸書的家人，讓我有機會在台南體驗各式各樣的人生經驗。能到電管所就讀，是一件很幸福的事情。

鈺傑 謹誌

成功大學電信管理研究所

中華民國一百一十一年一月

目錄

表目錄	xi
圖目錄	xii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	3
1.3 論文組織	6
第二章 文獻探討	7
2.1 數位行動無線電	7
2.1.1 數位行動無線電協議之架構	7
2.1.2 數位行動無線電技術之標準	12
2.2 軟體定義無線電	19
2.2.1 軟體定義無線電的基本架構	20
2.2.2 支援軟體定義無線電之設備	21
2.3 以軟體定義無線電實作數位行動無線電之研究	21
2.3.1 軟體定義無線電相關研究	22
2.3.2 數位行動無線電相關研究	23
2.3.3 文獻總結	24
第三章 研究架構	27
3.1 軟體架構	27
3.1.1 GNU Radio 軟體平台	27
3.2 硬體裝置介紹	29
3.2.1 RTL_SDR dongle (RTL-2832U) 技術規格	29
3.2.2 USRP 技術規格	30
3.3 軟體定義無線電實作 DMR 研究方法	32
3.3.1 實驗一	33
3.3.2 實驗二	34

3.4 軟體定義無線電實作 DMR 研究架構.....	37
3.4.1 實驗情境.....	37
第四章 研究結果.....	39
4.1 實驗準備.....	39
4.1.1 實驗一結果.....	43
4.1.2 實驗二結果.....	45
4.2 實驗架構—Linux Ubuntu(實驗組).....	45
4.2.1 解調預錄訊號.....	46
4.2.2 解調實際訊號(Real Time).....	50
4.3 實驗架構—Windows(對照組).....	52
4.3.1 解調預錄訊號.....	53
4.3.2 解調實際訊號(Real Time).....	55
第五章 結論.....	57
5.1 結論.....	57
5.2 未來研究建議.....	57
參考文獻.....	58

表目錄

表 1、DMR 標準歷程	8
表 2、DMR 標準技術表	13
表 3、常用之 SDR 開發硬體設備整合表	21
表 4、文獻比較表	26
表 5、RTL-2832U 基本規格表	30
表 6、USRP B200 規格	31



圖目錄

圖 1、	無線通訊示意圖	2
圖 2、	DSDPlus 執行畫面	4
圖 3、	151.788 MHz 的頻譜截圖	5
圖 4、	監聽訊號解碼過程	6
圖 5、	DMR protocol stack[9-11].....	9
圖 6、	TDMA 技術	12
圖 7、	TDMA 時序概述圖	14
圖 8、	通用突波結構	14
圖 9、	MS sourced TDMA frame	15
圖 10、	General data burst.....	15
圖 11、	數據類型資訊元素定義	16
圖 12、	CSBK message structure	17
圖 13、	CSBK 格式	17
圖 14、	BPTC(196,96)編碼方式	18
圖 15、	CSBK 之 BPTC(196,96)編碼編排方式.....	18
圖 16、	軟體定義無線電架構圖[15]	20
圖 17、	GNU Radio Companion (GRC)	28
圖 18、	GNU Radio 平台開發之架構圖	29
圖 19、	RTL2832U	29
圖 20、	USRP B200.....	31
圖 21、	實驗所需模組	32
圖 22、	GNU Radio 流程圖設計	33
圖 23、	OP25 模組安裝說明	34
圖 24、	OP25 模組檔案路徑	35
圖 25、	trunkyj3.tsv 文件	36
圖 26、	rx.py 檔案位置	36
圖 27、	rx.py 初次執行畫面	37
圖 28、	研究架構圖	38
圖 29、	研究架構示意圖	39
圖 30、	研究架構示意圖 2	40

圖 31、	錄製訊號.....	40
圖 32、	預錄檔名稱 SDRPlay_recording2048k_2_1.bin(90074).....	41
圖 33、	預錄檔名稱 SDRPlay_recording2048k_2.bin(36109).....	41
圖 34、	GUI 圖形化介面.....	42
圖 35、	取得 RID 資料.....	43
圖 36、	實驗 1 結果圖.....	44
圖 37、	實驗 1 結果圖 2.....	44
圖 38、	實驗 2 完成畫面.....	45
圖 39、	數位行動無線電系統之裝置資訊.....	46
圖 40、	執行畫面—Ubuntu rx.py(解預錄 36109).....	47
圖 41、	執行畫面—Ubuntu rx.py(解預錄 90074).....	47
圖 42、	星座圖(預錄 36109).....	48
圖 43、	星座圖(預錄 90074).....	48
圖 44、	眼圖(預錄 36109).....	49
圖 45、	眼圖(預錄 90074).....	49
圖 46、	執行畫面—Ubuntu rx.py.....	50
圖 47、	trunkyj2.tsv.....	51
圖 48、	RF 訊號.....	51
圖 49、	星座圖.....	52
圖 50、	數位行動無線電系統之裝置資訊.....	52
圖 51、	實際接收圖.....	53
圖 52、	訊號接收圖—SDRSharp.....	54
圖 53、	訊號解碼圖—DSDPlus.....	55
圖 54、	訊號解碼圖—Real Time.....	56

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

近年來，網路與資通訊技術日新月異，應用越來越廣泛，從最初的第一代行動通訊到第五代行動通訊，無線通訊不斷的在進步，將我們的生活昇華到前所未有的層級。無線通訊的產品目前有 FM 廣播、無線電視、無線上網 Wi-Fi、藍牙、手機、無線電對講機等，這使我們的日常生活有著更多樣的面貌。一般而言我們在生活中常見的無線通訊為手機與基地台的傳輸、無線對講機之間以及對基地台的通訊，或是手機透過 Wi-Fi 連上網路進行資料的傳輸。若是提到無線通訊或者是無線網路，我們的頻譜資源是必要探討的關鍵。

頻譜資源有其稀缺的特性，而人們對數據需求隨時間日與俱增，除了在技術上必須尋求突破外，有效率的使用頻譜資源也是重要的課題。如何讓頻譜不受到干擾和影響，且同時能容納更多的使用也是相當重要的。此外，近年來對講機的使用需求也越來越強烈，早期普遍用在軍警、安全、救護等方面，但隨著經濟發展，大眾對無線通訊使用的需求增加，使得無線電對講機逐步開放民間使用，例如：露營、登山、百貨公司、演唱會場上等，而對講機目前包含專用對講機、商用對講機、民用對講機、業餘對講機、鐵路對講機等應用。

無線電對講機的特色具有即時通訊功能、不需要透過基地台以通話收費，當我們在山上使用行動電話卻沒有訊號時，無線電對講機依然可以獨立運作不受到限制。基於這個特性在許多工作領域以及需要聯絡的環境中，無線電對講機是最佳的使用設備。

我們無線電使用的頻段為超高頻(Very High Frequency, VHF)，頻率範圍 30M~300 MHz，波長長度為 1 公尺到 10 公尺，又稱為米波頻段，與極高頻(Ultra High Frequency, UHF)，頻率範圍 300M~3 GHz，波長長度為 10 公分到 1 公尺，所以 UHF 稱為分米頻段。

傳統的無線電從類比技術到數位技術，其語音質量、通訊安全、頻譜效率有大幅度的明升，與類比技術相比更有優勢。即便有優勢，但仍需完全依賴硬體設計進行實作，且硬體設備需要投入大量成本。隨著無線電通信設備應用普及，頻譜資源的問題更加突出，同時用戶的需求也不斷提升，而用戶也越來越傾向於使用數位化的產品，因此面臨更換大量硬體設備的問題。

數位行動無線電(Digital Mobile Radio, DMR)，便是因應公共安全的需求而發展的，其最主要的用戶是警察及消防人員，如圖 1 所示。基於安全上的考量，在許多應用層面，通訊的訊號都會經過加密，因此較不容易被惡意人士盜取資訊。然而現況下有多套警用通訊無線電系統，因此未來會遇到系統整合的問題，而所需要的設備昂貴，導致沒有完善的平台系統可以改善這些問題，故本研究將以軟體定義無線電(Software Defined Radio, SDR)為核心技術，利用 GNU Radio 平台整合，並且建構出可以實際操作的 DMR 系統平台。



圖1、無線通訊示意圖

1.2 研究目的

藉由上述可得知無線電設備昂貴，為了解決問題，本研究利用 SDR 的軟體模組部分取代這些硬體的功能，同時讓功能更加彈性。軟體定義無線電降低通訊領域的門檻，不再需要很多昂貴的硬體設備，不但可以減少研究過程中的成本花費，且透過軟體定義無線電的 SDRPlay、RTL-SDR 作為 SDR 的 RF 前端硬體設備，可以有效節省硬體空間並完成本實驗。

近年來，軟體定義無線電為學界熱門的研究議題，因其方便的特性，越來越多使用者進行該領域的研究，如訊號分析、解析的實驗。本研究中礙於實作上的限制與難度。目前接收並解碼 DMR 訊號只有 Windows OS 的閉源軟體可以使用，而 Linux 雖有不少的資源，但公開的資料不多，只有幾個軟體定義無線電模組可以做整合使用。

在 Linux 的系統環境下，能取得的有 gr-dsd、gr-op25、gr-baz 這三個軟體定義無線電的通訊模組可以拿來使用，雖然以上通訊模組大多資料年份久遠，但仍有不少研究人員繼續這方面的工作，可於網路上找到相關的資料。根據本研究目前蒐集到的資料模組可以接收及監聽語音的訊號，但尚未有解析出 DMR 的數據資料。

故本研究目的歸納為以下幾點：

1. 利用軟體定義無線電模組，實作 DMR 之系統
2. 利用軟體定義無線電 GNU Radio 開發工具設計接收器
3. 利用軟體定義無線電 GNU Radio 開發工具以解調 DMR 語音及數據資訊

DSDPlus[1]為 Windows 作業系統之應用程式，如圖 2 所示，它能夠可靠地接收解調 VHF、UHF 和 800MHz 上常見的多種類型的數位音頻訊號。如下：

- P25 Phase 1
- ProVoice EDACS Digital voice
- X2-TDMA - Motorola public safety TDMA system with P25 style
- DMR/MOTOTRBO - Digital Mobile Radio standard
- NXDN - 9600 baud (12.5 kHz)、NEXEDGE - 4800 baud (6.25 kHz)
- NEXEDGE/IDAS
- D-STAR

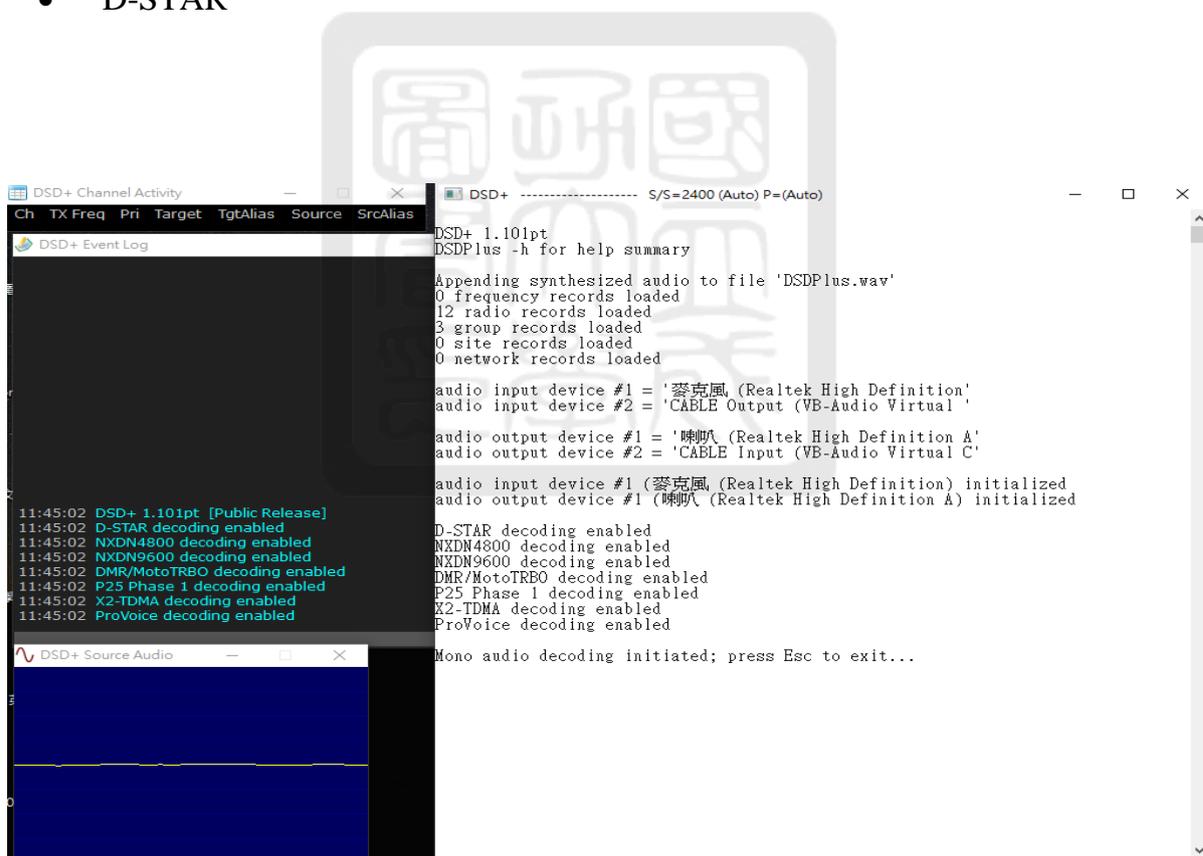


圖2、 DSDPlus 執行畫面

同時在 Windows 作業系統上還有一個應用程式 SDRSharp[2]，參考文獻 [3]，可以接收訊號，如圖 3。

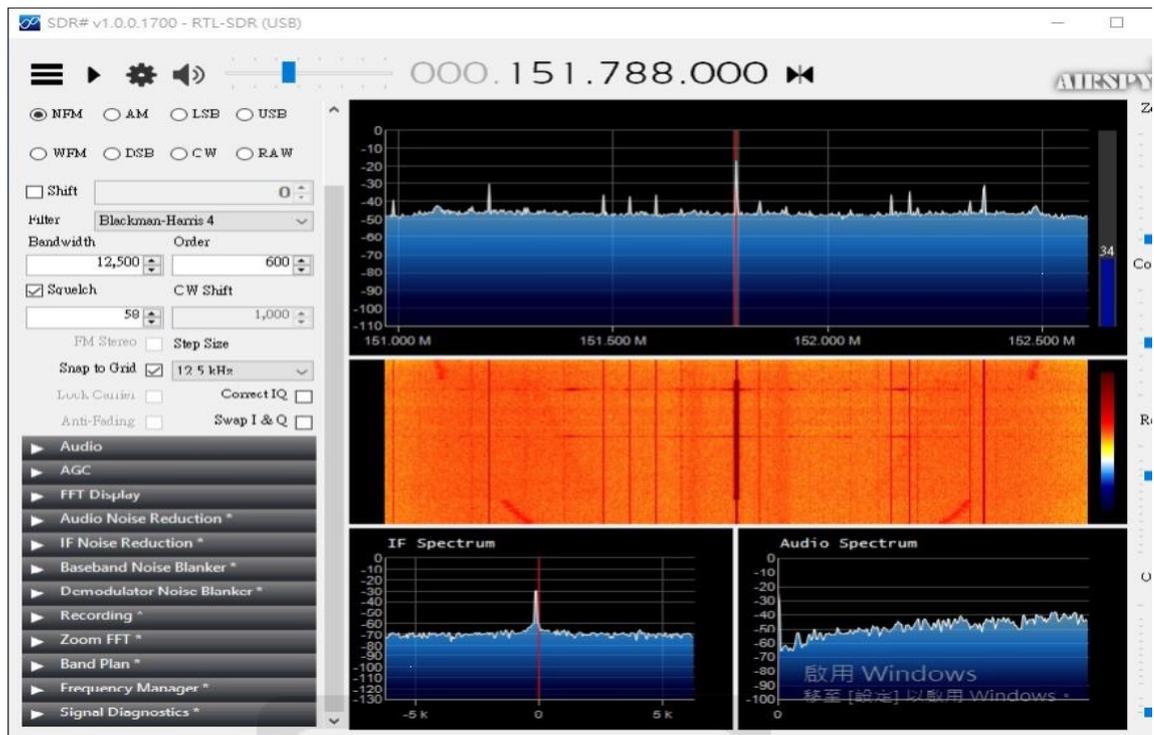


圖3、151.788 MHz 的頻譜截圖

有研究將以上這兩套軟體搭配做使用[3, 4]，利用 SDRSharp 掃描頻道，可以選擇我們要的頻率，且去收聽它，再透過 DSDPlus 解碼出一些資訊，例如：無線電設備名稱(Radio ID, RID)碼、時間、音頻，如圖 4。

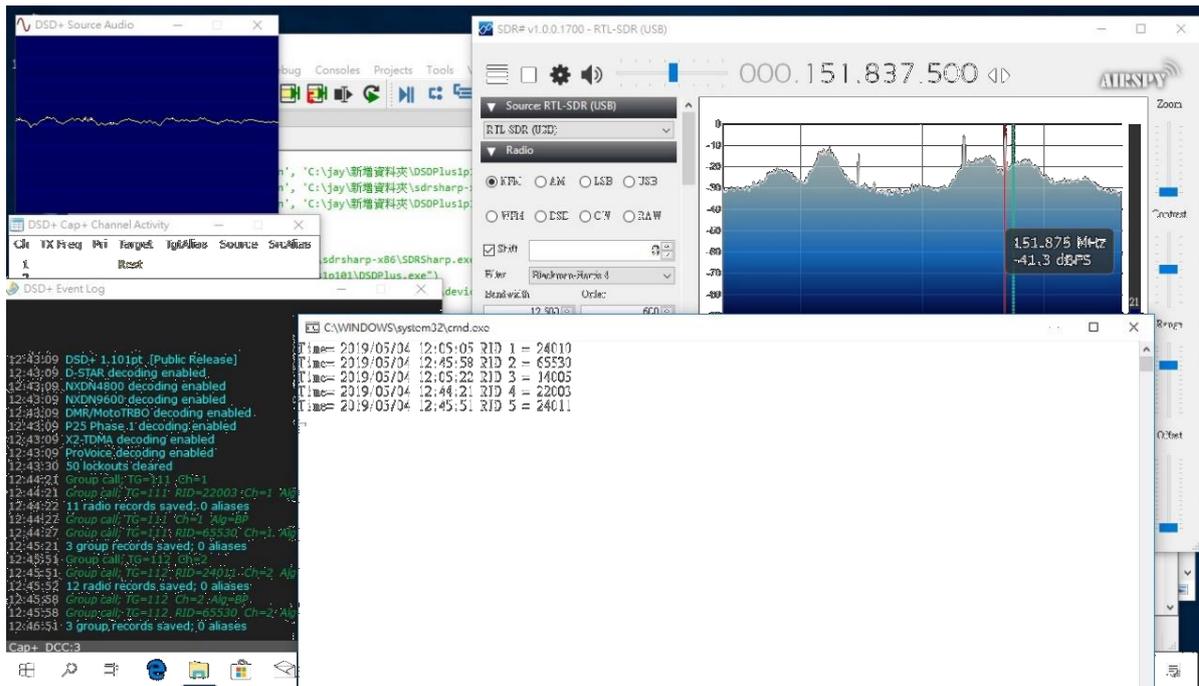


圖4、監聽訊號解碼過程

在 Windows 作業系統上，DSDPlus 配合 SDRSharp[2-4]可以很好地接收訊號並且解碼，但由於程式本身屬於閉源軟體，無法看到源碼，此外隨著程式版本的更新，是要授權並且收費的，所以在學術研究的部分，本研究希望以 Linux 中的 GNU Radio 免費的開源平台，實作數位行動無線電(Digital Mobile Radio, DMR)系統，並且同時也能做出解碼的功能。

1.3 論文組織

本論文，首先會介紹研究背景進而帶出研究動機與目的，接著介紹研究架構中各平台與軟硬體的背景介紹，並探討過往的文獻和比較相關的文獻。最後是介紹研究的架構及其原理，利用這套免費的開源軟體 GNU Radio 作為實作的平台，可以調整所需的頻段及其參數，以及說明研究中使用的軟硬體設備和所使用的軟體模組。

第二章 文獻探討

2.1 數位行動無線電

數位行動無線電(Digital Mobile Radio, DMR)，由歐洲電信標準協會(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)於2005年制定的一種數位集群行動通信標準[5]。ETSI 最初成立是為了滿足歐洲需求而成立的，但由於其發展迅速，現今已成為供全球使用以及備受推崇的技術標準生產商。

無線對講機具有即時通訊、成本低廉、經濟實用、使用方便以及無需通訊費等優點，因此廣泛應用在軍方與警民之間。尤其在緊急事件處理以及手機無線網路覆蓋的情況下，更顯示出對講機不可取代的地位。如今，模擬對講機仍然佔據絕大部分的市場，但由於數位通信可以提供更豐富的業務種類、更好的業務質量、保密特性和連接性，以及更高的頻譜效率。因此數位對講機的研究、生產和使用是與時俱進的，它符合訊息化、數位化發展的必然趨勢。DMR 標準為通道帶來了新的優勢[6-8]，例如：較低的失真率、更高的靈敏度以及相關更長的距離，主要為重要的通訊安全性、加密以及數據傳輸。

