

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

智慧型軟體無線電 UWB Ad-Hoc 通信系統研究

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫  
計畫編號：NSC 96-2623-7-009-004-D  
執行期間：96年 1月 1日至 96年 12月 31日

計畫主持人：唐震寰  
共同主持人：李大嵩、鍾世忠、張志揚、方凱田、陳棟洲  
計畫參與人員：莊秉文

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學電信工程系

中 華 民 國 97年 3月 31日

# 目 錄

中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
1. 研究方法.....	3
1.1 UWB 天線模組之開發與實作.....	3
1.2 UWB 射頻模組之開發與實作.....	6
1.3 UWB 基頻模組之開發與實作.....	9
1.3.1 UWB 基頻模組.....	9
1.3.2 SDR 模組.....	11
1.3.3 MAC 模組之開發與實作.....	12
1.4 UWB 混合式多重擇路協定與 AD HOC 多重跳躍式實驗平台之開發與效能實測.....	16
2. UWB 天線設計與量測.....	21
2.1 前言.....	21
2.2 研究方法.....	22
2.3 天線設計.....	24
2.4 模擬與量測結果.....	25
2.5 結論以及未來展望.....	28
3. 超寬頻射頻傳收機模組.....	29
3.1 前言.....	29
3.2 研究方法.....	29
3.2.1 UWB RF 收發機.....	29
3.2.2 RF 收發模組.....	30
收發模組實體電路.....	30
3.2.3 IF 收發模組.....	31
4. UWB 基頻模組.....	33
4.1 前言.....	33
4.2 UWB 基頻收發機系統模擬平台介紹.....	33
4.2.1 Lyrtech VHS-DAC.....	33
4.2.2 Lyrtech VHS-ADC.....	34
4.3 UWB 基頻收發機系統模擬平台實現.....	34
4.3.1 基頻模組傳送端.....	34
4.3.2 基頻模組接收端.....	34
4.3.2.1 同步.....	34
4.3.2.2 解展頻.....	35
4.3.2.3 解調和傳送.....	35
4.3.3 基頻模組與 MAC 模組的聯結.....	35
4.3.3.1 控制訊號與工作流程.....	35

4.3.3.2	系統驗證.....	35
4.3.4	基頻模組與 RF 模組的聯結.....	36
4.3.4.1	系統架構.....	36
4.3.4.2	控制訊號.....	36
4.3.4.3	工作流程.....	36
4.3.4.4	系統驗證.....	37
4.4	參考文獻.....	45
5.	MAC 模組模組之開發設計與實作.....	46
5.1	MAC 模組之開發與實作.....	46
5.1.1	MAC 協定.....	46
5.1.2	MAC 模組之軟硬體架構.....	46
5.2	MAC 模組之設計.....	48
5.2.1	MAC Kernel Module.....	48
5.2.1.1	MAC 執行緒 (MAC Thread).....	48
5.2.1.2	Tx Protocol.....	49
5.2.1.3	Rx Protocol.....	49
5.2.1.4	與上層 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組之介面程式.....	51
5.2.1.5	Linux 程式運作空間之間的介面程式 (Proc File System).....	52
5.2.2	GPIO Controller.....	53
5.2.3	MAC 與基頻模組的介面電路設計.....	54
5.3.	MAC 模組之功能測試.....	56
5.3.1	RTS/CTS 機制之測試.....	56
5.3.2	CSMA/CA 機制之測試.....	58
5.4.	MAC 模組之介面測試.....	63
5.4.1	與 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組之介面測試.....	63
5.4.2	與基頻模組之介面測試.....	65
6.	AD-HOC 混合式多重繞徑協定.....	70
6.1	簡介.....	70
6.2	SCALABLE MULTICAST ROUTING PROTOCOL (SMRP).....	71
6.2.1	設計考量.....	71
6.2.2	演算法.....	71
6.2.3	SMRP 協定特色與比較.....	71
6.2.4	實作方法.....	71
6.2.5	模組與介面測試.....	72
6.2.6	MAC 模組與 Ad-hoc 模組介面測試(R6).....	77
6.3	ENERGY CONSERVING MULTICAST ROUTING PROTOCOL(ECMRP).....	82
6.3.1	設計目標.....	82
6.3.2	演算法.....	82
6.3.3	模擬與結果分析.....	83

6.3.4 結論.....	84
6.4 參考文獻.....	85
7. 總語.....	86
7.1 系統之整合.....	86
7.2 測試規劃.....	87
7.3 測試結果.....	88
7.4 結語.....	89

# 圖目錄

圖 1-1	4
圖 1-2	4
圖 1-3 平面印刷式天線	5
圖 1-4	5
圖 1-5	6
圖 1-6	6
圖 1-7	6
圖 1-8 新規劃的射頻前端模組之系統架構方塊圖	7
圖 1-9 射頻模組中擬定使用之各個元件規格與供應商，以及擬定之測試方塊圖。	7
圖 1-10 包含中頻模組之整體射頻模組之系統方塊圖。	8
圖 1-11 基頻架構方塊圖：(a)傳送端，(b)接收端。	10
圖 1-12 Lyrtech 通訊系統發展平台	11
圖 1-13 SDR 控制介面	11
圖 1-14 分散式協調的處理程序	13
圖 1-15 後退程序(backoff procedure)的執行範例	13
圖 1-16 隱藏節點問題(hidden node problem)	14
圖 1-17 RTS/CTS 機制的動作流程	14
圖 1-18 MAC 模組之傳送程序	15
圖 1-19 MAC 模組之接收程序	15
圖 1-20 所有節點間皆採用樹狀結構連結	16
圖 1-21 子群組間採用網狀結構連接	16
圖 1-22 本研究多重跳躍式實驗平台之系統方塊圖	18
圖 1-23 多重跳躍式實驗平台之室內點對多點效能測試情境	20
圖 1-24 採用 RPGMM 群體移動模式之數位戰士班兵移動行為案例	20
圖 2-1	22
圖 2-2	23
圖 2-3	23
圖 2-4	23
圖 2-5	23
圖 2-6	24
圖 2-7	24
圖 2-8	25
圖 3-1 UWB RF 收發機系統架構圖	29
圖 3-2 RF 收發機系統使用的關鍵零組件	30
圖 3-3 RF 收發模組實體電路	31
圖 3-4 IF 收發模組架構圖	31
圖 3-5 IF 收發模組實體電路	31
圖 4-1 基頻模組平台全貌。	37

圖 4-2 Lyrtech VHS-DAC 模組。	37
圖 4-3 Lyrtech VHS-ADC 模組。	37
圖 4-4 傳送端實現電路圖	38
圖 4-5 接收端實現電路圖	38
圖 4-6 碼擷取	38
圖 4-7 路徑搜尋	39
圖 4-8 資料解展頻電路實現圖	39
圖 4-9 DBPSK 解調電路實現圖	39
圖 4-10 DQPSK 解調電路實現圖	39
圖 4-11 基頻模組傳送端 GPIO 控制訊號定義。	40
圖 4-12 基頻模組接收端 GPIO 控制訊號定義。	40
圖 4-13 MAC 與基頻模組連測示意圖	40
圖 4-14 MAC 模組傳送之訊框	41
圖 4-15 邏輯分析儀收到之結果 (一個訊框)	41
圖 4-16 圖 4-15 的前四個位元組 (bytes)	42
圖 4-17 MAC 模組收到來自基頻模組的訊框	42
圖 4-18 基頻、RF 模組聯結架構圖。	42
圖 4-19 基頻-RF 介面工作流程	43
圖 4-20 LMX2433 跳頻誤差測試 (第 1 組)	43
圖 4-21 LMX2433 跳頻誤差測試 (第 10 組)	43
圖 4-22 RF 模組輸出 (增益設定第 5 組)	44
圖 4-23 RF 模組輸出 (增益設定第 9 組)	44
圖 5-1 媒體存取控制模組軟體架構	47
圖 5-2 MAC Kernel Module 運作流程	48
圖 5-3 MAC 執行緒流程圖	49
圖 5-4 傳送封包之程式流程圖	50
圖 5-5 接收封包之程式流程圖	51
圖 5-6 IP 封包穿越 Netfilter 系統示意圖	52
圖 5-7 Proc file	53
圖 5-8 ARM 子板與 FPGA 子板的 GPIO 腳位規劃圖	53
圖 5-9 GPIO Controller 運作流程圖	54
圖 5-10 媒體存取控制模組與基頻模組的腳位規劃圖	55
圖 5-11 測試環境示意圖	56
圖 5-12 實際測試環境場景圖	57
圖 5-13 傳送端工作站 A 之終端機顯示	58
圖 5-14 接收端工作站 B 之終端機顯示	58
圖 5-15 傳送端工作站 A 之終端機顯示	59
圖 5-16 接收端工作站 B 之終端機顯示	59
圖 5-17 傳送端工作站 A 之終端機顯示	60
圖 5-18 接收端工作站 B 之終端機顯示	61
圖 5-19 傳送端工作站 A 之終端機顯示	61

