

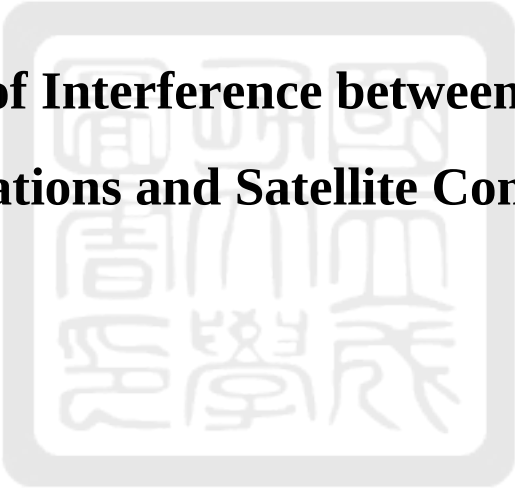
國立成功大學

電信管理研究所

碩士論文

第五代行動通訊與衛星通訊間干擾分析

**Analysis of Interference between 5G Mobile
Communications and Satellite Communications**



研究生：王柏鈞

指導教授：陳文字 博士

中華民國一百一十一年七月

國立成功大學

碩士論文

第五代行動通訊與衛星通訊間干擾分析

Analysis of Interference Between 5G Mobile Communications and
Satellite Communications

研究生：王柏鈞

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

林洞君

陳文宇

指導教授：

陳文宇

單位主管：

鄭子祥

(單位主管是否簽章授權由各院、系(所、學位學程)自訂)

中華民國 111 年 7 月 11 日

摘要

隨著行動通訊世代的推進與第五代行動通訊的到來，全世界行動網路的需求日益增加，伴隨著 5G 行動通訊的各項應用也越來越多，造成頻譜的需求逐漸擴大，而在 5G 頻譜的規劃中又以 FR1（頻率範圍 0.41GHz-7.125GHz）在電路設計上更加成熟且電波傳播上具有優勢，因此成為全球第五代行動通訊中最為熱門的頻段。其中在 C 頻段具有許多固定的衛星通訊用戶使用，因此在發展 5G 行動通訊之餘，與既有的用戶之間需要保留多少護衛頻帶是各國皆探討的議題。本研究透過軟體定義無線電（Software Defined Radio, SDR）來實作一個測試干擾的實驗平台，搭配 RF 設備 USRP B200 與 USRP B210 來發射與接收訊號。本實驗以 DVB-S2（Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation, DVB-S2）作為實驗的受害者，在 GNU Radio 軟體內來同時接收干擾源與解調符合 DVB-S2 規格之影片檔，並發射一個符合 5G NR 標準的干擾源訊號。為了確認 USRP 發射出的干擾源訊號的功率強度大小，因此透過實體纜線連接頻譜分析儀來測量其軟體上的增益值對應於真實訊號的功率大小為何，並將其紀錄於本實驗中。以同頻干擾來實驗，將干擾源與受害者之間的距離分別設置為五種不同的距離，固定干擾源的中心頻率並調整其八種電功率，測試在不同距離之下，其八種不同干擾訊號強度對 DVB-S2 標準之影片的影響。實驗結果使用 VLC 媒體播放器觀看 DVB-S2 解調解碼後的影片，並以 8PSK 星座圖與影片的畫面來觀察受害者被干擾的程度，最後以影片的音訊遺失數、視訊遺失數、輸入丟棄數來判斷影片被干擾的程度，由實驗結果可以發現，干擾源訊號強度越大，則影響影片之品質越大；而距離越遠，則影響影片之品質越小。本研究透過設計 GNU Radio 上的模組實現一個可測試干擾的實驗平台，不僅節省許多成本，也體現了 SDR 的運用靈活度。

關鍵字：軟體定義無線電、5G、GNU Radio、DVB-S2、同頻干擾

Analysis of Interference between 5G Mobile Communications and Satellite Communications

Po-Chun Wang

Wen-Tzu Chen

Institute of Telecommunications Management

National Cheng Kung University

SUMMARY

Advent of the fifth-generation mobile communication, the demand for spectrum resources is increasing. The interference between 5G mobile communications and satellite communications in the C-band is an issue that has been discussed around the world. In this study, an experimental platform for testing interference is implemented through software-defined radio technology. In this platform the RF equipment USRP is used to transmit and receive signals. This experiment takes DVB-S2 as the victim of radio communication. On the other hand, we have an interference source that complies with the 5G NR standard. While the interference signal is received, the DVB-S2 video file is demodulated at the same time. For co-channel interference, we set five different distances between the interference source and the victim. We also fix the center frequency of the interference source and adjust its eight different radiation power. The purpose is to test the effect of different distances and different radiation power of interference on DVB-S2 films. In the experiment, we use the 8PSK constellation diagram and the picture of the video to observe the degree of interference of the victim. We also use VLC media player to observe the DVB-S2 demodulated program video. Finally, the number of audio loss, video loss, and the number of discards are employed to determine the degree of interference of the program video. From the results, we can find that the stronger the signal strength of the interference source, the greater impact on the quality of the program video. And the farther the distance, the less the impact on the quality of the video. This research realized an experimental platform that can test interference by designing modules on GNU Radio, which not only saves a lot of costs, but also reflects the flexibility of SDR in its application.

Key Words: Software Defined Radio, 5G, GNU Radio, DVB-S2, co-channel interference

INTRODUCTION

Advancement of the mobile communication generation and the arrival of the fifth-generation mobile communication, the demand for mobile networks around the world is increasing. With the increasing applications of 5G mobile communication, the demand for spectrum is gradually expanding. In the planning of 5G spectrum, FR1 (frequency range 0.41GHz-7.125GHz) is more mature in circuit design and has advantages in radio wave propagation. Hence FR1 has become the most popular frequency band in the fifth-generation mobile communication in the world. However, there are many fixed satellite communication users in the C-band. Therefore, in addition to the development of 5G mobile communication, the size of guard band between incumbent and 5G network is an important issue around the world.

MATERIALS AND METHODS

In this thesis, GNU Radio, a software-defined radio development platform under the Linux operating system, is selected as the software platform for this study. In this platform, we adopt USRP B210 and USRP B200 as the radio frequency (RF) front-end hardware, as shown in Figure 1. In this study, an experimental platform for testing interference is implemented through software-defined radio technology. In this platform, we use the RF equipment USRP to transmit and receive signals. This experiment takes DVB-S2 as the victim of radio communication. On the other hand, the interference signal is received and the DVB-S2 video file is demodulated at the same time. In order to confirm the power intensity of the interference signal transmitted by the USRP, we connect the spectrum analyzer with a physical cable to measure the relation between gain on the SDR software and the power of the real signal. In the co-channel interference section, five different distances between the interference source and the victim is set, fixing the center frequency

of the interference source and adjusting its eight different radiation power levels. The purpose is to test the effect of different distances and different radiation power of interference on DVB-S2 films.

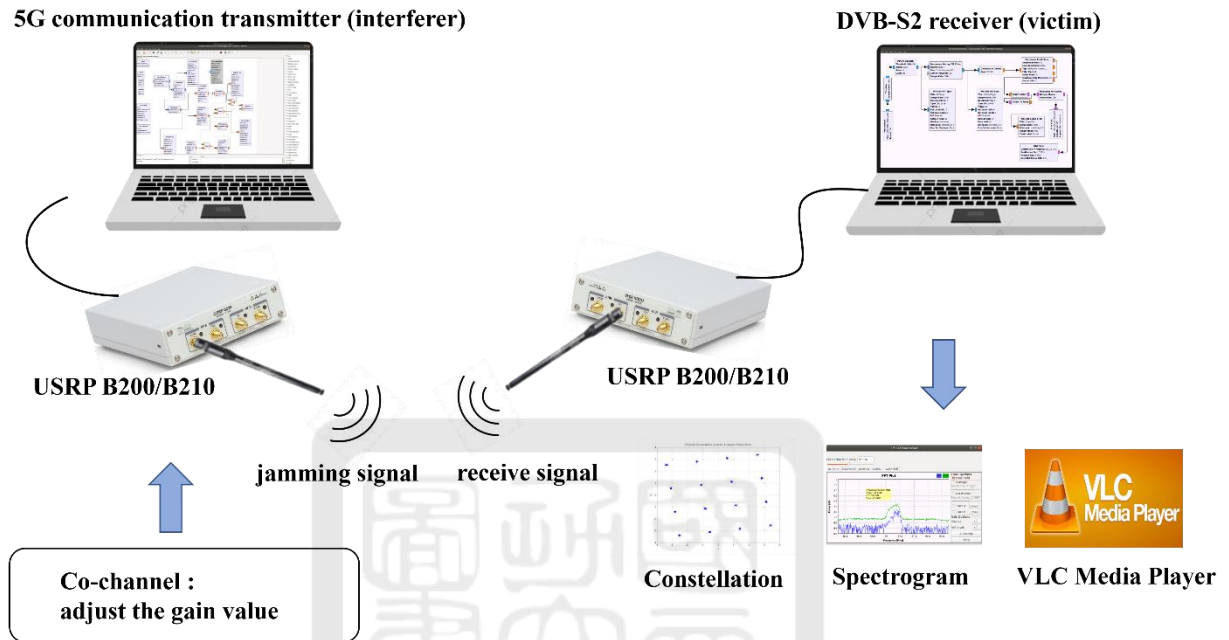


Figure 1. Experimental architecture diagram

RESULTS AND DISCUSSION

This study determines whether DVB-S2 is interfered by observing the constellation diagram and the video quality. From the results of the constellation diagram, 8 aggregated points can be seen when the intensity of the interference signal is low. Also, these points will be broken up when an interference source exists. In the experiment, we use the VLC media player to watch the video after DVB-S2 demodulation. We also use the 8PSK constellation diagram and the picture of the video to observe the degree of interference of the victim. It can be found from the experimental results that the greater the signal strength of the interference source, the greater the impact on the quality of the video; the farther the distance is, the less the quality of the video can be affected.

CONCLUSION

According to the experiment, we can find that in the 5G NR system, the computer platform of this research can be connected to the USRP hardware to transmit an OFDM signal with a maximum bandwidth of 10MHz. The radio bandwidth has positive relationship with the sample rate. The computation power of CPU can not be able to perform when sample rate is too large. Therefore, an experimental platform is executable when the software-defined radio transmission bandwidth of 5G NR is less than 10MHz.

From the experimental results of co-channel interference, we can observe that the larger the power of the interference source signal, the greater the damage to the picture quality of the program video. The weaker it is, the less the signal will be damaged by interference when it is received, demodulated and decoded.

In this thesis we measure the signal power emitted by the interference source on the spectrum analyzer via physical cable connection. Under the distance of 100 cm, when the gain value of the transmitter of the interference source is 60dB, the USRP is connected to the spectrum analyzer through the physical cable. The signal power measured on the spectrum analyzer is -13.5 dBm. However, if the radio power is transmitted to the air through the antenna, the signal power measured on the spectrum analyzer is -61.9dBm. Hence, we can observe that in the wireless transmission environment, the signal power from the interference source should be decreased to protect the incumbent systems.

目錄

第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	4
1.3 論文架構	5
1.4 研究流程	6
第二章 背景回顧與文獻探討	8
2.1 我國頻譜現況分析	8
2.1.1 第一次 5G 釋照	8
2.1.2 中新二號衛星 (ST-2) 介紹	9
2.1.3 中新二號衛星 (ST-2) 服務概述	9
2.2 2015 年世界通訊大會 (WRC-15) 確立 5G 新頻段	10
2.3 美國 5G 頻譜釋出規劃	11
2.3.1 美國 3.5GHz 釋出機制	11
2.3.2 美國 3.7GHz 釋出機制	12
2.3.3 美國 3.45GHz 釋出機制	14
2.3.4 民用寬頻無線電服務 (CBRS)	15
2.4 5G NR 系統介紹	16
2.5 OFDM 系統介紹	17
2.6 DVB-S2 系統介紹	19
2.7 5G 行動通訊與衛星通訊間干擾相關之文獻	21
2.8 同頻干擾與鄰頻干擾相關之文獻	22
2.9 小結	24
第三章 研究架構	25

3.1 研究發想.....	25
3.2 實驗架構.....	26
3.2.1 同頻干擾.....	27
3.3 硬體平台介紹.....	28
3.3.1 USRP 硬體規格	29
3.3.2 電腦硬體規格.....	31
3.4 軟體平台介紹.....	32
3.4.1 GNU Radio.....	32
3.4.2 5G NR 干擾源發射端模組設計	33
3.4.3 DVB-S2 發射與接收系統設計	35
3.4.4 5G NR 發射頻寬實驗測試.....	37
第四章 研究結果	41
4.1 5G 干擾源發射端與 DVB-S2 接收端執行成果	43
4.2 星座圖觀察.....	44
4.3 干擾源訊號於頻譜分析儀上觀察	45
4.4 影片清晰度觀察.....	48
4.4.1 同頻干擾.....	49
4.5 實驗數據.....	56
4.5.1 干擾源訊號於頻譜儀上之對應關係.....	56
4.5.2 同頻干擾.....	57
第五章 結論	63
5.1 軟體定義無線電的可行性	63
5.2 同頻干擾的影響.....	63
5.3 有線傳輸與無線傳輸之差異	63

5.4 研究限制.....	63
5.5 未來研究建議.....	64
參考文獻	65



表目錄

表 1、ST-2 服務項目與概述	10
表 2、USRP B200/B210 規格.....	29
表 3、實驗之電腦規格	31
表 4、同頻干擾實驗統計數據（100cm）	60
表 5、同頻干擾實驗統計數據（125cm）	61
表 6、同頻干擾實驗統計數據（150cm）	61
表 7、同頻干擾實驗統計數據（175cm）	62
表 8、同頻干擾實驗統計數據（200cm）	62



圖目錄

圖 1、5G 系統主要特性	2
圖 2、我國 5G 與 FSS 於 C 頻段頻譜使用情形	4
圖 3、未來可能預釋出之 5G 頻段	5
圖 4、研究流程圖	7
圖 5、我國 5G 頻譜第一次釋照前頻段[1]	8
圖 6、美國 3.5GHz 頻段規劃[3].....	11
圖 7、美國共用頻譜架構[3]	12
圖 8、美國 3.7GHz 頻段規劃[3].....	13
圖 9、美國 3.45GHz 頻段規劃[3]	14
圖 10、分層 CBRS-SAS 模型[3]	15
圖 11、定義 NR 的通道頻寬和傳輸頻寬之關係[4].....	16
圖 12、FR1 不同傳輸頻寬之資源模塊配置[4]	17
圖 13、OFDM 之多載波傳輸[5]	18
圖 14、OFDM 之循環字首[5]	18
圖 15、OFDM 發射與接收流程圖	19
圖 16、DVB-S2 系統架構圖[6]	20
圖 17、5G 干擾衛星接收器場景[9]	22
圖 18、上行和下行干擾鏈路圖[11].....	23
圖 19、兩層式架構圖	26
圖 20、實驗架構圖	27
圖 21、同頻干擾示意圖	28
圖 22、USRP B200/B210[17].....	30
圖 23、USRP B200/B210 內部板子圖[17].....	30

圖 24、USRP B200/B210 內部模塊構造圖[17].....	31
圖 25、GNU Radio Companion(GRC)	33
圖 26、5G NR 干擾源發射端之 GRC 流程圖	34
圖 27、DVB-S2 發射與接收端之 GRC 流程圖	36
圖 28、5G NR 頻寬系統資源使用情形 (a)5MHz, (b)10MHz, (c)15MHz, (d)20MHz.	39
圖 29、5G NR 頻寬 15MHz 以上 GNU Radio.....	40
圖 30、同頻干擾實驗佈署距離 (a)100cm, (b)125cm, (c)150cm, (d)175cm, (e)200cm	42
圖 31、檔案 tx_ofdm.grc 流程圖之執行頻譜圖	43
圖 32、檔案 dvbs2_rx.grc 流程圖之執行畫面	43
圖 33、無干擾時的 8PSK 星座圖	44
圖 34、有干擾時的 8PSK 星座圖	45
圖 35、干擾訊號於頻譜分析儀上校正	46
圖 36、干擾源訊號增益值於頻譜分析儀上之對應通道功率 (a)10dB, (b)20dB, (c)30dB, (d)40dB, (e)50dB, (f)60dB, (g)70dB, (h)80dB, (i)90dB, (j)100dB .	48
圖 37、距離 100cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm.....	51
圖 38、距離 125cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm.....	52
圖 39、距離 150cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm.....	53
圖 40、距離 175cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm.....	54

圖 41、距離 200cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm.....	55
圖 42、干擾源強度與頻譜儀強度對應之關係	56
圖 43、測量同頻干擾時干擾源的頻譜訊號 (a)100cm, (b)125cm, (c)150cm, (d)175cm, (e)200cm	58
圖 44、干擾源 -17.4dBm (60dB) 與頻譜儀距離之通道功率 (a)100cm, (b)125cm, (c)150cm, (d)175cm, (e)200cm	59



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

資通訊科技近幾年來成長飛速，伴隨著新型的科技產品、技術與創新的應用不斷地推陳出新，這些服務對人類帶來極大地便利性，也無形中融入了我們日常生活中不可或缺的一部分。舉凡一天之中生活的大小事，都能感受到我們沉浸在通訊網路的懷抱中。以學生來當作例子，需要使用電腦連上網路來搜尋資料、寫作業或是做報告，也會使用手機裡的各項應用程式，像是 Google Map 來查詢所要前往的目的地路線該如何走、使用 Foodpanda 或是 Uber Eats 等外賣平台來訂外送，還可以上網觀看 YouTube 影片、Netflix 串流電影或是與朋友連線打遊戲等等，這些所有人們的各種生活方式都已經離不開通訊網路了。而手機裡的應用程式越來越豐富，能做的事情也越來越多樣，手機的攜帶方便性也讓我們能隨時隨地的使用，伴隨著第五代行動通訊帶來更大的頻寬、更低的延遲以及更多海量設備的連結，5G 行動通訊的相關應用也越來越多，如圖 1 所示，5G 行動通訊串聯著各式各樣的應用服務，像是智慧家庭、智慧城市、智慧交通等等，這意味著行動寬頻數據流量將倍數成長。隨著各國行動通訊逐漸邁入 5G 的時代，無線通訊技術應用與服務持續增加，各種通訊產品規格與應用也不斷地更新，使得電波環境日益複雜化，全球行動上網的需求及網路流量亦不斷地上升，各界業者對於頻譜的需求越來越大，因此頻譜的資源規劃與利用也成為當今非常重要的議題。



圖 1、5G 系統主要特性

行動通訊發展到 5G，從電報到手機，頻譜資源的分配是每一代行動通訊轉換的關鍵，關係著全球漫遊和產業鏈的規模效應。根據國際電信聯盟

(International Telecommunication Union, ITU) 的無線電頻譜分配規則，各國政府訂定符合該國的頻率分配原則並發放頻譜使用執照，在頻譜資源稀少的情況下，如何有效率的利用頻譜以及在有限頻譜資源中獲得更高的傳輸率，一直都是各國政府與無線通訊領域專家所持續思考的問題。

隨著新興第五代行動通訊網路的到來，5G 頻譜規劃中定義了頻率範圍 (Frequency Range, FR) 分別是 FR1 (頻率範圍 0.41GHz-7.125GHz) 與 FR2 (頻率範圍 24.25GHz-52.6GHz) 兩大區塊，其中 FR1 因為操作頻率較低，在電路設計上相較於成熟且電波傳播上也具有優勢，因此國際間主要國家對於 5G 頻譜的釋照，無不考量最受矚目的 C 頻段，包括頻段 n48 之 3.35-3.7GHz，n77 之 3.3-4.2GHz 及 n78 之 3.3-3.8GHz。而由於 C 頻段在 3.4-4.2GHz 這區間，在國際上已被廣泛使用於衛星通信業務 (Fixed Satellite Service, FSS) 之下鏈通訊。因此在保障合法既有使用者的使用權之原則下，要規劃給 5G 服務使用時，通常會採取一些因應措施。舉例來說，釋出部分 C 頻段給 5G 服務，並保留適當的護衛頻帶 (guard band)，以避免與衛星通訊干擾，包括我國、美國、新加坡及香港等皆採用此方法。

目前我國 5G 與 FSS 於 C 頻段頻譜使用情形如圖 2 所示，於 3300-3570MHz 供 5G 行動通訊使用，於 3570-3610MHz 設為護衛頻帶，於 3610-4200MHz 供固定之衛星通訊與點對點微波通信使用。我國 5G 頻譜第一次競標戰已在 2020 年 2 月 21 日結束，其釋出的 5G 頻段以 3.5GHz 與 28GHz 頻段最受矚目，不過因為 28GHz 目前尚未發展完全，而 3.5GHz 的生態鏈與設備都相對成熟，因此 3.5GHz 成為了電信業者的必爭之地。而其競標的頻譜為 3300MHz 到 3570MHz，共 270MHz，其中以中華電信取得了此頻段的 90MHz 頻寬為最多，次之則為遠傳電信取得的 80MHz 頻寬。然而隨著 5G 行動通訊的快速發展，各項新技術應用的服務越來越多，串聯各行業的連結也越來越廣，台灣四大電信營運商所取得的 5G 頻寬皆小於 100MHz，對於 5G 行動通

訊的未來進展遠遠不夠，發揮不出 5G 的高速特性，因此必定得再釋出更多的頻譜資源供 5G 行動通訊使用是迫在眉睫的一大問題。

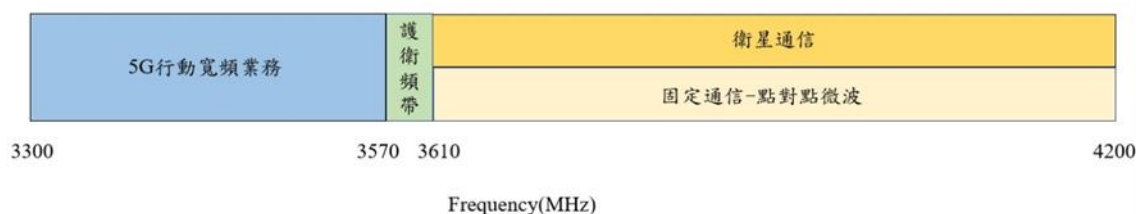


圖 2、我國 5G 與 FSS 於 C 頻段頻譜使用情形

1.2 研究目的

對於未來我國評估 C 頻段剩餘之 3570-4200MHz 頻段作為 5G 使用之可行性而言，首先要掌握一個事實，我國並非國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）之會員國，因此，原則上無法正式取得衛星通信下鏈所需之軌道及頻譜，即太空對地球之通訊鏈路。但對於此類衛星通信下鏈之頻譜，在管轄範圍的領土上，作為地面通訊使用，我國仍擁有完整的監管權，可以做最適合我國發展所需之頻譜規劃。事實上，在我國現行的無線電頻率分配表中，於衛星通信下鏈之 3.7-4.2GHz 頻段，也規劃供公眾通信中繼網路使用。從頻譜規劃的角度而言，這反而是少了一些限制，多了一些選項。這是我國有別於其他國家的特色，可以詳細考慮此特色，據此研析出我國獨特的 5G 頻譜規劃，或許可成為全球 5G 通訊發展的亮點。因此台灣未來幾年內將進行 5G 頻譜第二次釋出，要從原本的 C 頻段再釋出更多頻譜供 5G 使用，其頻段包含 3570MHz 到 4200MHz，如圖 3 紅色範圍內所示，此頻段目前為衛星通訊及點對點微波通訊使用等，其頻段上的固有業者眾多，與 5G 行動通訊彼此之間干擾的可能性也大，因此在台灣沒有發展衛星下鏈業務