2.1.1 數位行動無線電協議之架構

DMR 協議是 ETSI 下的無線及電磁兼容技術委員會(Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters, ERM)於2006年制訂發布的「ETSI 102 361-1 V1.2.1 (2006-01) Digital Mobile Radio Systems Part 1[9]: DMR Air Interface protocol 技術規範(TS)」。除 Part 1 以外，還有：Part 2[10]: DMR voice and generic services and facilities；Part 3[11]: DMR Data protocol 和 Part 4[12]: DMR trunking protocol，同時 DMR 的設備、產品有分三個層級，如下表 1 所示。

表 1、DMR 標準歷程

<p>I 級(不用執照)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.在歐洲、美國使用 446 MHz 頻段，免執照。 2.在 12.5KHz 通道中定義了兩個時槽(Time slot)。 3.設備傳輸最大功率為 0.5W。 4.在直通模式下運作(無需基礎結構進行通訊)：適合不需要廣域覆蓋的情況，如個人、娛樂等。
<p>II 級(常規)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.使用 66~960MHz 頻段，需要執照。 2.模擬常規無線電的替代品。 3.此模式可以使用中繼器括長無線電覆蓋範圍。 4.針對需要更高的頻譜效率、高級語音功能和整合 IP 數據服務的用戶，這些服務主要工作在允許進行高功率通訊的頻段。
<p>III 級(中繼)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.工作在 66-960MHz 頻段的中繼台。 2. DMR III 代標準支持類似 TETRA 的短訊息和語音處理，內建有 128 bits 的狀態資訊和短訊息，並支持多種格式的數據高達 288 bits，及各種類型的分組數據服務，包括 IPv4 和 IPv6。

DMR 行動無線電協議是目前熱門的通訊協議之一，功能全面且強大，但整個協議層的結構較為複雜。對於直通模式系統而言，我們可以簡單地去研究它，集群中更多複雜的功能，或帶有中繼的通訊，我們暫且不予討論，所以下面內容只針對直通模式的終端，就是我們常說的數位對講機。 DMR 協議是歐洲電信標準 (ETSI) 於 2005 年 4 月提出的新型數字集群通信協議，經多次修改後於 2007 年 12 月正式公佈。相對於目前 TETRA 和 P25 兩種制式，DMR 協議具有成本低，易實現的優勢。由於 DMR 協議有不同於其他兩協議的特點，其發展具有較好的前景，所以本研究會先對 DMR 進行介紹。

DMR 協議結構[9-11]採用了分層描述的方式，類似 TCP/IP 網路分層式架構的模型，協議總共分為 3 層，每一層各司其職，且上下層互聯互通，如圖 5。

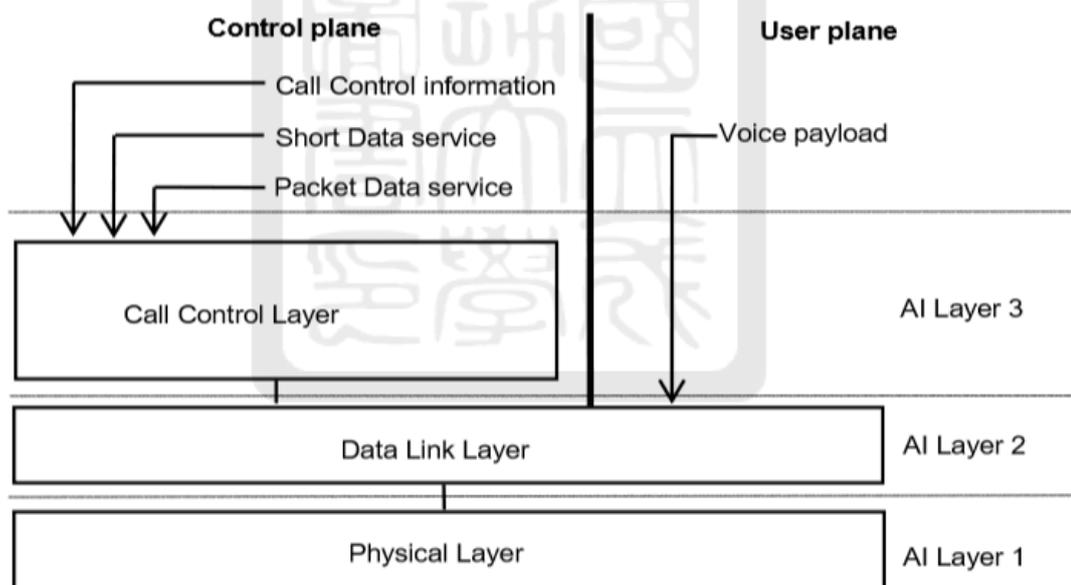


圖5、 DMR protocol stack[9-11]

第一層是實體層(PL)，負責處理數據傳輸並監控數據，與此層相關的連接設備通常是集線器、中繼器、調變解調器等。空中介面實體層 1(Air Interface Physical Layer 1)具備以下功能：

- 調變和解調變
- 發射器和接收器的切換
- RF 特性
- 位元和符元定義
- 頻率與符號同步
- 脈衝訊號建立

第二層是數據鏈結層(DLL)，可以解讀為數據通道，在物理層上傳輸數據難免會受到各種不可靠因素的影響而產生誤差，為了彌補這個缺點，為上層提供無誤差的數據傳輸，因此需要有偵錯、糾錯的功能，對數據資料偵錯並修正是數據鏈結層的基本條件，就是為網路層提供數據傳送服務。空中介面數據鏈結層(Air Interface Data Link Layer 2)具備以下功能：

- 通道編碼(前向糾錯 EFC，循環冗餘碼檢驗 CRC)
- 交織、解交織調變和位元排序
- 確認(ACK)和重發機制
- 媒體接取控制和頻道管理
- 訊框、超訊框建構和同步
- 脈衝訊號與參數的定義
- 尋址(來源或目標)
- 與實體層的語音應用(聲碼器數據)
- 數據承載業務
- 與 CCL 交換訊息指令或用戶數據

第三層是呼叫控制層(CCL)，空中介面(Air Interface, AI)的控制面，主要完成整個呼叫過程的控制與管理，提供數位行動無線電系統支援的服務，其具備以下功能：

- 基站(Base Station)啟動、停用
- 呼叫建立、保持和終止
- 個人或群組呼叫的傳送與接收
- 目標尋址(DMR ID 或適當的閘道器)
- 短數據、封包資料
- 支持固有服務(緊急訊息)
- 數據呼叫控制、訊息公告



2.1.2 數位行動無線電技術之標準

數位行動無線電(Digital Mobile Radio, DMR)的通信協議使用 TDMA 的技術，DMR 協議[9]規定了 12.5K 頻寬下，用 9600 bit rate 的 4FSK 調變方式，把每段頻寬按時間軸分為 30 毫秒的 2 個獨立時槽，每個時槽可以獨立傳輸一路語音或者數據(見圖 6、表 2)。DMR 為用戶提供多元的控制命令，實現點呼、組呼、全呼、數據轉發、數據加密、語音加密功能。在數據糾錯方面融合了 CRC、FEC 等數據糾錯技術，並在有限的資源下最大限度地提供數據的準確性。

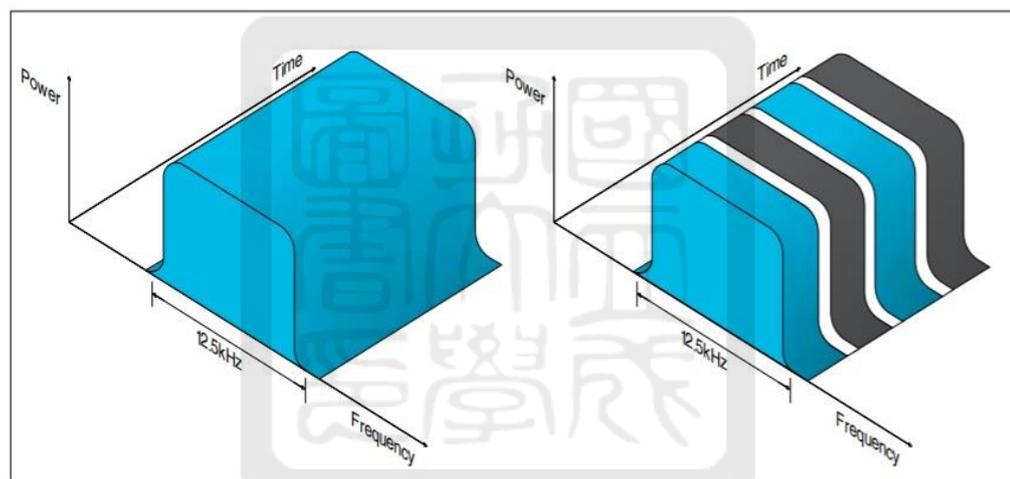


圖6、 TDMA 技術

表 2、DMR 標準技術表

頻率範圍	30 MHz
通道間距	12.5 KHz
射頻調變	4FSK
接取技術	TDMA
傳輸速率	9.6 Kb/s
符元率	4.8 Ks/s
FSK 頻率	+1944, +648, -648, -1944 Hz

DMR 的 TDMA Frame 架構

為了組織雙向發送的數據，定義了突波和訊框結構，如圖 7：

- Burst：每個傳輸突波的長度為 30 ms，由一個 TDMA 元素組成。每個突波可以用於一個 TDMA 通道，也可以用於第二個。
- Frame：一個訊框包含兩個 TDMA 突波，長度為 60ms。
- Super-frame：DMR 超訊框由六個訊框組成，用於語音傳輸。

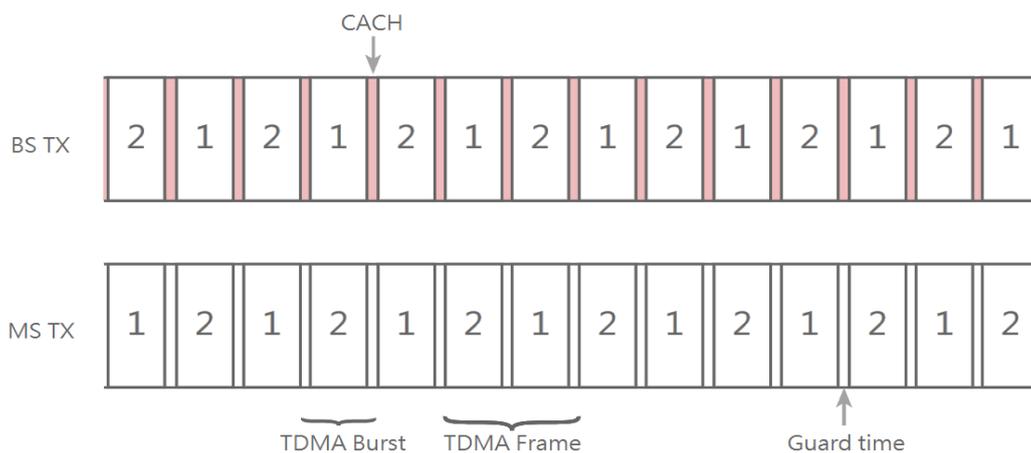


圖7、 TDMA 時序概述圖

來自基地台(Base Station, BS)的發送標記為 BS TX。當 BS 處於活動狀態時，它將連續發送。在各個突波之間，BS TX 包括公共廣播頻道(Common Announcement Channel,CACH)，其用於業務管理和訊息。行動台(Mobile Station, MS)只在有數據或語音要發送時才傳送，它包含了保護時間(Guard time)，而不是 CACH，也是適應不同行動台之間任何傳遞延遲所必需的。

DMR 的 Burst 和 Frame 架構

一般突波結構由兩個 108 bits 的負載區段和一個 48-bit 的同步或信息區段組成，如圖 8、9 所示。每個脈衝串的總時間長度為 30 ms，但 264 bits 數據中只使用其中的 27.5 ms，使用 216 bits 的負載區段足以承載 60 ms 的壓縮語音。

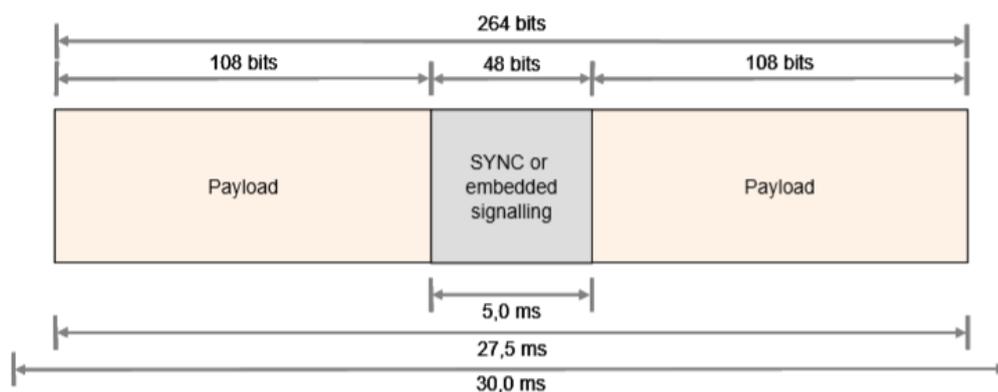


圖8、 通用突波結構

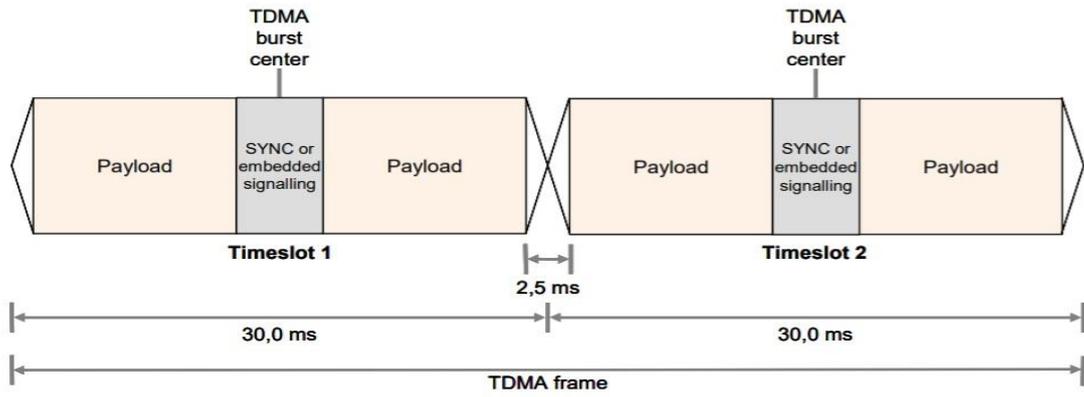


圖9、 MS sourced TDMA frame

如圖 10 所示，每個數據和控制突波包含一個 20 bits 的 Slot Type，它定義了 196 個資訊位的含義。Slot Type 的數據類型資訊元素的目的是如圖 11 中所定義，該圖還顯示了所使用的有效載荷(Payload)的 FEC。

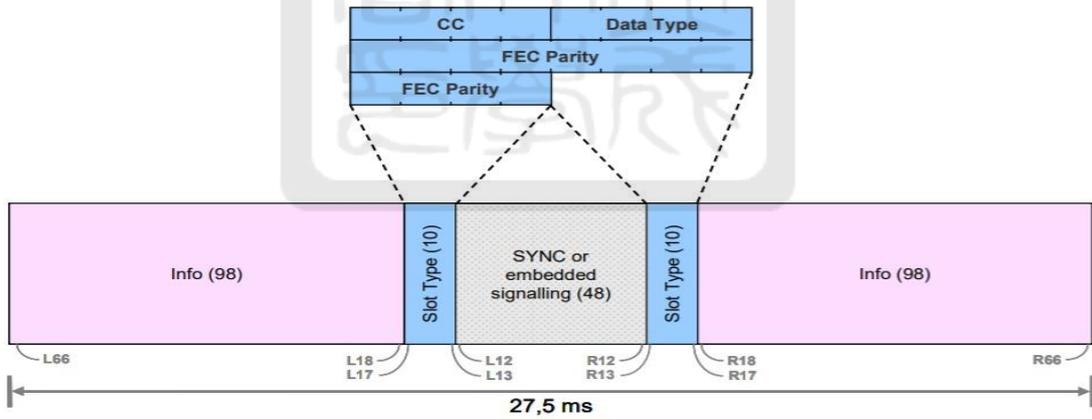


圖10、 General data burst

訊令與資料傳輸：

- 具有相同的突發格式。
- 突波可用於：訊令和分組數據協議，其中由短數據訊息協議和 IP 協議組成。
- 數據類型指示作為突波的使用。

Data Type	Purpose	Payload FEC
PI Header, see note	Privacy Indicator information in a standalone burst	BPTC(196,96)
Voice LC Header	Indicates the beginning of voice transmission, carries addressing information	BPTC(196,96)
Terminator with LC	Indicates the end of transmission, carries LC information	BPTC(196,96)
CSBK	Carries a control block	BPTC(196,96)
MBC Header,	Header for multi-block control	BPTC(196,96)
MBC Continuation	Follow-on blocks for multi-block control	BPTC(196,96)
Data Header	Carries addressing and numbering of packet data blocks	BPTC(196,96)
Rate ½ Data Continuation	Payload for rate ½ packet data	BPTC(196,96)
Rate ¼ Data Continuation	Payload for rate ¼ packet data	Rate ¼ Trellis
Idle	Fills channel when no info to transmit	BPTC(196,96)
Unified Single Block Data	Carries control and/or data payload in a single block	BPTC(196,96)
NOTE: This information element is not defined in the present document and is reserved for future use.		

圖 11、數據類型資訊元素定義

DMR 訊令

控制訊號區塊訊息架構(Control Signalling Block message structure)，CSBK 包含與 CSBK 操作碼 (CSBKO) 和特徵 ID (FID)組合。LB 應設置為 12。

- DATA 元素包含特定於特徵的資訊（例如 Source ID and Destination ID）
- CSBK 訊息包含一個 96 bits 的訊息字段。
- CSBK 訊息的一般結構如圖 12 所示。

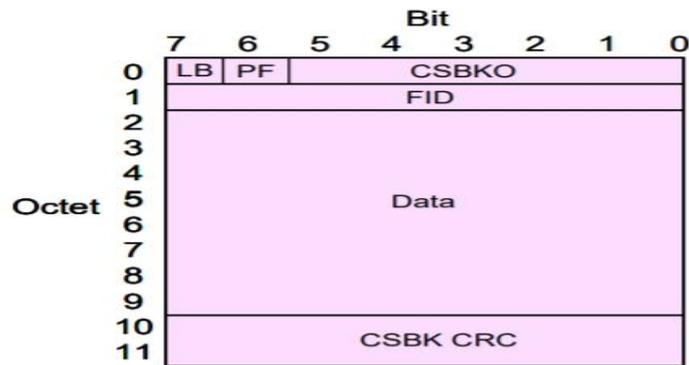


圖12、CSBK message structure

圖 13 中，兩個 Info 總共佔 196 bits，其中含有 96 bits 的 CSBK 控制訊號訊息區塊（80 bits 訊令 + 16 bits CRC）的資料。CSBK 訊令資料由 BPTC(196,96)編碼器 FEC 保護。在圖 13 中的 Slot Type 數據類型應設置為 CSBK 模式。

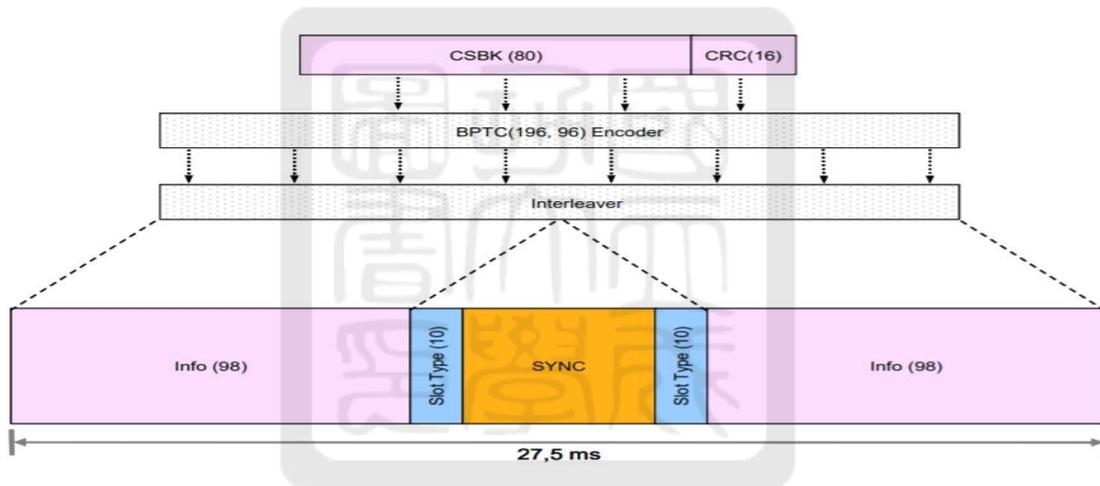


圖13、CSBK 格式

Block Product Turbo Codes , BPTC(196,96)

BPTC(196,96)編碼器會保護控制訊令、未確認和已確認的數據如圖 14 所示。圖 14 橘黃色方框中，將 96 bits 的訊息 I(0) - I(95) 放置在一個 9 行 × 11 列的矩陣中。R(0) - R(2)三個是保留位元，設置為 0，並加入有效載荷 Payload 裡，使之為 99 bits。每一行的資料由 H_{Rx} 使用 Hamming(15,11,3)編碼保護，每一列的資料由 H_{Cx} 使用 Hamming(13,9,3)編碼保護。