圖 5-20 接收端工作站 B 之終端機顯示 .....	62
圖 5-21 介面測試環境示意圖 .....	63
圖 5-22 實際測試環境場景圖 .....	63
圖 5-23 由 Ad hoc 隨意網路繞徑模組所發送之 UDP broadcast packet 內容 .....	64
圖 5-24 由 MAC 模組所收取之 128 bytes UDP broadcast packet 內容 .....	64
圖 5-25 由 MAC 模組所回傳之 128 bytes UDP broadcast packet 內容 .....	65
圖 5-26 由 Ad hoc 模組所接收之 UDP broadcast packet 內容 .....	65
圖 5-27 介面測試環境示意圖 .....	66
圖 5-29 媒體存取控制模組的終端顯示 .....	67
圖 5-30 邏輯分析儀擷取基頻模組接收之媒體存取控制模組測試訊框 .....	67
圖 5-31 邏輯分析儀擷取基頻模組接收之媒體存取控制模組測試訊框 .....	67
圖 5-32 邏輯分析儀產生之測試訊框內容 .....	68
圖 5-33 邏輯分析儀擷取到基頻模組傳送給媒體存取控制模組之信號 .....	68
圖 5-34 媒體存取控制模組之顯示終端機顯示接收到基頻模組傳送之測試訊框內容 .....	69
圖 6-1 Node A 快照 .....	74
圖 6-2 Node C 快照 .....	74
圖 6-3 Node D 快照 .....	74
圖 6-4 Node E 快照 .....	75
圖 6-5 Node C 快照 .....	75
圖 6-6 Node D 快照 .....	76
圖 6-7 Node E 加入後的 Node .....	77
圖 6-8 R6-01 Ad hoc 模組與 MAC 模組介面測試示意圖 .....	78
圖 6-9 R6-02 Ad hoc 模組與 MAC 模組介面測試實體照片 .....	78
圖 6-10 R6-03 Ad hoc 模組發送 128 bytes ICMP 封包至 MAC 模組之接收結果：接收之封包 內容與發送封包內容一致 .....	80
圖 6-11 R6-04 Ad hoc 模組發送 128 bytes UDP broadcast 封包至 MAC 模組之接收結果：接收 之封包內容與發送封包內容一致 .....	80
圖 6-12 R6-05 MAC 模組回傳至 Ad hoc 模組之 128 bytes UDP broadcast 封包接收結果：接收 之封包內容與發送封包內容一致 .....	81
圖 6-13 來源節點 S 欲傳送資料封包至接收端 R1 與 R2；在 ECMR 協定中，將由初始網狀 結構 {S,I1,I2,R1,R2} 演變為 {S,I2,R1,R2}。 .....	83
圖 7-1 本研究之超寬頻 ad-hoc 全系統架構與其介面規範 .....	86
圖 7-2 全系統測試架構與其介面示意圖 .....	87
圖 7-3 本計畫實驗室與全系統測試場景 .....	88
圖 7-4 全系統測試結果之驗證 .....	89

# 表 目 錄

表 1-1 Ad-Hoc 通訊系統與擇路演算法之實地效能評估項目 .....	18
表 3-1 LMX2433 控制訊號腳位定義.....	30
表 3-2 AL7230 控制訊號腳位定義 .....	32
表 4-1 LMX2433 控制訊號腳位定義.....	44
表 4-2 AL7230 控制訊號腳位定義 .....	44
表 4-3 跳頻頻段 .....	45



## 中文摘要

本計畫發展之「智慧型軟體無線電之 UWB Ad-Hoc 通信系統」，應具下列功能：(1) 運用『UWB 技術』設計「數位戰士」所需之通信系統，以提供高速、安全、強韌之傳輸鏈路；(2)藉由『Ad-Hoc 網路』做為適應戰場變化之行動隨意拓樸組網，滿足機動作戰任務之通信需求。具上述功能之系統，應由四項核心模組組成，茲將本年度之工作項目分述於下：

### ● UWB 天線模組

本計畫採用 UHF 頻段，其操作頻寬大於 25%在 VSWR: 2:1 以滿足 UWB 之需求。首先將研定及分析天線系統需求，並進行天線設計與實作；在來將完成天線模組性能測試與最佳化，以及天線模組與射頻模組整合測試。

### ● UWB 射頻模組

將改進去年的射頻電路模組，其中發射鏈路將增加一級增益級，及射頻濾波器，期能改進偽頻干擾(spurious signal interference)的問題。整個射頻模組都與基頻模組結合，確定控制訊號均能有效控制射頻模組所有的元件。

### ● UWB 基頻模組

UWB 基頻模組工作目標將包含：(1)建置 UWB Ad-Hoc 無線通訊網路之基頻雛形平台；(2)進行基頻模組與射頻模組之間及基頻模組與 MAC 模組之間之介面驗證；(3)進行全系統效能評估及改善各功能方塊之效能。另外也將訂定 SDR 全系統可重置性系統參數與 SDR 全系統可重置性軟硬體平台之建立。

### ● Ad-Hoc 無線通信網路模組

設計高效率及低複雜度之混合式 Multicast Ad-Hoc 多重擇路協定，其主要精神根據節點移動模式同時使用樹狀結構(Tree-based)與網狀結構(Mesh-based)來建立路徑。此模組中將完成 UWB Ad-Hoc 無線通信網路模組用以量測與驗證其系統性能，在計劃中將建構點對多點(Multicast)之 Ad-Hoc 無線通信網路實驗平台，並執行場測驗證。

除了上述核心模組之開發外，在整合方面，本年度預期完成之工作成果，以 UWBAd-hoc 全系統之整合與測試為主，含 (1) 各模組之測試與介面整合；(2) 超寬頻 Ad-hoc 無線通訊全系統軟硬體連測；及 (3) 多重跳躍式實驗平台效能場測。

關鍵詞：超寬頻、射頻模組、基頻模組、天線、隨意網路、多重擇路協定

## 英文摘要

Our proposal is designed to achieve the following goals: (1) Design communication equipments for digital war-fighters based on the ultra wide band (UWB) technique to provide high-speed, secure, and robust data links; and (2) To meet the communication requirements of mobile military operation by means of ad-hoc networking. In this year, four core modules, which complete the system, will be designed, implemented and partly integrated. They are given as following:

- **UWB antenna**

The UWB antenna module in this project will be operated in the UHF band. The operating bandwidth of the UWB antenna will be larger than 25% of the center frequency with a VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) of 2:1 to satisfy the requirement of UWB. In the first stage, we will determine and analyze the system requirements for the antenna module in order to design and implement the UWB Antenna. Then, we will test the antenna module and optimize the performance. Lastly, we integrate the antenna with RF module.

- **UWB RF module**

The subproject will improve last year's RF module that a gain stage and a RF filter will be added in the transmitting path to improve the spurious signal interference. The frequency, gain, transmit/receive path, and antenna diversity control signals from baseband module will be tested to verify the validity.

- **UWB baseband module**

The works of the UWB baseband module includes following parts: (1) Develop a UWB Ad-Hoc wireless communication baseband platform; (2) Verify the baseband/RF and baseband/MAC interfaces; and (3) Evaluate the overall system performance and improve the performances of respective function blocks. The works of the UWB SDR module include two parts: (1) Determine reconfigurable system parameters; and (2) Develop a reconfigurable hardware/software system platform.

- **Ad-hoc wireless communications network module**

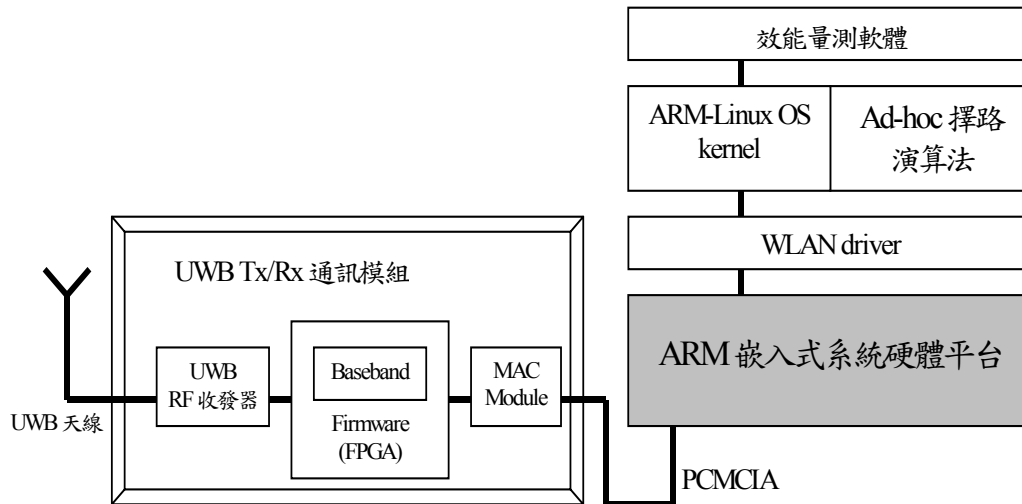
A high efficiency and low complexity multicast Ad-Hoc routing protocol will be developed to fulfill the requirement of military usages. The proposed hybrid multicast routing protocol will adjust itself into either tree-based or mesh-based structure depending on the traffic patterns of the mobile nodes. Field tests for both the multi-hop and single-hop scenarios will be conducted to evaluate the effectiveness of the proposed Ad-Hoc routing protocol.