的主導權之情形下，可以考慮用較小的頻譜騰讓成本，獲得頻譜使用效益之最大化，也可以使我國 5G 行動通訊服務有更足夠的頻譜得以順利發展其應用。

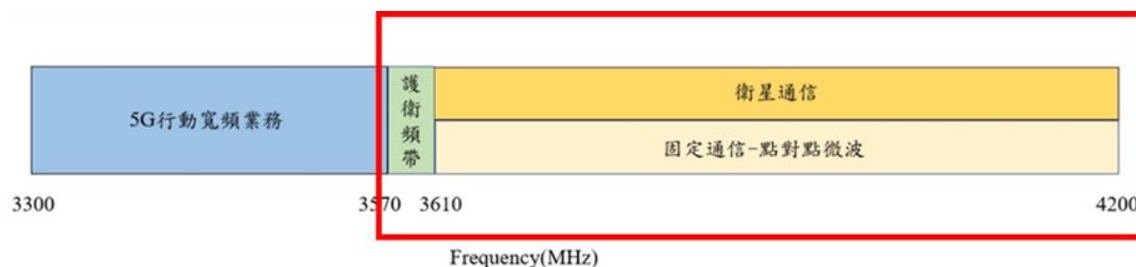


圖 3、未來可能預釋出之 5G 頻段

因此本研究將搭建一個實驗測試環境來分析 5G 行動通訊與固定衛星下鏈通訊的干擾。本研究目的分為以下幾點：

1. 評估軟體定義無線電實作出 5G 行動通訊與衛星通訊間干擾實驗平台之可行性。
2. 建立一個評估 5G 行動通訊與衛星通訊間干擾的測試實驗平台。
3. 透過量測來探討護衛頻寬 (guard band)、雜訊比、錯誤率等相關議題。
4. 將軟體定義無線電用於同頻干擾之研究。

1.3 論文架構

論文第一章說明研究背景及動機，介紹目前 5G 行動通訊的演進，且頻譜資源的不足不利於 5G 行動通訊的發展，因此我國未來將對 C 頻段的頻譜做更多的釋照，但前提是需要評估保留多少頻寬供衛星下鏈使用，以及 5G 行動通訊及衛星通訊之間需要預留多少護衛頻寬，兩方需求必須取得一個平衡點。第二章背景回顧與文獻探討，分別針對我國 5G 頻譜第一次釋照和美國 5G 頻譜釋照方案做回顧，再來針對 5G 行動通訊與衛星通訊間干擾及同頻與鄰頻干擾相關文獻做探討，並且說明本研究與過往文獻相異之處。第三章為研究架構，說明整體干擾測試架構，與設計干擾情境，交代實驗中所需硬體設備及

軟體參數設定。介紹實驗過程中會使用到的軟體平台 GNU Radio，以及硬體設備 USRP 的技術規格，包括軟體定義無線電的模組設計以及系統運作流程，最後敘述本研究之實驗架構。第四章研究結果說明本實驗之測量與分析結果，第五章是敘述整體研究實驗結果並將其做一結論，並提及本論文未來研究方向。

1.4 研究流程

本研究之流程如圖 4 所示，以為何進行此項研究的背景與動機作為開頭，再來進行相關文獻的蒐集與研讀，並根據文獻回顧的內容進行實驗架構的設計。同時我們將進行測試干擾的平台架設與進行穩定性評估，穩定性評估和調整是本研究相當重要的一環，須要確保訊號能在大多數情況之下都可以被接收到，否則無法用來進行實驗。在實驗架構和平台的穩定性均完備後才可以開始進行實驗，並且持續觀察可行性。最後，在實驗完成後將資料進行整理與分析並給予結論與建議。

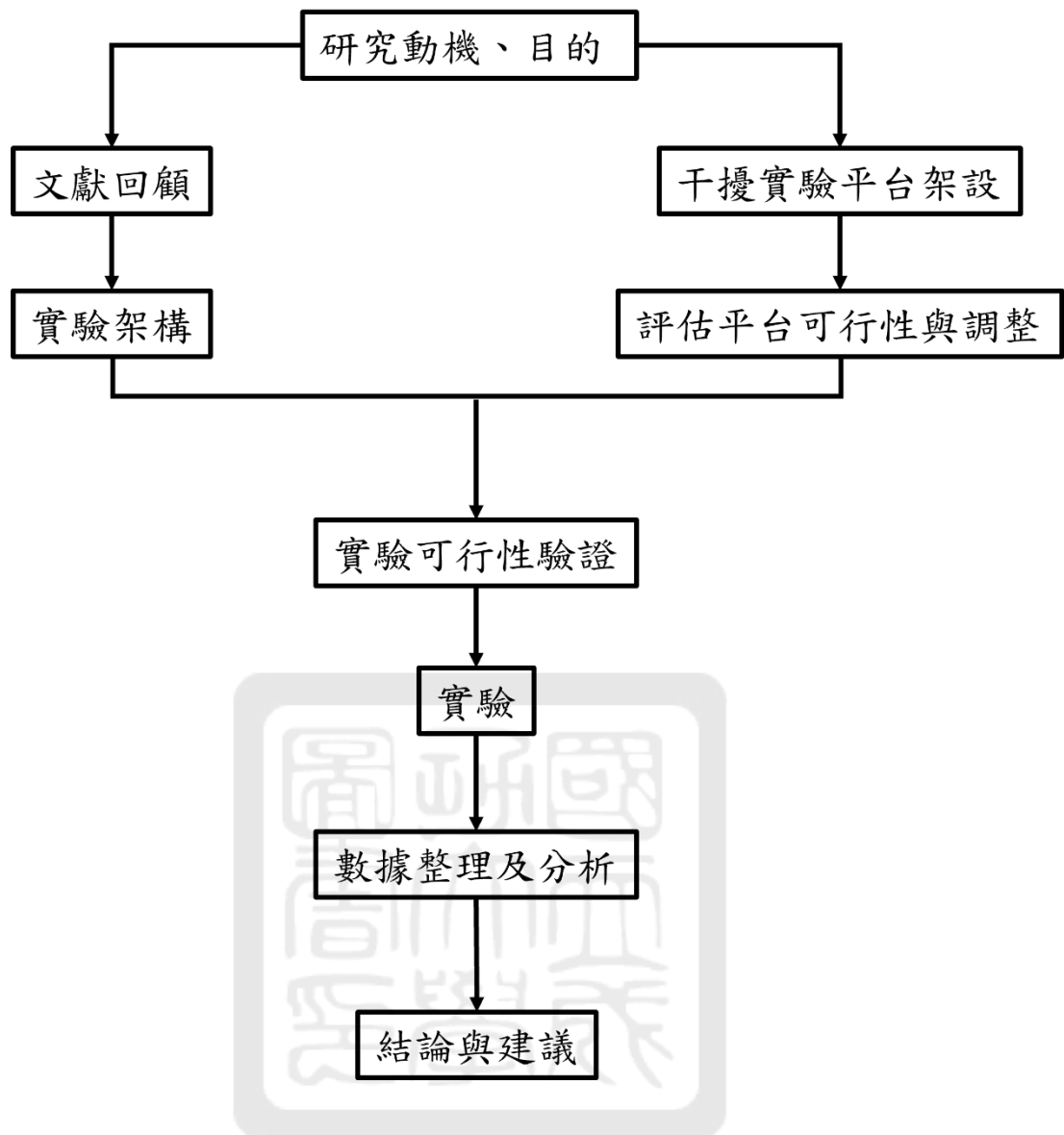


圖 4、研究流程圖

第二章 背景回顧與文獻探討

本章節將依序介紹我國第一次 5G 頻譜釋照後之頻段、中新二號衛星之服務、以及美國 5G 頻譜釋出之規劃與標準，接著藉由研讀現有文獻，探討過去他人的研究及結果，從中了解並比較各個研究中需加強及改善的部分，最後統整文獻並做出歸納。

2.1 我國頻譜現況分析

2.1.1 第一次 5G 釋照

在第一次 5G 頻譜釋照後，中華電信股份有限公司的中新二號衛星（ST-2）於 3.5GHz 頻段使用的部分頻段須繳回頻率使用權或變更頻率使用範圍，如圖 5 所示，中新二號衛星所使用的頻率範圍自 3528-3700MHz，其中的 3532-3568MHz 和所釋出的 5G 行動通訊業務之 3300-3570MHz 頻段有所重疊，而 3573-3609MHz 頻段則規劃為護衛頻段（3570-3610MHz）。因此中新二號衛星原先所使用的 3532-3568MHz 與 3573-3609MHz 兩個頻段的兩個衛星轉頻器須停用或進行調整。衛星轉頻器是衛星搭載的通訊中繼設備，用來接收地面站發射的上鏈訊號，將訊號放大再轉換成下鏈頻率，並經過功率放大後向地面發射[1]。

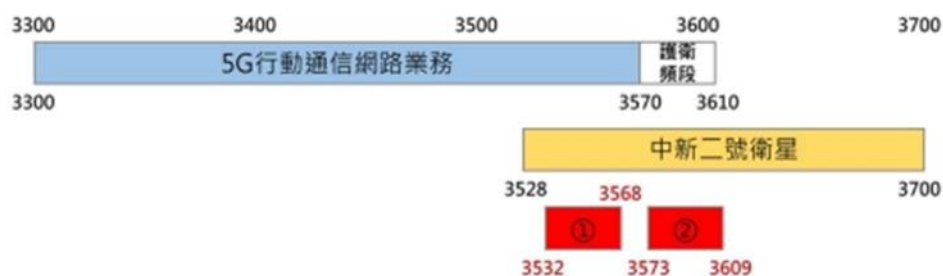


圖 5、我國 5G 頻譜第一次釋照前頻段[1]

2.1.2 中新二號衛星（ST-2）介紹

中新二號衛星（ST-2）為我國第二顆以通訊用途為主的商用衛星，由中華電信與新加坡電信（SingTel）共同出資並且擁有主控權。ST-2 包含 5 顆使用 36 MHz 頻寬之 C-band 轉頻器（操作頻段為 6557/3532 MHz-6716/3691MHz）及 6 顆使用 54 MHz 頻寬之 Ku-band 轉頻器（操作頻段 14256/12501MHz-14499/12744MHz）與 3 顆使用 72 MHz 頻寬之 Ku 頻轉頻器（操作頻段為 14000/11455MHz-14232/11687MHz）。新加坡電信與中華電信於 2008 年分別以 62%及 38%持股成立合資公司 ST-2 Satellite Ventures Pte.,，設立於新加坡，共同打造 ST-2，以替代使用壽命於 2011 年屆期的中新一號衛星（ST-1）[1]。

2.1.3 中新二號衛星（ST-2）服務概述

中新二號衛星（ST-2）的服務項目列於中華電信的衛星業務型錄，中華電信提供 ST-2 轉頻器頻寬出租、廣播、電信、臨時租用、影像遠端監測、海事通信等服務，如表 1 所示。ST-2 的臺北與枋山通信中心（Teleports）地面站設備，可提供包含上鏈（Uplink）、下鏈（Downlink）及轉送（Turnaround），HD/SD 電視節目中繼、衛星直播（Direct to Home, DTH）、小型地面站（Very Small Aperture Terminal, VSAT）、衛星新聞轉播車（Satellite News Gathering, SNG）及衛星通訊等各類衛星通信服務。目前衛星業務如衛星轉頻器出租及衛星增值服務、衛星行動通信服務等屬於國際電信分公司的業務[1]。

表 1、ST-2 服務項目與概述

服務項目	概述
衛星轉頻器 頻寬出租	提供 C (4-8GHz) / Ku (12-18GHz) 轉頻器支持電視節目轉播、電信、內容分發，企業專用網和寬頻應用。
廣播	• 高畫質／標準畫質電視節目中繼及播控 • 廣播節目中繼服務 • 國際、區域、全國廣播服務
電信	• 國際及國內衛星網路 • 私有企業網路 • 政府專用網路 • 行動基地台傳輸鏈路 • 偏遠、離島地區通信
臨時租用	• 運動、新聞及突發事件 • 緊急救災及災後復原
影像遠端 監測	• 監視河床、輸油管、土石流、道路危坡及落石 • 災難防範警告
海事通信	• 船舶語音及數據通信、視訊會議 • 網際網路接取、電視節目接收 • 船舶定位

2.2 2015 年世界通訊大會（WRC-15）確立 5G 新頻段

國際電信聯盟（International Telecommunication Union, ITU）在 2015 年世界無線電通訊大會（World Radiocommunication Conference 2015, WRC-15）上，為 5G 行動通訊增加了 3.4-4.2GHz 的頻段分配。而 3.4-4.2GHz 的頻段能候選的原因是經各種考慮後，被評估為適合用於 5G 行動通訊的頻譜。然而在

頻譜的使用過程中，5G 有一個很大的問題，就是該頻段是固定衛星通訊服務（FSS）用來當作下行鏈路的頻譜。[2]因此如何減緩彼此干擾的問題，是各國面臨的一大挑戰。

2.3 美國 5G 頻譜釋出規劃

2.3.1 美國 3.5GHz 釋出機制

聯邦通訊委員會（Federal Communications Commission, FCC）於 2020 年 7 月 23 日釋出 3.5GHz 頻段（3550-3650MHz）22,631 張優先接取執照（Priority Access Licenses, PALs），以郡（county）為單位，劃分為 3,233 個郡級區域，每個郡級區域最多可分得 7 張 PAL 執照，每張 PAL 執照可使用頻寬為 10MHz 的通道，如圖 6 所示，單一申請者最多可持有 4 張 PAL 執照。[3]

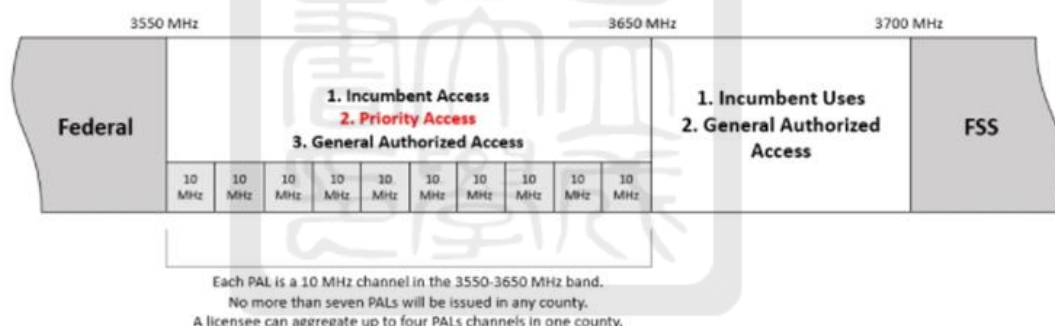


圖 6、美國 3.5GHz 頻段規劃[3]

頻譜接取系統（Spectrum Access System, SAS）將為執照持有者動態分配通道。PAL 執照持有者可於拍賣後要求 SAS 分配特定通道或頻段，但 SAS 無法保證取得，SAS 可能會配合既有使用者（Incumbent Access User）而分配給 PAL 執照持有者不同的通道。既有使用者包含 3550-3700MHz 之聯邦授權使用者、3600-3650MHz 頻段之固定衛星服務（太空對地面）地面站，以及 3650-3700MHz 頻段之傳統式無線寬頻（Grandfathered Wireless Broadband）執

照持有者，既有使用者得免受 PAL 執照持有者與一般授權接取（General Authorized Access）執照持有者的頻率干擾。在可行的範圍內，SAS 將「分配同一 PAL 執照持有者所持有的連續頻段至每個地理區域的相同通道中」，以及「分配同一 PAL 執照持有者所持有的多個通道至同執照區域之連續頻率中」。然而 SAS 仍可能暫時重分配個別 PAL 至非連續通道，以避免既有使用者運作受干擾，如圖 7 所示。

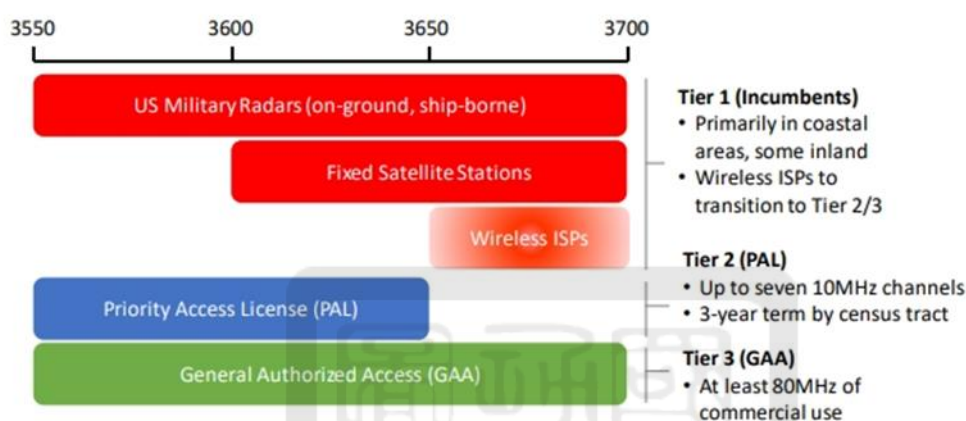


圖 7、美國共用頻譜架構[3]

2.3.2 美國 3.7GHz 釋出機制

聯邦通訊委員會（Federal Communications Commission, FCC）於 2020 年 12 月 8 日至 2021 年 2 月 17 日展開拍賣，釋出 3.7-3.98GHz 頻段，共 280MHz 頻寬，提供 5,684 張區域性執照。拍賣所釋出的 280MHz 頻寬將在不成對的基礎上劃分為 A、B、C Block 三大區塊，並依照相鄰各州和哥倫比亞特區的局部經濟區域（Partial Economic Area, PEA）細分為每 20MHz 的子區塊，而檀香山、安克雷奇、科迪亞克、費爾班克斯、朱諾、波多黎各、關島-北馬里亞納群島、美屬維爾京群島、美屬薩摩亞和墨西哥灣等區域則不發放區域性執照。如圖 8 所示，A Block 涵蓋 3.7-3.8GHz 頻段，共 100MHz 頻寬，包含 5 個 20MHz 子區塊：3700-3720MHz（A1）、3720-3740MHz（A2）、3740-

3760MHz (A3)、3760-3780MHz (A4) 以及 3780-3800MHz (A5)；B Block 涵蓋 3.8-3.9GHz 頻段，共 100MHz 頻寬，包含 5 個 20MHz 子區塊：3800-3820MHz (B1)、3820-3840MHz (B2)、3840-3860MHz (B3)、3860-3880MHz (B4) 以及 3880-3900MHz (B5)；C Block 則涵蓋 3.9-3.98GHz 頻段，共 80MHz 頻寬，包含 4 個 20MHz 子區塊：3900-3920MHz (C1)、3920-3940MHz (C2)、3940-3960MHz (C3) 以及 3960-3980 (C4)。而 3980-4000MHz 頻段，共 20MHz 頻寬則被保留作為護衛頻段 (guard band)，不列入拍賣之頻段。

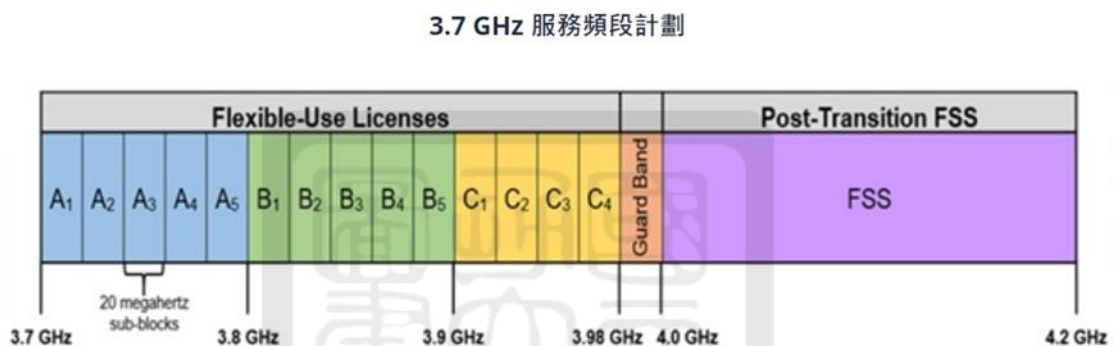


圖 8、美國 3.7GHz 頻段規劃[3]

而在此次的拍賣後，新的執照持有人被要求負擔特定比例的加速遷移費用 (accelerated relocation payments) 及遷移支出 (relocation expenses)，作為補償既有使用者從 C 頻段中較低頻率範圍的 300MHz 移出的合理費用。而美國無線通訊局 (Wireless Telecommunications Bureau, WTB) 於 2020 年 6 月 1 日宣布，既有衛星業者已充分承諾將按照 3.7GHz 報告與命令中所規劃的加速時程移出 3.7-4.0GHz 頻段，加速該頻段的清頻作業。

2.3.3 美國 3.45GHz 釋出機制

聯邦通訊委員會（Federal Communications Commission, FCC）於 2021 年 3 月 17 日宣布將重新分配 3.45-3.55GHz 頻段，共 100MHz 頻寬，給全國範圍的非聯邦固定和行動（航空行動除外）業務使用，並建立相關服務與技術規範，使營運商未來能提供全功率的商業營運。3.45GHz 頻段目前是提供給美國國防部（Department of Defense, DoD）用於 3GHz 頻段中各種平台上的高功率和低功率雷達系統，包含固定、行動、艦載和機載操作。美國國家電信暨資訊管理局（National Telecommunications and Information Administration, NTIA）和美國中頻段倡議團體（America's Mid-Band Initiative Team, AMBIT）皆主張 3.45GHz 頻段可採合作共享（cooperative sharing）模式，供美國國防部現有操作和新的商業營運商使用。在此模式下，商業營運商除了少數限制情況，將可不受限制地使用該頻段。FCC 也同意此作法，將 3.45GHz 頻段以合作共享制度釋出。FCC 將透過拍賣釋出 3.45-3.55GHz 頻段，共 100MHz 頻寬，提供 4,060 張區域性執照，但須遵守合作共享要求。為了促進與相鄰的 3.5GHz 和 3.7GHz 頻段達到一致的頻譜環境，3.45GHz 同樣將在不成對的基礎上進行分配，劃分為 A 到 J 等 10 個 10MHz 的區塊，如圖 9 所示。

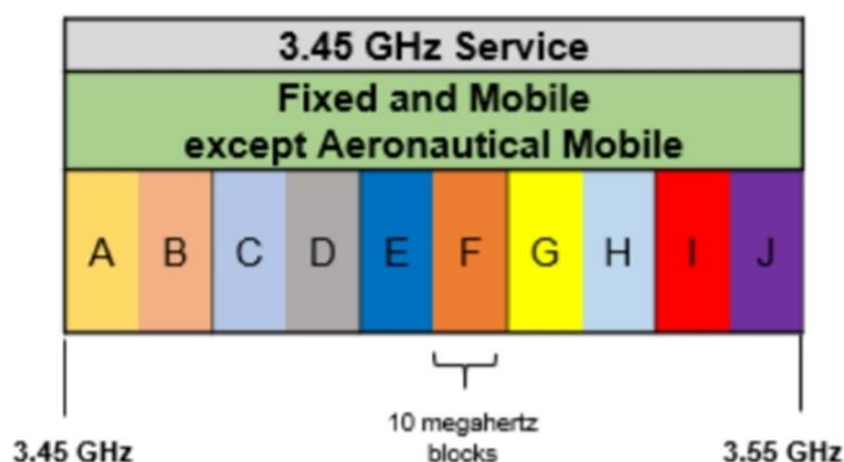


圖 9、美國 3.45GHz 頻段規劃[3]

由於 3.45GHz 頻段位處兩個現行頻段之間，頻段上緣有公民寬頻無線電服務（Citizens Broadband Radio Service, CBRS）在 3.55-3.65GHz 頻段；頻段下緣則主要分配給聯邦無線電定位業務持續在低於 3.45GHz 頻段運作。FCC 原考慮設置護衛頻段以保護相鄰系統，但此做法頻譜使用效率低且可改由其他技術解決方案避免，因此 FCC 最終決定不在該頻段設置護衛頻段。

2.3.4 民用寬頻無線電服務（CBRS）

美國 FCC 於 2015 年起，為開放民用寬頻無線電服務（Citizens Broadband Radio Service, CBRS），針對 3.55-3.7GHz 頻段採用三層式之頻譜監管架構，如圖 10 所示，只有現有使用者（Incumbents）的權利受到保護，它可以額外使用許可和免許可的頻譜。還介紹了兩種類型的頻譜使用，分別是優先使用許可（Priority Access Licenses, PAL）和免許可的一般授權使用（General Authorized Access, GAA）。而專用頻譜接入系統（Spectrum Access System, SAS）控制 PAL 和 GAA 用戶的頻譜接入。主要區別在於 PAL 用戶受到保護，不受其他 PAL 和 GAA 用戶的干擾，而 GAA 用戶通常不受保護，讓不同類型的應用可以共享頻譜。[3]