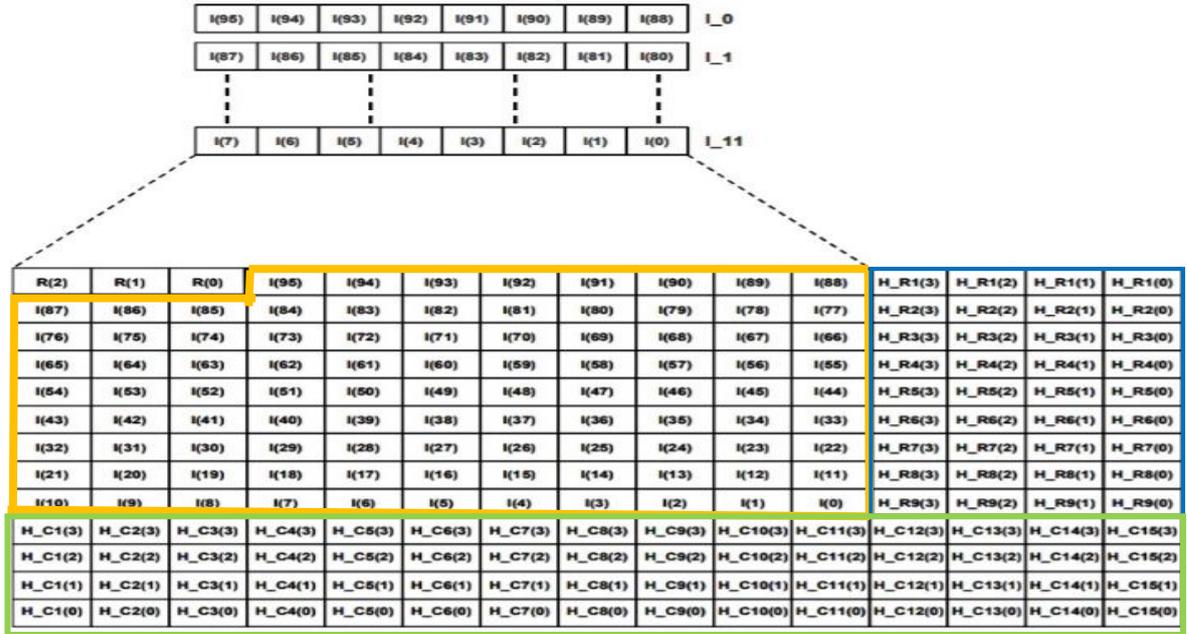


Figure B.1: BPTC (196,96)

圖14、BPTC(196,96)編碼方式

圖 15 以 CSBK 資訊架構，依照 BPTC(196,96)編碼方式由左至右，由上到下進行排列。左邊黑色方框中 I(0) - I(95) 根據圖 15 右上角的架構資訊，放入 96bits 的資料(Octet 0 - Octet 11)，右下角綠色方框為 CSBK 之 BPTC(196,96)編碼簡易排列圖。R(2) - R(0)預設為 0。

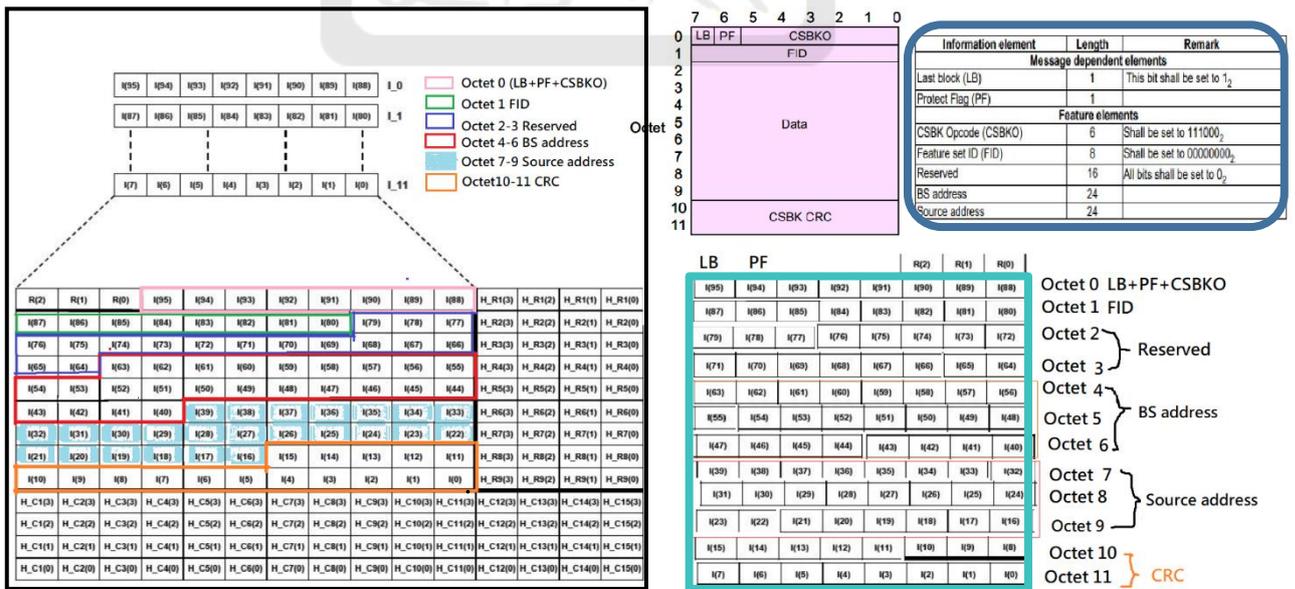


Figure B.1: BPTC (196,96)

圖15、CSBK 之 BPTC(196,96)編碼編排方式

2.2 軟體定義無線電

軟體定義無線電(Software Defined Radio, SDR)[13]，是一種實現無線通訊的技術。最早出現在 1980 年代，初步的架構十分美好，但礙於當時硬體設備效能還未能支援軟體定義無線電所需要的訊號處理能力，導致許多模型都還是處於提出概念與未來展望的階段，所以大部分的通訊設備還是以嵌入式硬體為主。1991 年由 Joe Mitola 再提出時，起初被軍方所看中，並應用在軍事用途。在軍用體系制度中，制式電台具備生產標準化及設備通用性的特性，而軟體定義無線電適合建構多模式、多頻段、多協議的通用無線電通訊平台，方便軍方於各軍種與他國部隊之間的通訊相容，因此其被認為可以完美與軍事用途相結合，而美國空軍國防高等研究計劃署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)目前仍在繼續進行相關研究。

軟體定義無線電在 21 世紀初，逐漸從軍事領域用途轉為開放給民間使用。近年來軟體定義無線電越來越受到重視的原因是它可以透過模組化的程式控制硬體元件，像是傳統硬體設備、裝置內的濾波器、放大器、混頻器、解調變器、升降頻器等，都可以透過軟體取代，而許多的參數值，如中心頻率、取樣頻率、頻寬、天線增益大小、訊號調變方式等等，都可以透過軟體更改元件的參數值並透過個人電腦進行運算，不用透過硬體的更改，以達到無線電的功能。軟體定義無線電提供了整合硬體與通訊協定的系統建置方案與快速的原型製作。

本研究用的軟體 GNU Radio 同時也是一個免費開放性與擴展性高的開源軟體平台，它有開放的原始碼使開發者能夠去更改內部的通訊架構，而訊號處理的流程所需要的通訊技術或是調變技術，大部分也可以透過軟體的更新或是下載新的套件來升級軟體，無需更換硬體設備。

軟體定義無線電可以在同一個平台 GNU Radio[14]建構多種不同模式和功能的無線通訊設備，有別於過去需要花費大量預算購買硬體設備，軟體定義無線電提供了通訊設備更彈性的選擇。

2.2.1 軟體定義無線電的基本架構

軟體定義無線電架構[15]，如圖 16 所示，軟體定義無線電並非讓電腦軟體完全取代傳統硬體裝置，還是要仰賴前端射頻裝置(RF Front-End)透過外接天線接收或發射訊號，訊號透過軟體無線電提供的類比數位轉換器(Analog to Digital Converter, ADC)、數位類比轉換器(Digital to Analog Converter, DAC)，以及場域可程式化邏輯閘陣列(Field Programmable Gate Array, FPGA)做訊號處理，再利用電腦通用序列匯流排(Universal Serial Bus, USB)介面作為溝通硬體裝置以及電腦軟體的平台，讓電腦程式軟體進行後續訊號處理，使用者可以透過軟體定義無線電平台實作符合其需求的通訊系統。

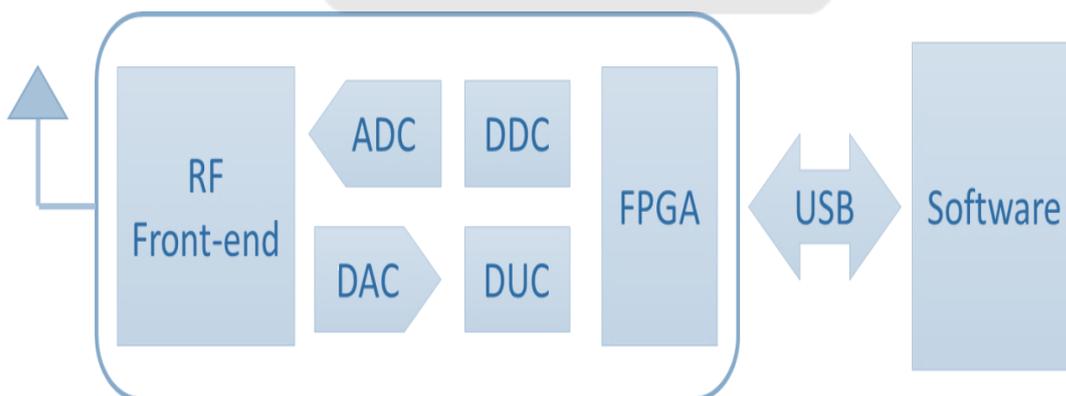


圖16、 軟體定義無線電架構圖[15]

2.2.2 支援軟體定義無線電之設備

隨著軟體定義無線電的發展，市面上越來越多支援軟體定義無線電的硬體設備提供我們做選擇，主要分為兩種，一種是純接收，另一種則是進行發射與接收的雙工功能。本研究在 RF 接收前端所使用的硬體為 RTL-SDR dongles (RTL2832U)，這種屬於前者。表 3 為參考文獻[16]進一步整理增修出目前最受到矚目的幾種硬體規格，並列出其相關技術參數。

表 3、常用之 SDR 開發硬體設備整合表

設備名稱	供應商	Freq. Range (MHz)	Sample Rate (Mbps)	ADC (bits)	Comment
HackRF	Mike Ossmann	30 - 6000	20	8	RX/TX
AirSpy	SDRSharp	24 - 1750	10	12	RX
SDRPlay	SDRPlay Team	0.1 - 2000	8	12	RX
RTL-SDR	Realtek	24 - 1766	3.2	8	RX
USRP B200	Ettus Research	70 - 6000	56	12	RX/TX

2.3 以軟體定義無線電實作數位行動無線電之研究

隨著時間推近，由於訊號處理的過程由硬體轉為軟體，因此 SDR 引起了世界各地的駭客與無線電玩家的注意。GNU Radio 即為常見的用來代替硬體處理的軟體開發平台，目前已有部分研究利用 GNU Radio 去建立一個 SDR 的環境。因此使用軟體定義無線電的應用越來越多，尤其是它的彈性高、價格便宜

與不易損壞，皆是軟體定義無線電的優勢和被採用的關鍵因素，許多的研究也證實在軟體定義無線電應用於無線通訊系統之實作便利性與穩定性。

2.3.1 軟體定義無線電相關研究

研究[17]介紹並簡要討論 USRP，RTL-SDR 和 GNU Radio 軟體，開源的 GNU Radio 軟體開發平台可以透過 SDR 的設備實現各種通訊系統。利用 USRP 與 RTL-2382U 結合，透過 GNU Radio 實作 WBFM 接收器。

研究[18]利用 RTL-2832U USB 接收器搭配 Raspberry Pi 接收和解碼 FM 信號，可以通過 PC 上的 SDR Sharp 軟體來實現。Raspberry Pi 是一種低成本且體積類似信用卡大小的小型電腦。RTL-2832U USB 接收器的模式是通過 USB 將原始 IQ 樣本轉存到電腦上。GNU Radio 支持這種相對便宜的 USB 接收器作為軟體定義的無線電，使用 GNU Radio，可以實作所有實際通訊的實驗環境。

研究[20]透過 GNU Radio 平台建構控制中心，使用 RTL-2832U USB 接收器和一個 USRP 設備來測量無線電信號，並且進行無線電視與 FM 廣播的頻譜監測。

研究[19] 描述使用 RTL-SDR 的機會、操作與開發，將這些教材整合融入到本科和研究生的核心課程中，將大大加強 DSP 和通訊理論、原理和應用的教學。

2.3.2 數位行動無線電相關研究

SDRSharp 程式可以在 Windows 作業系統上使用 RTL-SDR 進行頻譜監測，支援 FM、AM 上下 SSB、DSB、CW 解調器。在 1.2 研究目的中提到，如果搭配 DSD Plus 一起使用，可以對不同的中心頻率進行接收訊號、監聽訊號及獲取訊號資料等。

研究[21]設計數位中頻 IF 收發器的 DMR 系統，透過 FPGA 模擬進行實驗，設計出少於 1%的位元錯誤率(Bit Error Rate, BER)的收發器。

研究[22]作者基於軟體定義無線電 SDR 的結構，實作 DMR 物理層(Physical Layer, PL)系統：基頻處理、調變解調變等，在 Windows OS 上透過 MATLAB 和 USRP 完成實驗。

近年來，已經廣泛部署了多種無線網路以增強行動通信，在 2016 年這項研究中[23]，作者們專注於台灣的電子巴士 (e-bus) 系統以及公共交通數據的通訊方式。在台灣目前的系統中，這種類型的傳輸數據是通過特定的行動網路運營商提供的。這樣的操作每個月都需要巨大的開支來支付數據傳輸的訂閱費。因此，作者們設計了一個使用數位行動無線電 (DMR) 和增強型 Wi-Fi 的新網路系統，以取代當前的行動網路運營商。此外，他們提出了一種動態更新策略來增加系統容量。在緊急情況或災難發生的情況下，2G/3G/LTE 網路可能不是很可靠，他們建議的系統可以在救援行動中使用。與使用行動網路相比，它還具有更低的成本。

2020 年 A. Nikitin et al. 學者們提出[24]使用 DMR 標準的數位行動無線電控制俄羅斯鐵路交通的研究，確定列車和鐵路基礎設施之間的信息傳輸量，計算在這種情況下在無線電通道中產生的信息負載，根據列車強度確定所需的無線

電通道數量、流量和訊息傳輸頻率等。計算無線電範圍在 160 MHz 頻段方法的形式化，進行了無線電頻率範圍在可靠的水準上，對於基地台功率、天線安裝高度和軌道複雜性類型的依賴性。理論模型可用於對鐵路交通控制系統的設計與操作。

2020 年由 A. Atutxa et al. 學者們在研究中提出[25]，搜救活動最重要的要素之一是無線電通訊，DMR 應用在緊急救援行動環境中，透過小型無人機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 搭載樹莓派 Raspberry Pi 在空中運行 DMR 熱點來實現機動性。有些地區 2G 到 5G 的網路覆蓋率可能不高，在這種情況下，只能依靠數位無線電通訊技術進行調整。而 DMR 已在無線電業餘玩家中廣泛被使用。

2.3.3 文獻總結

過去通訊的實驗常常需要很多的硬體搭配少量的軟體，故整體的成本會因硬體而上升，而 M. Abirami 提出所有的類比與數位訊號實驗皆可執行在硬體為 USRP 及軟體 GNU Radio 上[26]，能用簡單且低成本的方式便可實現一通訊系統。而 B. Uengtrakul 也提出關於此類 SDR 實驗的問題[27]，他認為實驗是幫助學生了解且引起動機的重要元素，因此他提出一個更低成本的 SDR 實驗過程。

數位對講機隨著市場和對講機的需求增加，越來越受到重視。數位行動無線電 (Digital Mobile Radio, DMR) 是歐洲電信標準協會 (ETSI) 為專業行動無線電 (Profession Mobile Radio, PMR) 用戶專門制定的數位無線電標準，最早於 2005 年獲得批准。

DMR 的優勢在於通道容量的增加、能夠兼容傳統模擬系統、語音清晰、降低受到的干擾、提高頻譜使用效率。當行動通訊沒有訊號時，DMR 對講機卻能不受限制，例如在深山或是地震、火災、水災以及停電發生時，對講機的存在就頗為重要。

隨著通過語音，串流影片，數據等之通訊類的通訊領域中的指數增長，以簡單且符合成本效益的方式修改無線電設備是關鍵的任務。SDR 技術提供了一種靈活，高經濟效益的解決方案，以推動通訊並為終端使用者帶來廣大的利益。

伴隨著科技進步，電子以及軟硬體設備行業迅速的發展中，陸陸續續有著各式各樣的產品出現，建造成本逐漸降低。由於現在追求數位化，在類比數位轉換技術發展中，取樣頻率越來越高，DSP 以及 FPGA 技術的普及，早已為數位化電台的出現鋪路。例如中頻技術、調變、解調變，無須透過基頻，直接採用中頻即可。它避開了調變的限制，也剛好接上了 SDR 軟體定義無線電的部分。目前音頻數位化的技術日益成熟，故 DMR 系統應用必然為此研究的重點之一。

最後將過去文獻與本論文的相異之處相做比較，如下表 4。文獻[18]、[3]在 Windows 作業系統上使用 SDR Sharp(第三方軟體)接收 FM 訊號，而本研究為接收 DMR 訊號。文獻[21]在 Windows 作業系統上設計 DMR 中頻接收器，透過 FPGA 進行模擬實驗；本研究在 Linux 作業系統上透過 GNU Radio 軟體定義無線電開發平台設計 DMR 接收系統，並解析數據資料。文獻[22]基於 SDR 的結構，實作 DMR 系統，在 Windows 作業系統上透過 MATLAB 和 USRP 完成實驗；與本研究差別在於我們使用不同的作業系統、它使用 MATLAB 而我使用 GNU Radio，以及文獻[22]沒有解數據資料與其它應用。文獻[23-25]將 DMR 做了很多應用，例如：電子巴士、鐵路以及無人機搜救。最後文獻[28]與本研究都使用 Linux 作

業系統以及 GNU Radio 軟體定義無線電開發平台實作，差別於文獻[28]實作廣播電視監測系統之數位分析、即時影像解碼與效能分析。

表 4、文獻比較表

項目\文獻	[21]	[22]	[18]	[3]	[23]	[24]	[25]	[28]	本研究
Windows 系統	O	O	O	O	X	X	X	X	X
Linux 系統	X	X	X	X	X	X	X	O	O
MATLAB	X	O	X	X	X	X	X	X	X
GNU Radio	X	X	X	X	X	X	X	O	O
FPGA	O	O	X	X	X	X	X	X	X
解數據資料	X	X	X	X	X	X	X	X	O
SDR 架構	X	O	O	O	X	X	X	O	O
DMR	O	O	X	X	O	O	O	X	O
應用	X	X	X	X	O 巴士	O 火車	O 無人機 搜救	O	O 警消

第三章 研究架構

此章節旨在介紹本研究中所使用的相關工具及系統架構。本研究將使用軟體定義無線電平台去建立數位行動無線電(Digital Mobile Radio, DMR)系統，並且利用此架構比較不同 RF 設備做研究分析。本章節第一部分將介紹用來開發軟體定義無線電之開發平台 GNU Radio 軟體架構，第二部分將介紹實作數位行動無線電所使用之軟體定義無線電前端 RF 射頻硬體設備，以及探討相關標準規格，最後是系統架構及流程設計。

3.1 軟體架構

軟體定義無線電技術發展至今有許多開發平台，有些平台需要綁定特定前端裝置才能使用，有些平台則需要付費使用，且不少功能介面都被軟體開發者鎖定，使用者較無法在平台上彈性的依據自身需求開發相關應用，因此本研究選定在 Linux 系統下之開源軟體定義無線電開發平台 GNU Radio 作為本研究軟體平台。

3.1.1 GNU Radio 軟體平台

GNU Radio[14]是一款免費的開源軟體，同時也是無線電開發平台，它能夠執行多種通訊調變技術、封包的加密解密、產生 RF 訊號、呈現頻譜圖、瀑布圖以及錄製訊號。GNU Radio 支援軟體定義無線電之 RF 前端硬體設備，能夠進行發射或接收訊號的動作，它允許不同的通訊技術整合在同一個軟體系統中。GNU Radio 在程式啟動時會執行相對應的通訊技術，但在 GUI 介面的部分無法做到雙工任意切換(同時發射與接收)。GNU Radio 應用程式是利用流程圖概念，連結一連串訊號處理方塊，將複雜的通訊技術整合在一個流程圖中，通過 GNU Radio Companion(GRC)來運行，用於建構訊號流程圖和生成流程圖

源代碼，如圖 17。流程圖中連接的模塊是藉由 GNU Radio 開發包中所包含的一些典型訊號處理的模組，如濾波器、通道代碼、同步元素、等化器及解碼器等模塊，使用者也可以由撰寫 C/C++ 程式語言自行創建模塊。圖 18 為 GNU Radio 平台開發之架構圖，GNU Radio 框架分為兩大部分，使用 C++ 語言撰寫的訊號處理模組和控制流程圖的排程器(Scheduler)，利用 Python 內建模組執行緒去決定流程圖的開始、暫停或結束，再透過利用 Python 腳本程式語言將這些不同的模塊與連接線賦予作用、建構流程圖，而具有方便修改的特性。因此本研究選擇 GNU Radio 作為架構，為系統提供高效率 and 靈活性。