Based on the development of above core modules, we will integrate these core modules into the proposed UWB communication system in this year. The working items of system integration are: (1) Testing and integration of interfaces between modules; (2) Hardware/software integration and verification to build up the proposed UWB communication system; (3) Field test of the proposed multicast ad hoc routing protocol.

**Keywords :** Ultra Wide Band, UWB RF Module, UWB Baseband Module, UWB Antenna, Mobile Ad-Hoc Network, Multicast Ad-Hoc Routing Protocols

## 1. 研究方法

96 年度之工作重點，以完成 UWB Ad-hoc 全系統之整合與測試，含 (1) 各模組之測試與介面整合；(2) 超寬頻 Ad-hoc 無線通訊全系統軟硬體連測；及 (3) 多重跳躍式實驗平台效能場測。下圖為此 UWB Ad-hoc 全系統方塊圖。



UWB Ad-hoc 全系統方塊圖

### 1.1 UWB 天線模組之開發與實作

一般常見的寬頻天線有螺旋天線 (Spiral antenna)、雙錐形天線(Biconical antenna)、對數週期天線 (Log-periodic antenna)、盤錐形天線(Discone Antenna)等，這類型的天線為滿足寬頻的使用，在天線的外形上常需有較特殊的設計，如漸細的設計(taper)，一般常見使用在 UWB 的韋瓦第天線(Vivaldi antenna)亦是如此，故對於天線的選取及設計方面將有這些考量。

本次計畫天線主要的設計規格(Spec.)如下:

1. UWB 天線需具備良好的饋入匹配(Return Loss < -10dB)在 900MHz~1200MHz 頻段之間。
2. UWB 天線需具備全方向性場型(Omnidirectional pattern)在 900MHz~1200MHz 頻段之間。
3. UWB 天線傳輸相位被要求線性在 900MHz~1200MHz 頻段之間。

我們會針對一些不同種類天線做研究，例如 slotline 天線可以用來傳遞寬頻的電磁波；slotline 亦可以應用在韋瓦第天線(Vivaldi antenna)見圖 1-1、圖 1-2。韋瓦第天線(Vivaldi antenna)是在微波基板兩面做喇叭狀刻蝕，兩個錐狀的金屬依附在銅板的兩側，由 coax-to-slotline (C/S)的傳遞訊號以達到寬頻。韋瓦第天線有一些特性，如逐漸彎曲的曲線、以及在不同的頻率由天線不同的部分輻射。事實上操作的頻寬受限於由傳輸線輸入天線上的狹縫，以及受限於天線的終端尺寸大小。

由於電腦硬體和軟體的進步，數值技術已經被用來解決許多在時域的電磁天線研究議題，故本計畫會用電腦來演算數值分析，更有效率的讓所設計之超寬頻天線擁有更好

的效能，以獲得更精確的資訊。我們將以 IE3D (MOM)和 HFSS (FEM)電磁模擬軟體來設計超寬頻天線，以研探不同種同類的超寬頻天線的性能分析。在實際量測方面:S 參數(S parameters) :網路分析儀(Network analyzer);天線阻抗與電壓駐波比(Antenna impedance and VSWR):由量測出的 S 參數計算出來;輻射場型(Radiation pattern):交大無反射實驗室(NCTU anechoic chamber)。

在本計劃中所討論的 UWB 天線，期望可以具有實際應用價值，故在設計此 UWB 天線時，將依據下列幾個出發點進行研究與改進：

1. 平面印刷式天線 (Printed Antenna)如圖 1-3 所示
2. 使用單純的天線結構例如單極天線 (Monopole Antenna),槽孔天線(slotline antenna)
3. 使用便宜且常見的板材例如 FR4 ( $\epsilon_r=4.4$ )

UWB 天線被要求盡可能小外形尺寸，以達到整體無線系統小型化的目地，故今年的目的需要把先前所做之 UWB 天線有效的縮小且天線之效能如：全向性,頻寬 900Mhz~1200Mhz 亦與先前之天線相同。然而我們所採用是平面印刷式天線((Printed Antenna)如圖 1-3 所示，在實際應用上我們希望天線是平面式的天線，方便與後端模組做結合亦可降低成本，另一方面來說天線的結構是屬於單極天線(monopole antenna)，以結構來說也比較簡單，以利往後的設計。