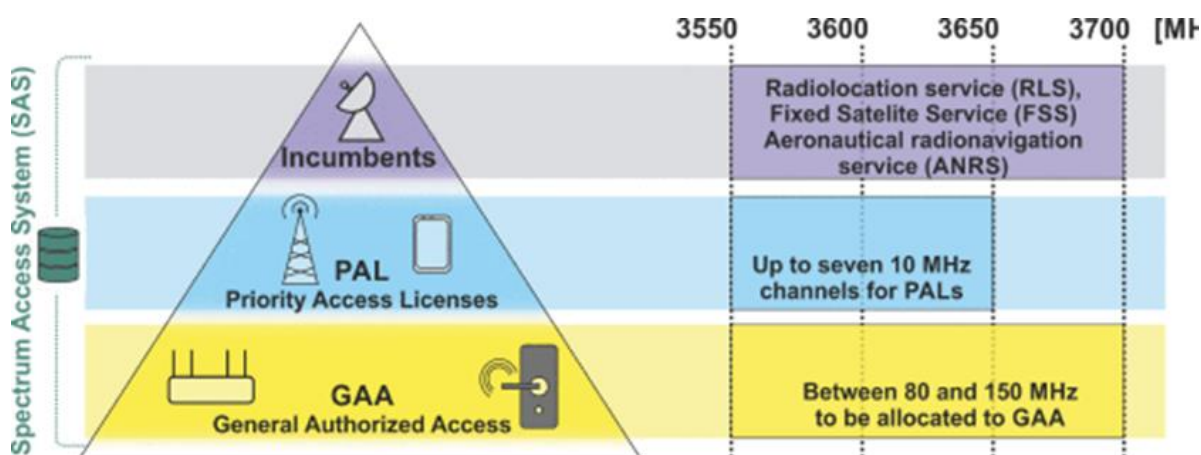


圖 10、分層 CBRS-SAS 模型[3]

2.4 5G NR 系統介紹

5G NR (New Radio) 是一項新的無線接取技術，是由 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 所推動的行動網路通訊技術，為 4G 系統後的演進。5G 的效能目標是高資料速率、減少延遲、大規模裝置連接。3GPP Release-15 中的 5G 規範的第一階段是為了適應早期的商業部署。5G 第一個演進標準 3GPP Release 16 於 2020 年 7 月 3 日完成，主要新增了 5G 超級上行技術、完善超高可靠低延遲通訊和大規模機器類互連的場景，並進一步提升效能和使用者體驗。第三代合作夥伴計劃 (3GPP) 將提交 5G NR 作為其 5G 通訊標準提案。

在 NR 的基地台通道頻寬上，不同的終端使用者與基地台連接都有其對應的通道頻寬，終端使用者的通道頻寬布局十分靈活，但需要在基地台對應的通道頻寬範圍內，基地台必須能夠傳送或接收不同終端使用者在射頻載波上的資源模塊，如圖 11 顯示通道頻寬、保護帶和傳輸頻寬之間的配置關係。而在 FR1 之基地台頻寬與不同子載波間隔所配置的資源模塊數量如圖 12 所示。

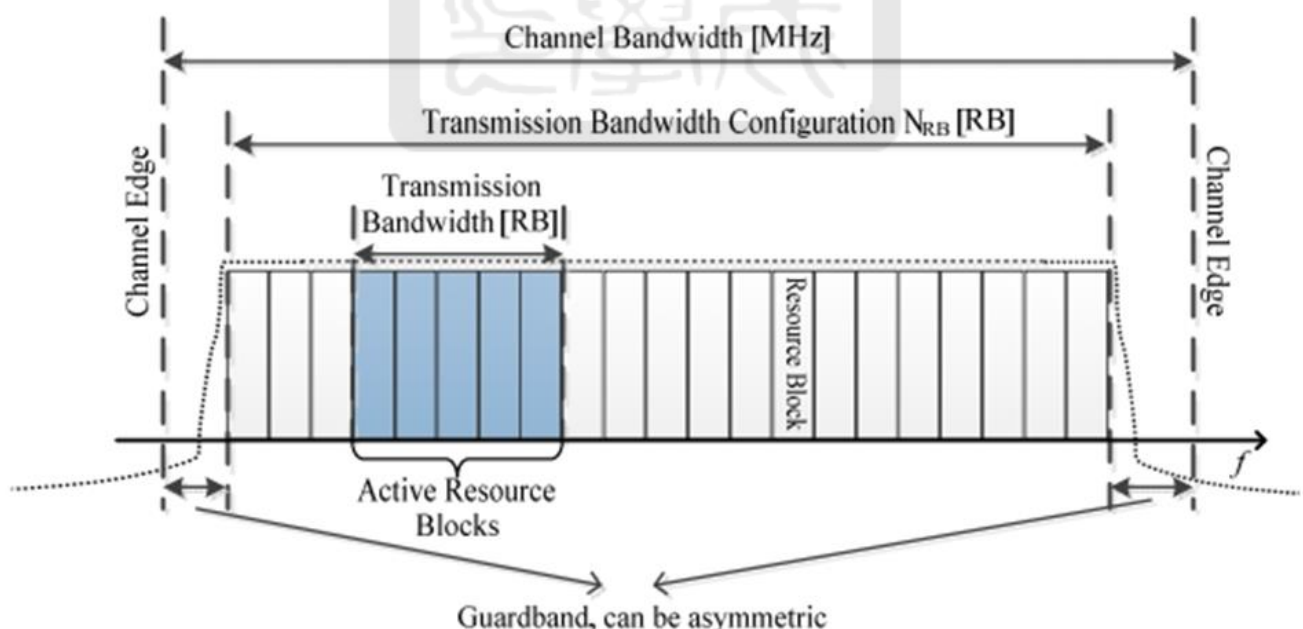


圖 11、定義 NR 的通道頻寬和傳輸頻寬之關係[4]

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

圖 12、FR1 不同傳輸頻寬之資源模塊配置[4]

2.5 OFDM 系統介紹

正交分頻多工（Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM）系統，它的原理是將資料數據的序列分配給不同的子載波上進行平行傳送，因此每一個子載波上的傳輸間隔變大為原來間隔的數倍，也使得在每個子載波上的符元持續時間（Symbol Duration）加大，同時也能降低多重路徑的干擾，如下圖 13 所示。OFDM 系統在現今新世代通訊中之所以能被廣泛運用，主要是它與傳統的 FDM（Frequency Division Multiplexing）的頻譜使用方式有所不同，它是透過多個正交子載波來傳輸，每個子載波的頻寬較窄，而且可以重疊，但由於子載波間彼此正交，也就是差異很大，很容易就能分辨出來，所以就算重疊也不會互相干擾，不太需要保護帶，能擁有更高的頻譜效率。

OFDM 除了能夠提升頻譜效率之外，還能抵抗多重路徑干擾，因為它會在每一個 OFDM Symbol 之間加入保護區間（Guard Interval），也就是循環字首 CP（Cyclic Prefix），它複製一區段 OFDM Symbol 的後段並將其移至前面，使每一個 Symbol 間加入一段時間以抵抗多重路徑干擾，也減少符號間干擾（Inter Symbol Interference, ISI）的情形，如下圖 14 所示。OFDM 技術目前廣泛地應用在無線通訊的第四代行動電話(LTE/LTE-A)、第五代行動電話(5G NR Phase I/II)、無線區域網路(IEEE802.11a/g/n)、數位電視(DTV)、數位音訊廣播(DAB)等，以及有線通訊的非對稱數位用戶線路(ADSL)、電力線通訊(PLC)等產品上，可以抵抗干擾並且大幅增加資料傳輸率。

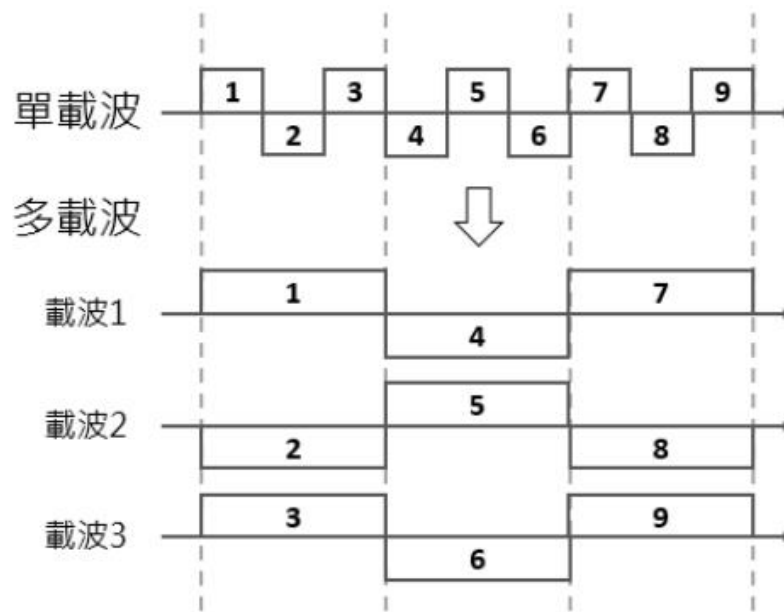


圖 13、OFDM 之多載波傳輸[5]



圖 14、OFDM 之循環字首[5]

圖 15 為 OFDM 的傳輸架構，先將欲傳輸的 Bit stream 經過所對應的調變方式，也就是 Mapper，像是 BPSK、QPSK、16QAM 或是 64QAM 等等，再經過 S/P (Serial to Parallel) 的轉換，使資料數據可以切割成數個並且平行並列的方式來傳送，接著透過反傅立葉轉換 (IFFT)，以此來達到每個資料數據彼此正交的關係，再來經過 P/S (Parallel to Serial) 的轉換，將原來的數據資料型態還原，再加上 CP，也就是循環前綴，可以解決多重路徑干擾的問題，最後經由天線發射至空氣中。接收的部分則是發射的逆向結構，先經由天線

將收到的訊號移除 CP，再經過 S/P，接著進行傅立葉轉換（FFT），再來經過等化器（Equalizer）後，P/S 串並列轉換，最後透過所對應的調變方式將訊號還原。

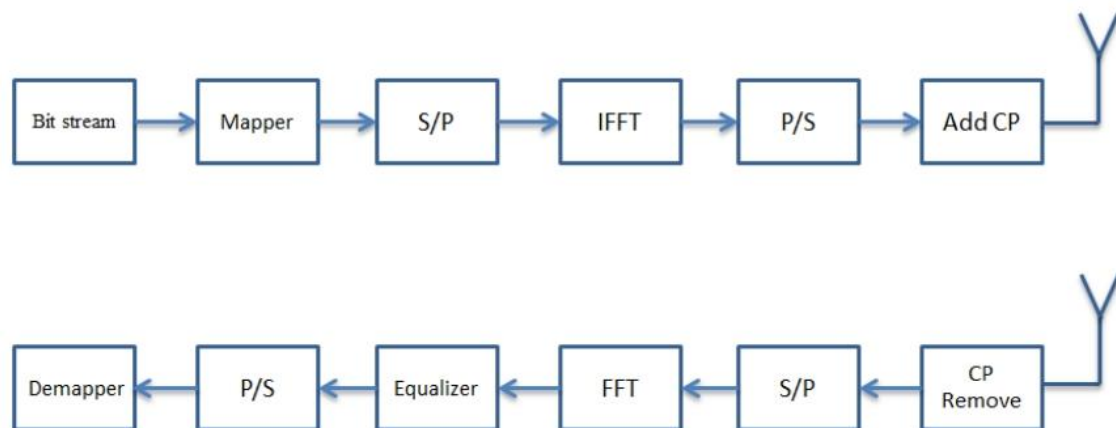


圖 15、OFDM 發射與接收流程圖

2.6 DVB-S2 系統介紹

數位視訊廣播-衛星-第二代（Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation, DVB-S2）是一種物理層的標準，也是衛星傳輸廣播電視節目應用科技的重大發展，衛星傳輸具有涵蓋範圍大、傳送品質高、節省衛星資源等優點，而 DVB-S 的調變模式使用 QPSK，以及循環碼及 Reed-Solomon 編碼，但是已不足以符合現階段寬頻電視及龐大資料的傳輸，因此而有了 DVB-S2 的誕生，且數位通訊調變技術有 8PSK 及 16QAM 等更多可以選擇及其他功能選項靈活高效，同時也對轉發器的非線性進行了專門優化。

DVB-S2 具有五大基本特徵如下：

- （1）可以彈性使用各種格式的單輸入或多輸入資料流，輸入的訊號可以是離散的數據包或連續的數據流。
- （2）採用高性能的前向糾錯系統，透過內碼低密度奇偶檢查碼（Low-density parity-check code, LDPC）加上外碼（Bose–Chaudhuri–Hocquenghem codes,

BCH) 的編碼方式，使傳輸容忍度接近向農極限值，容許較低的發射功率就能達到傳輸的目的。

(3) 編碼率支援 1/4 至 9/10 等多種及支援 QPSK、8PSK、16APSK、32APSK 四種調變方式，減少轉頻器非線性失真的問題。

(4) 採用自適應編碼調變技術 (Adaptive modulation and coding, AMC)，可以根據傳輸環境的不同，進行調變和編碼的優化，提高系統的傳輸效能。

(5) 可以多選擇的頻譜滾降係數：0.35、0.25、0.20，以滿足音訊、視訊、數據等不同通訊需求來提高頻譜效能。

DVB-S2 的架構如下圖 16 所示，依序分為適應性輸入訊號格式模組 (Mode Adaptation)、資料模組適應性 (Stream Adaptation)、前向錯誤更正碼 (Forward Error Correction Encoding)、星座編碼調變 (Mapping)、物理層訊框信號插入 (Physical Layer Framing)、基頻濾波和正交調變 (Base-Band Filtering and Quadrature Modulation)。

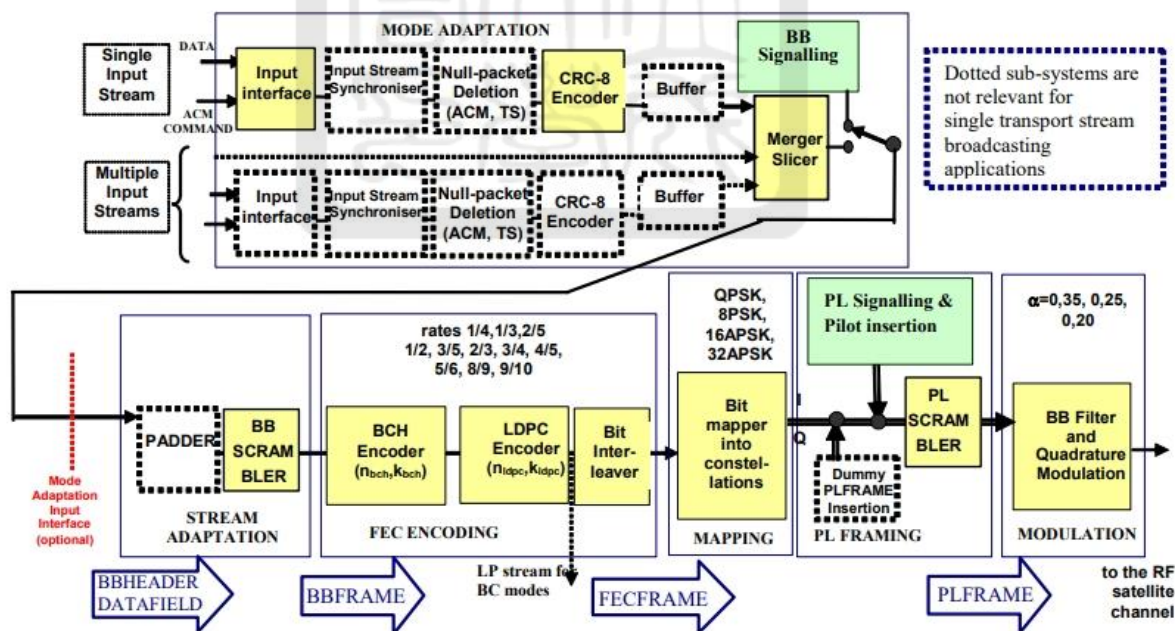


圖 16、DVB-S2 系統架構圖[6]

2.7 5G 行動通訊與衛星通訊間干擾相關之文獻

研究[7]說明，3.7-4.2GHz 頻段的第一個優勢是與相鄰的 3.55-3.7GHz 頻段具有相似的傳播特性，而 3.7-4.2GHz 頻段已被 FCC 分給無線寬頻應用，而此頻段也為 5G 帶來更良好的傳播特性。第二個優勢是 3.7-4.2GHz 頻段也與 3.5GHz 頻段相鄰，因此將兩者結合將有助於提供 650MHz 的連續頻譜。第三個優勢是此頻段可能成為全球 5G 統一的範圍，因此可實現規模經濟及擴展全球漫遊並降低設備設計的複雜性。

研究[8]提到，來自 5G 行動通訊對 3600MHz 以上的衛星通訊頻段所造成的飽和干擾是有具有減少干擾以及相互共存的方案的。實驗中透過蒙地卡羅方法（Monte Carlo method）模擬、實驗室測試及現場環境測試得出需要 1-2 公里的距離才能避免飽和干擾，而若將隔離距離減少至 50 公尺，則需要在低噪聲下變頻器（Low Noise Block, LNB）的輸入接口安裝一個 35dB 的額外濾波器。

研究[9]提到，在 5G 下行鏈路的共存場景中，FSS 地球站可能會受到來自 5G 基地台的有害干擾，而這些基地台被假設為最壞的情況是全向的發射功率，而由於 C 頻段頻譜共享，5G 行動通訊干擾衛星地球站的場景如圖 17 所示。還評估了 5G 下行鏈路對單個基地台的影響，發現位於衛星接收器附近（即 16 公里）的基地台的帶外發射（OOB）會干擾衛星接收器的運行，即使它們與衛星天線的指向不對齊。

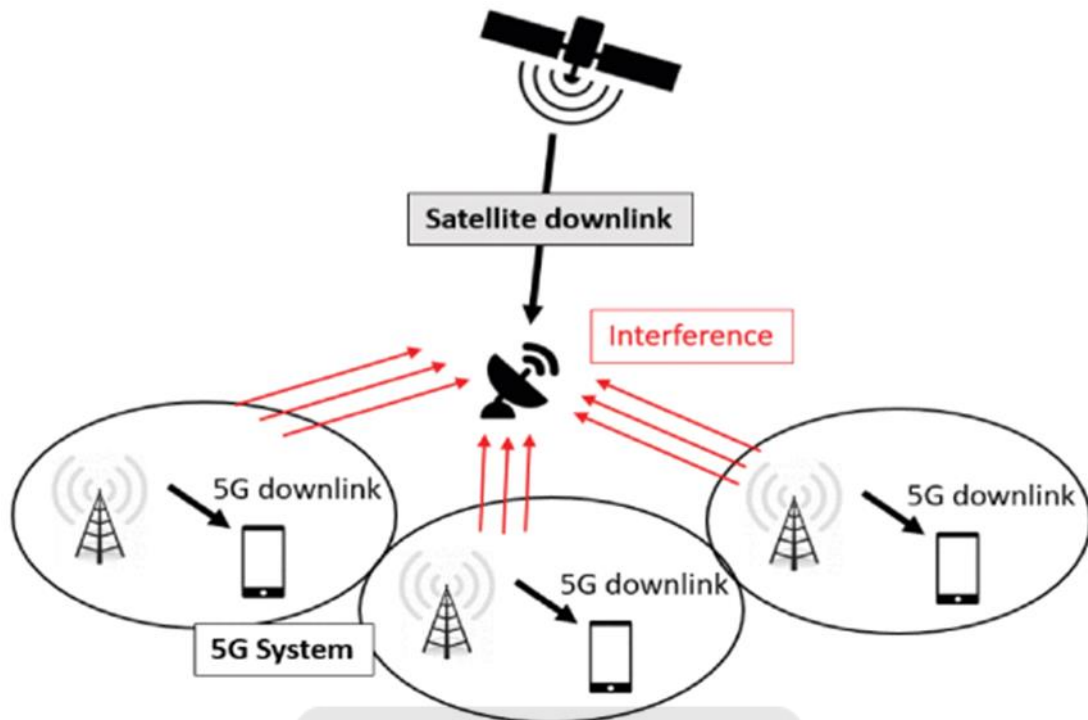


圖 17、5G 干擾衛星接收器場景[9]

研究[10]提到，針對 5G 行動通訊與衛星通訊之間的干擾如何來緩解，主要有幾項技術，像是將同頻的衛星下鏈接收頻率更改到其他頻段、在衛星地球接收站加裝設計更良好的低雜訊放大器（Low-Noise Amplifier, LNA）或是低噪聲下變頻器（Low Noise Block, LNB）、在衛星地球接收站附近方圓多少距離不得設置任何 5G 行動基地台、降低 5G 訊號的最大輸出功率或是透過調整天線的角度來減緩干擾的發生等等。

2.8 同頻干擾與鄰頻干擾相關之文獻

研究[11]說明頻譜資源有限，因此需要地面物聯網和衛星物聯網之間的頻譜共享，而這將不可避免地導致系統之間的上下行同頻干擾。而干擾情境分析如圖 18 所示，系統之間的主要干擾鏈路為 A1、B1、B2。A1 鏈路是地面基站（BS）對衛星系統的干擾鏈路，B1 鏈路和 B2 鏈路是衛星物聯網系統對地

面物聯網系統的干擾鏈路，其中 B2 鏈路是衛星對地面物聯網設備的下行干擾鏈路。

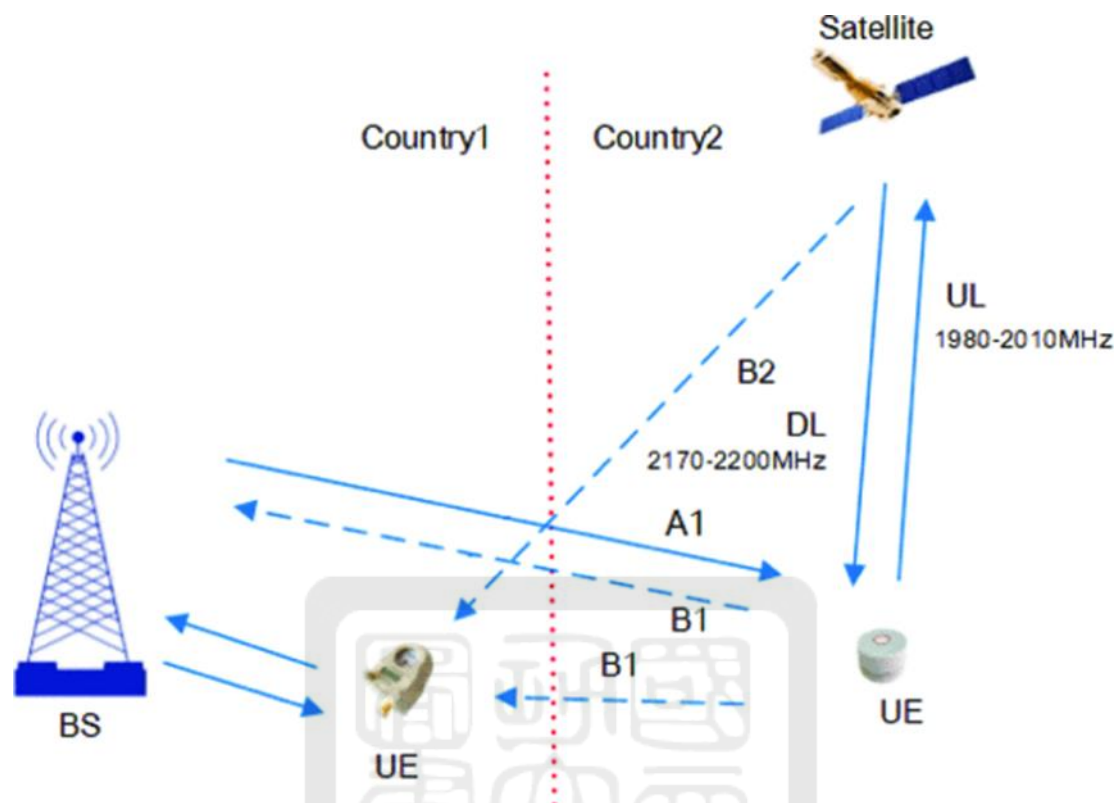


圖 18、上行和下行干擾鏈路圖[11]