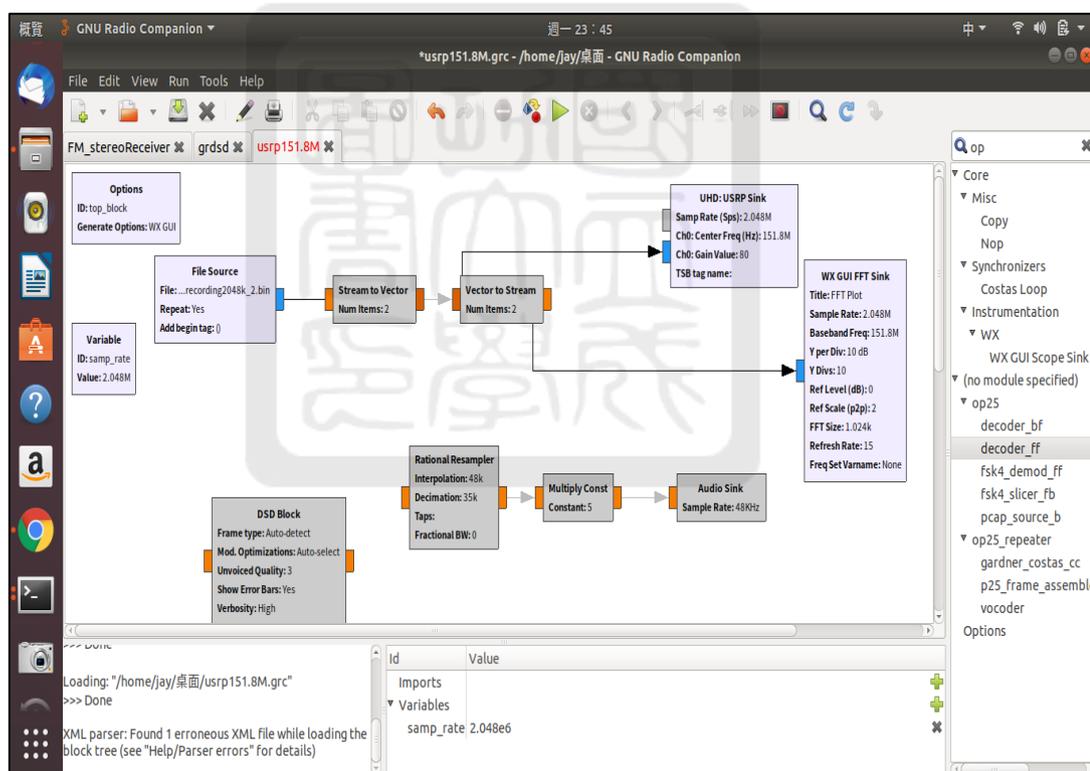


圖 17、 GNU Radio Companion (GRC)

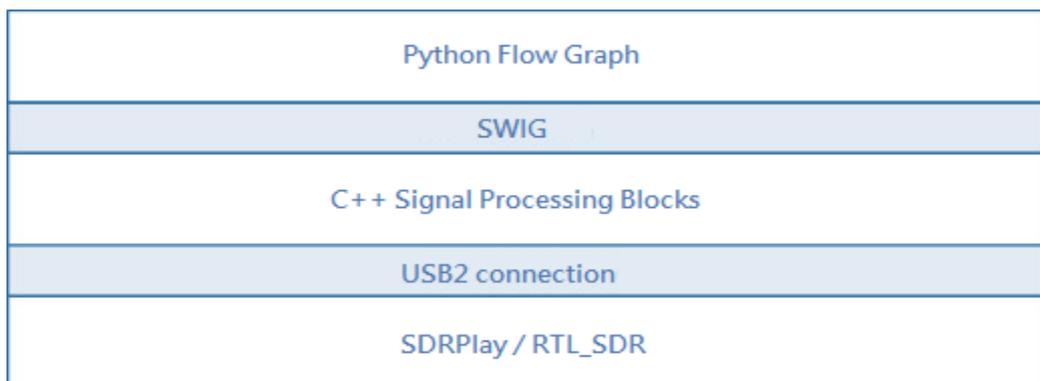


圖18、GNU Radio 平台開發之架構圖

3.2 硬體裝置介紹

組成軟體定義平台，仍需要部份透過 RF 前端硬體設備作為接收數據的支援，藉此提供電腦接收的訊號數據。

3.2.1 RTL_SDR dongle (RTL-2832U) 技術規格

本研究使用硬體設備之一，為 Realtek 公司所製作的 RTL-2832U[18, 19]，可配置為多種格式、協議與頻率，是一種全積體化的收發器。目標是生產一部有效率，具成本效益，而且易於使用的裝置，如圖 19。



圖19、RTL2832U

由於 RTL2832U 可支援將未經解調的同相和正交分量訊號 (RAW I/Q Samples) 直接傳輸到電腦，許多開發者就想到可以利用這個組合(R820T + RTL2382U) 來完成軟體定義無線電的實驗平台。

在這之後，經由 Antti Palosaari、Eric Fry 和 Osmocom 團隊的開發與努力，許多研究者都可以藉由利用這個便宜的硬體將 SDR 投入其他的開發應用，其基本規格如下表 4。

表 5、RTL-2832U 基本規格表

頻率範圍	24 MHz ~ 1766 MHz
頻寬	Up to 56MHz
最大取樣頻率(Sample Rate)	2.56MS / s
取樣解析度(ADC/DAC)	8 bits
支援模式	Rx
解調器晶片	Realtek RTL2832U

3.2.2 USRP 技術規格

本研究所採用的 USRP(Universal Software Radio Peripheral) B200 如圖 20，是美國廠商 Ettus Research 所生產的通用軟體定義無線電周邊裝置，USRP 可以使用官方的 USRP Hardware Driver (UHD)，而 UHD 是一個開放的原始碼、

跨平台的驅動程式，不管是在 Linux、微軟或是 Mac OS 上都提供相同的 API (Application Programming Interface)，更方便地使開發者能夠有更彈性的開發環境，其基本規格如表 5。

表 6、USRP B200 規格

頻率範圍	70MHz~6GHz
頻寬	Up to 56MHz
最大取樣率	61.44M Sample/second(MS/s)
取樣解析度(ADC)	12 bits
支援模式	Full Duplex (Rx/Tx)
電腦連結接口	USB 3.0



圖20、USRP B200

3.3 軟體定義無線電實作 DMR 研究方法

為了完成實驗，我們需要準備相關的研究環境，本研究使用 Linux Ubuntu18.04 作業系統，安裝開源的 GNU Radio 作為軟體定義無線電的開發平台。此研究除了需要 GNU Radio 內原有的模組之外，還需要 rtl-sdr 驅動程式、gr-op25、gr-baz、gr-dsd 和 gr-osmosdr 等等通訊模組，如圖 21。通訊模組透過由 GitHub (一個共享虛擬主機服務，存放版本控管的軟體代碼和專案內容)取得相關模組。過程中我們需要克服一些問題，像是各個軟體會有版本不相容的問題、有些開放資源沒有更新或是找不到的狀況，因此系統整合也將成為本研究重點之一。

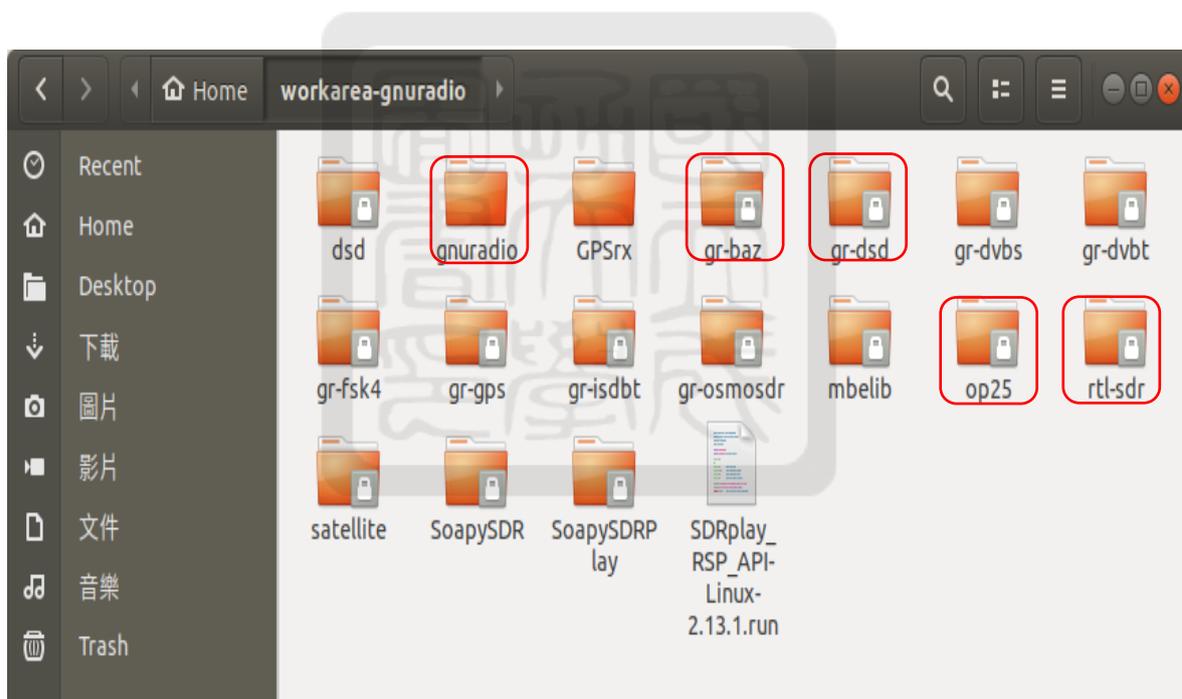


圖21、實驗所需模組

3.3.1 實驗一

實驗一使用 GNU Radio 為軟體定義無線電實作軟體的部分，實際接收 DMR 的訊號，除了 GNU Radio 內原有的模組外，也由 GitHub(開源代碼平台)取得相關模組，本文會介紹所需要的模組，如圖 22 所示。

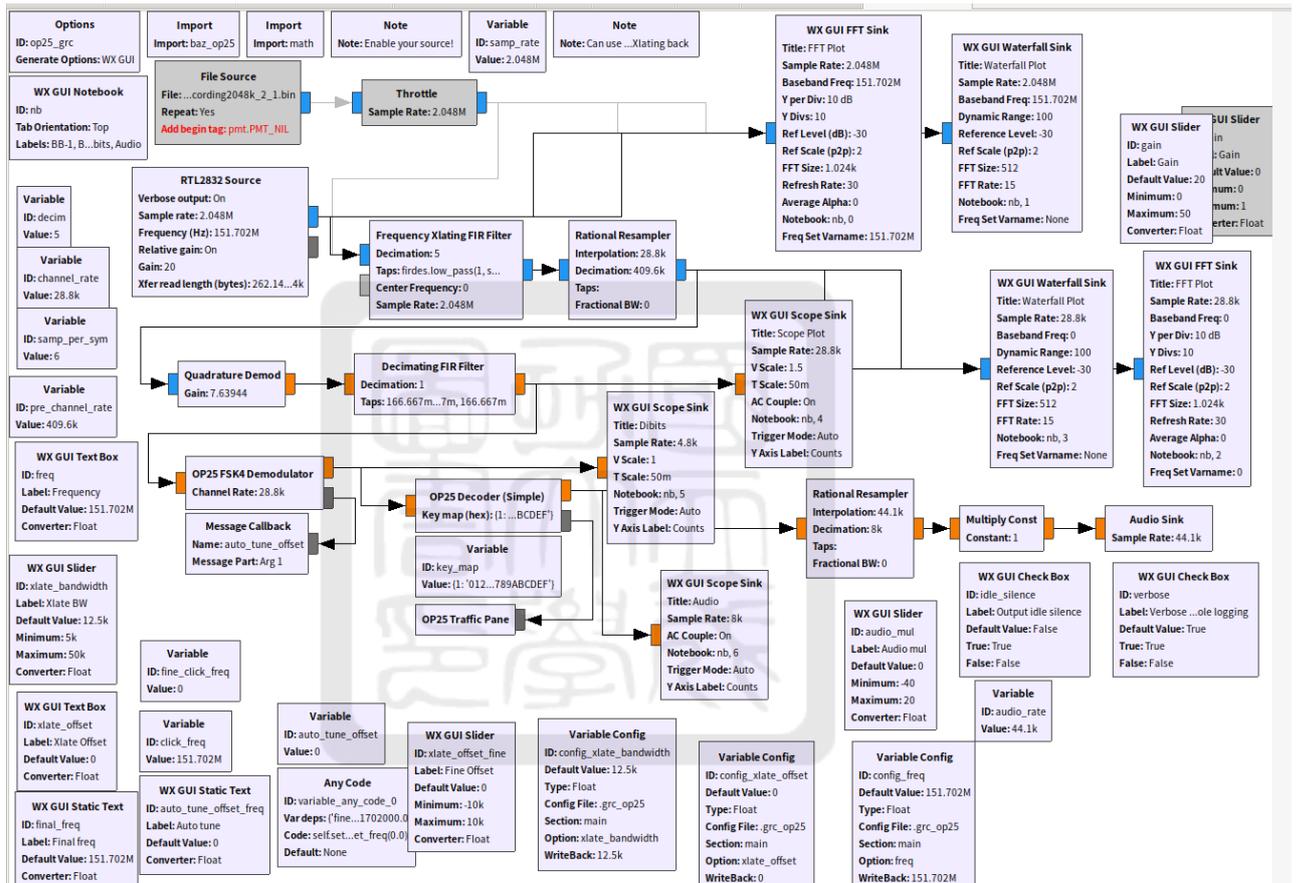


圖22、 GNU Radio 流程圖設計

- RTL2832 Source：通過使用 RTL2832 模組，支援 RTL-SDR dongle 2832U 裝置，透過設定參數可以決定接收的頻段和取樣率。
- Frequency Xlating FIR Filter：變頻有限脈衝響應濾波器，該模組對訊號進行頻率轉換，並通過在其上運行抽取(降頻)FIR 濾波器，對訊號進行取樣。它可以提取訊號的窄頻部分，而該窄頻部分不必以頻率為中心。

- Rational Resampler：重新取樣器，可以透過此模組更改取樣率。
- Quadrature Demod：用於解調 FM、FSK、GMSK 等，輸入是複數基頻，輸出是與取樣率相關的訊號頻率乘以增益值。
- Decimating FIR Filter：抽取(降頻)有限脈衝響應濾波器，該模塊根據此數值來對輸入數據進行抽取操作。抽取率為 1 時表示不進行抽取。若抽取設置為高於 1，則需要確保濾波器可以移除「輸出區域」之外的能量，即 $-Fs/2$ 到 $Fs/2$ ，其中 Fs 是輸入數據的取樣率除以該模塊的抽取率。
- OP25 FSK4 Demodulator：4FSK 解調變模組。
- OP25 Decoder：透過 OP25 解碼模組，我們可以對 DMR 訊號進行解碼。

3.3.2 實驗二

首先如圖 23，本研究建立實驗二所需環境，將模組分別安裝在指定的位置，照著安裝說明文件一步一步進行建立。安裝完成之後，我們點開 op25 專屬的資料夾，在到以下的檔案路徑「op25/op25/gr-op25_repeater/apps」進行操作如圖 24 紅色框框所示。

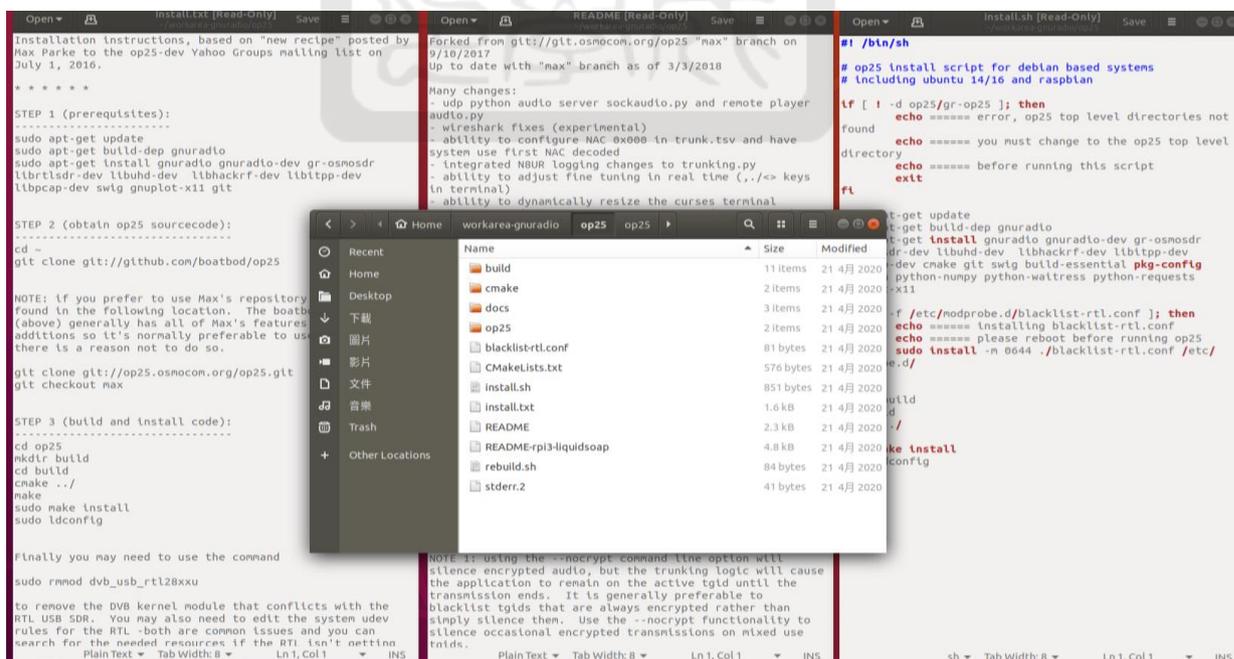


圖23、OP25 模組安裝說明

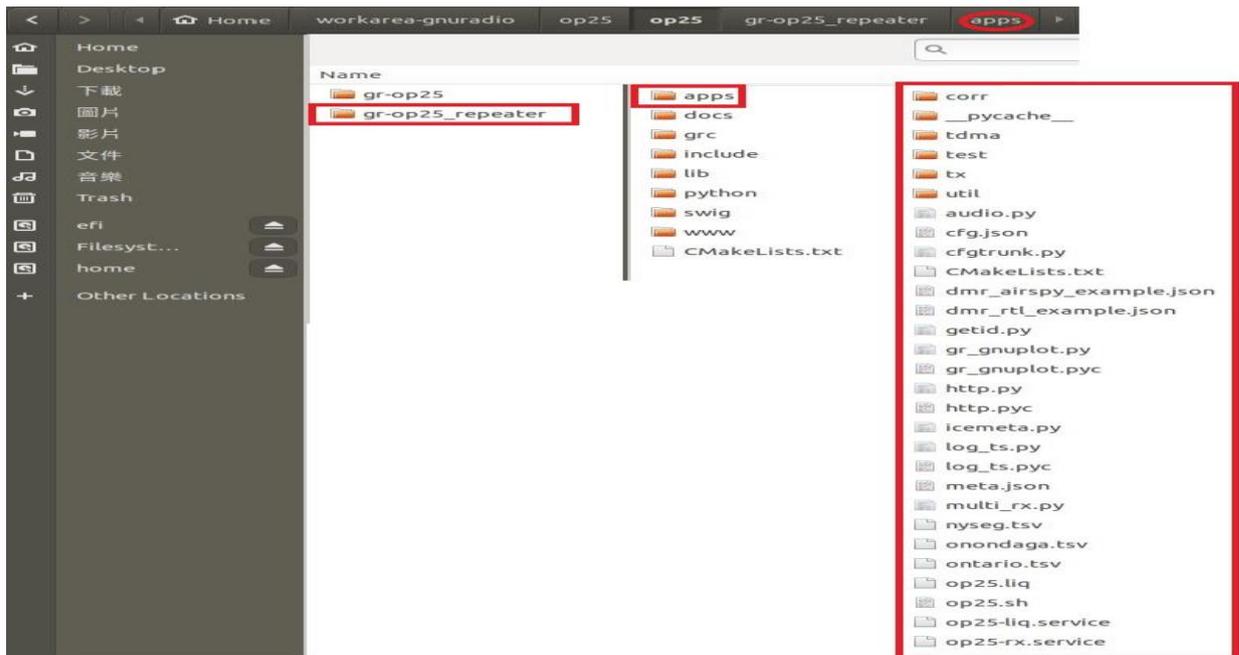


圖24、OP25 模組檔案路徑

實驗二之數據設置，設定 trunkyj3.tsv 文件，將中心頻率、調變模式等設定在文件內如圖 25、26 所示，設定好文件後在 Terminal 輸入 `./rx.py --args 'rtl' --gains 'lna:49' -T trunkyj3.tsv -q 0 -S 2048000 -2` 執行 rx.py，執行畫面為圖 27 所示，檔案路徑為 `/home/lab402/workarea-gnuradio/op25/op25/gr-op25_repeater/apps`。

- `--args`：選擇 sdr 裝置。
- `--gains`：選擇接收增益值大小。
- `-T`：載入 trunkyj3.tsv 文件。
- `-q`：頻率偏移量設定。
- `-S`：取樣率設定，這裡設置 2.048 MHz。