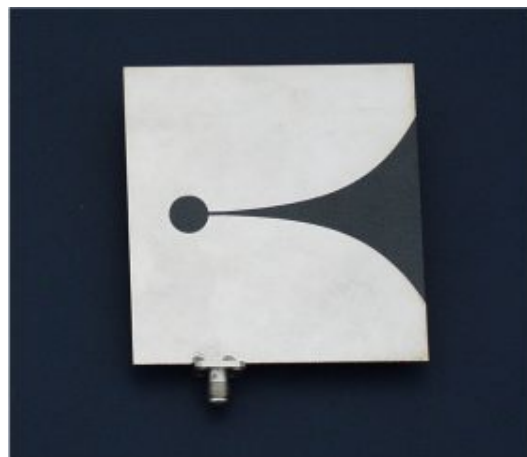


圖 1-1

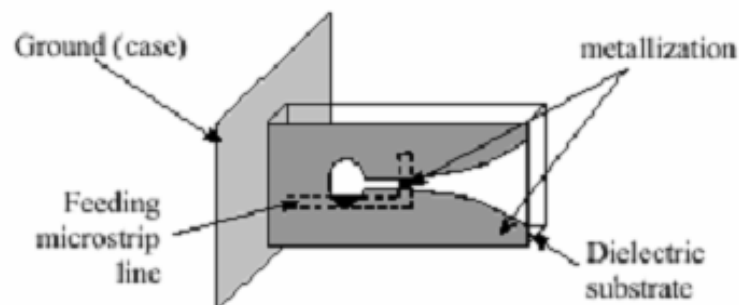


圖 1-2

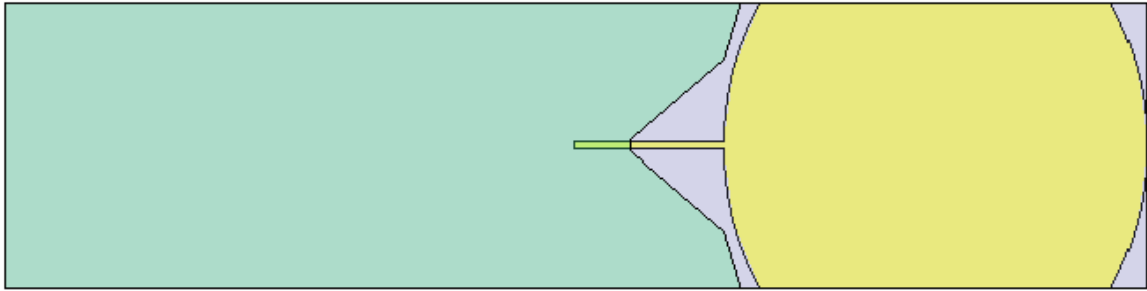


圖 1-3 平面印刷式天線

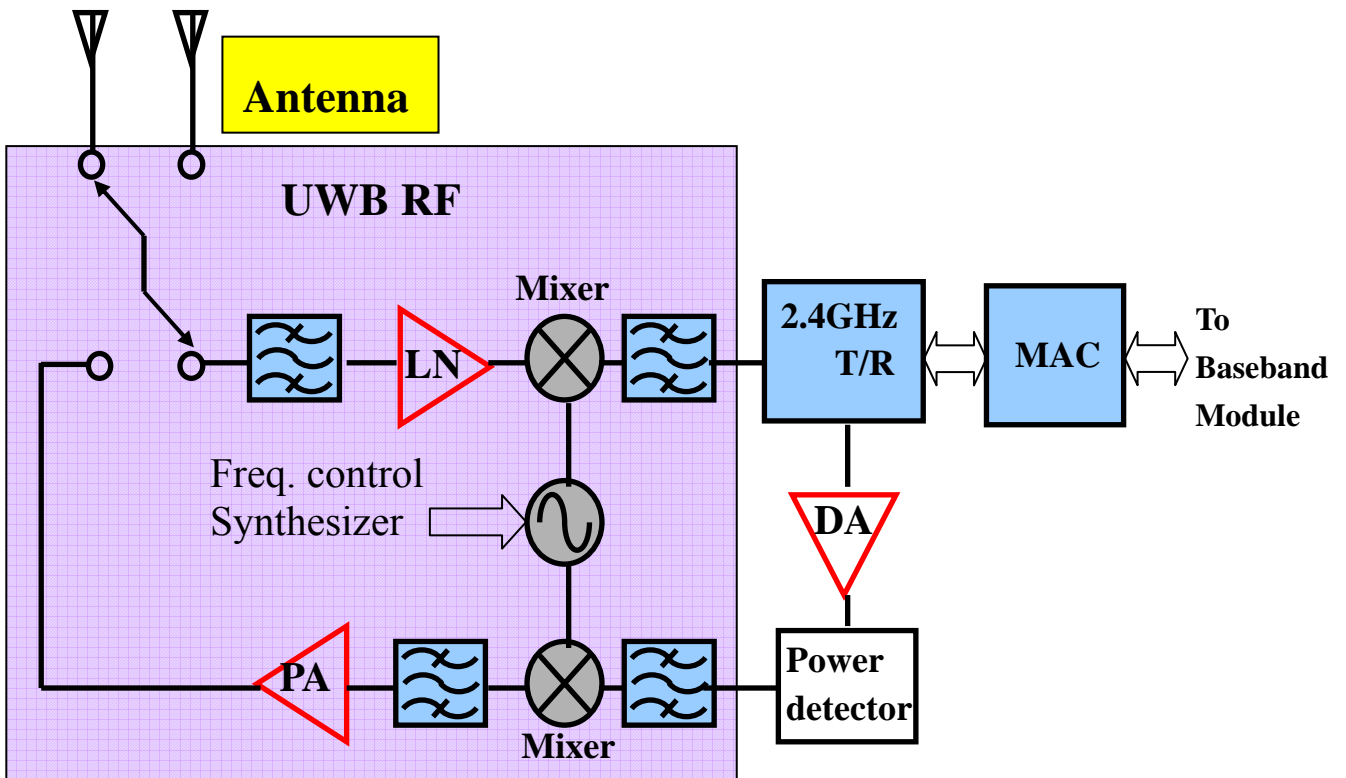


圖 1-4

本計劃中 RF 電路與天線置於同一個平面，整體的架構圖如圖 1-4 所示，因此可能對天線上的輻射電流產生一些擾動的效應，進而影響整個天線的輻射特性。接下來的工作我們需要考慮 RF 電路對天線特性的影響，包含天線之 S 參數、天線之輻射場型，進而找到最好的擺放位置使天線可以達到最佳的輻射效率。

將 RF 電路與天線進行實質上的整合，並量測整合之後收發端(transceiver)之特性其中包含輻射場型的量測有效等向輻射功率(Effective Isotropic Radiated Power (EIRP))，就是把有指向性的天線(圖 1-5 所示)與等向性增益為一(圖 1-6 所示)的天線做比較，可得所需的傳輸功率大小。

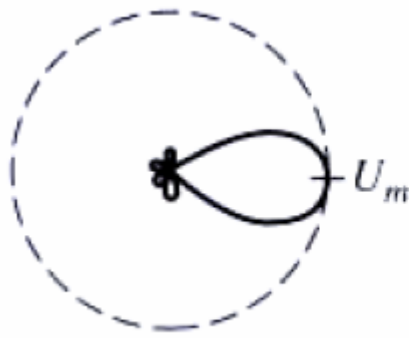


圖 1-5

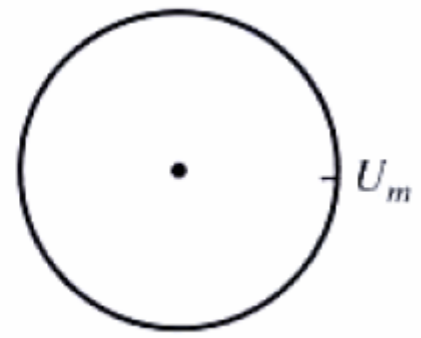


圖 1-6

由於電流的擾動會影響天線的輻射場型使收發訊號的品質降低，而把電路放在地的上方將會產生難預期的效應，例如電源電路的輸入端、中頻信號端、基頻電路等，都有可能因為電流經過或是雜訊由地耦合到天線，亦可能經由空氣中耦合到天線，使天線的場型產生不可預期的效應，電流擾動的示意圖如圖七所示：其中白色虛線為中頻訊號的擾動；紅色虛線為電源電路端的擾動。此外，UWB 天線與電路模組的整合方面，如圖 1-7 所示，我們在電路模組上提供了兩個天線接孔，除了 UWB 天線端預定銜接本計畫設計出之 UWB 天線外，並另外設計外接天線端，可供使用者於訊號太弱時，選擇性外接天線，以增強訊號強度，達到最好的傳輸效果。

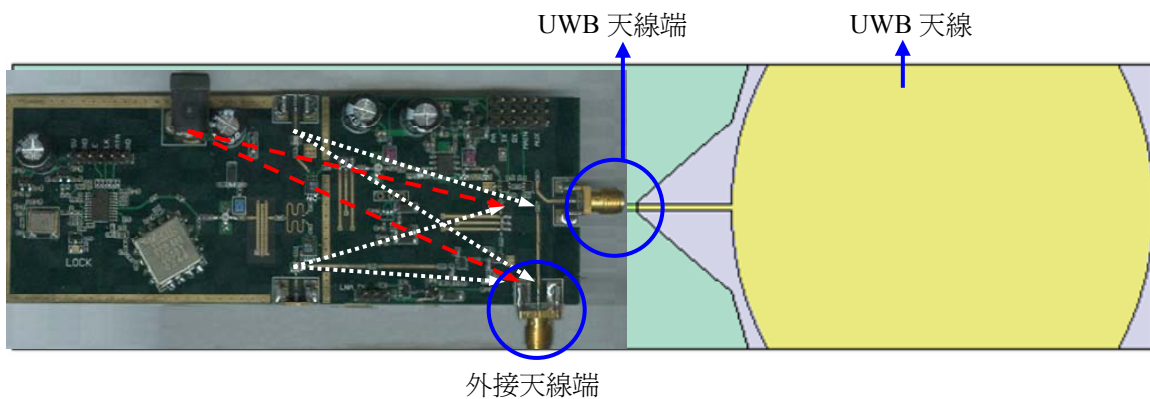


圖 1-7

## 1.2 UWB 射頻模組之開發與實作

依據上年度之計畫成果，去年完成了一個射頻前端模組，依據去年測試之結果今年我們預計要做少許修正以減少偽頻訊號干擾。偽頻訊號(spurious signal)最易產生的元件是發射路徑上的升頻混頻器，而且中頻訊號愈強則愈容易在升頻混頻器之射頻輸出端產生偽頻訊號，所以在發射路徑要將進入混頻器之 2.4GHz 的中頻訊號調的較低，如此才不易產生偽頻訊號干擾，所以今年新的射頻前端模組在射頻發射路徑上增加了一個放大級，同時也增加一級濾波器。因為射頻路徑上之增益增加，所以進入升頻混頻器之訊號可以大大降低，如此可以使得偽頻訊號水準大幅降低。新規劃的射頻前端模組之系統方塊圖如圖 1-8:

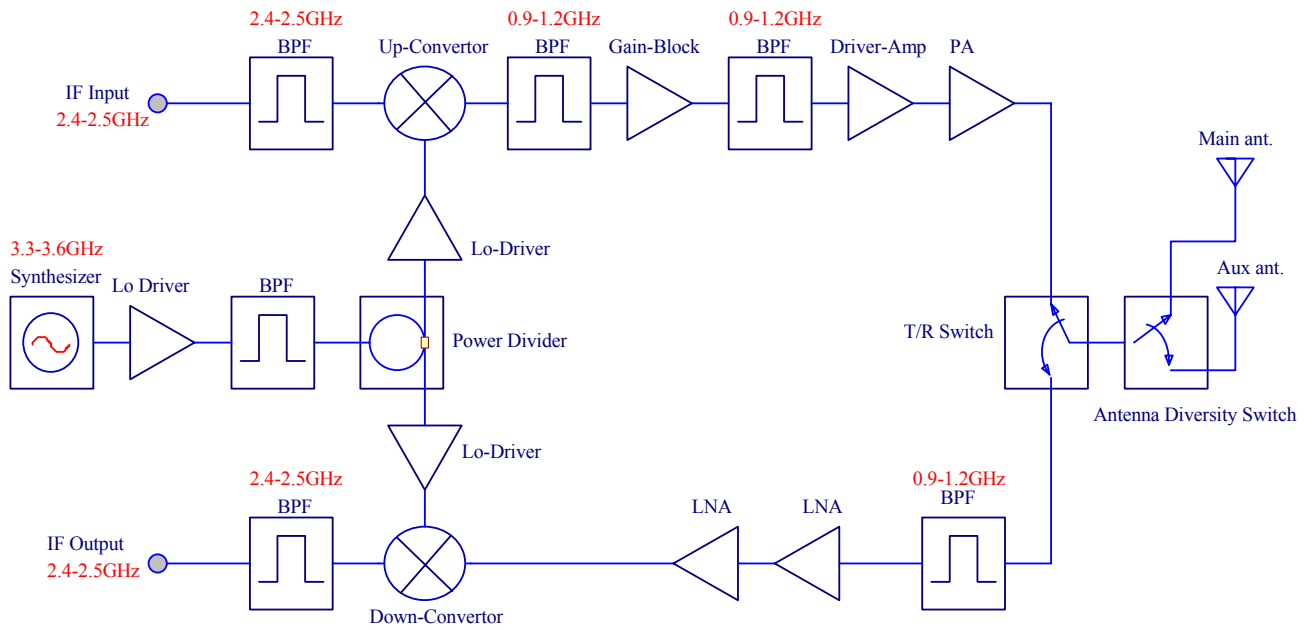


圖 1-8 新規劃的射頻前端模組之系統架構方塊圖

就上圖中各個射頻電路元件所擬使用的型號與規格詳細描述於圖 1-9，其單獨射頻部份之測試亦在圖中標示出來，即為：圖右之紅色區塊是待測的射頻模組，圖左是測試時所用得測試板。