研究[12]提到，同頻干擾主要原因是頻段重複使用，導致頻段內的訊號與訊號之間缺乏足夠的間隔，造成吞吐量下降，而距離干擾源越近，對於封包的遺失率則會越高。

研究[13]提到，在同頻干擾的部分，干擾源的訊號強度越強則影響節目影片的品質越大，而訊號雜訊比越高，訊號接收時受干擾的程度越小。在鄰頻干擾的部分，頻譜位移小於 3MHz 時會開始影響節目影片的品質，以相同的干擾訊號強度來看，頻譜重疊會造成訊號受到干擾，但不至於影響太大，若只有交疊到小於 3MHz 就幾乎不會對節目影片造成影響，則不需要預留護衛頻帶。

研究[14]提到，在無線通訊多媒體服務不斷增長下，許多頻段被分配用於不只一種多媒體服務，造成無線系統間高機率干擾。而距離對於干擾的影響，增加距離可以使干擾減少。

2.9 小結

透過回顧上述文獻，得以了解在既有用戶衛星通訊受到 5G 行動通訊的干擾已是屢見不鮮，其中又以同頻干擾及鄰頻干擾發生最多，不過在 5G 頻譜上的選擇又以 C 頻段為最佳，能使 5G 行動通訊發揮出的效益會最佳，但許多國家在 C 頻段的使用上又以衛星通訊為最大眾，因此各國政府與電信相關機構皆有針對 5G 行動通訊與衛星通訊間的干擾做各項措施的保護，像是規劃護衛頻段、在衛星地球站加裝 LNB 或 LNA、調整天線角度、降低 5G 訊號的輸出功率等等方法。而這些種種的保護措施，是因應各國地理環境、建築物分布的情況以及政策上頻譜使用的規劃等等皆不相同所做的改變與調整。

第三章 研究架構

本章節將介紹本研究實際會使用到的軟硬體設備，系統架構之設計以及實驗之架構。本文章主要分為四部分，第一部分是研究發想，透過第二章的文獻回顧後，參考美國 CBRS 的三層式頻譜監管模型，將其簡化為兩層，只保留第一層及第二層，即 Incumbents 與 PAL，而第一層相當於衛星通訊，第二層則為 5G 行動通訊業務，能使頻譜使用效率更高。第二部分是實驗整體架構介紹，並分別介紹干擾者與受害者以及同頻干擾的實驗，以 GNU Radio 軟體內設計衛星通訊之模塊來模擬衛星的發射與接收，再以 USRP B200/B210 發送 5G 無線電波訊號當作干擾源。第三部分介紹實驗將會使用到的硬體設備與規格。第四部分將介紹軟體定義無線電的開發平台 GNU Radio，包含其軟體定義無線電模組設計以及系統的運作流程。

3.1 研究發想

透過第二章的背景回顧與文獻探索，評估我國該以何種方式來解決 5G 行動通訊和衛星通訊之間的干擾問題以及和諧共享頻譜，是一個值得探討的問題。建議可以參考美國 CBRS 的作法，將既有衛星通訊與點對點微波通訊之位址建立資料庫，並設定一個保護區，提供給 5G 行動業者作為建置基地台的選址參考，以避免訊號干擾既有用戶之通訊，且可將原美國 CBRS 頻譜共享之三層架構，簡化為兩層，只保留第一層及第二層，即 Incumbents 與 PAL，而第一層相當於衛星通訊及海軍雷達等既有用戶，第二層則為 5G 行動通訊業務，如圖 19 所示，可使頻譜使用更有效率。至於第一層與第二層間頻段該如何分配或是共存，皆是我們需要探討的。

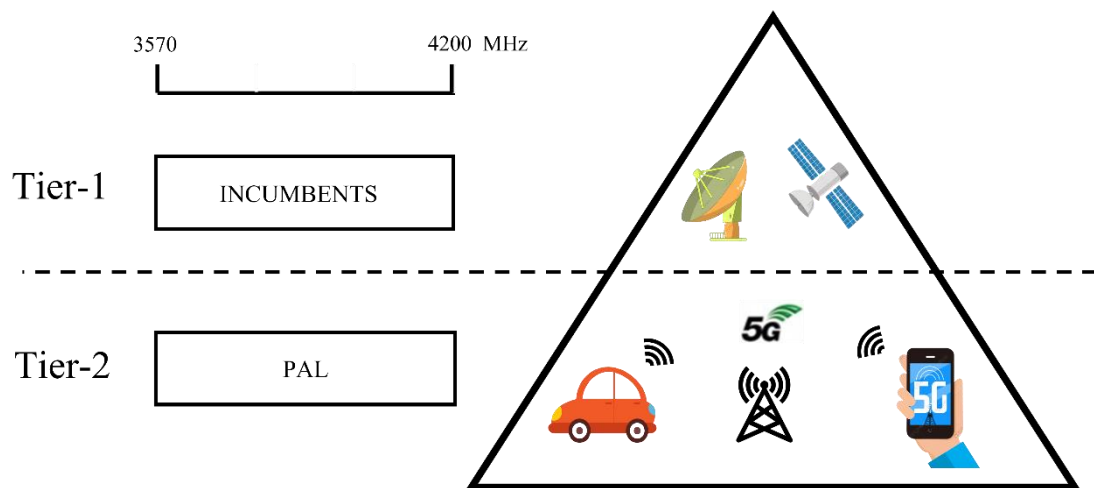


圖 19、兩層式架構圖

3.2 實驗架構

本實驗為 5G 行動通訊對衛星之下鏈通訊進行干擾，測量頻段為 3.57-4.2GHz 之頻段，將透過兩台 SDR 設備來進行，分別擔任發射端（干擾者）、接收端（受害者）的角色。受害者為使用頻段 3570-4200MHz 的衛星下鏈訊號，而干擾者部分則是同為使用此頻段之 5G 行動通訊所發射的訊號。干擾為同頻干擾。

圖 20 為本研究的實驗架構，圖左邊部分以電腦連接 USRP B200/B210 模擬 5G 通訊來發射訊號作為干擾源，並透過 GNU Radio 軟體設定參數來發射無線電波訊號，圖右部分則以電腦連接 USRP B200/B210 模擬衛星地球接收站來接收衛星通訊之下鏈訊號作為接收端，同時也為受害者，最後接收端（受害者）經過 GNU Radio 軟體解調變及解碼後，會產生 FFT 頻譜圖、星座圖，並在 VLC 媒體播放器上播放節目影片，並透過星座圖、FFT 頻譜圖、解碼影片、音訊遺失數、視訊遺失數與輸入丟棄數的變化，來評估 5G 訊號強度對衛星之下鏈通訊的干擾程度，並給予此兩個無線通訊設備需要預留多少護衛頻寬及距離之建議。

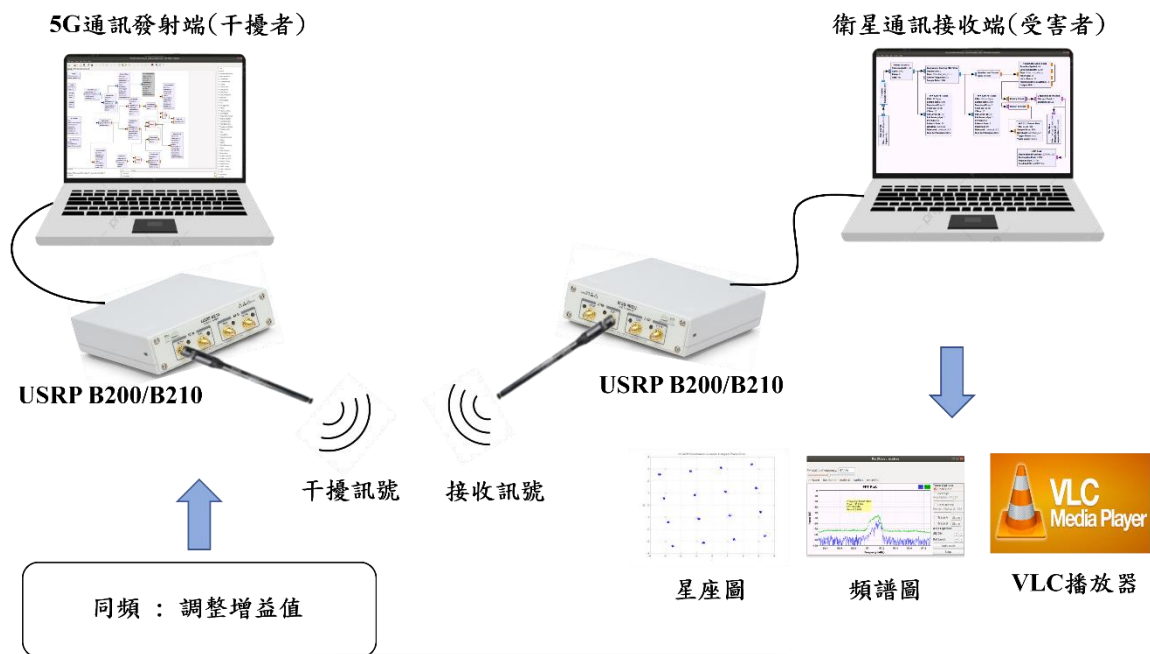


圖 20、實驗架構圖

3.2.1 同頻干擾

同頻干擾（Co-Channel Interference, CCI）是指兩個或多個以上的無線通訊設備各有自己的訊號範圍，使用同一個頻段，於是就會出現相互干擾的情形，因此同一個時間只有一個無線通訊設備能傳送資料，假設有兩個無線通訊設備使用相同的頻道，如果這兩個無線通訊設備的距離足夠遠，那麼兩個無線通訊設備都能完整的使用頻道資源，但如果這兩個無線通訊設備距離靠得太近，兩設備間的訊號就會互相影響、彼此干擾，如圖 21 所示，兩種無線通訊系統使用相同頻道 X，中心頻率為 F_1 ，且距離過近，因此在資料傳送的過程中，就可能造成許多雜訊干擾或是封包遺失等。因此在同頻干擾的情況下，必須保留適當的空間距離（guard space），否則會降低傳輸的效能與品質。

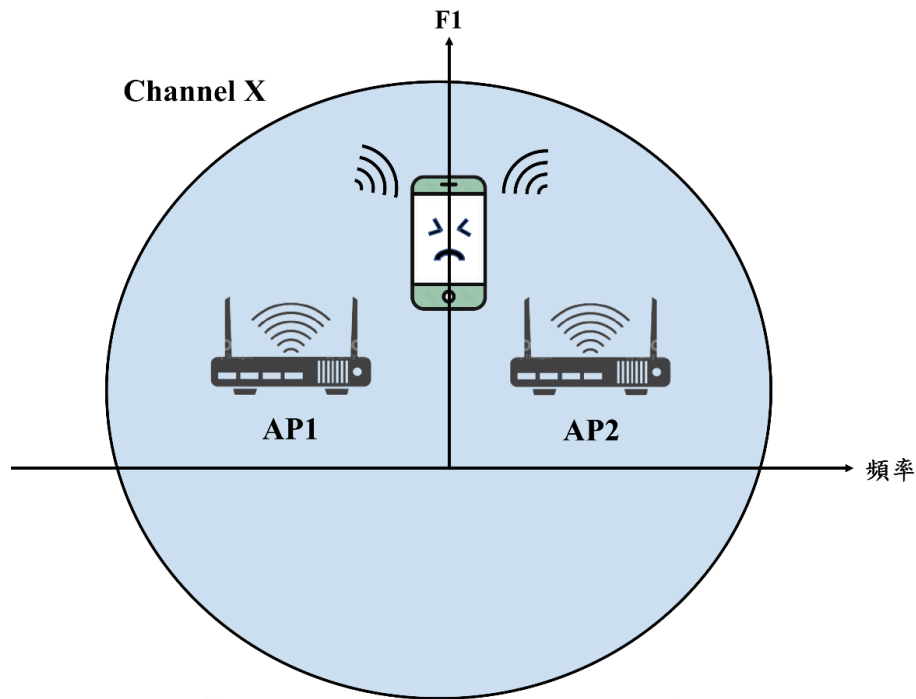


圖 21、同頻干擾示意圖

本研究以衛星通訊之下鏈通訊作為頻道使用的受害者，固定接收端的頻率為 1.5GHz，並以實驗模擬 5G 行動通訊設備發射的無線訊號作為干擾源，固定干擾源發射的中心頻率為 1.5GHz，並調整干擾源發射的功率大小，功率越大代表干擾源距離受害者越近，功率越小代表干擾源距離受害者越遠，再來判斷出在功率大於多少時會對衛星通訊的訊號產生干擾。

3.3 硬體平台介紹

本研究依據軟體定義無線電的訊號發射及接收皆須要透過前端硬體射頻（Radio Frequency, RF）裝置來支援 GNU Radio 軟體，在接收端的部分為裝置接收到訊號數據後會交由電腦軟體處理後續的訊號資料，而在發射端的部份則是先由軟體定義無線電的平台處理訊號資料後，再經由射頻裝置來發射訊號。

3.3.1 USRP 硬體規格

USRP (Universal Software Radio Peripheral) 為通用軟體無線電的周邊設備，而本研究使用 Ettus Research 公司所製作的 USRP B200/B210[15] [16]，其基本規格如表 2 所示，USRP B200/B210 不需要外接電源來供電，主要透過連接電腦上的 USRP3.0 接口來供電，並傳送數據及訊號至軟體定義無線電的平台 GNU Radio 上來做訊號的處理，且搭配不同頻率的天線，頻率範圍可以從低頻的 70MHz 到高頻的 6GHz，還能同時發射 (Tx) 和接收 (Rx) 資料。在操作上需先在 GNU Radio 軟體上下指令安裝 USRP 的 UHD (Ultra High Definition) 模組，就能開始使用 USRP 作為軟體定義無線電的前端射頻裝置，只要點擊 USRP 模組塊就能輕鬆調整發射頻框、可以配置為多個格式、協議與頻率，是一種全積體化的收發器。目標是生產一部具有效率以及成本利益且利於操作使用的裝置。

表 2、USRP B200/B210 規格

發射與接收的頻率範圍	70MHz~6GHz
頻寬	Up to 56MHz
電腦連結接口	USB3.0
最大取樣率	61.44MSample/second (MS/s)
取樣解析度 (ADC/DAC)	12 bits
支援模式	1 TX & 1 RX, Half or Full Duplex / 2 TX & 2 RX, Half or Full Duplex
售價	\$ 30,600.00 / \$ 49,900.00TWD

USRP B200/B210 硬體外觀如圖 22 所示，內部板子如圖 23 所示，而其硬體內部模塊構造如圖 24 所示，使用射頻前端集成電路設計，現場可程式化邏輯陣列（Field Programmable Gate Array, FPGA）提供類比及數位訊號的轉換處理，並將訊號轉換為同相分量（in phase, I）與正交分量（quadrature components, Q）的基頻訊號。利用 USRP B200/B210 接收射頻前端的 I/Q 訊號數據再透過 GNU Radio 進行通道解碼及解調變訊號。



圖 22、USRP B200/B210[17]



圖 23、USRP B200/B210 內部板子圖[17]

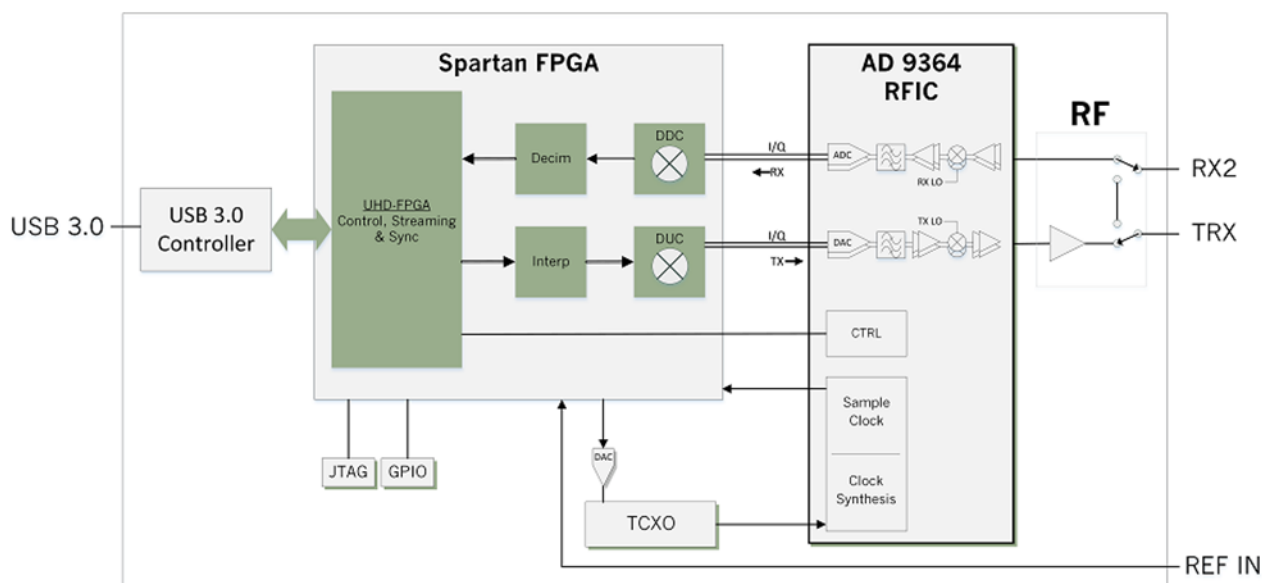


圖 24、USRP B200/B210 內部模塊構造圖[17]

3.3.2 電腦硬體規格

由於 USRP 設備必須搭配一台電腦進行訊號處理，根據以往的研究發現接收端的解碼器需要耗費非常大的計算能力，而計算能力會影響接收訊號、解調變與解編碼的功能，因此這台電腦需要相當強的處理效能以便即時處理傳入的數位訊號。電腦的核心數與中央處理器都必須有一定的要求，而本研究所使用之電腦效能表 3 所示。

表 3、實驗之電腦規格

中央處理器	Intel® Core™ i7-9750H CPU @ 2.60GHz × 12
記憶體	16GB
硬碟	1.5TB
USB	USB3.0
作業系統版本	Ubuntu 20.04.2 LTS
GNU Radio 版本	3.8.2.0

3.4 軟體平台介紹

軟體定義無線電技術具有許多軟體開發平台，有些軟體平台需綁定特定的射頻前端裝置才可以使用，而有些軟體平台則是需要付費的，且有不少的功能模塊介面都被開發者鎖住，使用者較無法自由地在軟體平台上開發符合自身需求的應用。因此，本研究選擇在 Linux 作業系統下來操作軟體定義無線電開發平台 GNU Radio 作為本研究的軟體平台。

3.4.1 GNU Radio

GNU Radio[18]是一個免費且開源的軟體，同時也是軟體定義無線電開發平台，而這個軟體可以在 Windows、Linux、Mac OS 等不同的作業系統上使用，此平台可以與外部射頻硬體設備連接來創建出軟體定義無線電的概念，它能夠執行多種通訊調變技術、封包的加密解密、製造訊號、觀看頻譜圖、錄製訊號及支援軟體定義無線電的射頻前端設備的硬體，以進而進行發射與接收訊號的動作，能夠將不同的通訊技術整合在同一個軟體系統中，GNU Radio 軟體是利用流程圖概念來連接一系列訊號處理的模塊，將複雜的通訊技術整合在一個流程圖中，透過 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平台，如圖 25 所示，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模組，像是濾波器、通道代碼、同步元素、均衡器、解調變器及解碼器等模塊，使用者也可以由撰寫 C/C++ 程式語言來自行創建模塊。

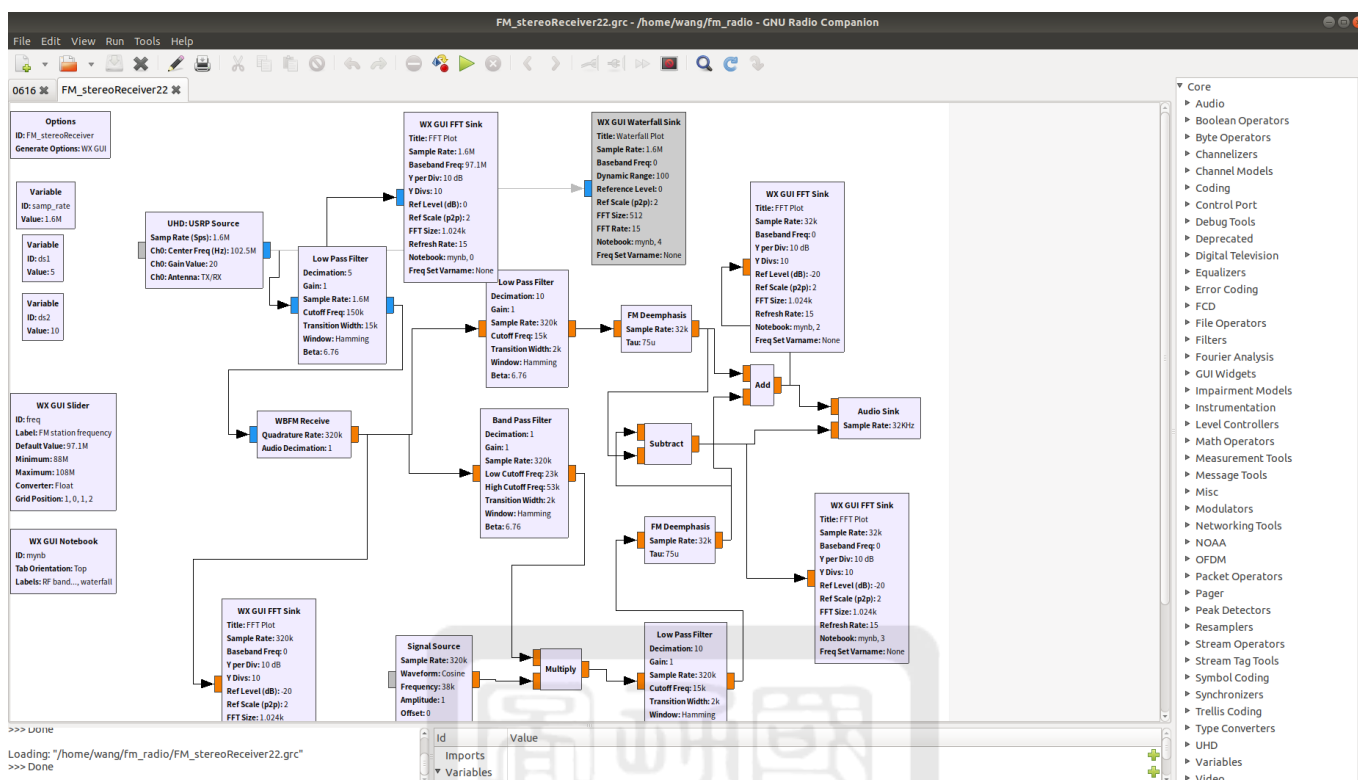


圖 25、GNU Radio Companion(GRC)

3.4.2 5G NR 干擾源發射端模組設計

圖 26 為 5G NR 干擾源發射端的 GRC 流程圖，此模組設計是透過 OFDM 多工搭配調變技術，配合 5G NR 的標準來設定參數，經過本實驗測試，若頻寬超過 10MHz，會使取樣率過大造成電腦無法快速提供數據給 USRP，將導致軟體系統當機無法進行實驗，因此根據 2.4 節的 5G NR 標準設定其中傳輸頻寬為 8MHz、Sampling Rate 為 7.68MHz，FFT Size 為 256 point、攜帶數據的子載波為 132 根。