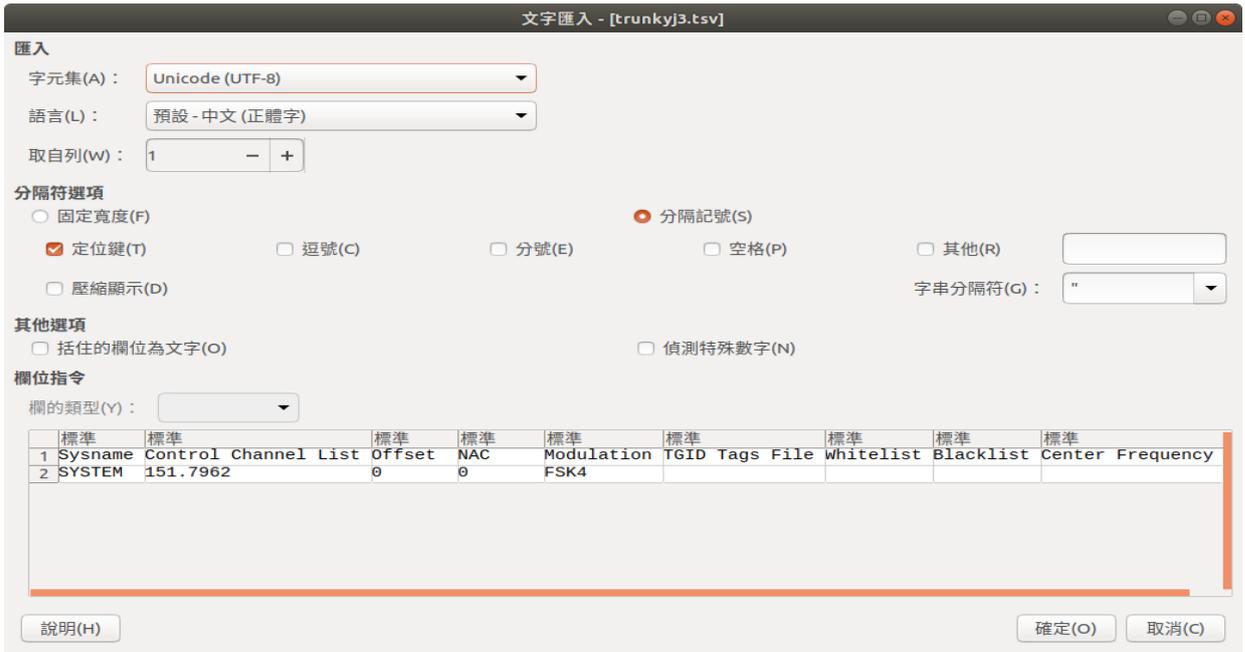


圖25、trunkyj3.tsv 文件

- Control Channel List：中心頻率設定，這裡設置為 151.7962 MHz。
- Modulation：這裡調變方式選 4FSK。

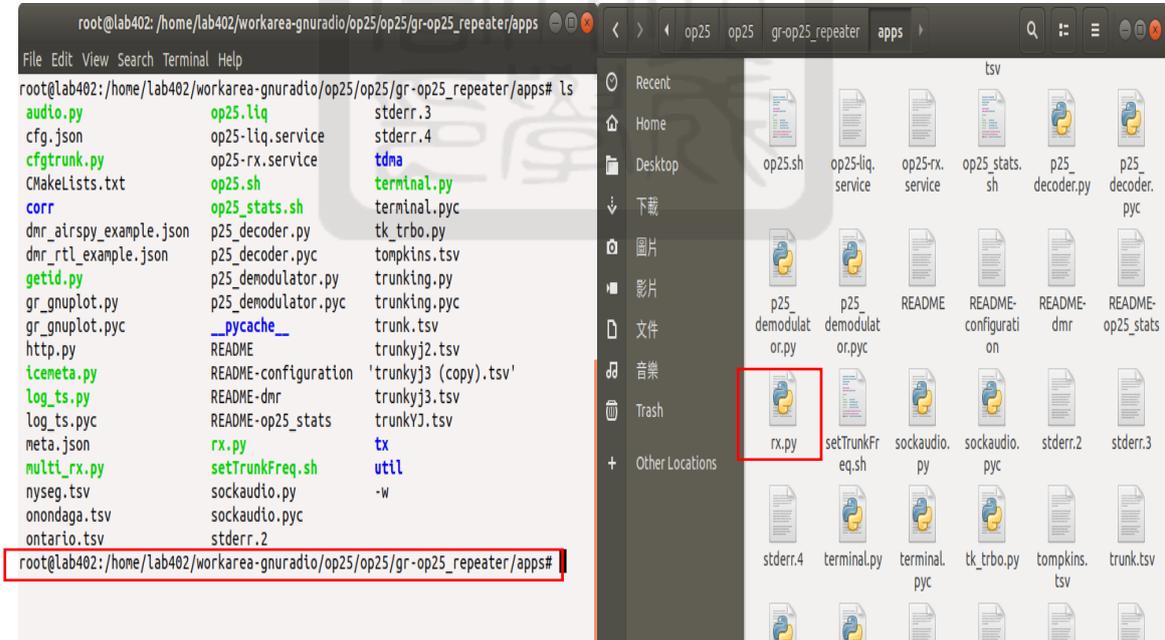


圖26、rx.py 檔案位置

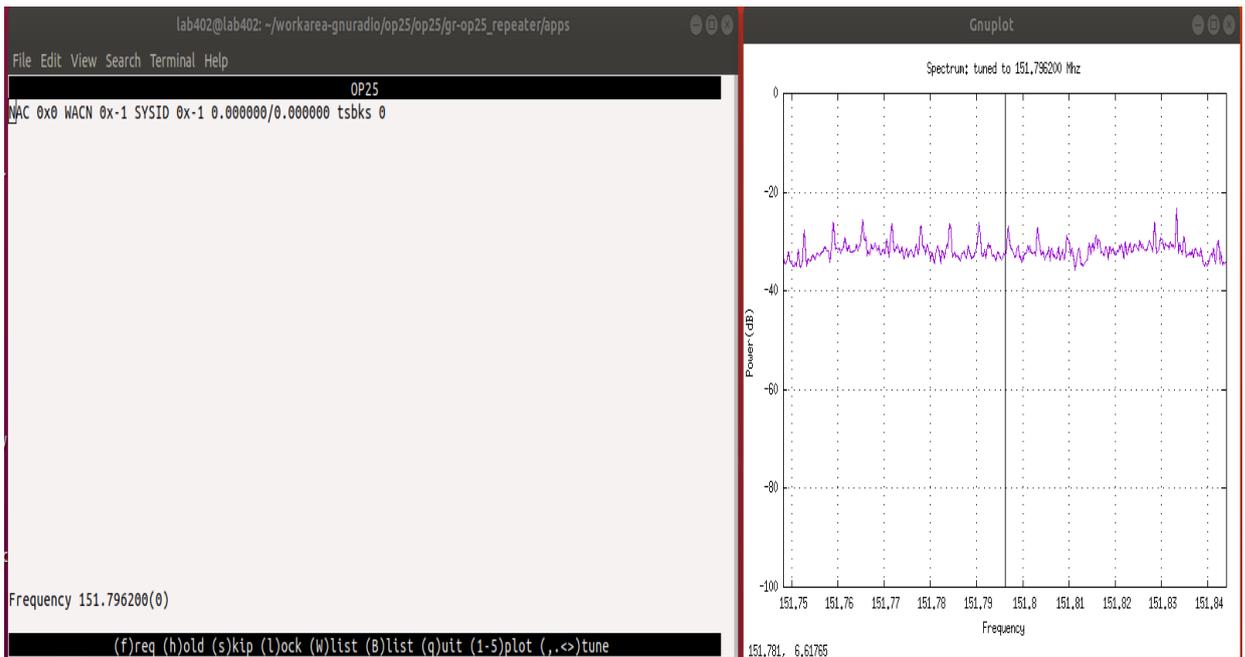


圖27、 rx.py 初次執行畫面

3.4 軟體定義無線電實作 DMR 研究架構

3.4.1 實驗情境

在理想的情況，軟體定義無線電是利用寬頻的類比數位轉換器直接對天線接收進來的射頻訊號進行取樣，而系統中所有的訊號處理都經由軟體執行完成。在系統架構中，通常包括高速且同時能維持高精準度取樣的類比數位轉換器晶片、協助運算的現場可程式化閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)晶片、高速的數位訊號處理(Digital Signal Processing, DSP)晶片，以及設計良好的演算法等。

本研究實驗環境採用一台筆電，搭配一台 RTL-SDR dongle 2832U 進行訊號接收。預計藉由天線接收警局或是消防局所發射的 DMR 無線電訊號，再透過 GNU Radio 設計 DMR 接收器的程式、模組來進行音頻與數據的解碼。整合程式與系統，將無線電設備 ID 號碼做加值應用，架構圖如下圖 28 所表示。

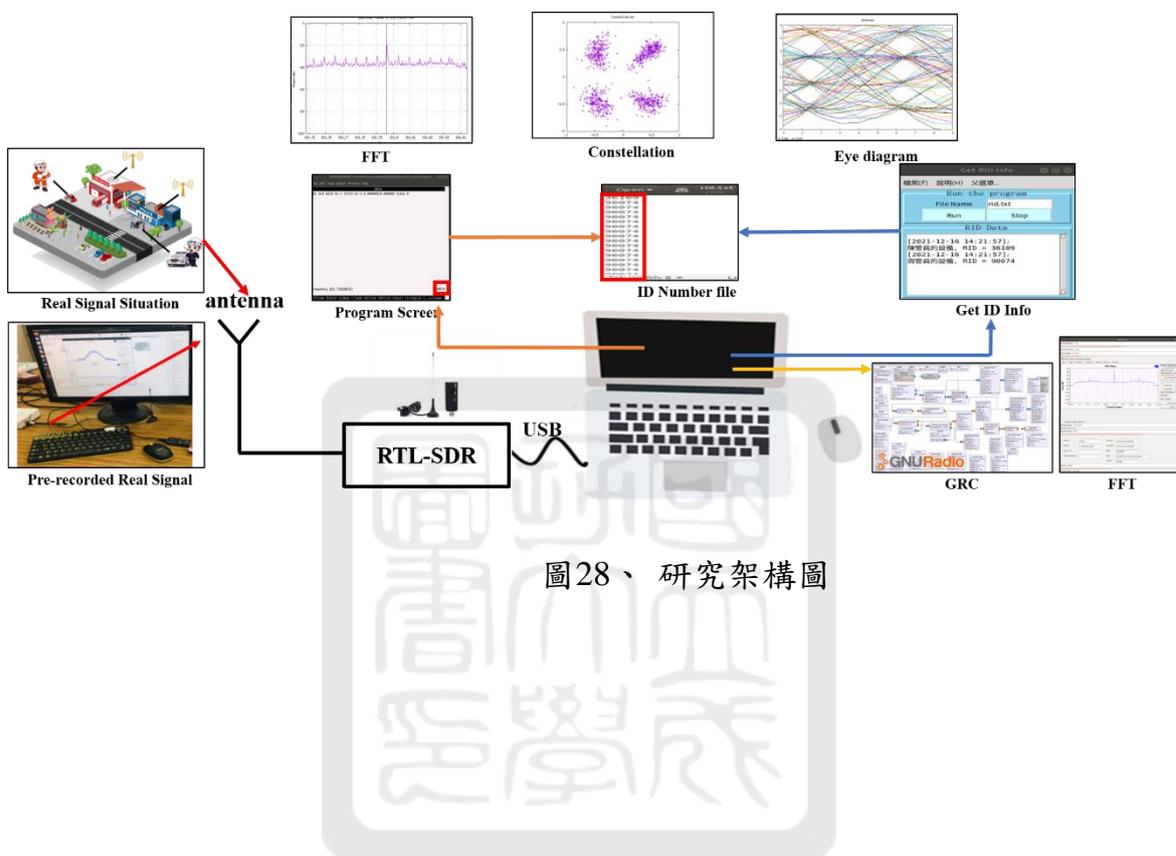


圖28、研究架構圖

第四章 研究結果

本章節將呈現最後的實驗結果。本實驗透過一台作業系統為 Linux Ubuntu 18.04 版本的筆記型電腦，使用 GNU Radio 3.7.13.4 版本的軟體定義無線電平台，再加上一台 RTL-SDR 的 RF 前端設備，來完成數位行動無線電接收系統。本研究最後會加入 Windows 作業系統環境中所使用的兩個軟體，DSDPlus 搭配 SDRSharp 所執行的結果進行比對，驗證與本研究實驗二的結果是否相符。

4.1 實驗準備

此研究使用軟體定義無線電的設備、開發工具還有通訊模組，來實作數位行動無線電系統。實務上這種實驗會在室外比較少干擾的地方進行。本研究是利用 SDR 實際接收警察局或是消防局發射的訊號，進行接收解調的實驗，如下圖 29 所示。

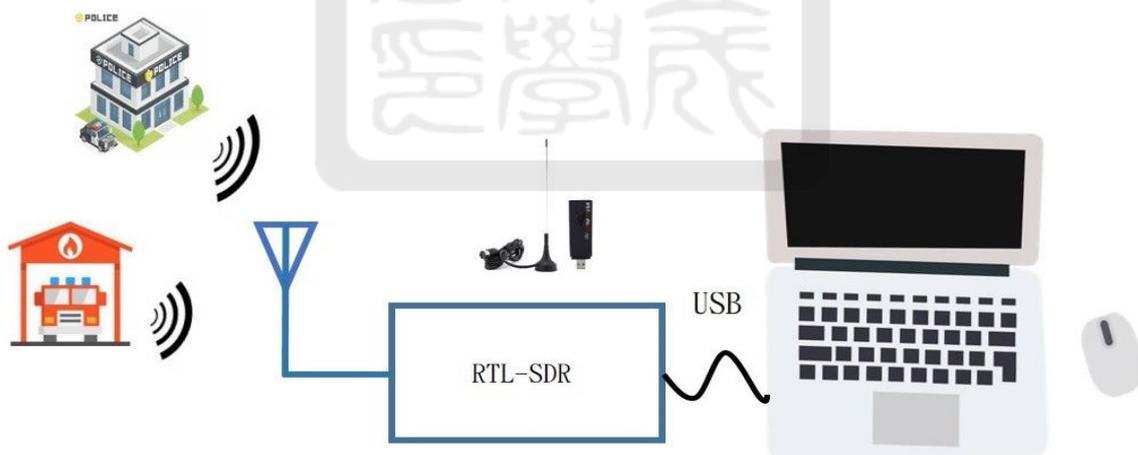


圖29、研究架構示意圖

本研究考慮到長期在戶外做實驗並非每次都有訊號的情況下，本研究利用 GNU Radio 透過 RTL-SDR dongle 2832U 藉由天線接收無線電訊號。再透過圖 31 的軟體定義無線電模組來進行訊號錄製，使實驗能得到更好的成效，圖 30 為研究架構示意圖 2。

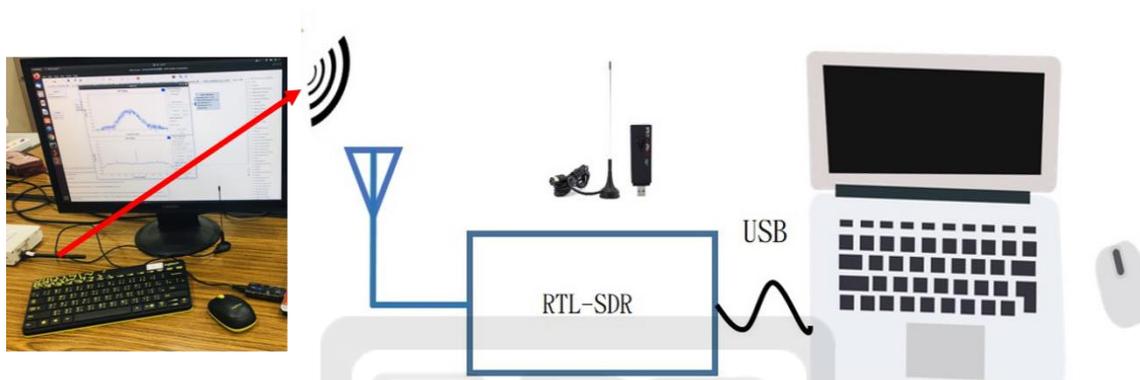


圖30、研究架構示意圖 2

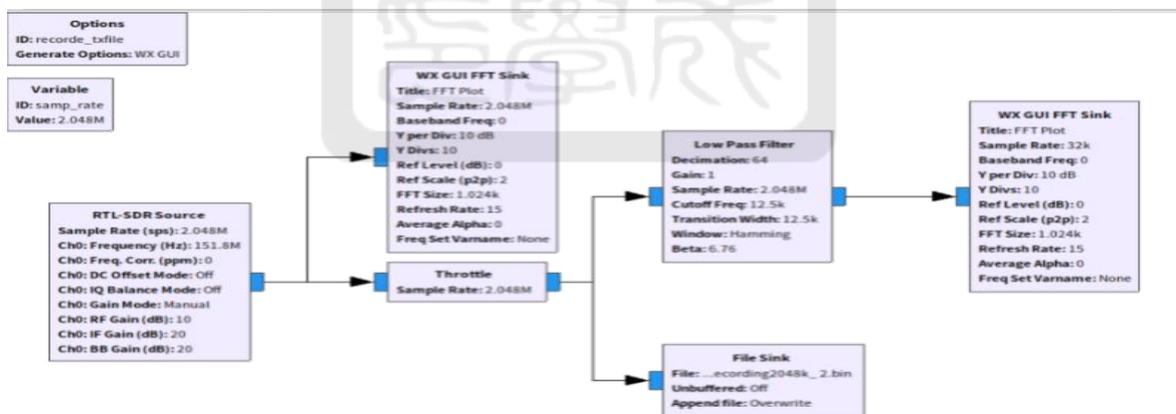


圖31、錄製訊號

預錄檔案名稱如圖 32、33 為：

- SDRPlay_recording2048k_2_1.bin (RID 號碼為 90074)
- SDRPlay_recording2048k_2.bin (RID 號碼為 36109)

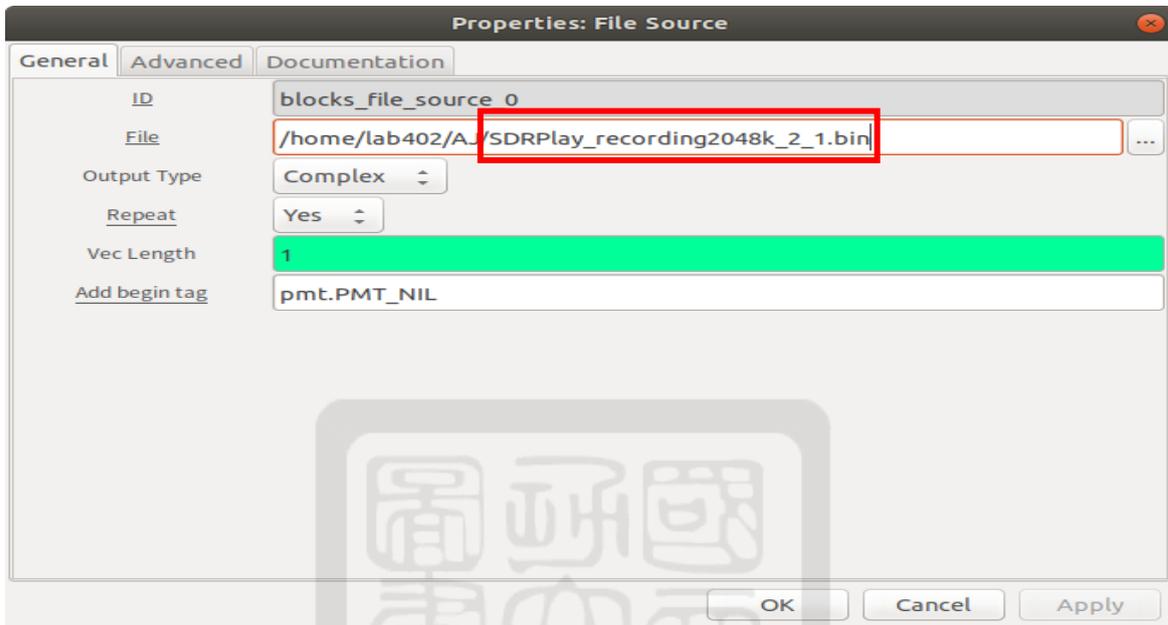


圖32、預錄檔名稱 SDRPlay_recording2048k_2_1.bin(90074)

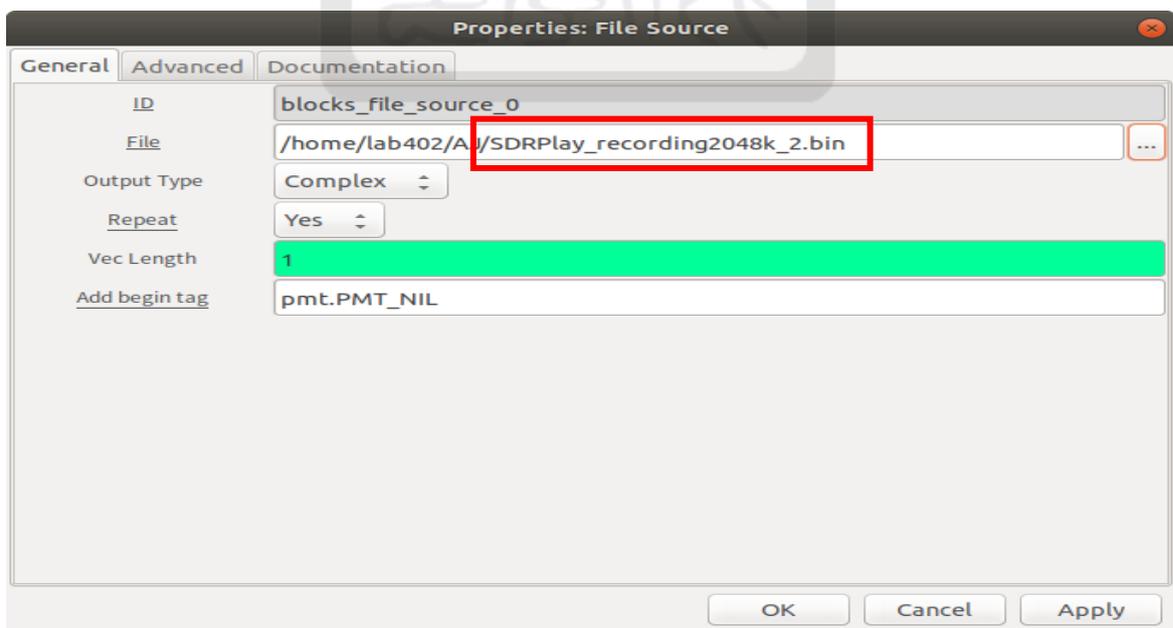


圖33、預錄檔名稱 SDRPlay_recording2048k_2.bin(36109)