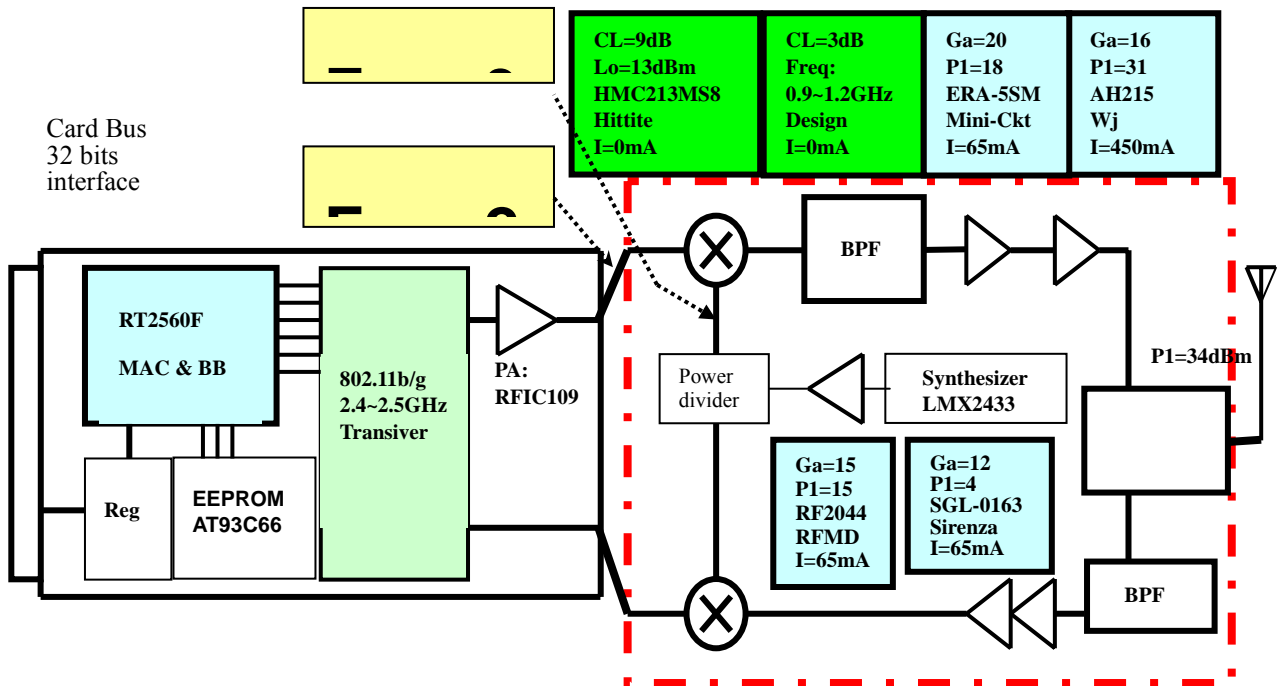


圖 1-9 射頻模組中擬定使用之各個元件規格與供應商，以及擬定之測試方塊圖。

除了改進去年射頻模組的部份，今年也要增加一項中頻之降頻的工作。亦即，在接收時將 2.4GHz 之中頻降到基頻供給基頻模組，在發射時將基頻模組之訊號升頻至中頻之 2.4GHz 給射頻模組。且基頻模組之基頻訊號包含有 I 與 Q 的訊號，此部份乃就市面現成之無線網路收發模組中找尋適當的產品(積體電路)來製作我們的模組，如此可以大大的降低成本。初步規劃的整體射頻加中頻模組顯示於圖 1-10。

圖 1-10 包含中頻模組之整體射頻模組之系統方塊圖。

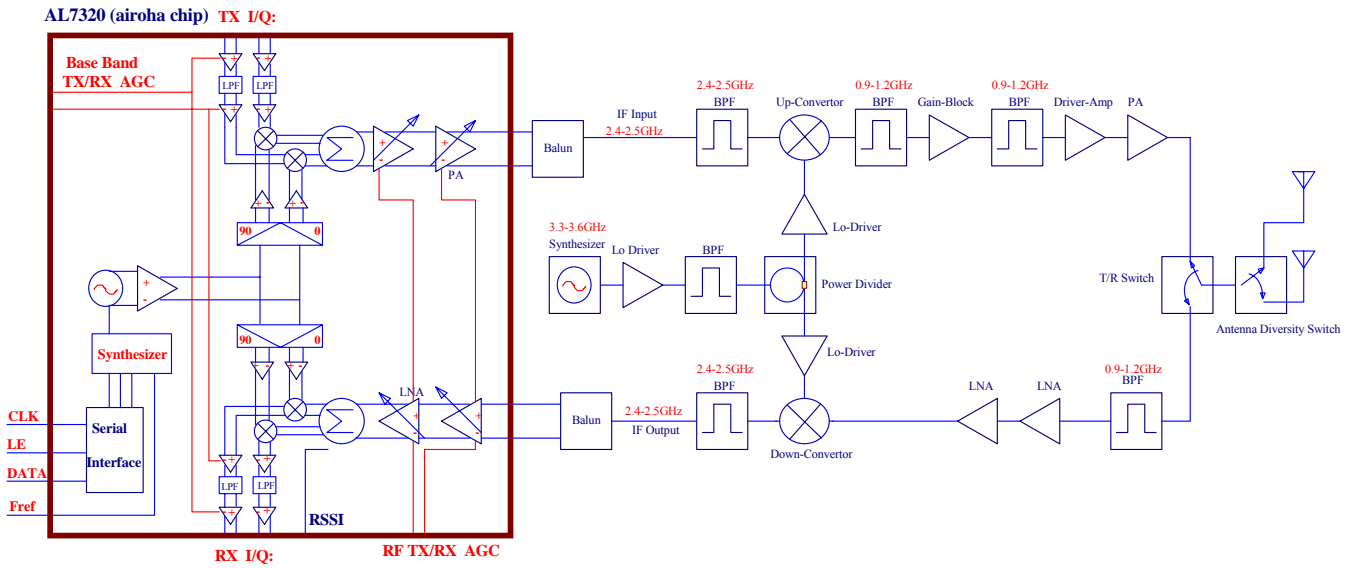


圖 1-10 中，紅色方塊內及為今年擬增加的中頻 2.4GHz 模組的部份，中頻模組部份也有許多控制線須與基頻模組相連接受基頻模組的控制。總體而言射頻模組除了前端與天線連以外，後端與基頻模組又許多連線與射頻模組相連，是一個相當複雜的系統。



## 1.3 UWB 基頻模組之開發與實作

### 1.3.1 UWB 基頻模組

由於 UWB 是一種借助雷達技術概念的超短電磁脈衝收發技術，目前較成熟的調製方式為脈時調製及直接序列相位編碼調變，將脈衝能量由專用寬帶天線擴展至 GHz 量級的頻寬內，短距離連接速率可高達數百 Mbps。因此本模組之研究方法為首先針對射頻之 900MHz-1200MHz 頻段進行分頻處理，將共約 300MHz 的頻帶分為多個頻道，其中每個頻道約為 20MHz-40MHz 寬，在每個頻道之內吾人所建議的方法為使用直接序列展頻 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 技術，在 300MHz 內的不同頻道間則使用跳頻 (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) 展頻技術，使用此方法的好處在於吾人可藉由調整處理增益 (processing gain)，在 32 kbps 至 1.544 Mbps 間彈性改變資料率。由於 UWB 系統頻寬非常大，因此其工作頻段常會與現存窄頻系統的頻譜重疊，為了提高信號接收的可靠度，本模組將特別著墨於抗干擾功能區塊的設計。

所謂的直接序列展頻是一種直接將資料藉由展頻碼與載波調變的展頻技術，這種調變方式以二次調變造成非常寬的調變訊號，一般而言二次調變多採用數位相位調變 (digital phase modulation)，儘管如此類比振幅 (analog amplitude) 或類比相位 (analog phase) 的方式理論上也是可行的。展頻訊號必須經過思考而挑選，挑選原則為使發射端欲送至的接收器易於解調變，而不希望送到的接收器儘可能做到無法解調變，同樣的也必須思考該訊號必須讓接收器能夠分辨收到的是真正所需的資料或是干擾訊號，如果展頻訊號的頻寬遠大於資料的頻寬時，展頻的頻寬將決定於展頻訊號而與資料幾乎無關。事實上，當傳送資料為 0 時，會以數個展頻訊號 (chip) 的正交偽雜訊數碼 (PN pseudo random code)，而傳送資料為 1 時，會以上述之碼的補數表示。當這些展頻訊號 (chip) 送至發射調變時，在接收端會解開這些展頻訊號 (chip) 以還原回資料，而此過程即能有效地將干擾訊號濾除。