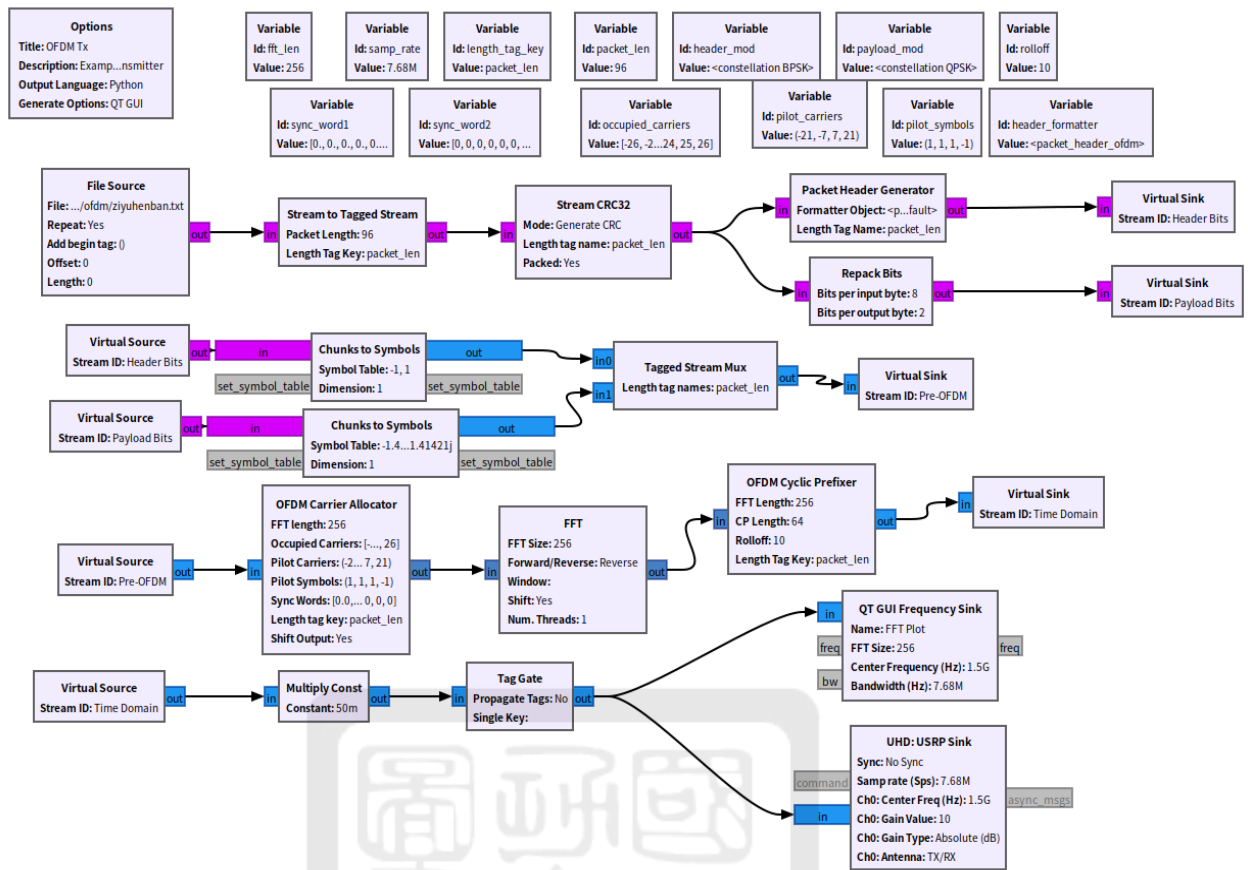


圖 26、5G NR 干擾源發射端之 GRC 流程圖

- File Source：透過 File Source 模塊餵進一個檔案，使之傳送數據樣本，並重複發送，輸出的數據類型為 byte。
- Stream to Tagged Stream：將輸出的數據樣本進行封裝，形成一定長度的數據包，並將數據包貼上標籤，輸出的數據類型為 byte。
- Stream CRC32：將輸入的每個數據末尾加入校正碼，輸出的數據類型為 byte。
- Chunks to Symbols：將數據模塊轉換到符號模塊，可實現 BPSK 和 QPSK 之映射，輸出的數據類型為 complex。
- Tagged Stream Mux：將兩路訊號（Header 與 Payload）合併，而輸出的訊號會有一個新的長度標籤，舊的標籤會被丟棄。輸出的數據類型為 complex。

- OFDM Carrier Allocator：OFDM 子載波分配模塊，載波的類型包含攜帶數據子載波（Occupied Carriers）、導引子載波（Pilot Carriers）、虛擬子載波（Virtual Carriers）和直流子載波（DC Carrier），輸出的數據類型為 complex。
- FFT：將已分配好的子載波符號進行傅立葉轉換，而發射端設定反傅立葉轉換，輸出的數據類型為 complex。
- OFDM Cyclic Prefixer：對 OFDM 符號添加循環前綴，目的是為了防止 OFDM 符號間彼此干擾（ISI），輸出的數據類型為 complex。
- Multiply Const：衰減器模塊，將輸入的數據乘上一個常數，目的是為了改變輸入訊號的幅度。在此模組中的目的是為了防止調變好的 OFDM 訊號在進入功率放大器後產生非線性失真，所以需要將輸入的訊號乘上一個小於 1 的常數，輸出的數據類型為 complex。
- Tag Gate：控制標籤的傳送，使用此模塊可以阻止標籤傳送，輸出的數據類型為 byte。
- UHD: USRP Sink：訊號發射模塊，此模塊實現了訊號從軟體到硬體之間轉換的橋樑作用，將訊號送到硬體後再經過射頻天線把訊號發射出去。

3.4.3 DVB-S2 發射與接收系統設計

DVB-S2 的訊號是透過傳輸 MPEG-2 TS 資料格式檔為基礎，MPEG-TS 為一種標準數據容器格式，傳輸與儲存語音視頻、節目與系統訊息協議數據，應用於數位廣播系統。在 GNU Radio 上執行時必須符合 DVB-S2 系統架構的相關規格標準及參數設定，本研究實作此模組除了在 GNU Radio 內原有的模塊外，還有從[19] Github（開源代碼平台）取得之相關模組，此 DVB-S2 模組連接設計會配合 DVB-S2 的標準，在下圖 27 為 DVB-S2 發射與接收端之 GRC

流程圖，本實驗的 DVB-S2 是以 MPEG-2 TS 的影片檔為受害對象，為了讓接收端可以在解調及解碼影片檔的同時接收來自 5G NR 訊號的干擾源，因此我們在加法器（Add）前加入 UHD USRP Source，以 USRP B200 接收 5G NR 干擾訊號來對數位視訊廣播衛星訊號做干擾，而後續再對影片檔作解調變與解碼的還原處理。

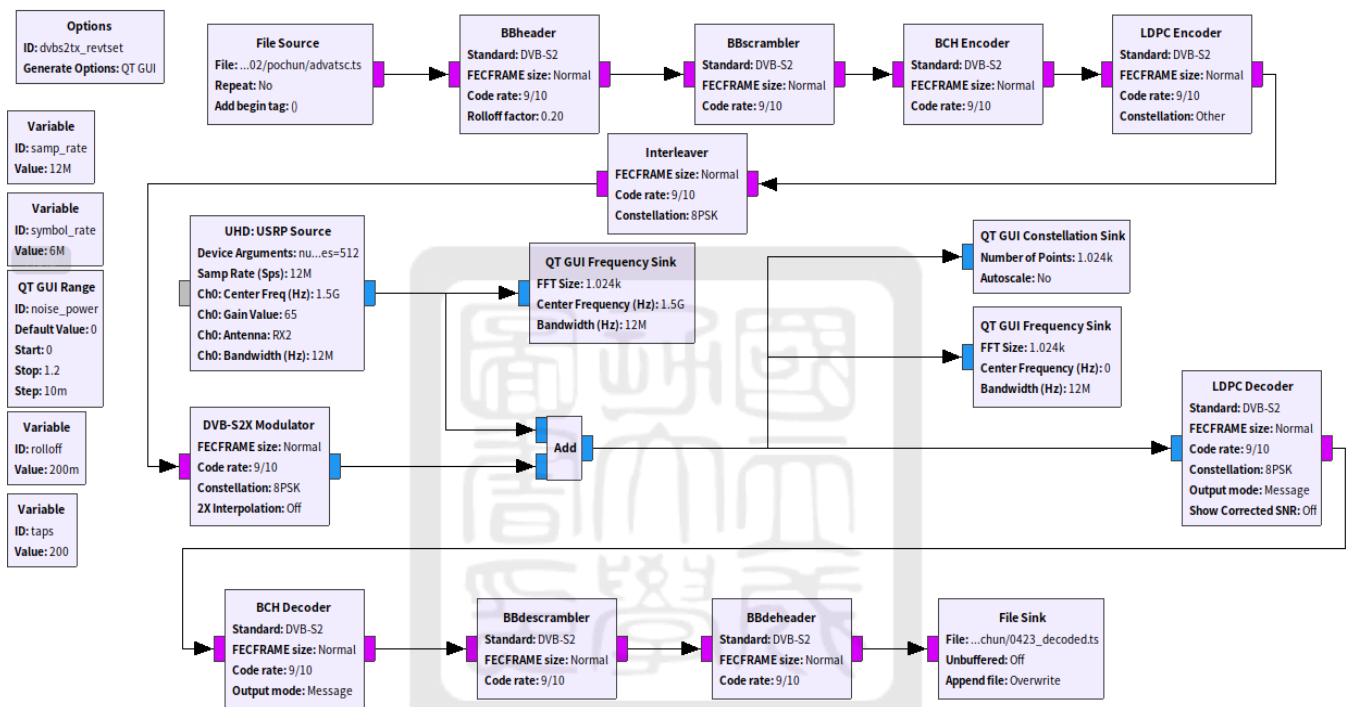


圖 27、DVB-S2 發射與接收端之 GRC 流程圖

- **File Source**：透過 File Source 模塊餵進一個 MPEG-2 TS 的影片檔，使之傳送影片數據包，輸出的數據類型為 byte。
- **BBheader**：將數據資料前加上一個基頻的標頭，用來通知接收方輸入數據資料的格式，輸出的數據類型為 byte。
- **BBscrambler**：使用偽亂數二進位數列（Pseudo Random Binary Sequence, PRBS）編碼器對數據資料流進行加擾，輸出的數據類型為 byte。

- BCH Encoder & LDPC Encoder：透過加上外碼 BCH 與內碼 LDPC 的編碼方式，讓傳輸容忍度接近於香農極限值，容許更低的發射功率就可以達到傳輸的目的，輸出的數據類型為 byte。
- Interleaver：把編碼完畢的 BBFRAME 作 bit 交錯，以減少連串錯誤帶來的影響，輸出的數據類型為 byte。
- DVB-S2X Modulator：DVB-S2 調變器，輸出的數據類型為 complex。
- BCH Decoder & LDPC Decoder：透過外碼 BCH 與內碼 LDPC 的解碼器，將前面數據的編碼還原，輸出的數據類型為 byte。
- File Sink：將解調與解碼完成後的數據包儲存成一個檔案。

3.4.4 5G NR 發射頻寬實驗測試

根據 3GPP 所規範的 5G NR 傳輸頻寬規格，本實驗分別發射 5G NR 頻寬為 5、10、15、20MHz 做為測試，同時使用 ubuntu 系統上的 htop 指令來即時監控電腦系統資源的使用狀態，如圖 28 (a), (b), (c), (d)所示，我們可以發現在 CPU 的使用率（CPU%）與頻寬的增加呈現正比的關係，而電腦的核心數也會隨著頻寬的增加開始出現滿載的情況，而在記憶體的使用率（Mem%）則是沒有太大的改變。當 5G NR 頻寬發射超過 15MHz 時，GNU Radio 軟體上會出現一大串“U”的符號，這代表著所使用運算的電腦已經無法快速地提供數據給 USRP，進而造成電腦當機的情形發生，如圖 29 紅色框框內所示。因此本實驗將使用 5G NR 發射頻寬為 10MHz 以下的規格。

```

lab402@AsusLaptop: ~
1  [|||] 3.9% 4  [|||] 2.7% 7  [|||] 2.0% 10  [|||] 3.3%
2  [|||] 1.3% 5  [|||] 5.9% 8  [|||] 3.3% 11  [|||] 4.6%
3  [|||] 10.4% 6  [|||] 4.0% 9  [|||] 2.7% 12  [|||] 5.3%
Mem [|||||] 3.68G/15.5G Tasks: 156, 565 thr; 1 running
Swp [|||||] 0K/2.00G Load average: 0.79 0.50 0.34
Uptime: 1 day, 21:23:52

  PID USER      PRI  NI  VIRT   RES   SHR  S  CPU% MEM%   TIME+  Command
48349 root        20    0 2206M  217M  119M  S   65.4  1.4   0:36.44 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48394 root        20    0 2206M  217M  119M  S   10.6  1.4   0:05.17 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48375 root        20    0 2206M  217M  119M  S    5.9  1.4   0:03.67 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48383 root        20    0 2206M  217M  119M  S    4.6  1.4   0:02.64 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48384 root        20    0 2206M  217M  119M  S    4.0  1.4   0:02.02 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48382 root        20    0 2206M  217M  119M  S    4.0  1.4   0:02.10 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48386 root        20    0 2206M  217M  119M  S    4.0  1.4   0:01.71 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48388 root        20    0 2206M  217M  119M  S    4.0  1.4   0:01.77 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48392 root        20    0 2206M  217M  119M  S    3.3  1.4   0:02.24 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48390 root        20    0 2206M  217M  119M  S    3.3  1.4   0:01.59 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48387 root        20    0 2206M  217M  119M  S    3.3  1.4   0:01.84 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48391 root        20    0 2206M  217M  119M  S    3.3  1.4   0:01.73 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48385 root        20    0 2206M  217M  119M  S    2.6  1.4   0:01.60 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48389 root        20    0 2206M  217M  119M  S    2.6  1.4   0:01.81 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
F1Help F2Setup F3Search F4Filter F5Tree F6SortBy F7Nice F8Nice + F9Kill F10Quit

```

(a)

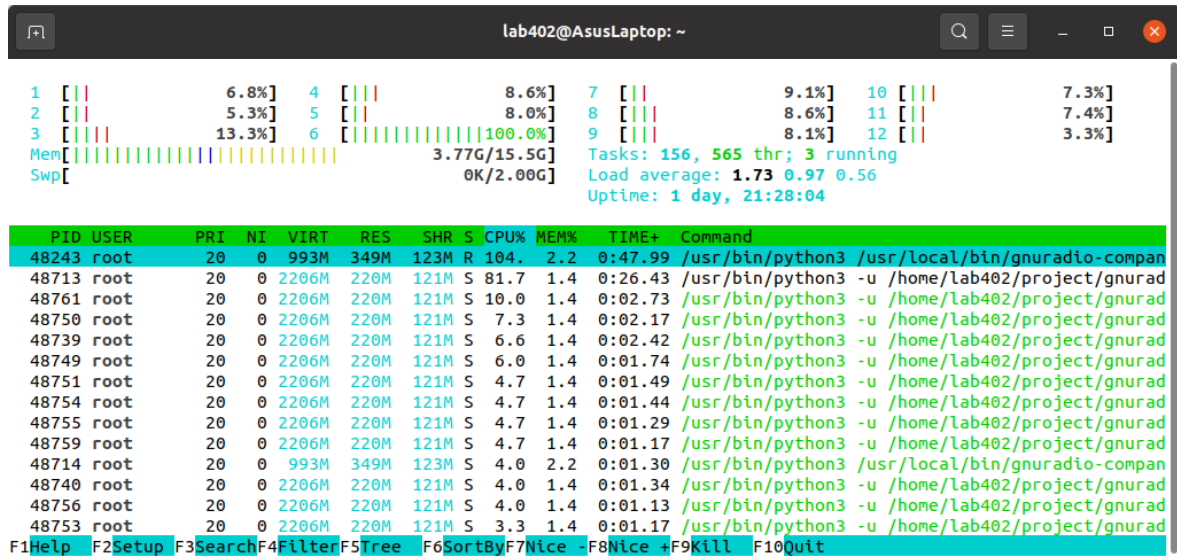
```

lab402@AsusLaptop: ~
1  [|||] 1.4% 4  [|||] 4.6% 7  [|||] 3.3% 10  [|||] 6.6%
2  [|||] 6.6% 5  [|||] 3.3% 8  [|||] 5.9% 11  [|||] 7.9%
3  [|||] 10.5% 6  [|||] 4.6% 9  [|||] 7.9% 12  [|||] 6.6%
Mem [|||||] 3.72G/15.5G Tasks: 155, 554 thr; 1 running
Swp [|||||] 0K/2.00G Load average: 1.30 0.69 0.44
Uptime: 1 day, 21:26:36

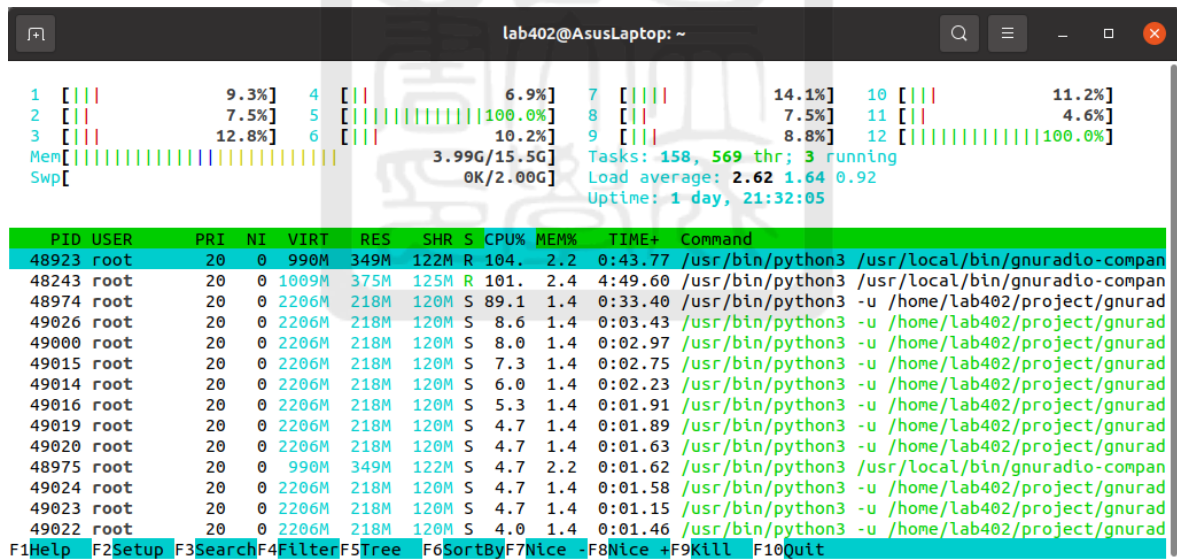
  PID USER      PRI  NI  VIRT   RES   SHR  S  CPU% MEM%   TIME+  Command
48582 root        20    0 2206M  219M  120M  S   69.4  1.4   0:25.38 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48627 root        20    0 2206M  219M  120M  S    7.3  1.4   0:02.78 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48616 root        20    0 2206M  219M  120M  S    6.6  1.4   0:02.47 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48615 root        20    0 2206M  219M  120M  S    6.6  1.4   0:01.96 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48617 root        20    0 2206M  219M  120M  S    5.3  1.4   0:01.60 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48608 root        20    0 2206M  219M  120M  S    4.6  1.4   0:01.84 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48621 root        20    0 2206M  219M  120M  S    4.6  1.4   0:01.42 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48620 root        20    0 2206M  219M  120M  S    4.0  1.4   0:01.59 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48625 root        20    0 2206M  219M  120M  S    4.0  1.4   0:01.31 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48614 root        20    0 2206M  219M  120M  S    4.0  1.4   0:01.14 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48619 root        20    0 2206M  219M  120M  S    3.3  1.4   0:01.33 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48622 root        20    0 2206M  219M  120M  S    3.3  1.4   0:01.21 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48618 root        20    0 2206M  219M  120M  S    2.6  1.4   0:01.11 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
48623 root        20    0 2206M  219M  120M  S    2.6  1.4   0:01.17 /usr/bin/python3 -u /home/lab402/project/gnurad
F1Help F2Setup F3Search F4Filter F5Tree F6SortBy F7Nice F8Nice + F9Kill F10Quit

```

(b)



(c)

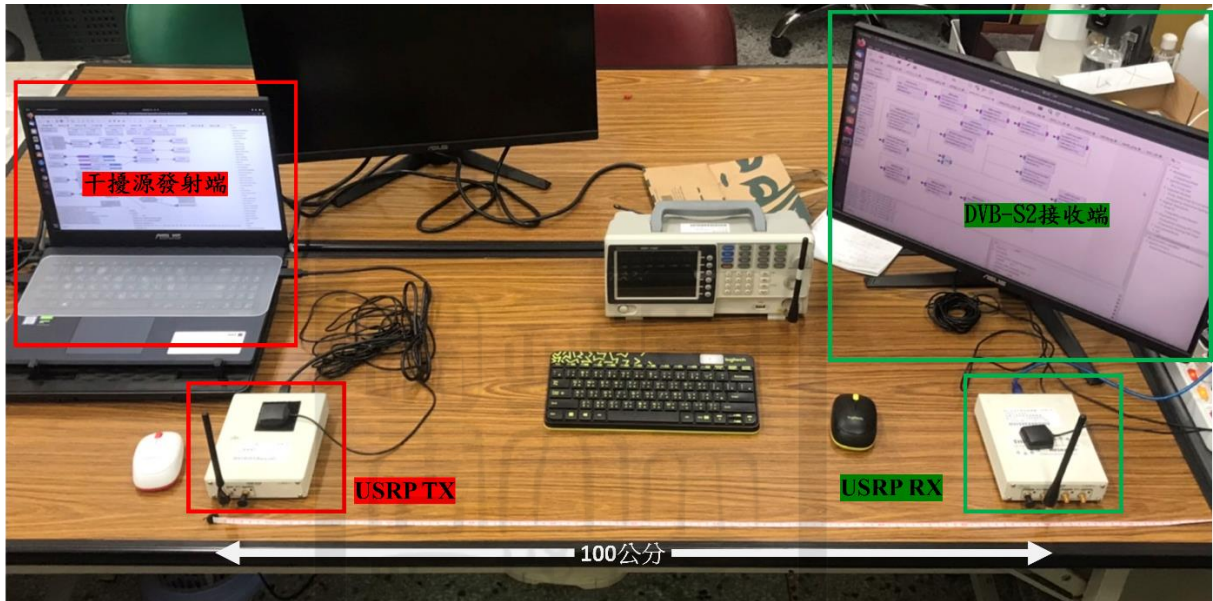


(d)

圖 28、5G NR 頻寬系統資源使用情形 (a)5MHz, (b)10MHz, (c)15MHz, (d)20MHz.