本研究撰寫了一個 GUI 圖形化使用者介面程式，實驗的結果將呈現在紅色方框中，如圖 34 所示。本程式的實際應用會在圖 35 呈現。



圖34、GUI 圖形化介面

如圖 35 右邊橘色方框所示，本實驗 RID 的號碼解出來分別是 36109 以及 90074。透過撰寫程式自動抓取這個設備的號碼，便可以更進一步做一些加值應用。例如：當警局在做指揮調度時，就能透過程式知道設備號碼是屬於哪一個警員或哪一部警車，如圖 35 左邊紅色方框所示。

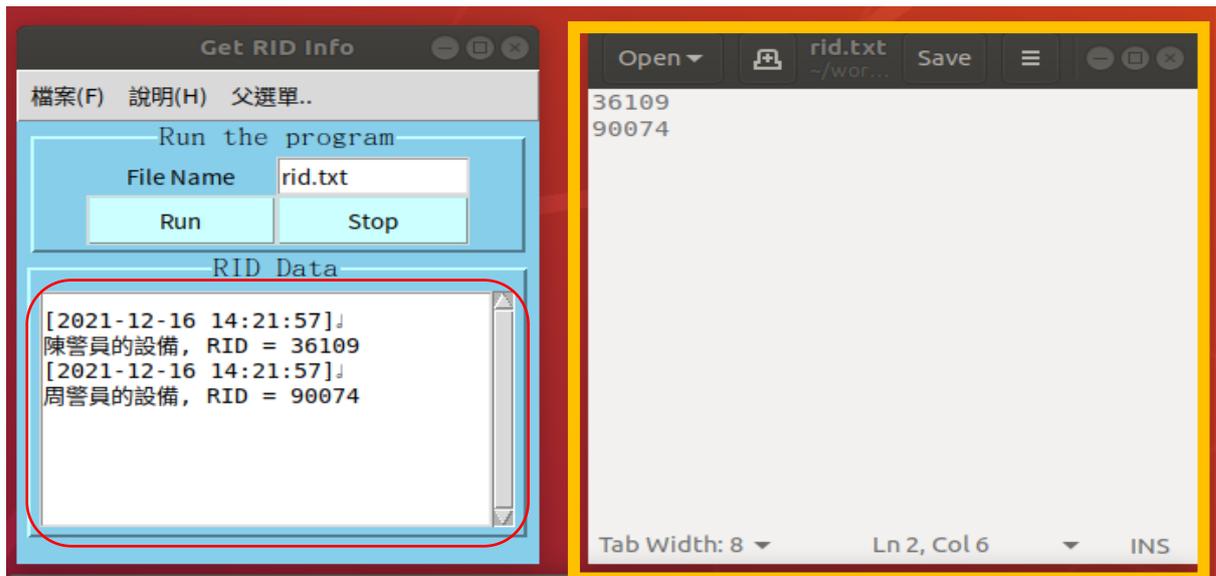


圖35、取得 RID 資料

4.1.1 實驗一結果

透過實驗一的結果，本研究在此階段以 151.6 MHz 的中心頻率、12.5 kHz 的頻寬以及 2.048 MHz 的取樣頻率接收 DMR 訊號進行處理。如圖 36、37，在頻譜圖上可以看見 DMR 訊號，並且在方框中顯示數據資料。預錄檔 RID 無線電設備的號碼十進制為 36109 以及 90074；十六進制分別為 8D0D、15FDA。將實驗一與進行之比對結果顯示，Source ID 與預錄檔的 RID 不一樣，還需要釐清哪個環節需要做調整。

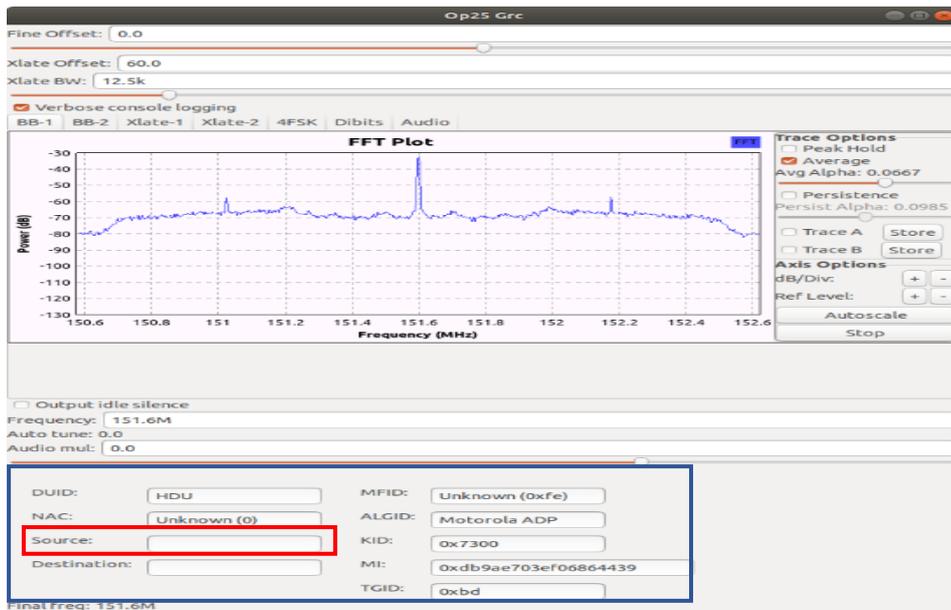


圖36、實驗 1 結果圖

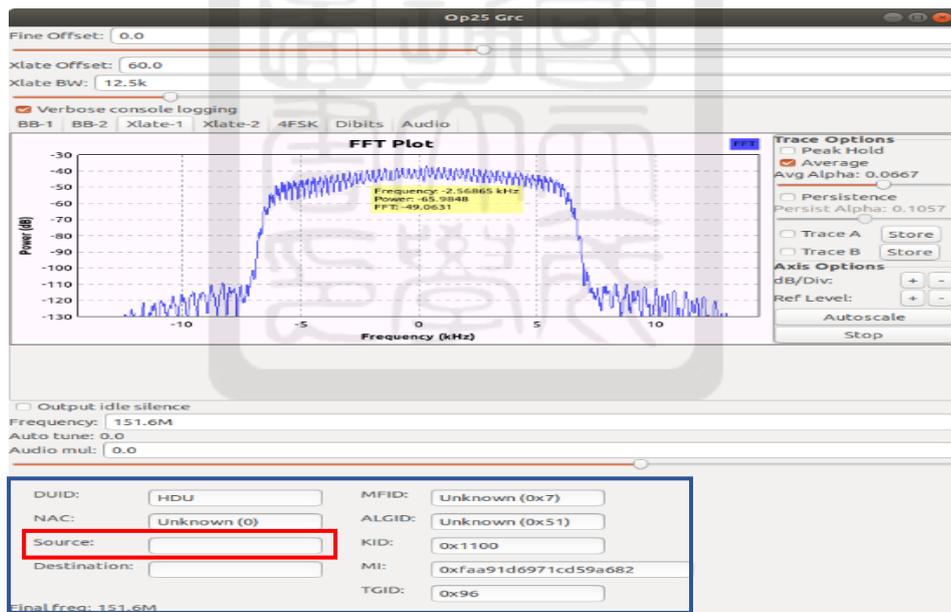


圖37、實驗 1 結果圖 2

4.1.2 實驗二結果

本研究透過實驗二的架構，可以接收 DMR 訊號，也能解出 RID 資料，並且能將資料做加值應用，如圖 38 右上角所示，例如：陳警員的設備，RID = 36109、周警員的設備，RID = 90074。期望未來有程式專家，可以將 GUI 程式變得更彈性化與豐富化。圖 38 左上角紅色方框為呈現訊號的頻譜圖，中心頻率為 151.7962 MHz。本研究將圖 38 左下角紅圈圈呈現的 RID 資料存入到 rid.txt 文件，透過 GUI 程式實時更新資料。

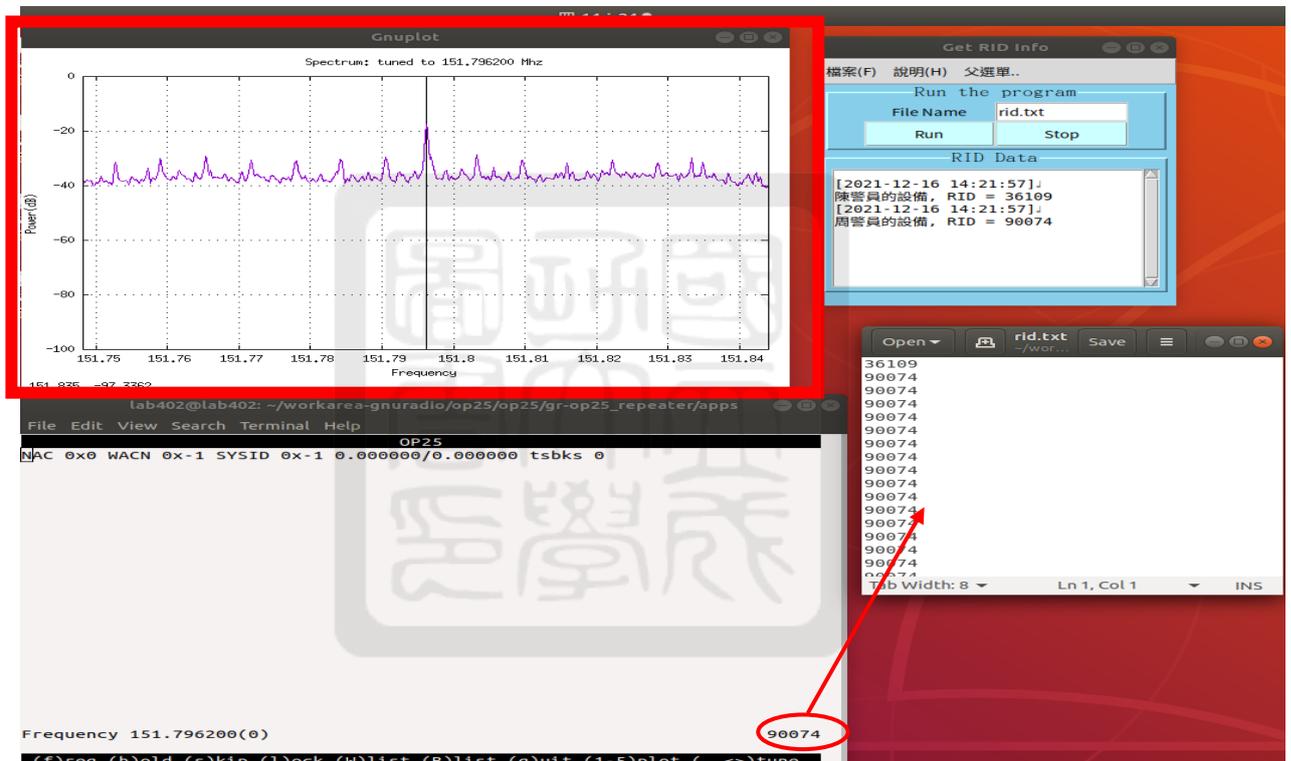


圖38、實驗 2 完成畫面

4.2 實驗架構—Linux Ubuntu(實驗組)

圖 39 左邊方框為傳送端，右邊方框為接收端，將本研究預錄好的訊號透過 GNU Radio 以 151.8MHz 作為發射頻率，藉由 GNU Radio 內建的模組 File Sink 匯入訊號檔案進行傳送，再透過右邊橘黃色方框中，Linux Ubuntu 環境的軟體進行接收加以處理。

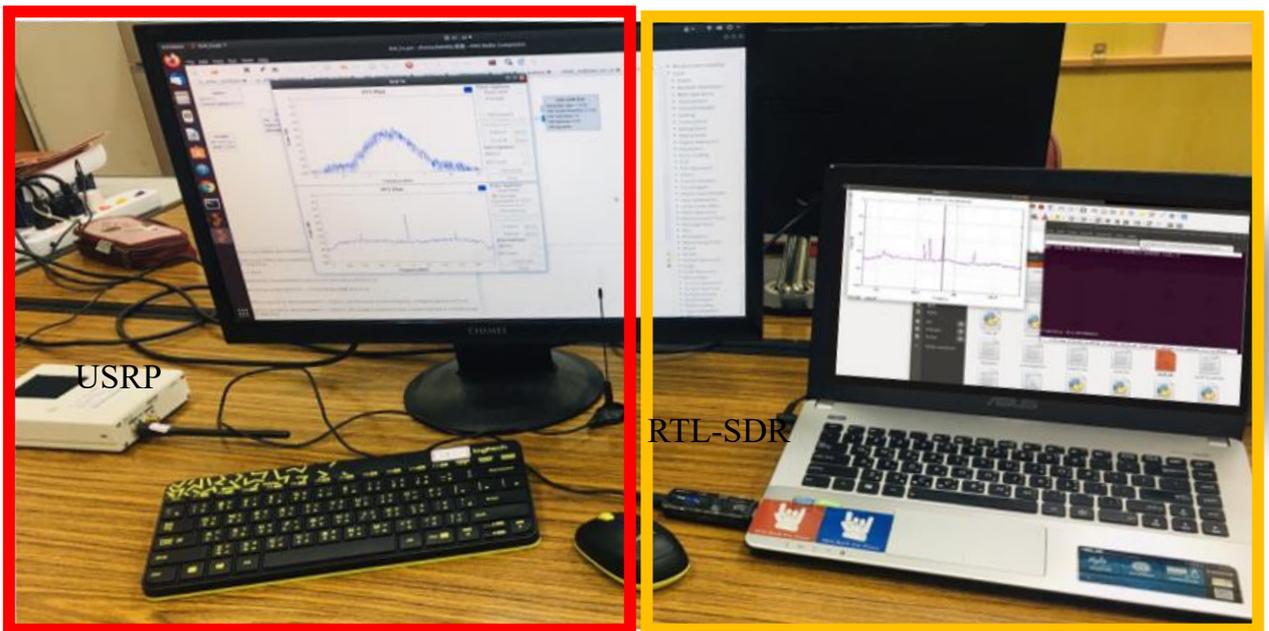


圖39、數位行動無線電系統之裝置資訊

4.2.1 解調預錄訊號

本研究使用 RTL-SDR 接收訊號，在頻率上會有些許偏移現象，故以中心頻率 151.7962 MHz，取樣率 2.048 MHz，4FSK 解調模式作為接收解調的參數。圖 40、41 為執行畫面，圖片左下角顯示中心頻率，紅框為 RID 號碼。接著將設備 ID 號碼輸出到一個名為 rid.txt 的文字檔，利用 GUI 程式對資料進行延伸應用，並且實時更新資料。

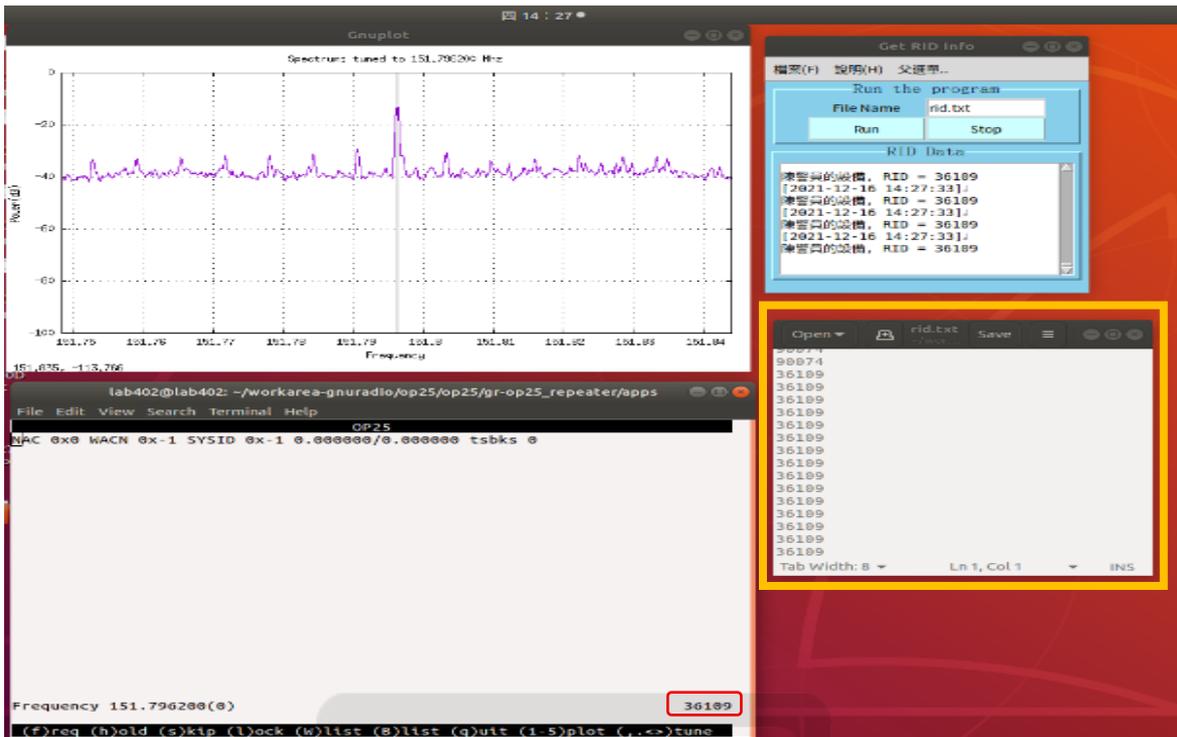


圖40、執行畫面—Ubuntu rx.py(解預錄 36109)

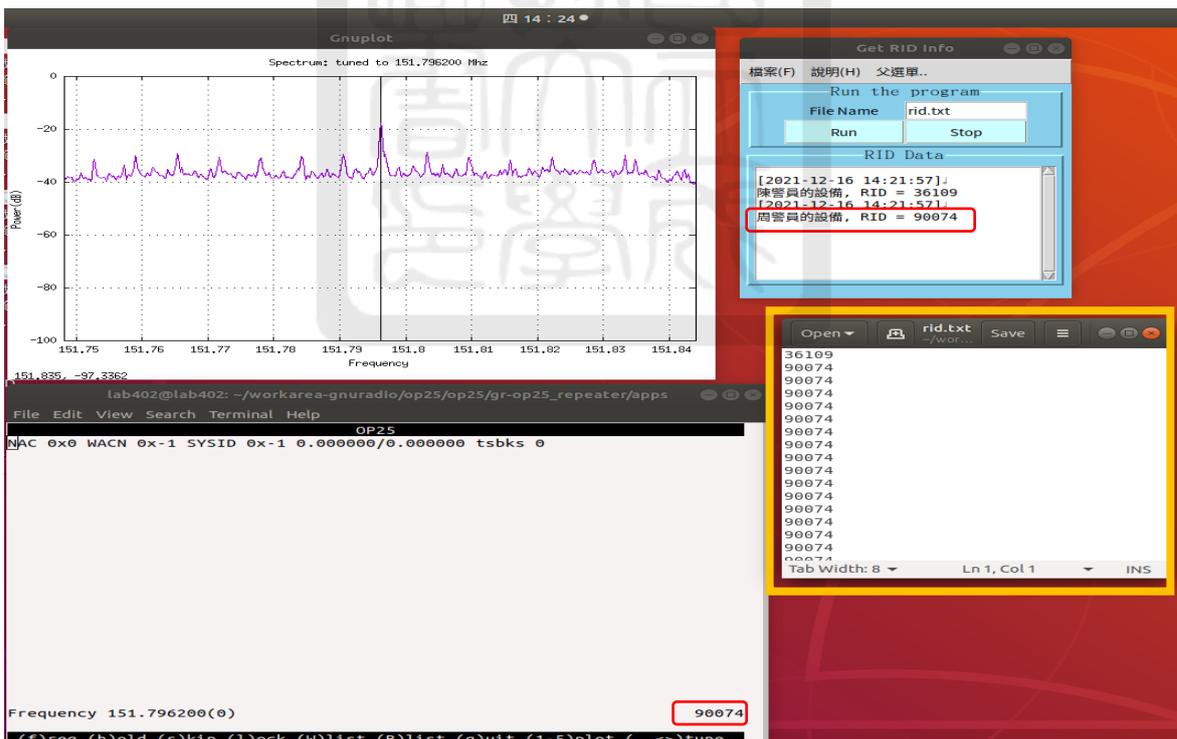


圖41、執行畫面—Ubuntu rx.py(解預錄 90074)

如圖 42、43 所示，在左上角紅色框起來的部分顯示 4FSK 的星座點。我們能直接透過星座圖觀察接收訊號的情況，也可以知道資訊存在。雖然沒有完美的四個集中的星座點，不過還在能接收解出訊號的範圍內。