至於跳頻展頻則是一種將資料與載波調變，藉由週期性的頻率改變造成的擴展頻譜技術。一般而言，每一個載波頻率會被一組周期性的表 (展頻碼) 所決定，而該定義的頻率改變會在近乎資料調變的頻寬的寬度留出間隔，使其有一定頻寬距離。在 FHSS 的展頻方式下展頻碼並不會直接與載波調變，該展頻碼被用在控制載波變換的順序，資料調變至載波後即成了發射的訊號，載波則會從一個頻率跳至下一個頻率。

基於直接序列展頻及跳頻展頻之特性，吾人所設計之 UWB 系統架構可有效抵抗其他窄頻訊號的干擾、降低資料錯誤率，除此之外，由於採用展頻技術，接收機只有在已知發送端展頻碼者才能解出發射資料，且系統的發射功率譜密度極低，用一般的接收機無法接收，因此更具有保密的重要特性。而藉由 FHSS 展頻碼的適當配置，吾人之系統可提供多用戶同時上線，大幅提高整體系統容量。

吾人所發展之基頻架構如圖 1-11 所示，本年度將著重於整合前一年度所發展之功能方塊的硬體架構，包括通道編碼/解碼、交錯器 (interleaver) /解交錯器、訊號同步、碼追蹤、頻率估計及通道估測等，搭配吾人所發展之展頻/跳頻機制，建構一完整之基頻收發機架構，除此之外，亦將對此架構進行效能評估，藉以修正各功能方塊之訊號處理演算法則。此基頻架構將建立在吾人前一年度所採購之 Lyrtech 通訊系統發展平台 (如圖 1-12 所示)，其允許利用 Simulink 進行做軟體架構的實現與驗證，並採用 Lyrtech VHS-ADC/DAC 及 Lyrtech SignalMaster Quad 實現與整合各基頻功能方塊之硬體架構，同時具備了 GPIO 埠及 SMA 接頭，可作為基頻模組與射頻模組及 MAC 模組溝通之介面。

本計畫前一年度從媒介接取控制 (MAC) 架構、基頻架構及射頻架構等三個主要模組切入，並著重各模組間之整合發展。如此高複雜度系統的建構，其成敗仰賴各模組間之介

面定義，再以此為基礎進行各模組間之細部整合；本年度另一向重要的工作為訂定各模組間之溝通介面，包括：

- MAC 模組-基頻模組溝通介面：主要針對訊號封包架構之設計，包括控制訊號之種類及所傳送之資料量，期能有效整合基頻模組與 MAC 層模組之功能。本部分之溝通介面預期可藉由 GPIO 介面達到此目標。
- 基頻模組-射頻模組溝通介面：包括設計 A/D 及 D/A 控制訊號、設頻頻率控制訊號、工率控制訊號等。其中 A/D 及 D/A 訊號有 SMA 接頭可提供 I 訊號及 Q 訊號的傳輸，而其他的控制訊號則可利用 GPIO 介面來做資料傳輸。由於本系統支援跳頻功能，因此射頻控制訊號通道必須高速且可靠，才能使系統穩定且精確地運作於各頻率之間，預計這將是本部分主要的挑戰。

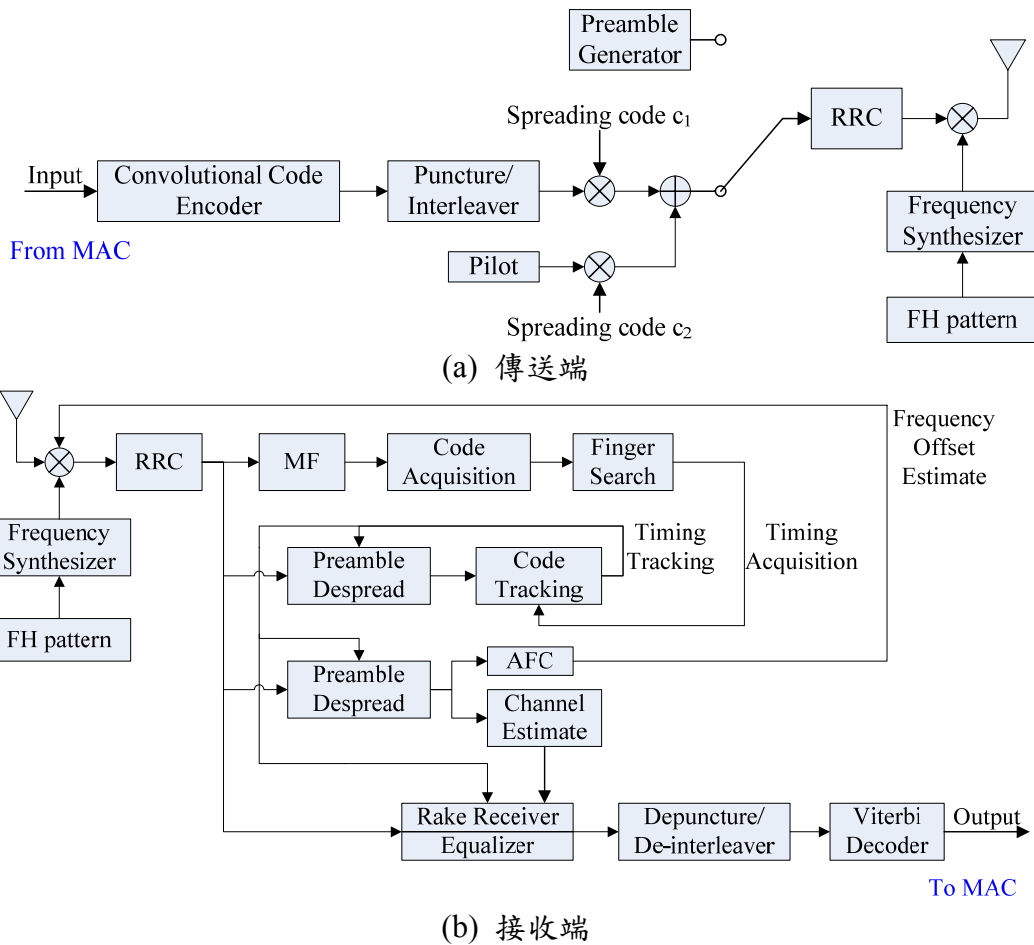


圖 1-11 基頻架構方塊圖：(a)傳送端，(b)接收端。



圖 1-12 Lyrtech 通訊系統發展平台

### 1.3.2 SDR 模組

軟體無線電 (Software Defined Radio, SDR) 是一種通訊裝置，其實體層至更高階通訊協定層的功能主要是由軟體定義，因此可提供更具彈性之系統架構。SDR 支援多頻寬多模式的無線電和無線程式設計，減輕了部署新通訊標準時產生的問題。只要在處理硬體時變更裝置的軟體程式碼，SDR 便會彈性地變更無線電之系統功能。藉由軟體無線電的實現，吾人可直接透過下載程式碼之方式來改變系統參數，進而改變系統之運作架構，而無須對硬體組態進行任何改變。

圖 1-13 為本子計畫欲建立之 SDR 參數，主要分為兩部份：

1. MAC 模組-基頻模組可重置性參數：本系統之 MAC 模組與基頻模組間的溝通除了傳統控制訊號外，必須額外增加處理增益、適應性跳頻碼配置及編碼率之控制訊號，以滿足雙模系統運作之需求。
2. 基頻模組-射頻模組可重置性參數：於本系統中所使用之基頻頻寬可彈性地調整，因此收發機 A/D 及 D/A 的取樣速率也必須能彈性地做修正；此外，取樣位元數、RF 中心頻率及 RF 發射功率等參數亦可藉由控制訊號調整。