第四章 研究結果

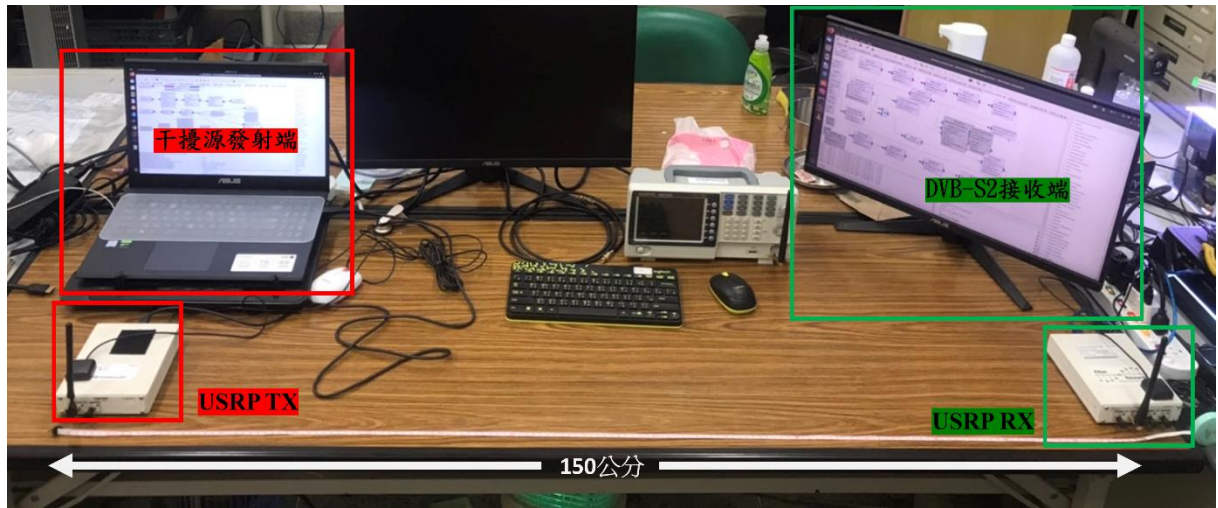
本章節根據 3.2 節的實驗情境來進行實作，並將實驗結果完整地呈現在此章。圖 30 (a), (b), (c), (d)，分別為同頻干擾實驗不同距離實際佈署情形，左方是以筆記型電腦連接 USRP B200 作為 5G NR 之干擾源發射端；右方是以桌上型電腦連接 USRP B210 作為 DVB-S2 系統來接收 5G NR 之干擾源，而接收端天線與干擾源發射端天線的距離分別設置為 100、125、150、175、200 公分。



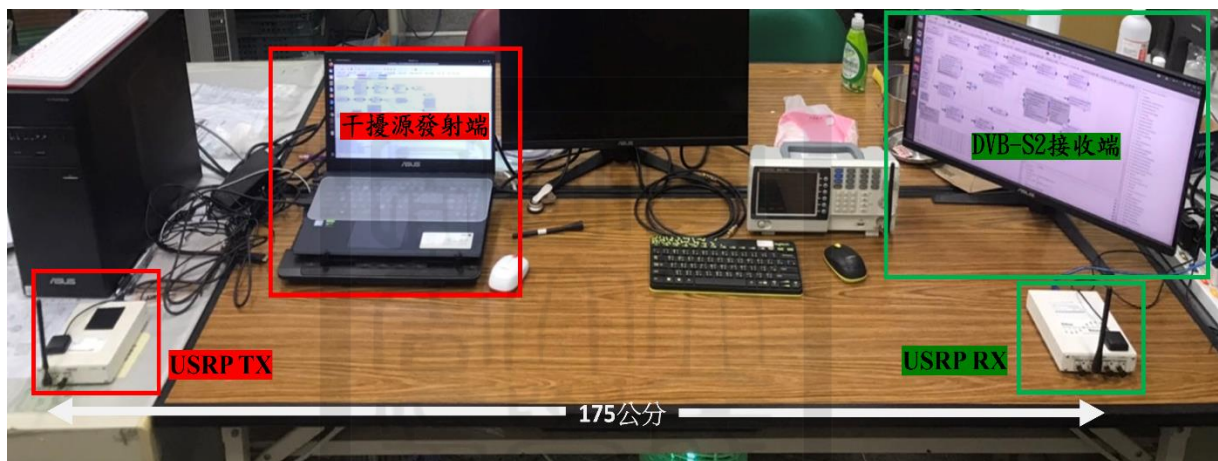
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

圖 30、同頻干擾實驗佈署距離 (a)100cm, (b)125cm, (c)150cm, (d)175cm, (e)200cm

4.1 5G 干擾源發射端與 DVB-S2 接收端執行成果

在 5G NR 干擾源的部分是以檔案 tx_ofdm.grc 之流程圖來發射符合 5G NR 標準的訊號，如圖 31 所示。而在 DVB-S2 接收端則是以檔案 dvbs2_rx.grc 之流程圖來接收干擾源訊號同時解調變與解碼影片檔，上方為接收到的干擾源訊號，下方為判斷 DVB-S2 影片檔之干擾狀況的星座圖如圖 32 所示。

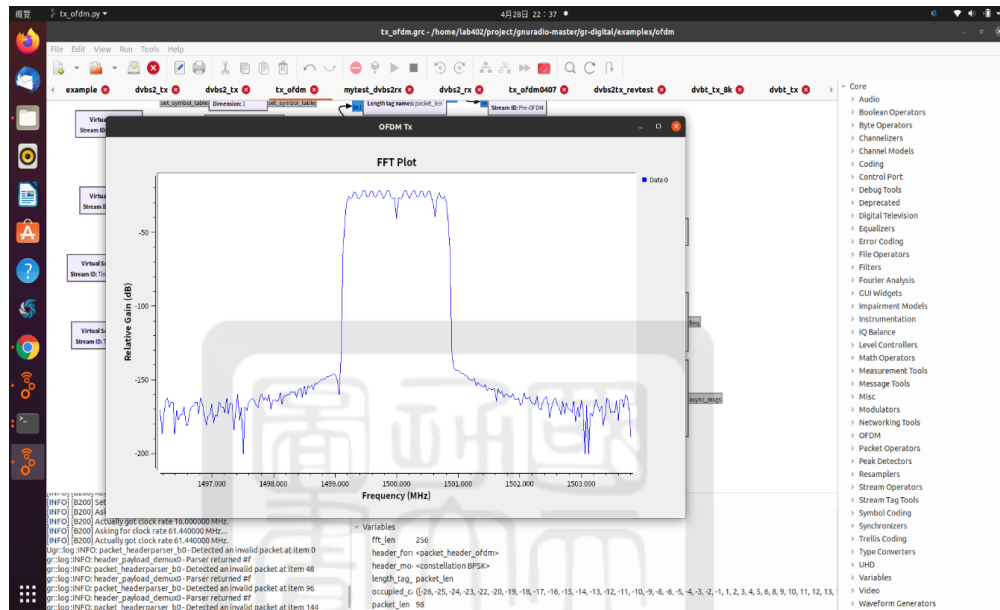


圖 31、檔案 tx_ofdm.grc 流程圖之執行頻譜圖

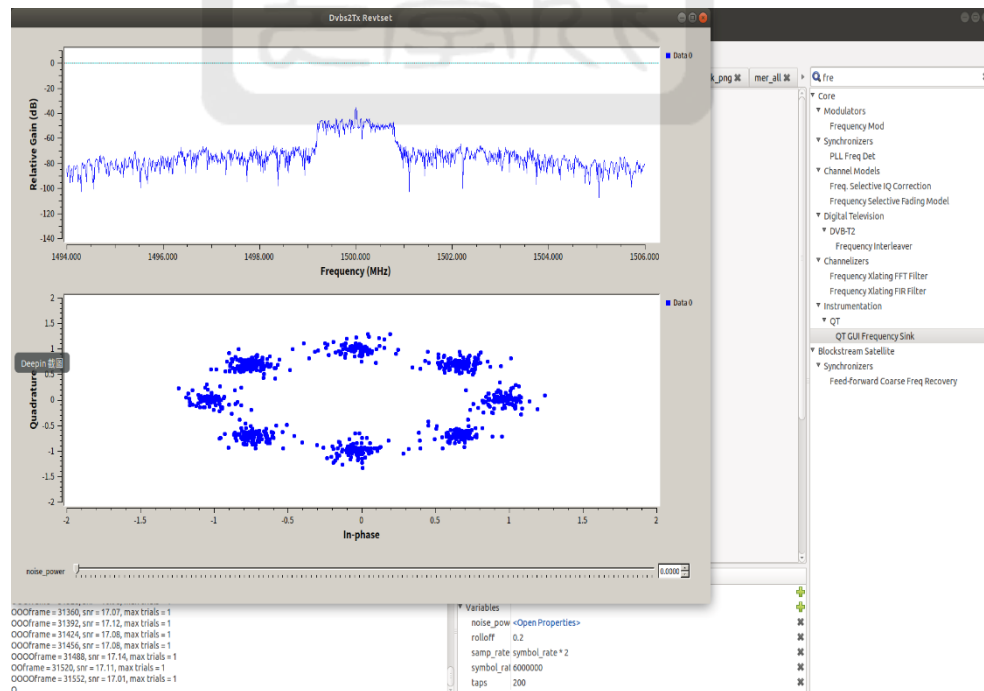


圖 32、檔案 dvbs2_rx.grc 流程圖之執行畫面

4.2 星座圖觀察

本研究透過觀察星座圖來判斷 DVB-S2 是否有被干擾與破壞，以及被干擾破壞的程度如何，星座圖是利用 GNU Radio 內部程式所產生出來的。本研究在星座圖的部分是選擇 8PSK 的調變方式，因此在圖 33 中會看到 8 個聚集的點，為 8PSK 的星座圖，在沒有被干擾或是干擾的訊號強度與距離較小時，可以看到明顯且清楚的 8 個點。

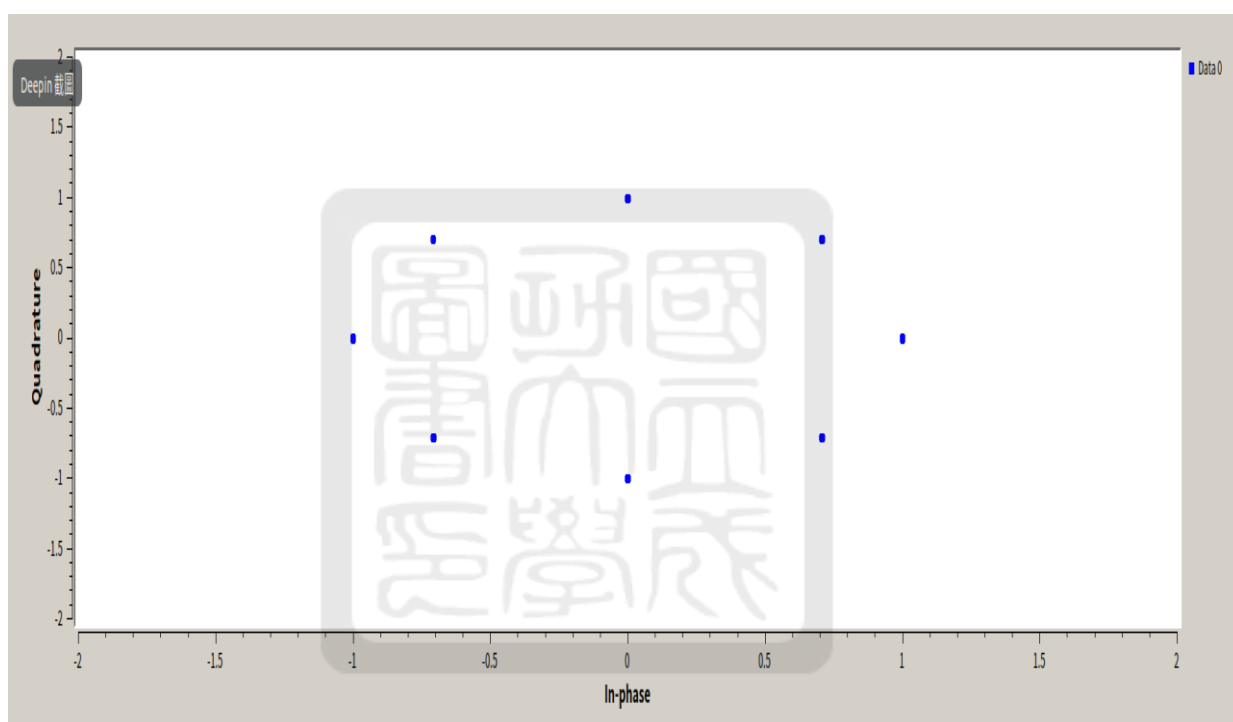


圖 33、無干擾時的 8PSK 星座圖

圖 34 則是接收端在有干擾源時的 8PSK 星座圖，可以發現在 8PSK 星座圖上可以看到星座圖的點已經被打散，呈現許多點凌亂散布在星座圖上，看不出聚集的 8 個點，意味著接收到干擾的情況發生。

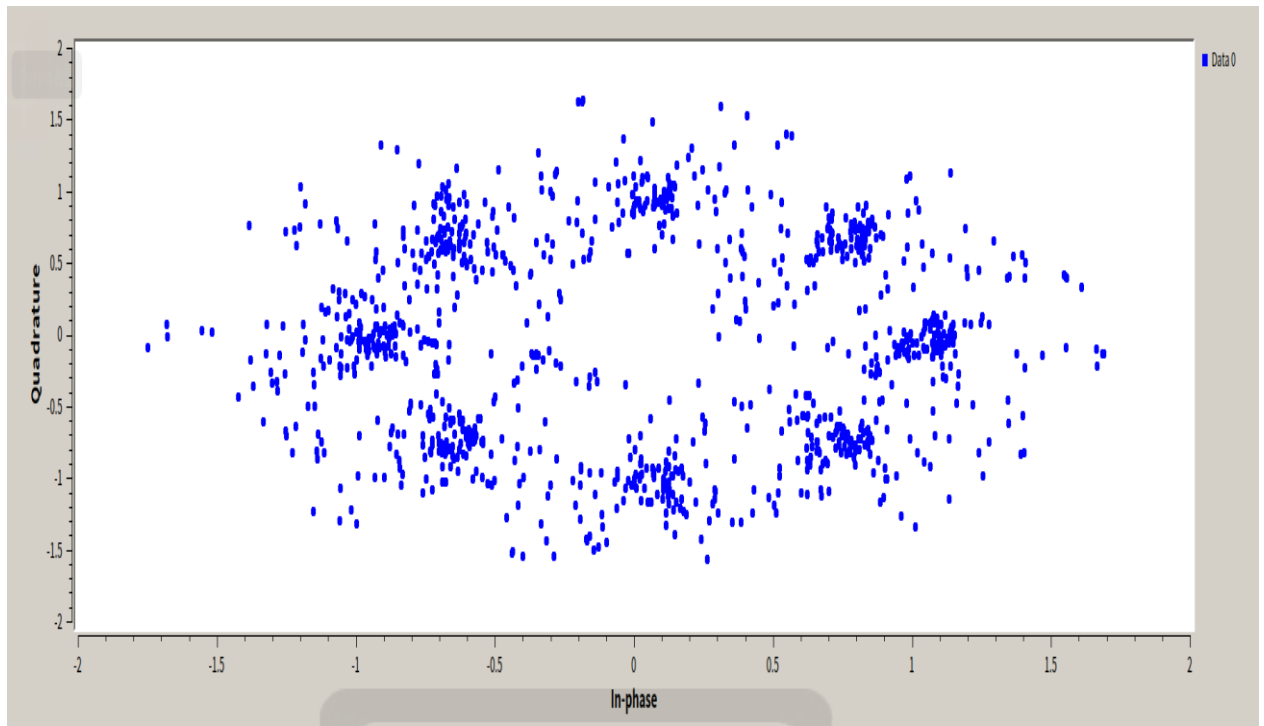


圖 34、有干擾時的 8PSK 星座圖

4.3 干擾源訊號於頻譜分析儀上觀察

本研究為了確認 5G NR 干擾源訊號透過 USRP B200 發射出來的訊號強度對應於頻譜儀上顯示的功率大小為何，因此透過筆記型電腦連接 USRP B200，搭配在 GNU Radio 上所使用的 tx_ofdm.grc 流程圖來發射出 5G NR 的干擾訊號，再透過實體電纜線連結 USRP B200 與 GSP-730 型號的頻譜分析儀來觀察訊號的頻寬與功率強度大小，如圖 35 所示。從圖中可以看出，在 GNU Radio 執行檔案 tx_ofdm.grc 之流程圖來發射干擾訊號時，USRP B200 的 TX 端孔會亮紅色的燈，代表目前 USRP B200 在發射訊號，從右方頻譜分析儀上可以看出接收到的中心頻率、頻寬以及功率大小。

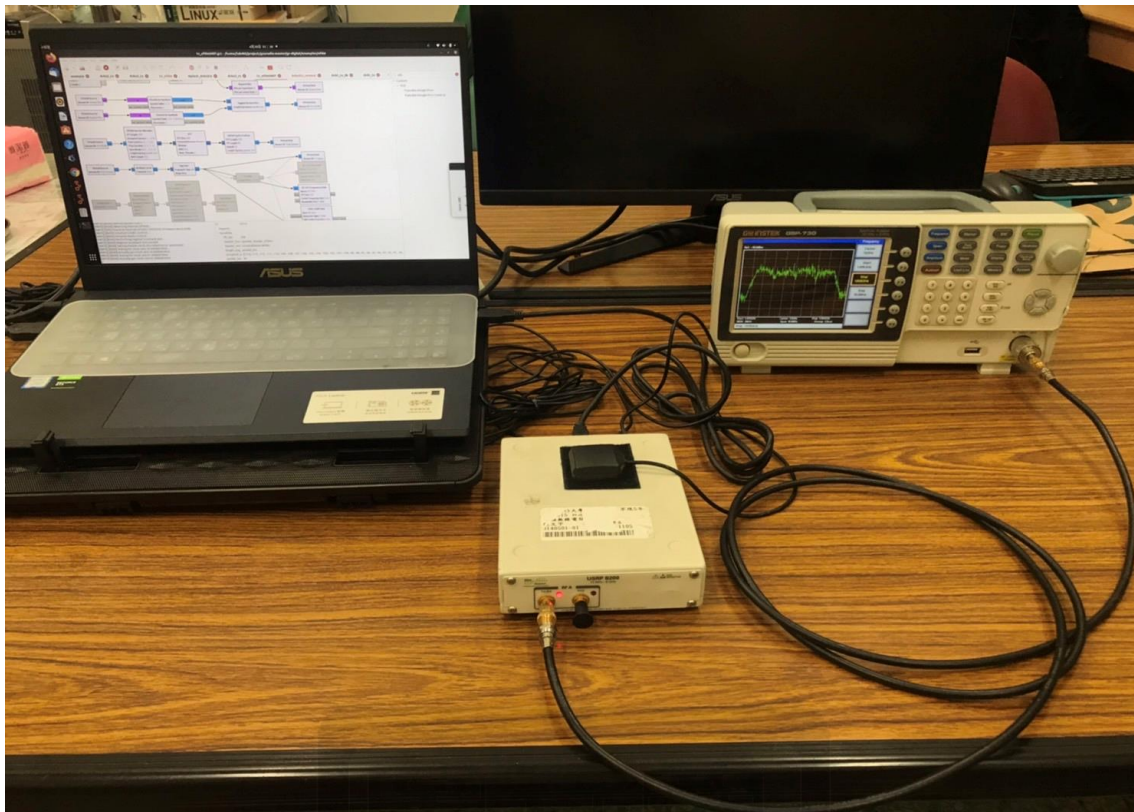
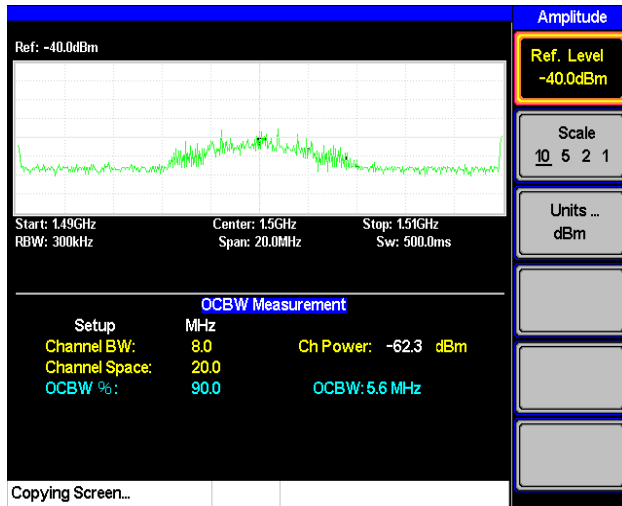
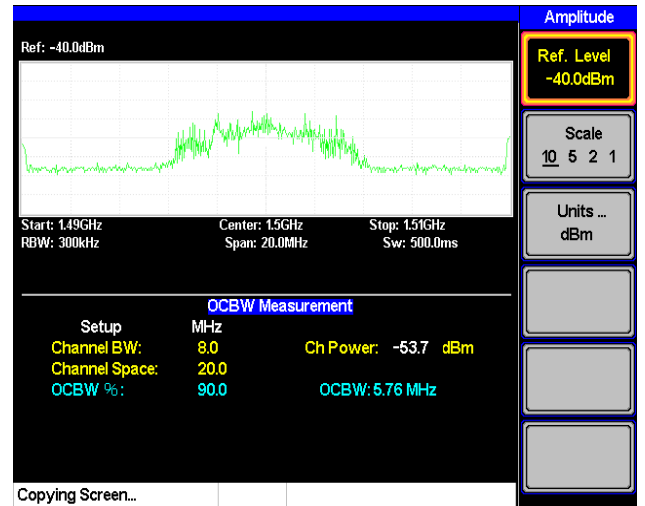


圖 35、干擾訊號於頻譜分析儀上校正

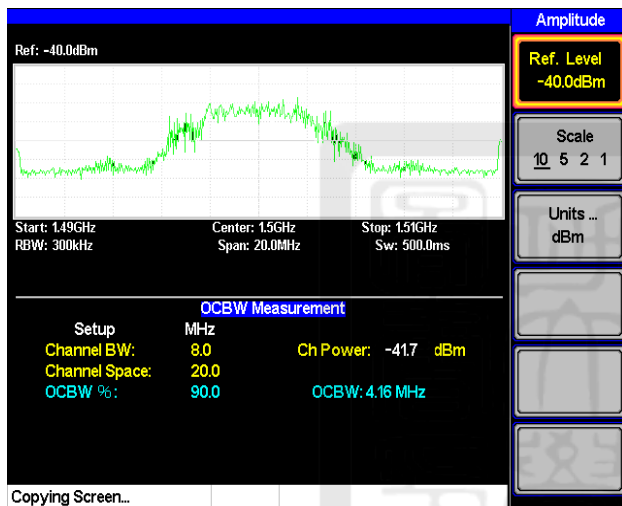
圖 36 為不同 5G 干擾源訊號增益值從 GNU Radio 軟體上發射，從增益值 (gain) 10dB 開始測量，以每 10dB 為單位往上測量到 100dB，再於頻譜儀上觀察所對應到的頻寬與訊號大小的 dBm 值為何，以此來校正從 USRP B200 發射出的訊號 dB 值與頻譜分析儀上顯示訊號 dBm 值之對應關係。從下圖可以發現到當干擾源增益值從 10dB 依序調到 80dB 時，頻譜分析儀上顯示對應的通道功率數值為 -62.3dBm 到 6dBm，訊號強度是相對增長的，但當干擾源增益值調到 90dB，理論上頻譜分析儀通道功率的數值應大約為 20dBm，不過頻譜分析儀上顯示的通道功率數值為 12.7dBm，且干擾源增益值為 100dB 亦是如此，所以我們可以發現當干擾源增益值調到 90dB 以上時，通道功率的規律已不復存在。因此能夠得知在本實驗中，干擾源透過 USRP 所發射出訊號的電功率最大可以到達 6dBm (增益值為 80dB)。



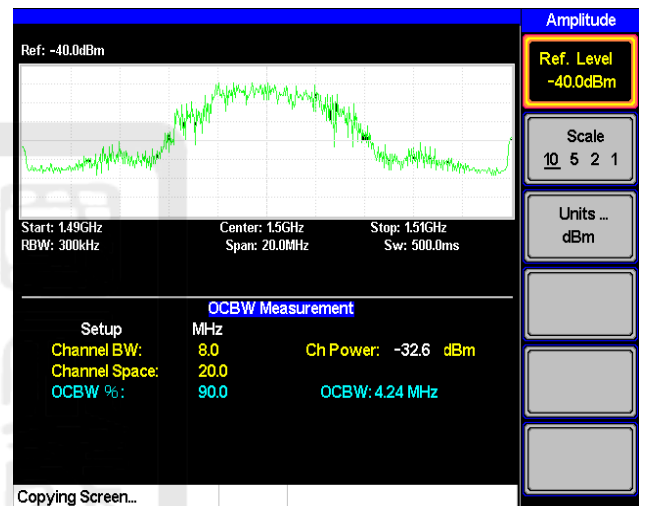
(a)



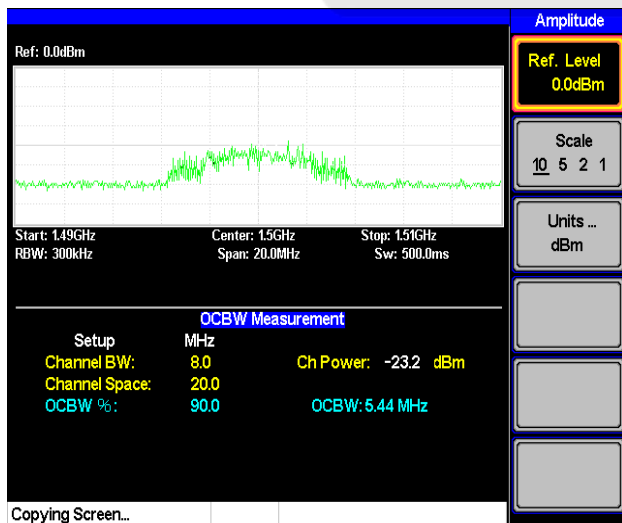
(b)