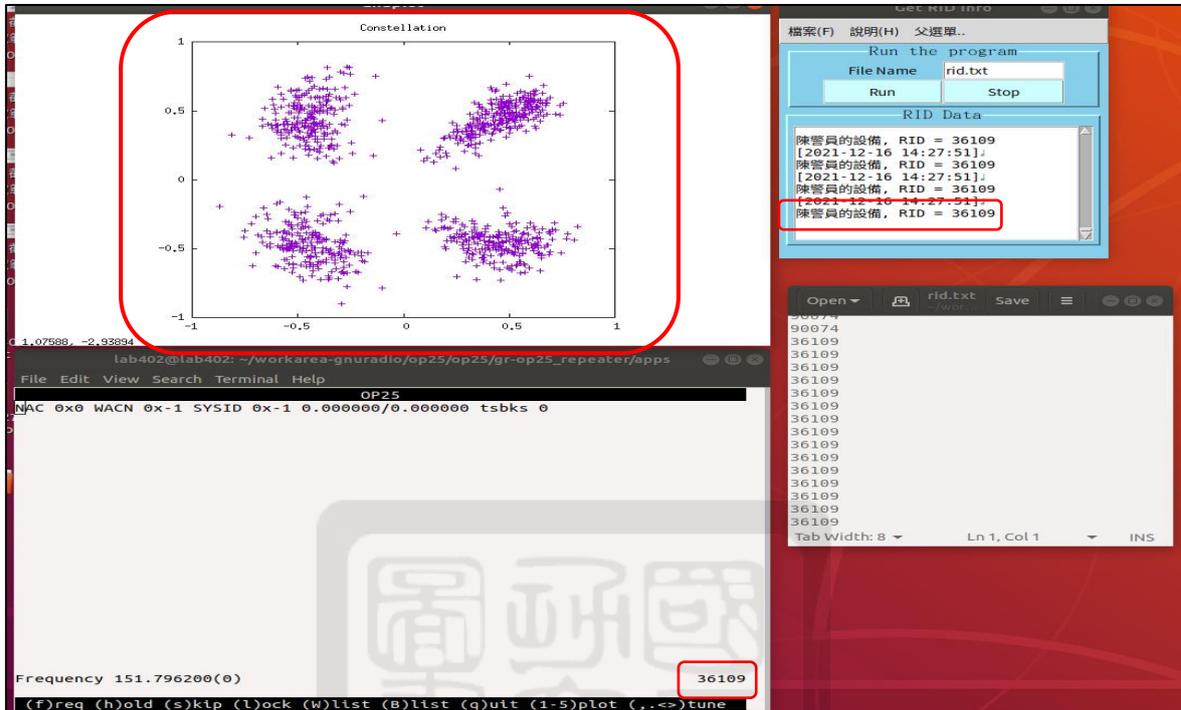


圖42、星座圖(預錄 36109)

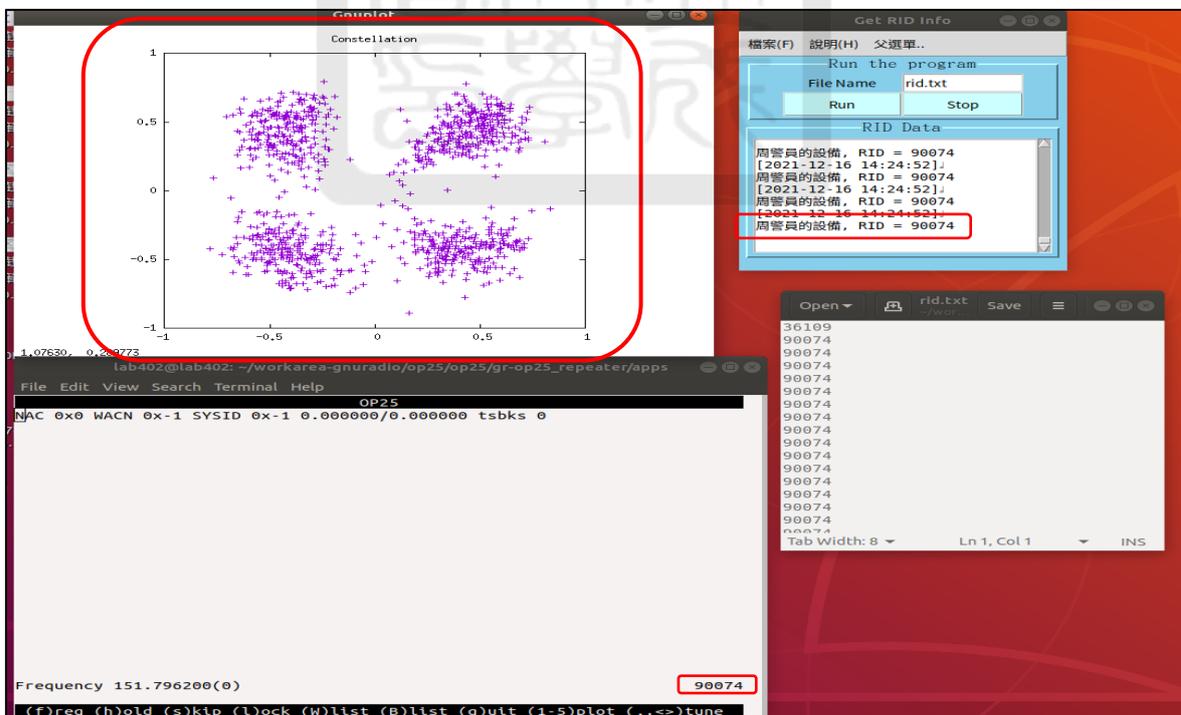


圖43、星座圖(預錄 90074)

如圖 44、45 所示，左上角的眼圖(Eye Diagram)，是一項時間分析工具，它包含了豐富的資訊，可以呈現訊號的整體特徵，並且能夠很好地評估訊號的質量。我們可以透過眼睛的開口大小來判斷 4FSK 訊號。紅色圈起來的有四個點即表示 4FSK 的特點。眼圖中紅色方框所示，眼睛的寬度越寬，其訊號穩定時間越長；眼睛的高度越高，其訊號越好。

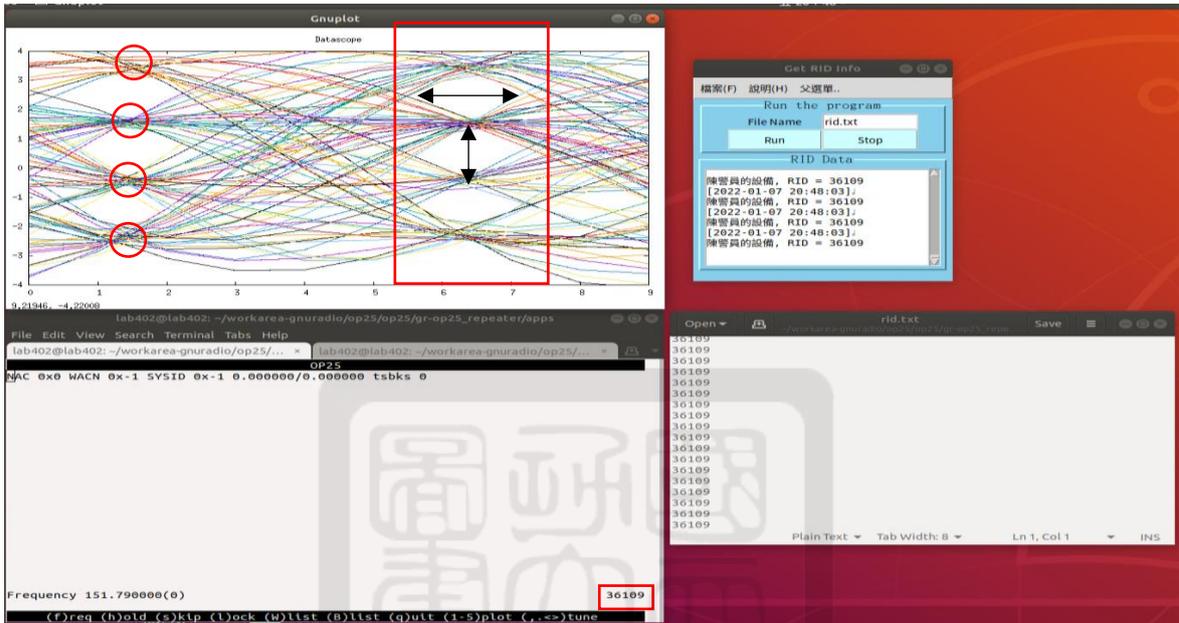


圖44、眼圖(預錄 36109)

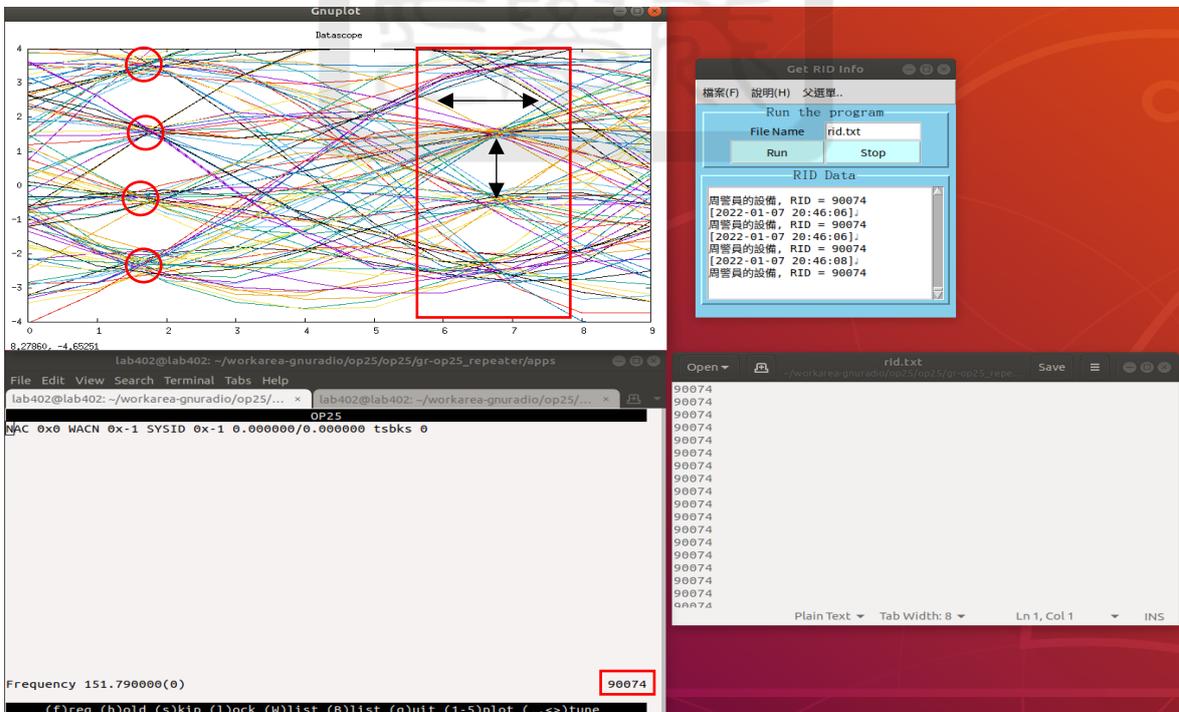


圖45、眼圖(預錄 90074)

4.2.2 解調實際訊號(Real Time)

透過執行 rx.py 程式，便可以從圖 46 方框中左邊的頻譜圖看見三到四個實際訊號。我們選擇接收中心頻率 151.668 MHz 的訊號。圖右上為執行 rx.py 執行畫面，解調訊號的 RID 設備號碼會顯示在小方框中。由於不是每個時段都會有訊號發射，而且解析訊號也需要一段時間，故暫時尚無解出訊號。左下為數據設置，右下則為檔案資料夾。經過實驗發現此方法會受到幾種因素影響：1. 為訊號發射時間不一、2. 為訊號品質、3. 訊號干擾，以及 4. 天線增益等問題。基於上述原因，本研究改採用預錄方式進行實驗，將實際從警局或消防局接收到的訊號透過 GNU Radio 進行錄製。透過解預錄檔，不但可以解決室內干擾問題，並且透過多次重覆發射訊號進行解碼可以得到良好的實驗結果。

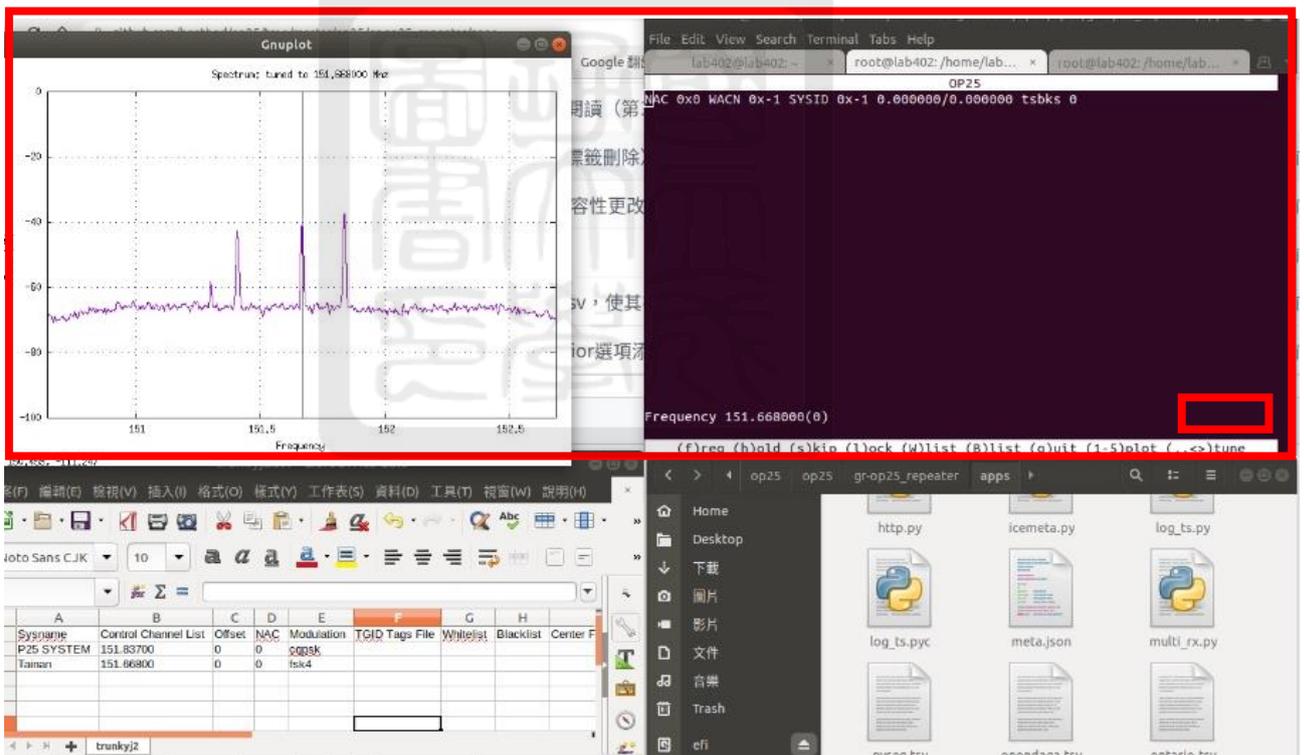


圖46、執行畫面－Ubuntu rx.py

如圖 47 為 trunkyj2.tsv 文件之數據設置，將中心頻率、調變模式等設定在文件內。圖 48 可以看到四個訊號，而中心頻率 151.668 MHz 為我們主要接收的訊號。

- Control Channel List：中心頻率設定，這裡設置為 151.668 MHz。
- Modulation：這裡調變方式選 4FSK。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Sysname	Control Channel List	Offset	NAC	Modulation	TIGID Tags File	Whitelist	Blacklist	Center Frequency	
2	P25 SYSTEM	151.83700	0	0	qpsk					
3	Tainan	151.66800	0	0	fsk4					
4										
5										
6										
7										

圖47、trunkyj2.tsv

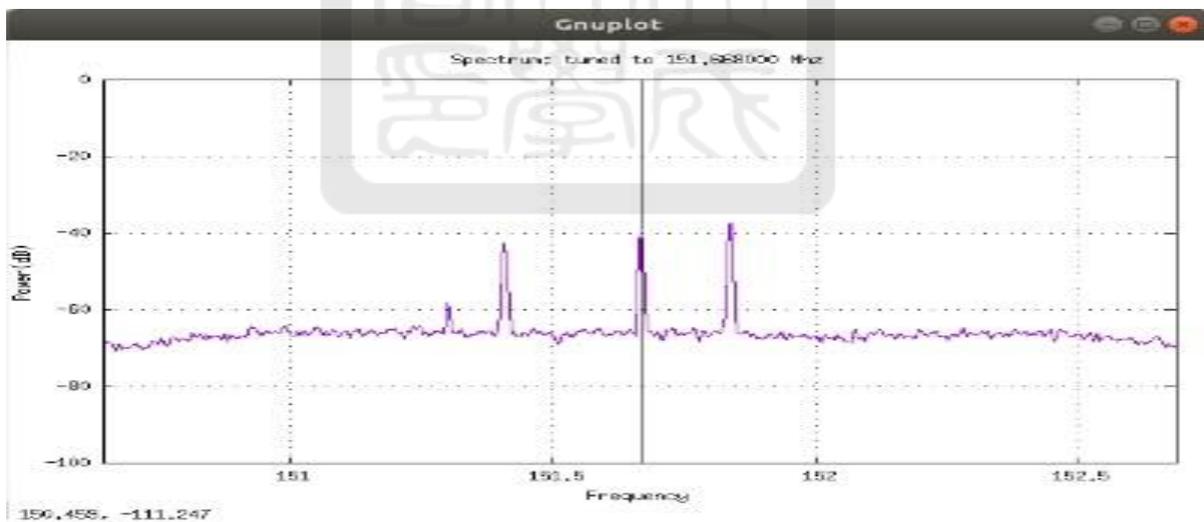


圖48、RF 訊號

雖然實時解調實際訊號尚未解出 RID 號碼，但是在圖 49 中，透過星座圖可以得知接收訊號的狀況，且 4FSK 的星座點清楚地畫面上呈現。

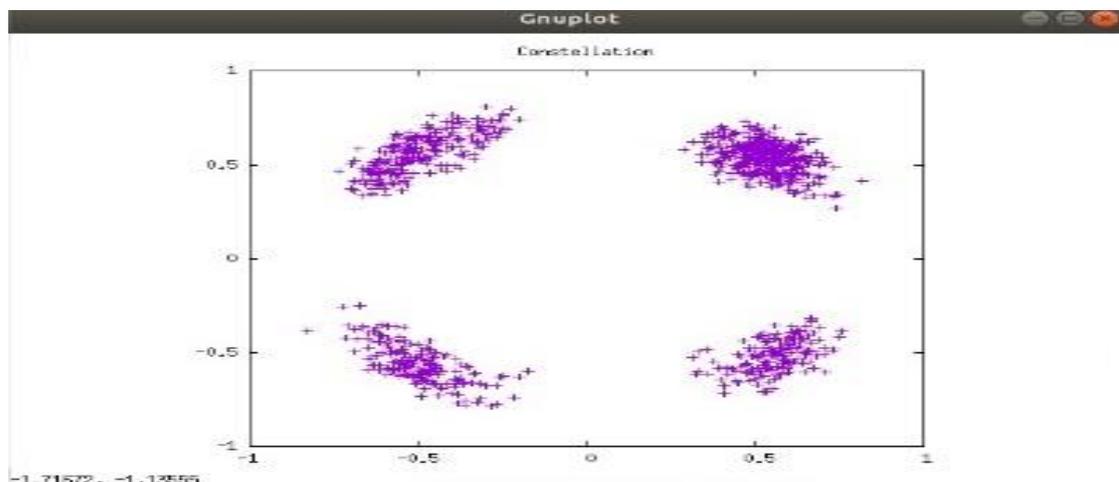


圖49、星座圖

4.3 實驗架構—Windows(對照組)

圖 50 左邊方框為傳送端，右邊方框為接收端，將錄好的訊號透過 GNU Radio 以 151.8 MHz 作為發射頻率，藉由 GNU Radio 內建的模組 File Sink 匯入訊號檔案進行傳送，再透過右邊 Windows 環境的軟體進行接收加以處理。

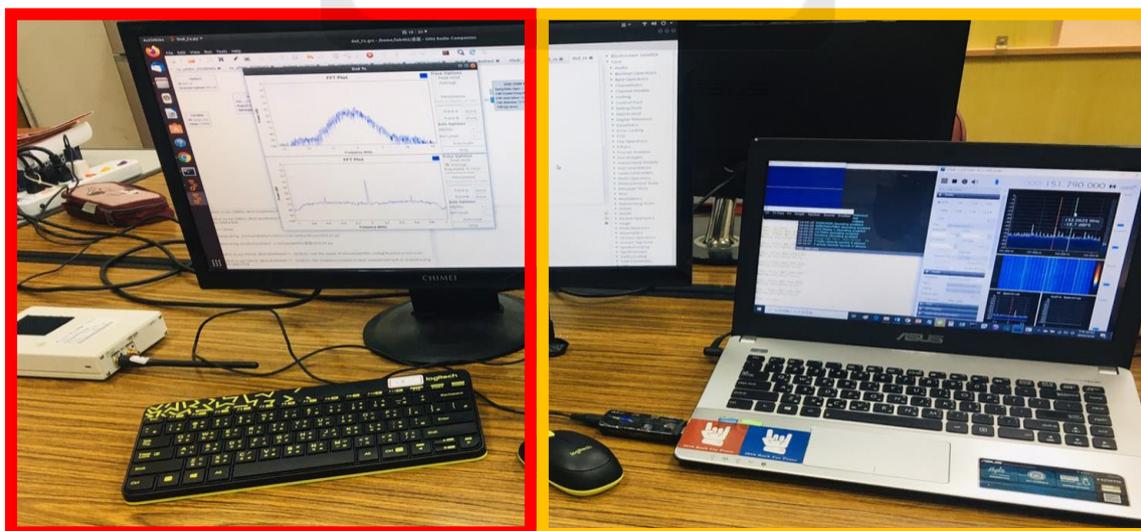


圖50、數位行動無線電系統之裝置資訊

4.3.1 解調預錄訊號

如圖 51，本研究在 VHF 的頻段範圍內，使用 151.79 MHz 的中心頻率、窄頻調變(Narrow Band Frequency Modulation, NFM)、頻寬 12.5 KHZ、取樣率 2.048 MHz、鮑率(baud rate)9.6 K b/s、符元率(symbol rate) 4.8 K s/s 作為接收的參數。在通訊領域上也常有使用類比調變解數位調變的方式，故這裡的調變模式選擇使用類比的窄頻 FM 調變方式來解數位的 FSK 調變。