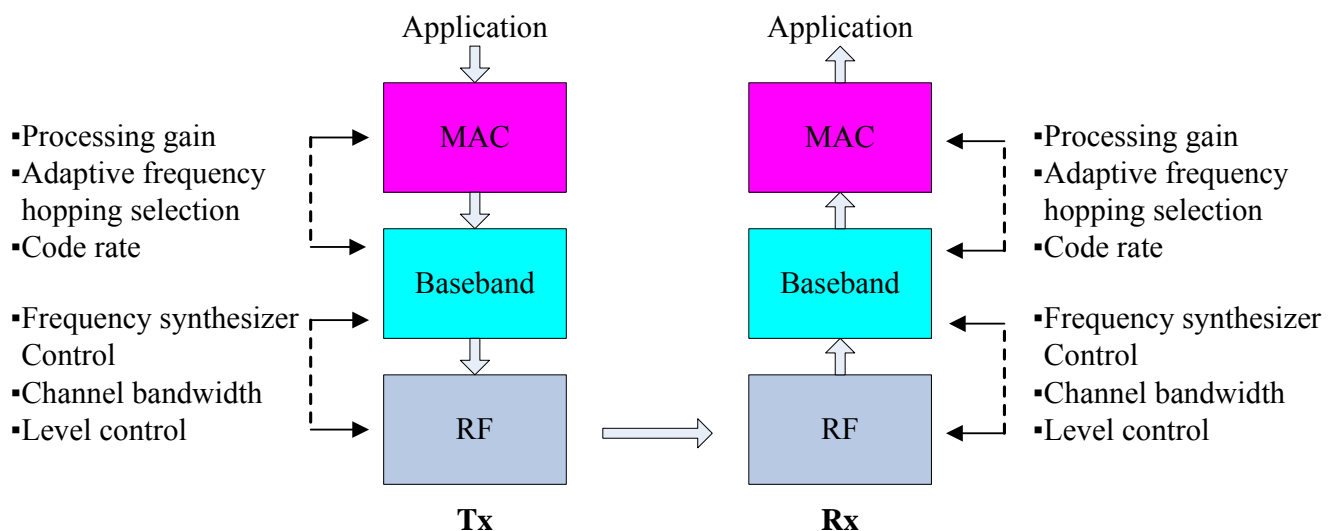


圖 1-13 SDR 控制介面

實現軟體無線電系統的最佳架構為可程式之軟體平台，意即可由使用者自行決定系統軟體模組及繞線規劃的平台；透過運作軟體的置換，使用者能切換至各種不同規格之系統，輕易實現通訊系統多模式、多功能之需求。至於硬體實現架構往往是以運用需求為導向，因此本模組將利用 MATLAB、DSP 與 FPGA，模擬及實作數位化後之基頻訊號處理，其中軟體無線電各功能區塊包括類比數位轉換技術、數位通道濾波器、動態取樣頻率轉換以及基頻通訊信號處理等。上述之發展平台將由吾人所採購之 SDR 模擬系統實現。

本模組於下一工作年度主要著重於整合各模組間之研究成果，期能完成建構具使用彈性之展頻/跳頻雙模 UWB Ad-Hoc SDR 平台。除此之外，所發展之 SDR 平台亦將於實際環境中進行測試（包括模組功能測試、模組間之相容性測試及全系統效能測試），並探討各種實際傳輸條件對系統表現之影響，期能對所發展之系統做一全面性整合評估，進而使系統設計能滿足實際環境及達到系統最佳化之目的。

### 1.3.3 MAC 模組之開發與實作

媒體存取控制(MAC)位於實體層之上，負責控制資料的傳輸，讓上層協定的資料可以正確無誤地經由傳輸媒體(即 UWB Tx/Tx 實體層)傳遞與接收。因此，媒體存取控制主要的工作是負責訊框的封裝以及與上層網路之間的互動。媒體存取控制的功能有：1.對被共用媒體的存取控制，2.以媒體存取層級的訊框交換協定來確保資料能可靠地傳遞。

本計畫將以分散式協調功能 (Distributed Coordination Function, DCF)為基礎來設計及實現 MAC 模組。採用類似 Ethernet 的載波偵測多重存取/碰撞避免(Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)技術，來提供工作站傳送非同步訊框。分散式協調功能在傳輸時，工作站必須在發射訊號前偵測傳輸媒介連續空閒一段時間後才能開始發射訊號，這一段空閒的時間稱為訊框間隔(Inter Frame Space, IFS)。例如 802.11 系統會用到四種不同的訊框間隔，分別為 SIFS (Short IFS)、PIFS (PCF IFS)、DIFS (DCF IFS)、與 EIFS (Extended IFS)，訊框間隔時間長度  $SIFS < PIFS < DIFS < EIFS$ ，優先權等級越高的訊框其訊框間隔時間越短。一旦有工作站使用較短的訊框間隔取得傳輸媒體後，其他工作站便不能發射訊號。工作站要傳送訊框時必須先偵測是否有其他工作站正在傳送訊框，即偵測傳輸媒體是否忙碌，一旦得知媒體呈現空閒，此時仍不能立即傳送訊框，要依訊框的優先權等級等待一段適當的訊框間隔時間後，如果傳輸媒體仍保持空閒才能將訊框送出去。但是依此方式，相同優先權等級的訊框在傳送時仍有可能無可避免地同時傳送而造成碰撞。為了避免碰撞便須以競爭視窗(Contention Window, CW)，即隨機延遲一段時間傳送的機制來避免碰撞。例如，一工作站要傳送一般訊框時，先等待一個 IFS 之後，如果媒體呈現空閒，便會進入競爭視窗。此分散式協調的處理程序如圖 1-14 所示。每個工作站都會產生一個隨機延遲時間，稱為後退時間(backoff time)，工作站在等待其後退時間之後，若媒體呈現空閒方可傳送訊框。工作站進入競爭視窗後，以後退時間遞減方式完成等待程序，工作站必須等到其後退時間減為零時才能傳送訊框。在遞減的過程中若有其他工作站傳送訊框就表示競爭視窗結束，必須暫停遞減，等到下次再進入競爭視窗時才能繼續遞減的工作。後退程序(backoff procedure)的執行如圖 1-15 所示。

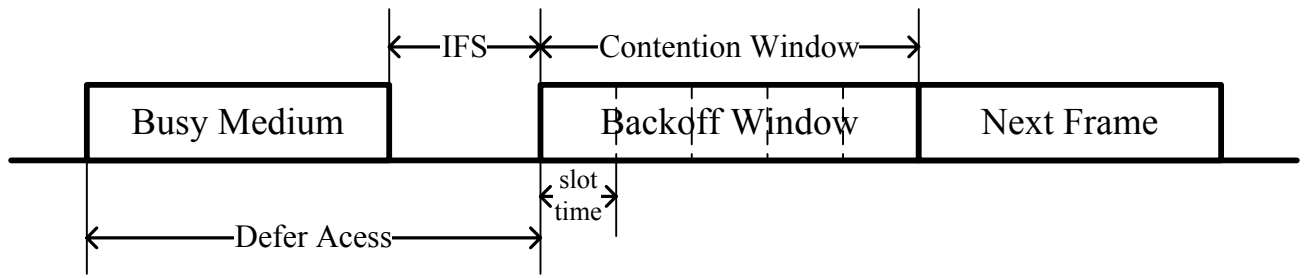


圖 1-14 分散式協調的處理程序

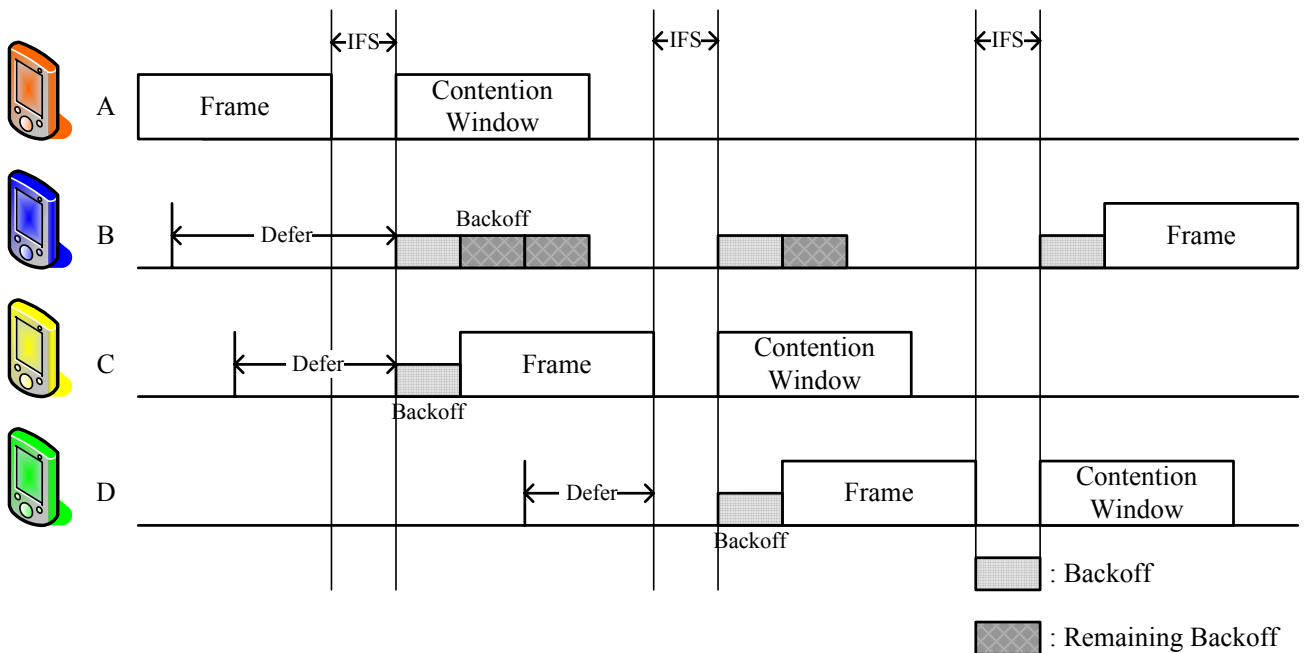


圖 1-15 後退程序(backoff procedure)的執行範例

為了確保資料傳輸的可靠性，我們將使用訊框分割(fragmentation)、訊框檢查序列(Frame Check Sequence, FCS)及回應(acknowledgement, ACK)等機制來確保資料可以正無誤地傳送到目的端。訊框分割是將 LLC 子層送交媒體存取層處理的媒體存取層資料區塊(MAC Service Data Unit, MSDU)分割成較小的媒體存取控制協定資料區塊(MAC Protocol Data Unit, MPDU)，此分割動作在資料來源端工作站進行。目的端工作站則進行資料重組的動作，將多個分割的 MPDU 還原為原本的 MSDU。因為長訊框在傳輸時可靠度較低，故當媒體存取控制層收到的 MSDU 長度超過一個 MPDU 可容納的容量時，就會分成多個 MPDU 傳輸。每個傳送的 MPDU 中都將加入 FCS，接收工作站在確認收到的 MPDU 中的位址及 FCS 是正確後，必須給來源工作站一個 ACK 訊框。如果來源工作站在回應時間終了仍未收到 ACK 訊框，造成無法判斷目的站是否正確收到訊框，則來源工作站必須重送訊框。