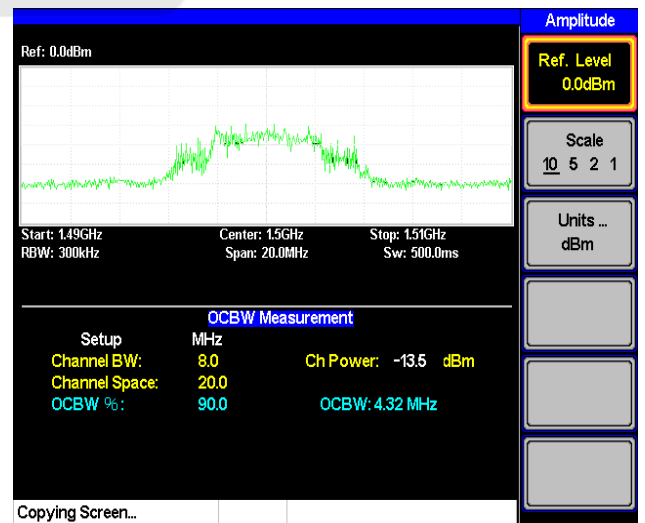
(c)



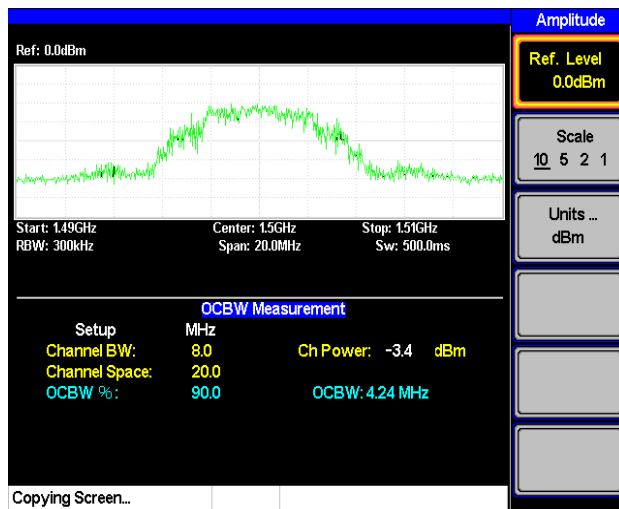
(d)



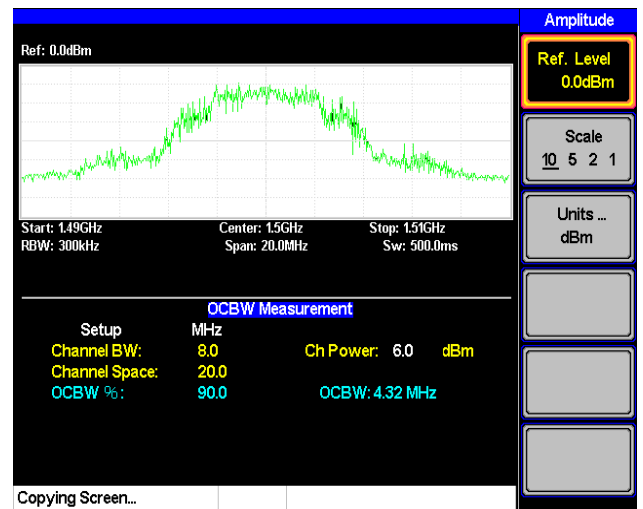
(e)



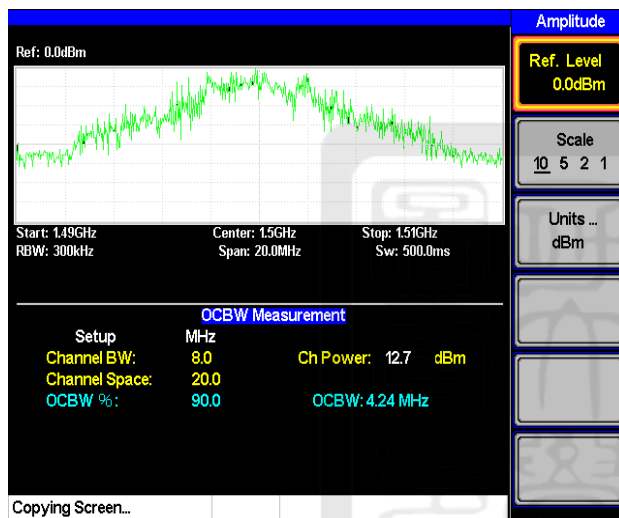
(f)



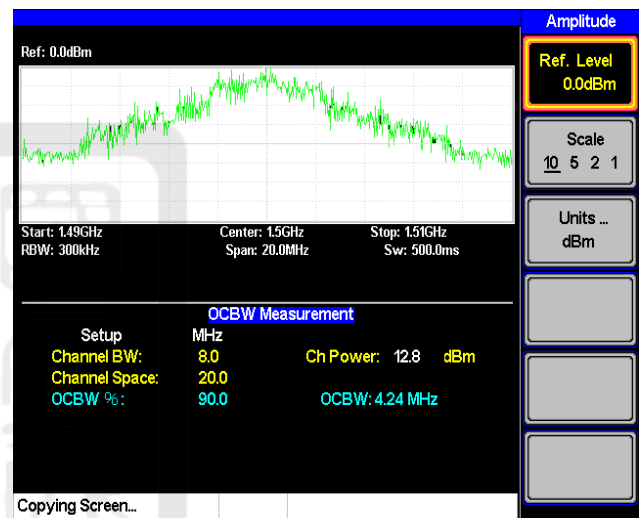
(g)



(h)



(i)



(j)

圖 36、干擾源訊號增益值於頻譜分析儀上之對應通道功率 (a)10dB, (b)20dB, (c)30dB, (d)40dB, (e)50dB, (f)60dB, (g)70dB, (h)80dB, (i)90dB, (j)100dB

4.4 影片清晰度觀察

本研究透過觀察解調變及解碼 MPEG-2 TS 檔後的影片來判斷被干擾破壞的情形，並且我們統一擷取影片檔第 15 秒時的畫面，來比較不同干擾源發射端的電功率值對於影片畫質產生的影響狀況，透過節目影片中第 15 秒之畫面來分析干擾破壞的嚴重程度，以下為同頻干擾的實驗結果。

4.4.1 同頻干擾

因於 Github 上的 DVB-S2 流程圖為開發者所設計，其 DVB-S2 的發射與接收皆是在基頻，並未到射頻，因此本實驗配合此 DVB-S2 的流程圖將中心頻率降頻至 1.5G。本實驗固定 5G NR 干擾源發射端的中心頻率為 1.5GHz，固定干擾源天線與接收端天線的距離分別為 100、125、150、175、200 公分，且分別透過調整干擾源發射端的電功率為 -20.3dBm（增益值 57dB）、-19.1dBm（增益值 58dB）、-18.2dBm（增益值 59dB）、-17.4dBm（增益值 60dB）、-16.2dBm（增益值 61dB）、-15.2dBm（增益值 62dB）、-14.2dBm（增益值 63dB）、-13.0dBm（增益值 64dB）此八種；同時固定 DVB-S2 接收端的中心頻率為 1.5GHz，而接收端 USRP B210 設定之電功率則隨著干擾源發射端之電功率來跟隨調整，使其接收端收到其干擾源發射端所發射之電功率大小。影片檔在解調解碼完後於 VLC 媒體播放器上來觀看節目影片，由於節目影片中每秒被干擾破壞的程度皆不相同，造成每秒節目影片中的清晰程度也皆不相同，圖 37 至圖 41 分別為在距離干擾源 100、125、150、175、200 公分，且在同一個中心頻率下，調整不同的電功率大小，並統一擷取接收端節目影片第 15 秒時的畫面，以此來判斷節目影片被干擾破壞的情形。

首先，將干擾源天線與接收端天線的距離設為 100 公分，固定干擾源發射的電功率為以上八種，從圖 37 中節目影片的畫面可以發現，當干擾源發射端的電功率越大，節目影片的畫面被干擾破壞的程度越大，當干擾源發射端的電功率在小於 -19.1dBm（增益值 58dB）時，節目影片的畫面都相當清晰，但從 -18.2dBm（增益值 59dB）開始節目影片的畫面逐漸模糊不清，甚至到 -16.2dBm（增益值 61dB）以上時，節目影片在解碼的過程中因錯誤率太多而造成無法成功還原出節目影片，顯示出被干擾極為嚴重。

接著，將干擾源天線與接收端天線的距離增為 125 公分，其他設定參數皆保持不變，來評估節目影片被干擾的程度如圖 38 所示，當干擾源發射端的電功率在小於-18.2dBm（增益值 59dB）時，節目影片的畫面都相當清楚，但從-17.4dBm（增益值 60dB）開始節目影片的畫面會逐漸不清楚且還會暫存前幾秒的畫面，無法完整解析該秒數的畫面，即為被干擾的情形逐漸嚴重，甚至到-15.2dBm（增益值 62dB）以上時因錯誤率太高而無法還原出節目影片。

接續，將干擾源天線與接收端天線的距離增為 150 公分，其他設定參數皆保持不變，來評估節目影片被干擾的程度如圖 39 所示，當干擾源發射端的電功率在小於-17.4dBm（增益值 60dB）時，節目影片的畫面都相當清楚，但從-16.2dBm（增益值 61dB）開始節目影片的畫面會逐漸不清楚且還會暫存前幾秒的畫面，而到-14.2dBm（增益值 63dB）以上時因錯誤率太高而無法還原出節目影片。

再來，將干擾源天線與接收端天線的距離增為 175 公分，其他設定參數皆保持不變，來評估節目影片被干擾的程度如圖 40 所示，當干擾源發射端的電功率在小於-15.2dBm（增益值 62dB）時，節目影片的畫面都十分清楚，但在-14.2dBm（增益值 63dB）時節目影片的畫面會逐漸不清楚且有殘影，而到-13.0dBm（增益值 64dB）以上時因錯誤率太高而無法還原出節目影片。

最後，將干擾源天線與接收端天線的距離增為 200 公分，其他設定參數皆保持不變，來評估節目影片被干擾的程度如圖 41 所示，當干擾源發射端的電功率在-20.3dBm（增益值 57dB）至-13.0dBm（增益值 64dB）區間，節目影片的畫面都非常清楚，代表距離已經足夠遠，已經能夠避免同頻干擾情形發生。

從以上與干擾源發射端五種不同距離的情形下，由距離近到遠逐步增加來實驗，並且固定八種不同的電功率，可以發現距離干擾源越近，受到干擾破壞的情形越嚴重；反之距離干擾源越遠，節目影片的畫質越清晰可見。



(a)



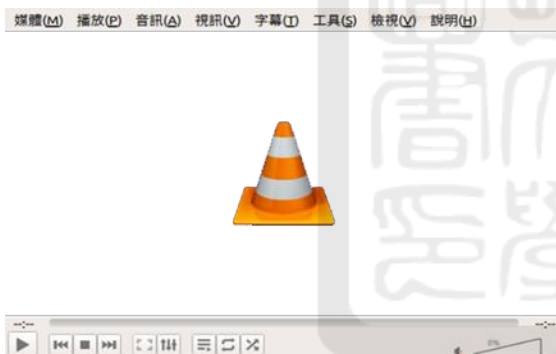
(b)



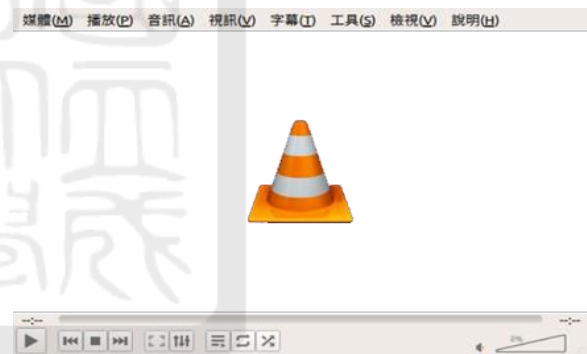
(c)



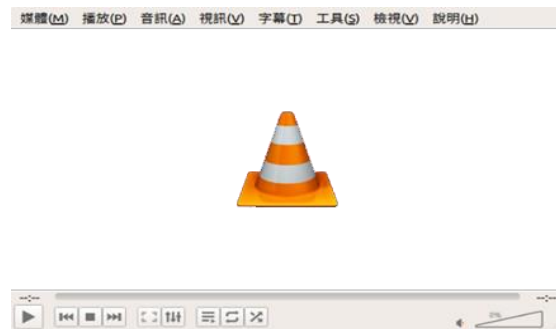
(d)



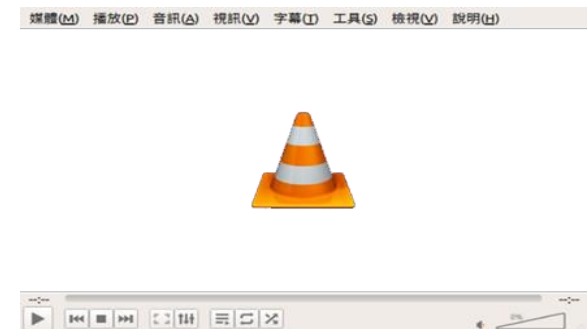
(e)



(f)



(g)



(h)

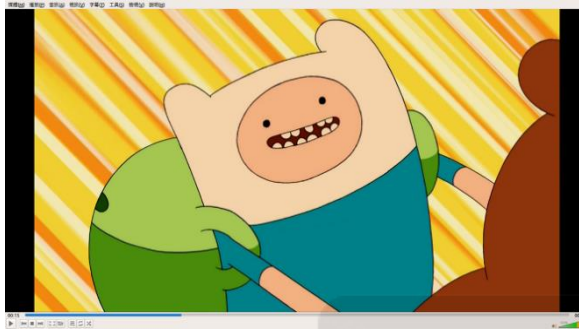
圖 37、距離 100cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm



(a)



(b)



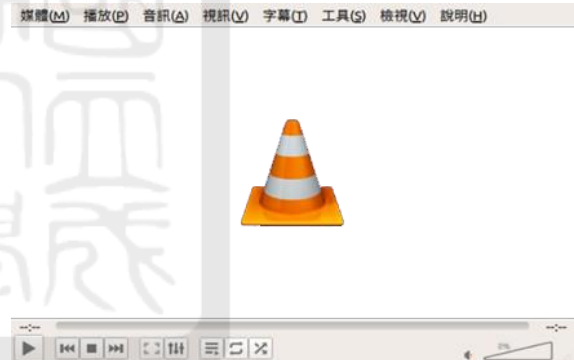
(c)



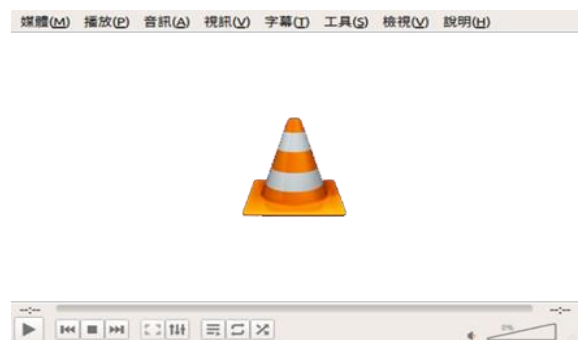
(d)



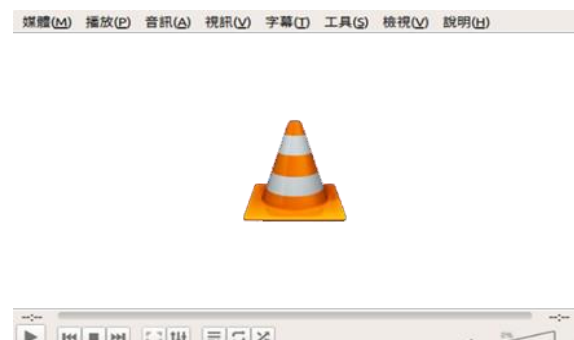
(e)



(f)



(g)



(h)

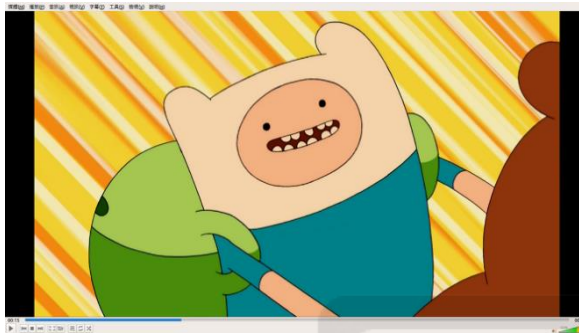
圖 38、距離 125cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm



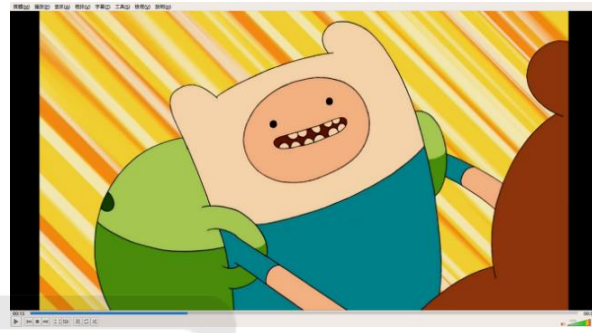
(a)



(b)



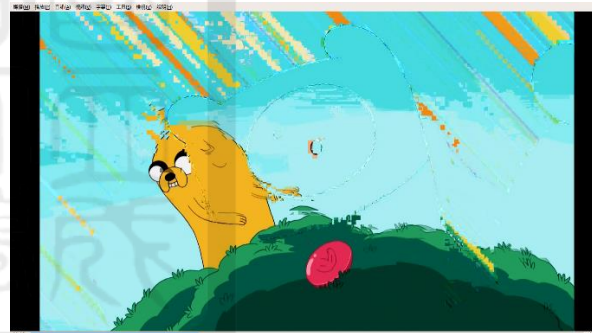
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

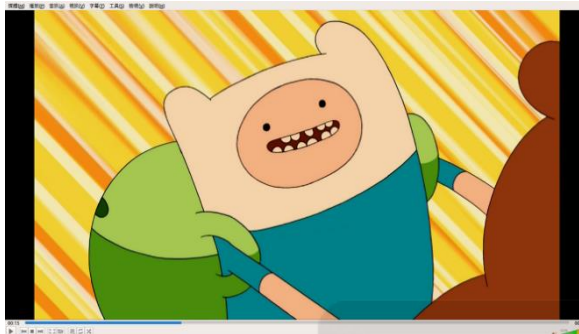
圖 39、距離 150cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm



(a)



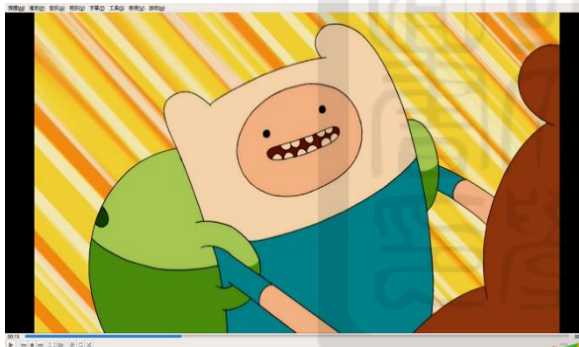
(b)



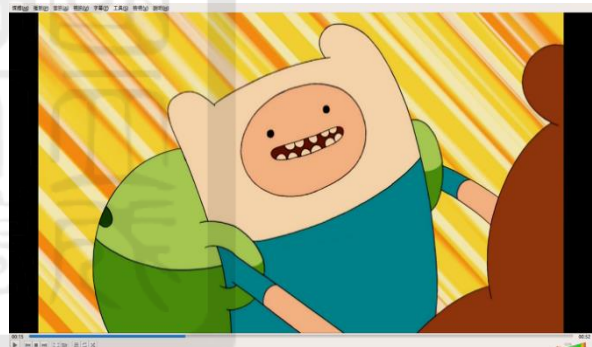
(c)



(d)



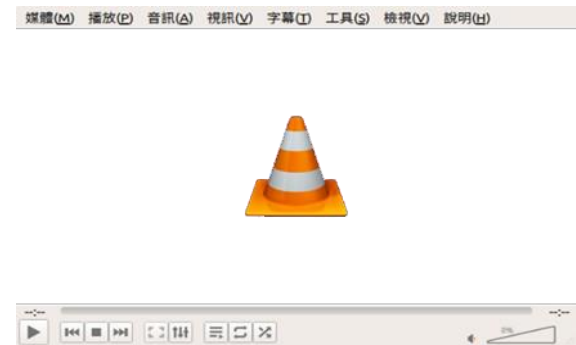
(e)



(f)



(g)



(h)

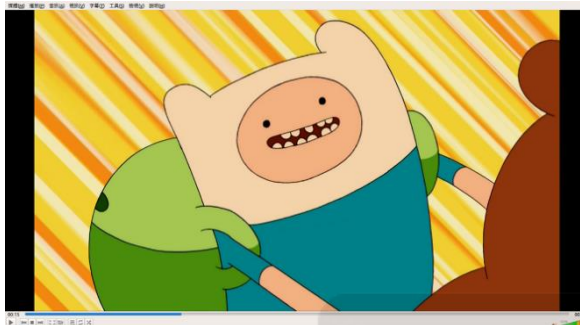
圖 40、距離 175cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm



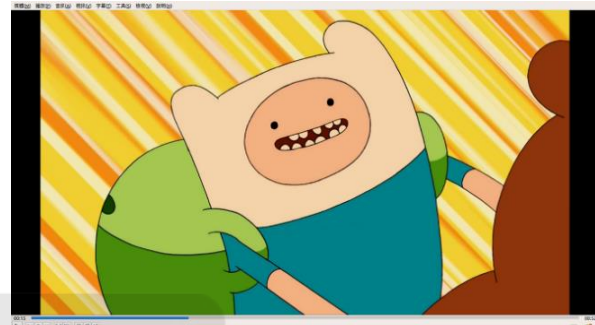
(a)



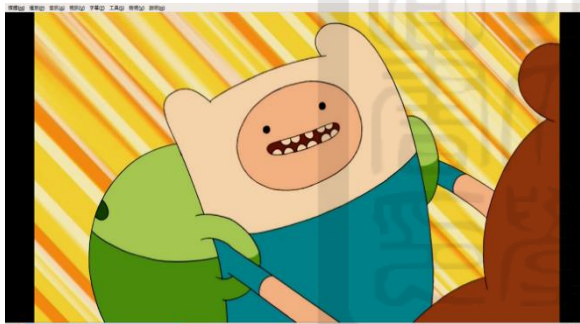
(b)



(c)



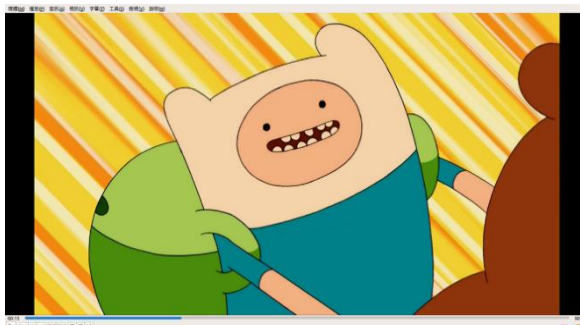
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

圖 41、距離 200cm 時節目影片之畫面 (a)-20.3dBm, (b)-19.1dBm, (c)18.2dBm, (d)-17.4dBm, (e)-16.2dBm, (f)-15.2dBm, (g)-14.2dBm, (h)-13.0dBm

4.5 實驗數據

4.5.1 干擾源訊號於頻譜儀上之對應關係

在實驗中透過調整 GNU Radio 軟體上干擾源發射出的訊號電功率大小來改變干擾源的訊號強度，且將干擾源發射出的訊號利用實體纜線連結頻譜分析儀，以此來校正干擾源訊號強度顯示於頻譜分析儀上之訊號大小，從圖 42 中可以看出實驗的干擾發射訊號增益值與頻譜分析儀訊號強度呈現了正比關係，表示干擾源的增益值越大，頻譜分析儀收到的訊號功率強度也越大，只有當干擾源增益值為 90dB 以上，頻譜分析儀訊號逐漸趨於平滑，意味著在 GNU Radio 軟體平台上連接 USRP 的功率無法再往上增加。