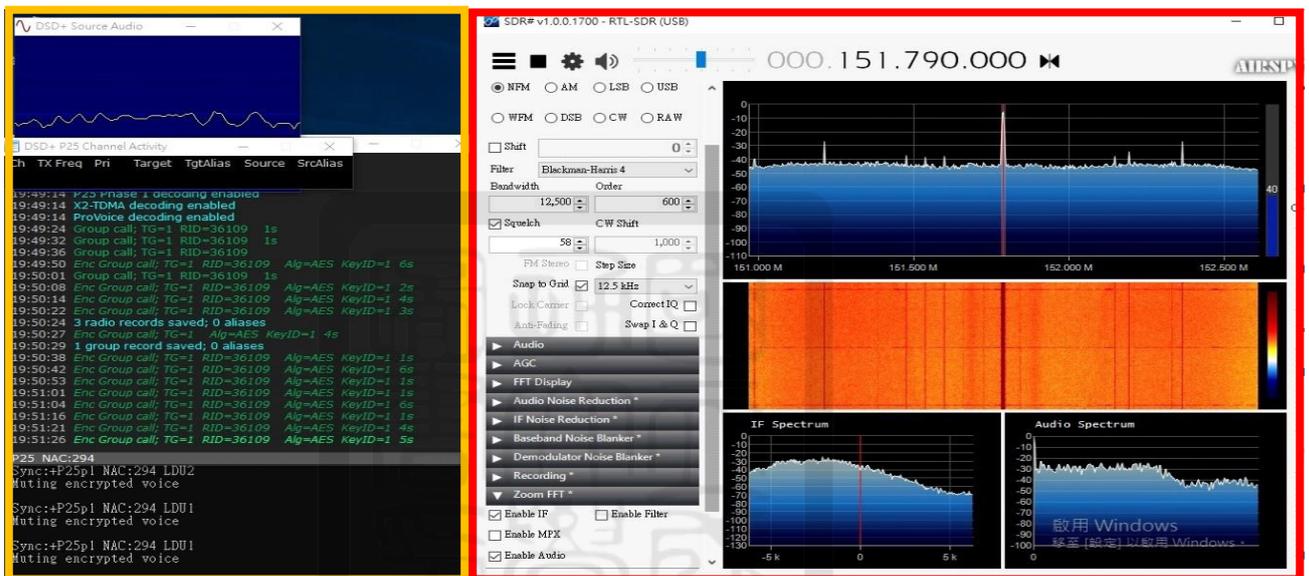


圖51、實際接收圖

傳送端是以 151.8 MHz 發射訊號，但是 RTL-SDR 接收訊號時，頻率偏移 -10 KHz，故使用 151.79 MHz 作為接收的頻率中心頻率，如圖 52 所示。可以從圖 52 的頻譜、瀑布圖看見接收到的訊號。

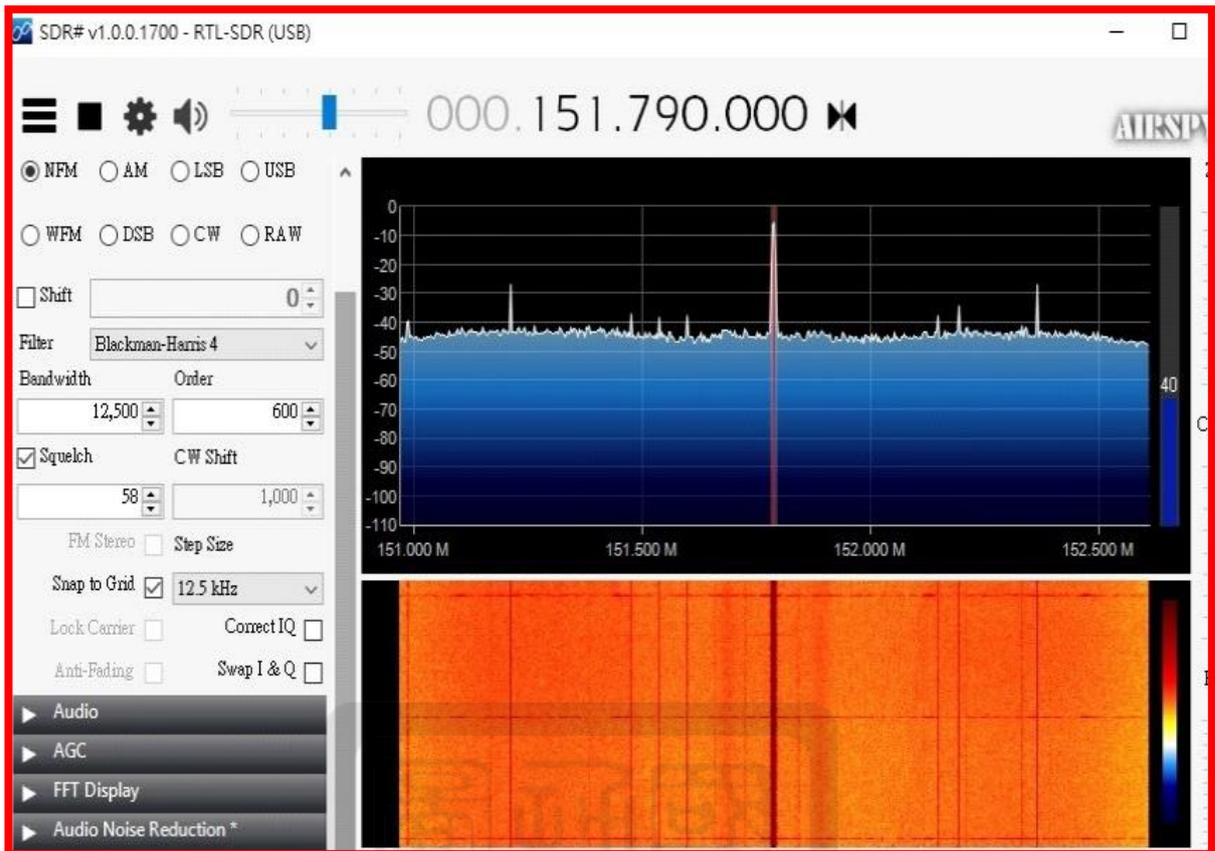


圖52、訊號接收圖—SDRSharp

SDRSharp 接收訊號後透過 DSDPlus 進行解碼，從圖 53 中可以看到無線電的通話群組(Talk Group, TG)、無線電設備號碼 RID 等非加密的資料，甚至是訊號的無線電系統資訊。如圖 53 黃色方框中所示，DSDPlus 解出來的資訊有 TG = 1、RID = 36109 等，我們預錄好的無線電訊號，其無線電設備號碼為 36109。

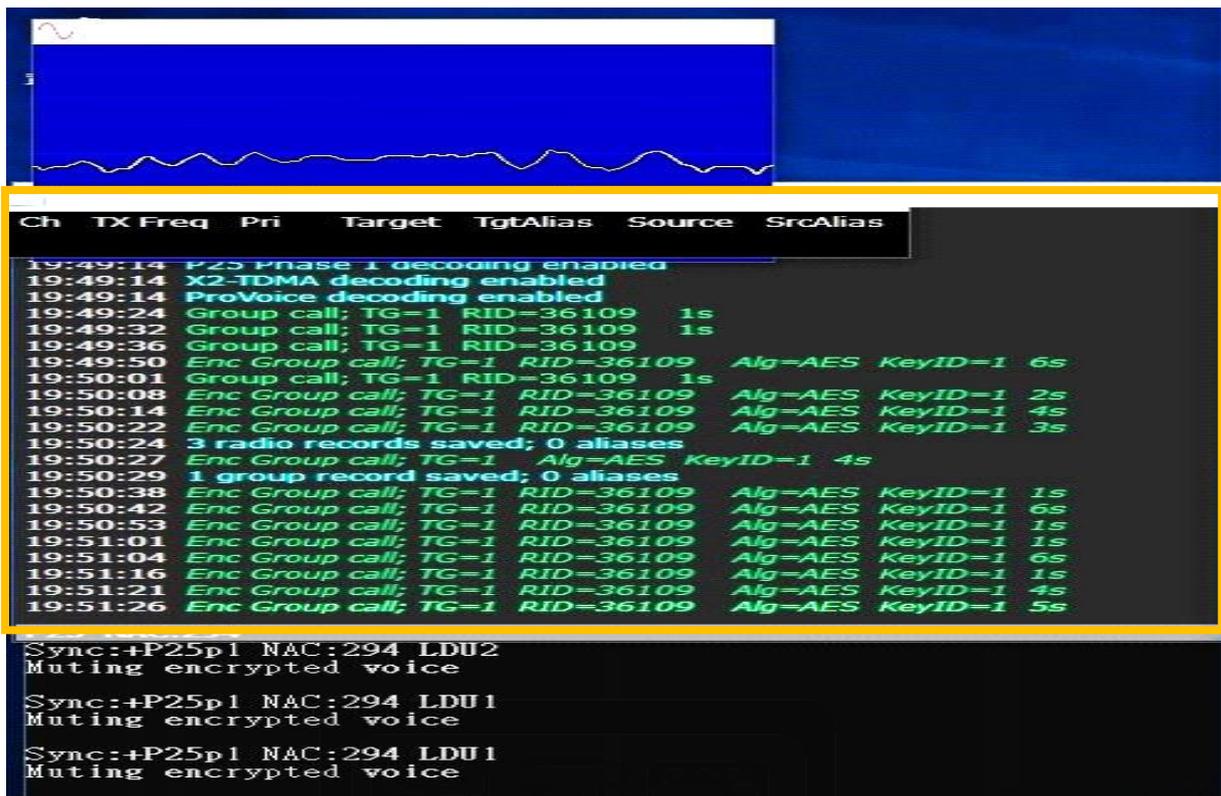


圖 53、訊號解碼圖—DSDPlus

4.3.2 解調實際訊號(Real Time)

如圖 54 所示，在 VHF 的頻段範圍內，使用 151.7075 MHz 的中心頻率、窄頻調變(Narrow Band Frequency Modulation, NFM)、頻寬 12.5 KHz、取樣率 2.048 MHz、鮑率(baud rate) 9.6 K b/s、符元率(sys rate) 4.8 K s/s 作為接收訊號的參數。

設置好參數後，在圖 54 紅色框的地方—SDRSharp 的頻譜中可以看見我們選好的頻率，瀑布圖可以看到整個時間範圍內訊號的幅度與強度。透過 SDRSharp 接收訊號，DSDPlus 將收到的訊號進行解碼處理。在黃色框的左下方顯示 DMR 的訊號正在被解碼，且可以看到兩個 slot、RID = 65535、RID = 15006。

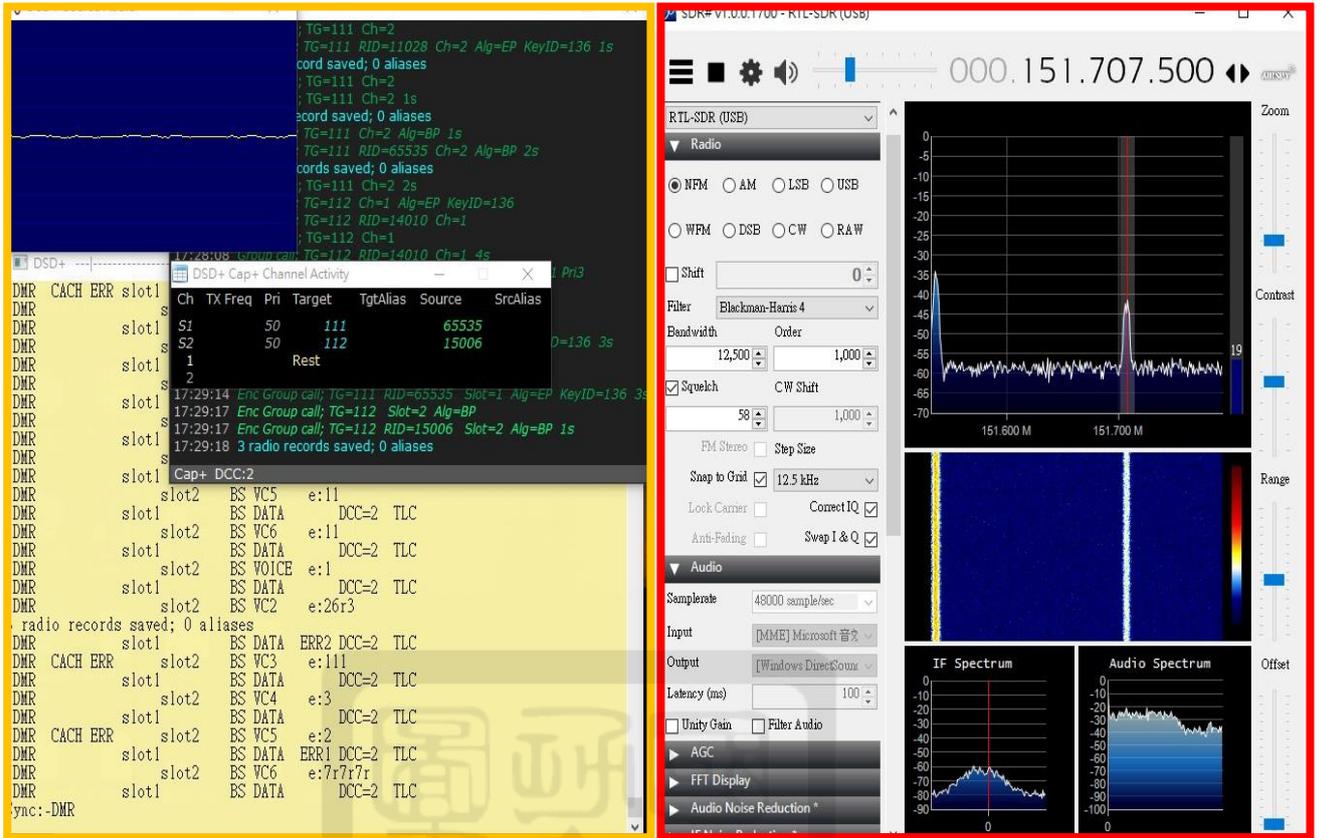


圖54、訊號解碼圖—Real Time

第五章 結論

5.1 結論

本研究使用 GNU Radio 作為軟體定義無線電平台，加以實作 DMR 系統。並且以時域上的波形、對應的頻譜圖、和由 I/Q data 構成的星座圖、眼圖、預錄檔，以及實際訊號解碼成果來進行確認。呈現了軟體定義無線電在編解碼、調變解調變，以及數位訊號處理方面的功能。依據這些功能也確認軟體定義無線電的確有取代 DMR 原有的架構、系統，以及設備的可能性。

本研究透過軟體定義無線電降低了通訊領域的門檻，不再需要很多昂貴的硬體設備。它的優勢是可以根據不同通訊系統中不同的需求，自行調整通訊整體架構，同時還能夠搭配其他裝置做系統整合，解決因太多套系統而無法整合的問題。

5.2 未來研究建議

本研究以數位行動無線電系統作為研究對象。在研究的過程中會遇到很多挑戰與限制，像是相關公開的資源不多、能使用的通訊模組少、每個通訊模組都需要詳讀其規格、不是每個時段都有實際訊號發射，以及對於 Linux 的操作也需要具備一定的程度。此研究就外出量測的便利性來說，筆記型電腦較為合適。然而在過往研究[28]中有提到，即時監測的計算能力需求相當大，需要高階的 CPU 運行處理，所以需要很好的散熱效果，以免熱當的問題發生。因此後續的發展可依循兩個方向：其一，是以其他的無線電系統作為研究對象，透過 GNU Radio 進行其他不同的無線電系統平台，並將本研究根據其他不同的無線電系統做出比較、效能評估等。其二，是在 Linux 環境下，將其他不同的無線電系統整合起來，往系統整合的方向做相關的研究。

參考文獻

- [1] DSDPlus. (2015). DSDPlus 1.101 released, [Online]. Available: <https://www.dsdplus.com/dsdplus-1-101-released/>.
- [2] SDRSharp. SDRSharp, [Online]. Available: <https://airspy.com/download>.
- [3] B. R. Sanga, A. M. Villavicencio, V. S. Padilla, S. V. Alvia, and R. A. Ponguillo, "Software Defined Radio Applications Using USB Receptors," Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS, vol. 1, 2016.
- [4] RTL-SDR. (2018). VIDEO TUTORIAL: SETTING UP DMR DECODING WITH SDR#, DSD+ AND AN RTL-SDR, [Online]. Available: <https://www.rtlsdr.com/video-tutorial-setting-dmr-decoding-sdr-dsd-rtl-sdr/>.
- [5] ETSI TR 102 398 V1.4.1, "Digital Mobile Radio (DMR) General System Design," 2018.
- [6] D. Association, "Benefits and Features of DMR White Paper," 2016.
- [7] (March. 2019). DMR Radio performance characteristics and channel sharing with other radio types, [Online]. Available: <https://dmrassociation.org/>.
- [8] D. C. Cox, "Universal digital portable radio communications," Proceedings of the IEEE, vol. 75, no. 4, pp. 436-477, 1987.
- [9] ETSI TS 102 361-1 V2.5.1, "Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol," 2017.
- [10] ETSI TS 102 361-4TS 102 361-2 V2.4.1, "Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 2: DMR voice and generic services and facilities," 2017.
- [11] ETSI TS 102 361-3 V1.3.1, "Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 3: DMR data protocol " 2017.
- [12] ETSI TS 102 361-4 V1.10.1, "Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 4: DMR trunking protocol," 2019.
- [13] J. Mitola, "The software radio architecture," IEEE Communications Magazine, vol. 33, no. 5, pp. 26-38, 1995.
- [14] GNU Radio. (2019). GNU Radio, [Online]. Available: <https://www.gnuradio.org/docs/>.
- [15] D. Valerio, "Open source software-defined radio: A survey on gnuradio and its applications," Forschungszentrum Telekommunikation Wien, Vienna, Technical Report FTW-TR-2008-002, 2008.
- [16] 林哲緯, "以軟體定義無線電技術設計及實作應急指位無線電示標," 成功大學電信管理研究所學位論文, pp. 1-59, 2017.
- [17] K. Vachhani and R. A. Mallari, "Experimental study on wide band FM receiver using GNURadio and RTL-SDR," 2015 International Conference on Advances in

- Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2015, pp. 1810-1814, doi: 10.1109/ICACCI.2015.7275878.
- [18] 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, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICACCS.2013.6938691.
- [19] R. W. Stewart et al., "A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR," in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 9, pp. 64-71, September 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263347.
- [20] Chen, W. T., Chang, K. T., & Ko, C. P. (2016). Spectrum monitoring for wireless TV and FM broadcast using software-defined radio. *Multimedia Tools and Applications*, 75(16), 9819-9836.
- [21] H. Wang, Y. Song and X. Lin, "On the Implementation of Digital Intermediate Frequency Transceiver for DMR System," 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/WICOM.2009.5304247.
- [22] W. Luo, J. Zeng, X. Su, L. Liu, and C. Zhang, "On the implementation of DMR system based on SDR structure," in 2013 8th International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), 2013: IEEE, pp. 314-317.
- [23] S. H. Lin, C. Chen, E. H. Wu, C. Chan and E. Jou, "A New e-Bus System Using Two-Way Government Radio Networks," in IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 51-60, Spring 2016, doi: 10.1109/MITS.2015.2477657.
- [24] A. Nikitin, A. Manakov, I. Kushpil, A. Kostrominov and A. Osminin, "On the issue of using digital radio communications of the DMR standard to control the train traffic on Russian railways," 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224707.
- [25] A. Atutxa, J. Astorga, M. Huarte, E. Jacob and J. Unzilla, "Enhancing Rescue Operations With Virtualized Mobile Multimedia Services in Scarce Resource Devices," in IEEE Access, vol. 8, pp. 216029-216042, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041394.
- [26] M. Abirami, V. Hariharan, M. B. Sruthi, R. Gandhiraj and K. P. Soman, "Exploiting GNU radio and USRP: An economical test bed for real time communication systems," 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), 2013, pp. 1-6, doi:

- 10.1109/ICCCNT.2013.6726630.
- [27] B. Uengtrakul and D. Bunnjaweht, "A cost efficient software defined radio receiver for demonstrating concepts in communication and signal processing using Python and RTL-SDR," 2014 Fourth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP), 2014, pp. 394-399, doi: 10.1109/DICTAP.2014.6821718.
- [28] 陳靖姿, "以軟體定義無線電實作廣播電視監測系統之數位訊號分析, 即時影像解碼與效能分析," 成功大學電信管理研究所學位論文, pp. 1-47, 2018.