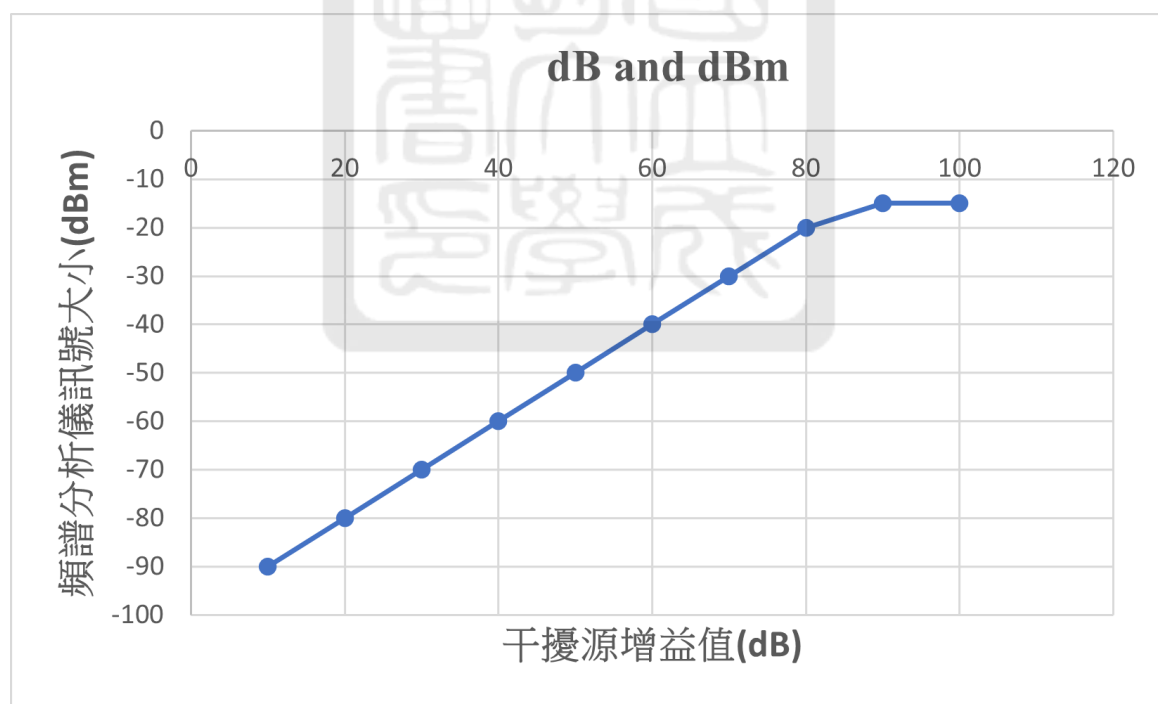
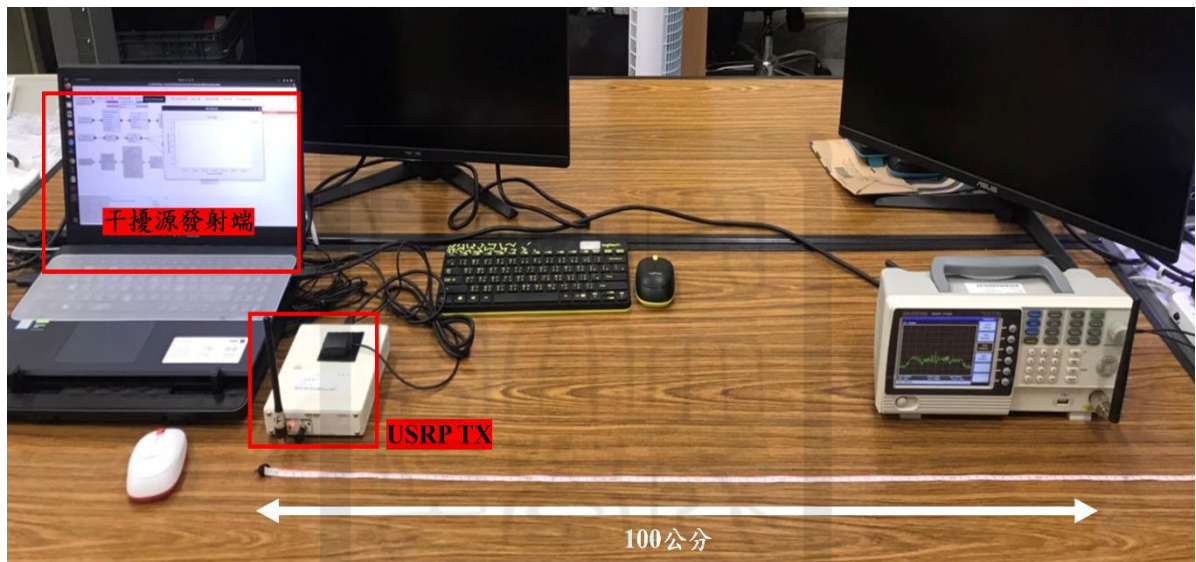


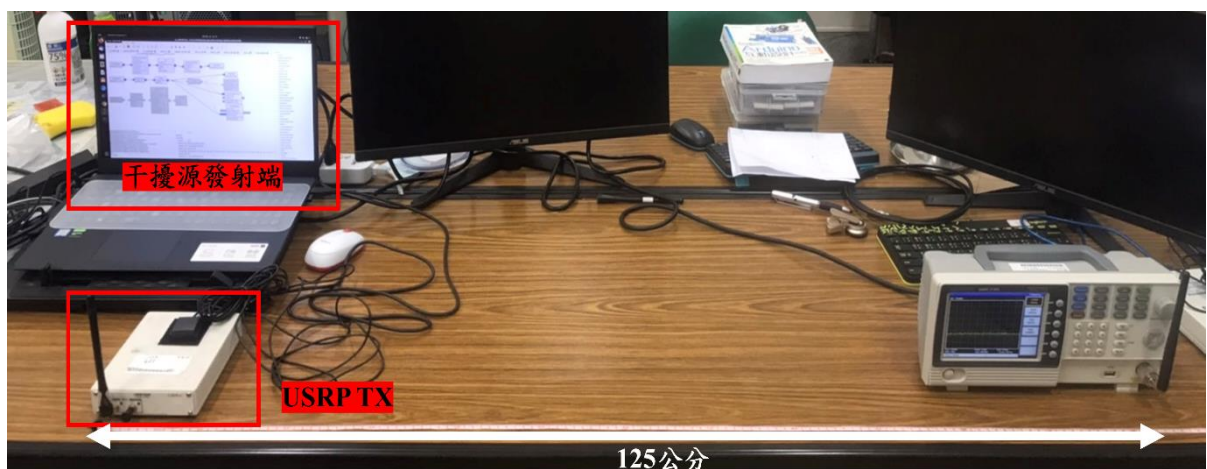
圖 42、干擾源強度與頻譜儀強度對應之關係

4.5.2 同頻干擾

在同頻干擾的實驗中，為了得到干擾源的功率大小，我們使用了頻譜分析儀 GSP-730 來測量，在頻譜分析儀之天線與干擾源發射端之天線兩者之間距離分別為 100、125、150、175、200 公分的位置，以無線通訊的方式來測量干擾源訊號的中心頻率、頻寬與功率值，如圖 43 所示，以發射 5G NR 干擾源訊號中心頻率為 1.5GHz、電功率為-17.4dBm（增益值 60dB）的訊號為例，在頻譜分析儀接收端收到的通道功率如圖 44 所示。



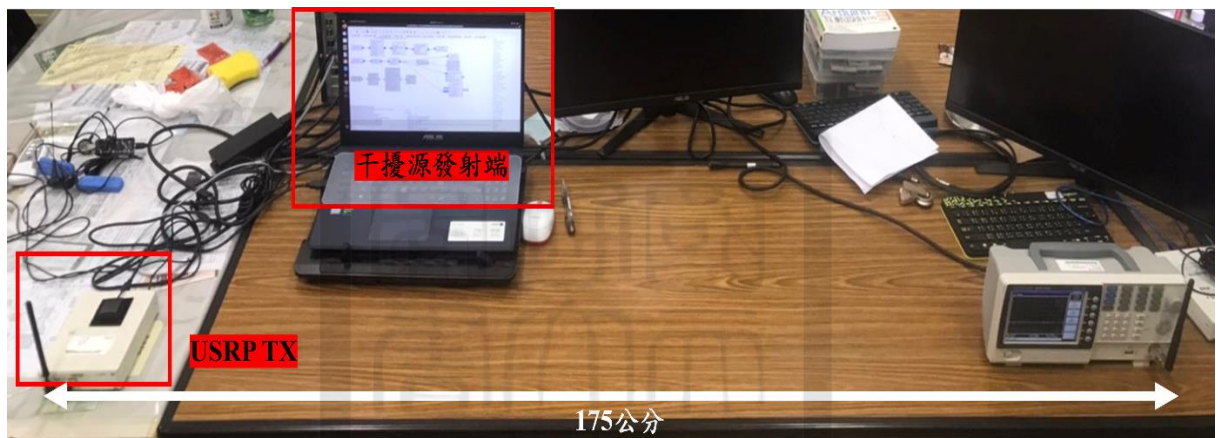
(a)



(b)



(c)

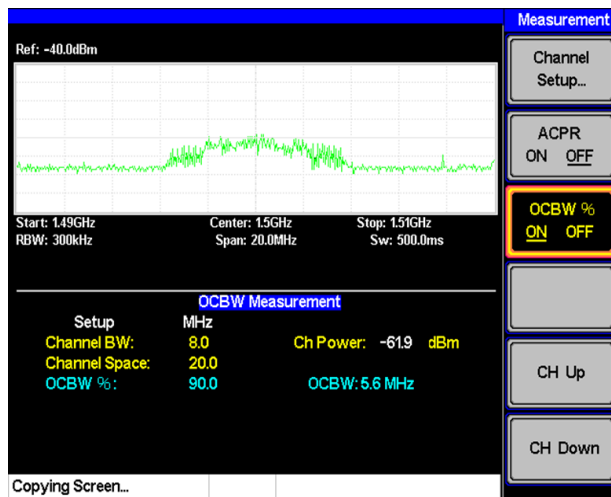


(d)

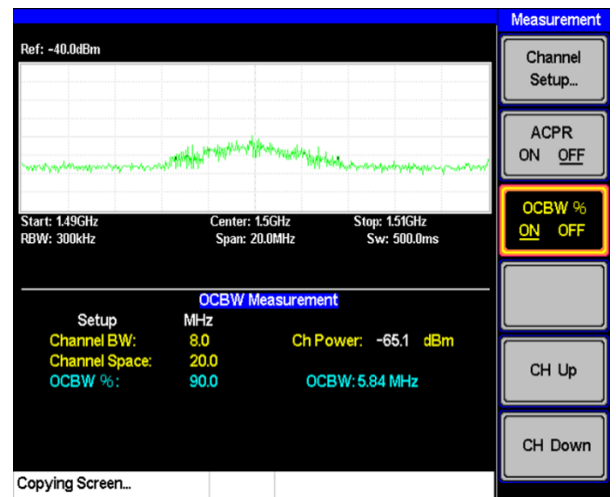


(e)

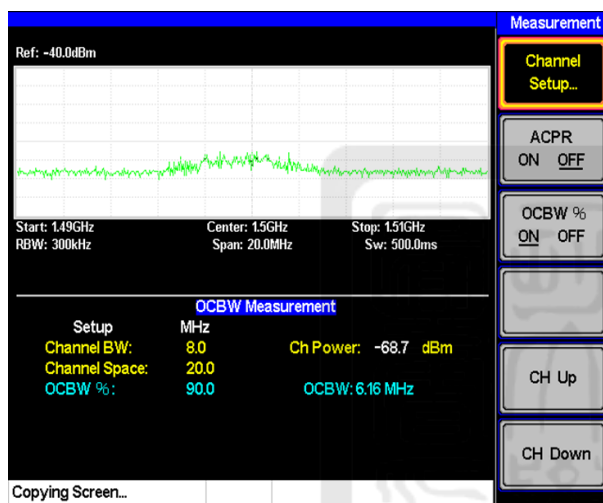
圖 43、測量同頻干擾時干擾源的頻譜訊號 (a)100cm, (b)125cm, (c)150cm, (d)175cm, (e)200cm



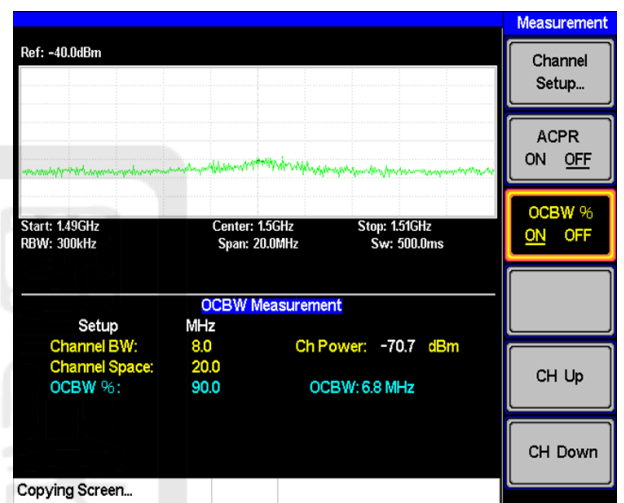
(a)



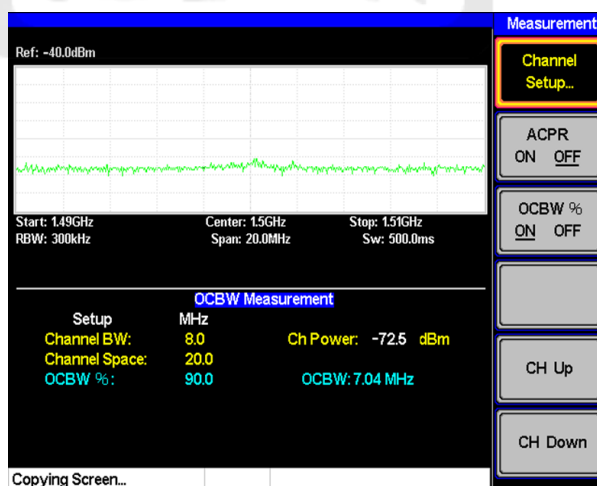
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 44、干擾源-17.4dBm (60dB) 與頻譜儀距離之通道功率 (a)100cm, (b)125cm, (c)150cm, (d)175cm, (e)200cm

根據 4.3 節中使用實體纜線測量干擾源的結果可以發現，使用實體纜線連接 USRP B200 所測量到干擾源增益值為 60dB 時，頻譜分析儀顯示的通道功率大小為-17.4dBm；而在干擾源連結天線打出訊號到空氣中，透過這種無線的傳輸方式，在距離 100 公分的位置，頻譜分析儀收到的通道功率訊號大小為-61.9dBm，可以得出干擾源在同樣的電功率大小下，且在距離相差 100 公分的位置，無線的傳輸會比有線的傳輸功率減少大約 40dB 的功率大小。

在同頻干擾的實驗後，我們可以從 VLC 媒體播放器上蒐集節目影片之相關統計數據，由於節目影片中每一秒的遺失數量都是動態變化的，為了方便資料數據的統計，我們統一蒐集節目影片中從第 1 秒到第 30 秒時的數據資料。每一種距離與其八種電功率值實驗測試皆做五次，並將五次實驗所得到的遺失的音訊遺失數、視訊遺失數、視訊遺失數取五次後之平均並記錄在下表中。

表 4 至表 8 分別為同頻干擾實驗中在距離干擾源 100、125、150、175、200 公分，不同干擾強度的電功率對節目影片造成遺失數據統計，音訊遺失數表示因破壞而遺失的音訊個數，視訊遺失數表示因破壞而遺失的畫面張數，輸入丟棄數表示在讀取輸入時因破壞而丟棄的資料數。

表 4、同頻干擾實驗統計數據（100cm）

干擾源的 通道功率	干擾源發射的 增益值	音訊遺失數	視訊遺失數	輸入丟棄數
-16.3dBm	57dB	0	0	0
-15.5dBm	58dB	0	0	0
-14.4dBm	59dB	0	2	9
-13.5dBm	60dB	0	4	24
-12.3dBm	61dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示
-11.4dBm	62dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示
-10.5dBm	63dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示
-9.3dBm	64dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示

表 5、同頻干擾實驗統計數據（125cm）

干擾源的 通道功率	干擾源發射的 增益值	音訊遺失數	視訊遺失數	輸入丟棄數
-16.3dBm	57dB	0	0	0
-15.5dBm	58dB	0	0	0
-14.4dBm	59dB	0	0	0
-13.5dBm	60dB	0	4	13
-12.3dBm	61dB	0	6	156
-11.4dBm	62dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示
-10.5dBm	63dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示
-9.3dBm	64dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示

表 6、同頻干擾實驗統計數據（150cm）

干擾源的 通道功率	干擾源發射的 增益值	音訊遺失數	視訊遺失數	輸入丟棄數
-16.3dBm	57dB	0	0	0
-15.5dBm	58dB	0	0	0
-14.4dBm	59dB	0	0	0
-13.5dBm	60dB	0	0	0
-12.3dBm	61dB	0	2	18
-11.4dBm	62dB	0	4	193
-10.5dBm	63dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示
-9.3dBm	64dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示

表 7、同頻干擾實驗統計數據（175cm）

干擾源的 通道功率	干擾源發射的 增益值	音訊遺失數	視訊遺失數	輸入丟棄數
-16.3dBm	57dB	0	0	0
-15.5dBm	58dB	0	0	0
-14.4dBm	59dB	0	0	0
-13.5dBm	60dB	0	0	0
-12.3dBm	61dB	0	0	0
-11.4dBm	62dB	0	0	0
-10.5dBm	63dB	0	8	192
-9.3dBm	64dB	無資料數顯示	無資料數顯示	無資料數顯示

表 8、同頻干擾實驗統計數據（200cm）

干擾源的 通道功率	干擾源發射的 增益值	音訊遺失數	視訊遺失數	輸入丟棄數
-16.3dBm	57dB	0	0	0
-15.5dBm	58dB	0	0	0
-14.4dBm	59dB	0	0	0
-13.5dBm	60dB	0	0	0
-12.3dBm	61dB	0	0	0
-11.4dBm	62dB	0	0	0
-10.5dBm	63dB	0	0	0
-9.3dBm	64dB	0	0	0

第五章 結論

5.1 軟體定義無線電的可行性

經過本研究的實驗後，可以得知在 5G NR 的系統中，透過本研究的電腦效能之 GNU Radio 軟體設計的模塊並且連接 USRP B200 與 USRP B210 之硬體所能發射出 OFDM 訊號頻寬最大為 10MHz，若頻寬再往上加大，會使頻寬與取樣率過大，進而造成電腦的 CPU 會負荷不了，導致當機的情況發生，因此呼應 1.2 節的研究目的之第一點與第二點，在本實驗所架構的軟體定義無線電中，5G NR 的發射頻寬在小於 10MHz 時，是一個可執行的實驗平台。

5.2 同頻干擾的影響

在同頻干擾的實驗部分，從實驗結果可以得知在相同距離條件下，干擾源訊號的電功率越大，則對節目影片畫質的破壞越大；而在相同干擾源電功率條件下，距離越近，則對節目影片畫質的破壞越大，與研究[13]所提出的結果相符，當訊號雜訊比越大，也就是訊號強度越強，雜訊越弱時，訊號在接收解調解碼時受到干擾破壞的影響就會越小。

5.3 有線傳輸與無線傳輸之差異

在頻譜分析儀上測量干擾源發射的訊號透過連結實體纜線的部分可以得知，在距離 100 公分的條件下，當干擾源發射端的增益值為 60dB 時，於 USRP 透過實體纜線連接頻譜分析儀上測得的訊號功率大小為-13.5dBm；但若改成透過天線發射至空氣中，於頻譜分析儀上所測得的訊號功率大小為-61.9dBm，以此可以得知在無線傳輸的環境中，訊號的衰弱程度會特別顯著。

5.4 研究限制

本研究是以 MPEG-2 TS 的影片檔作為 DVB-S2 的受害者，而非即時接收數位衛星廣播電視之訊號，因即時接收會因地理位置、天線增益與方向、衛

星方位與角度和氣候等因素影響，在實驗中較難控制，因此透過 TS 影片檔的傳輸格式來進行軟體解調與解碼的動作，並改變軟體中模塊的設計與參數，使得 5G NR 干擾源可以對影片檔造成影響，因此不影響實驗結果。

5.5 未來研究建議

本研究的干擾源訊號是基於 5G NR 標準來設定參數，因其標準之 FFT Size 較大，也會使頻寬與取樣率較大，因此對於電腦處理速度的要求較高，建議必須使用 CPU 處理速度規格較好的電腦來進行實驗，以滿足軟體執行與高速運算的需求。然而在實驗環境中，是以我們電管所研究室作為實驗的環境，在實驗環境中有眾多物體會使電波反射而造成多重路徑干擾，且有許多電磁波充斥於空氣中，形成不穩定因素，因此建議未來可以於無反射實驗室來進行此項研究。



參考文獻

- [1] 財團法人台灣經濟研究院, "因應政策調整或停用無線電頻率所涉補償費用之鑑價評估委託研究採購案期末報告," report 2020. [Online]. Available: https://www.ncc.gov.tw/chinese/files/20091/5138_45046_200914_1.pdf.
- [2] T. Haryanti and K. Anwar, "Frequency Domain-Extended Coded Random Access Scheme for Spectrum Sharing between 5G and Fixed Satellite Services," in *2019 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, 2019: IEEE, pp. 143-149.
- [3] Ł. Kułacz *et al.*, "Coordinated Spectrum Allocation and Coexistence Management in CBRs-SAS Wireless Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 139294-139316, 2019.
- [4] 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception ETSI, July 2020.
- [5] NCTU, "OFDM." [Online]. Available: <https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/45879/7/350507.pdf>.
- [6] ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)," Aug 2009.
- [7] G. Hattab, P. Moorut, E. Visotsky, M. Cudak, and A. Ghosh, "Interference analysis of the coexistence of 5G cellular networks with satellite earth stations in 3.7-4.2 GHz," in *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2018: IEEE, pp. 1-6.
- [8] H. Tan, Y. Liu, Z. Feng, and Q. Zhang, "Coexistence analysis between 5G system and fixed-satellite service in 3400–3600 MHz," *China Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 25-32, 2018.
- [9] E. Lagunas, C. G. Tsinos, S. K. Sharma, and S. Chatzinotas, "5G cellular and fixed satellite service spectrum coexistence in C-band," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 72078-72094, 2020.
- [10] A. W. Group, "APT REPORT ON MITIGATION MEASURES TO IMPROVE SHARING AND COMPATIBILITY BETWEEN 4G-LTE AND 5G-NR SYSTEMS AND OTHER SYSTEMS OPERATING IN PORTIONS OF 3300 – 4200 MHZ," report 2021.
- [11] D. Xu, G. Zhang, and X. Ding, "Analysis of co-channel interference in low-orbit satellite Internet of Things," in *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2019: IEEE, pp. 136-139.
- [12] N. Golmie, N. Chevrollier, and O. Rebala, "Bluetooth and WLAN coexistence: challenges and solutions," *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 6, pp. 22-29, 2003.

- [13] 王紫瑜, "以軟體定義無線電技術分析數位無線電視頻段之干擾," 2020.
- [14] Y. Chaiko and M. Dzhamanshalov, "Coexistence between mobile and digital television systems," in *2014 55th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2014: IEEE, pp. 120-123.
- [15] E. Research, "USRP B200." [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/ub200-kit/>.
- [16] E. Research, "USRP B210." [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.
- [17] E. Research, "USRP B200 mini." [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini/>.
- [18] GNURadio, "GNURadio." [Online]. Available: <https://www.gnuradio.org/>.
- [19] drmpeg, "gr-dvbs2." [Online]. Available: <https://github.com/drmpeg/gr-dvbs2>.