由於無線電波的傳遞會因距離而衰減，因此在無線環境下傳輸資料會遇到隱藏節點問題(hidden node problem)。如圖 1-16 所示，A、B 與 C 共三個節點，各自有其有效通訊範圍。其中 A 與 B 或是 B 與 C 之間皆能互相通訊，但是 A 與 C 之間因為距離太遠而無法通

訊。此時，節點 A 對於節點 C，或是節點 C 對於節點 A 而言，便是對方的隱藏節點 (hidden node)。隱藏節點會造成傳輸的碰撞而造成資料傳輸的錯誤，此問題就稱為隱藏點問題。例如，A 與 C 都要傳送資料給工作站 B 時，在 A 的範圍內沒有偵測到有其他的傳輸，所以就開始傳送封包給 B，在 C 的範圍內也沒有偵測到有其他的傳輸，所以也就開始傳送封包給 B，這兩個封包在節點 B 便發生了碰撞(collision)。隱藏節點問題可使用 RTS (Request To Send)/CTS (Clear To Send)機制來克服，透過 RTS/CTS 短訊框通知鄰近地區所有工作站即將進行訊框交換，可將隱藏點的干擾降到最低。RTS/CTS 機制的動作流程則如圖 1-17 所示。

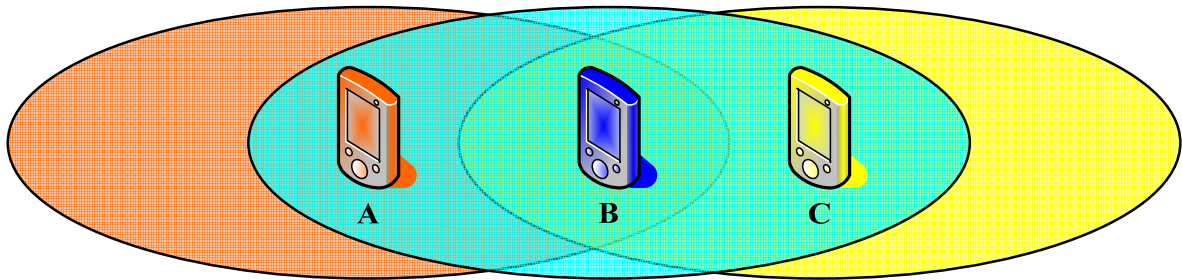


圖 1-16 隱藏節點問題(hidden node problem)

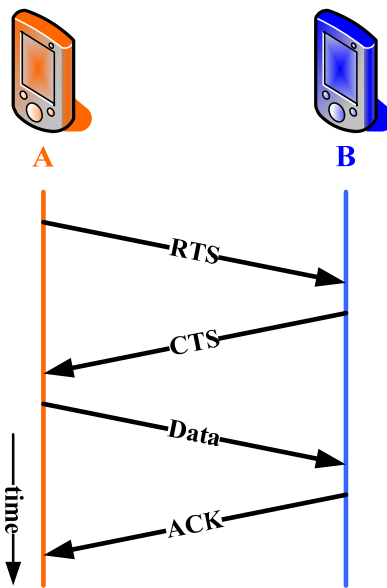


圖 1-17 RTS/CTS 機制的動作流程

本計畫之媒體存取控制模組(MAC module)的開發與實現，主要功能是負責控制資料的傳輸，讓上層協定的資料可以正確無誤地經由傳輸媒體(即 UWB Tx/Rx 實體層)傳遞與接收。當有資料要傳送時，MAC module 會偵測目的地端媒體是否使用，如果是空閒則可以傳送訊框，否則會繼續等待至媒體空閒再傳送訊框。傳送訊框後要等到收到目的端的回應訊框才算傳送完畢。如果超過時間還尚未收到回應訊框就會判定傳送失敗，MAC module 將重新傳送訊框。接收端則一開始先判斷目的位址是否為自己的位址。如果不是，則將訊框丟棄，否則便接收訊框並且計算訊框檢查序列，如果計算的結果與訊框內的框檢查序列相符，則表示訊框沒有錯誤，可以接收並送出回應訊框，再將接收的資料傳送至上層。初步規劃之 MAC module 的傳送與接收的程序分別如圖 1-18 與圖 1-19 所示。本計畫將以

ARM/FPGA 發展板來具體實現此媒體存取控制模組，並驗證與測試其功能。MAC 模組與上層之介面為 PCMCIA 介紹，與下層之實體層介面則為 GPIO。MAC 模組的各別功能驗證與測試包括有：CSMA/CA 機制、後退程序、CRC 之產生與驗證、RTS/CTS 機制、重傳機制...等等。最後將與整個系統做整合測試。

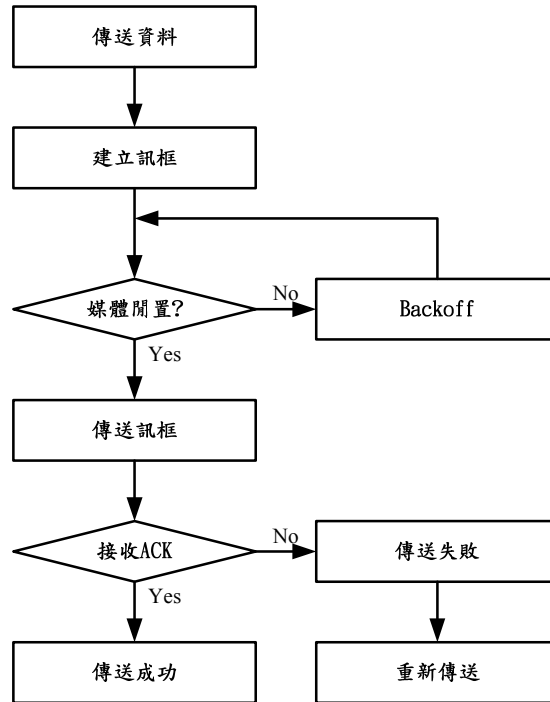


圖 1-18 MAC 模組之傳送程序

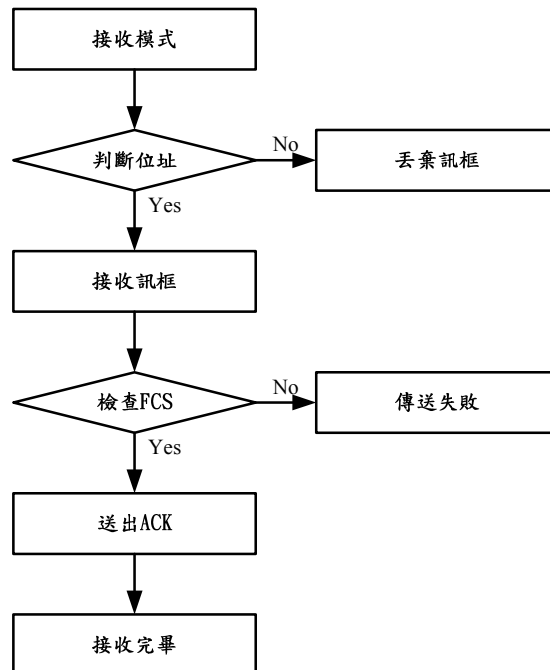


圖 1-19 MAC 模組之接收程序

#### 1.4 UWB 混合式多重擇路協定與 Ad hoc 多重跳躍式實驗平台之開發與效能實測

本計畫將著重於以 ARM-Based 的實驗平台實現所發展適用於軍事領域之 Multicast 行動 Ad-Hoc 通信網路擇路協定—混合式多重擇路協定 (Hybrid Multicast Routing Protocol)，並於可能形成之部隊群組移動模型下，詳細研究評估擇路協定的效能、可行性及可靠度。據我們所知，目前並無以群組移動模式作為設計考量的多重擇路演算法。因此針對群組移動模式我們建立了一套適用的演算法，該演算法的主要精神是在每個子群組內採用樹狀結構來建立路徑，如此將可降低控制封包數量。此外由於子群組內節點移動的範圍較小，所以連結的維持較為容易，亦剛好彌補樹狀結構缺點之隱憂；至於子群組間的聯繫，我們採用網狀結構來建構連結，以提供子群組間的路徑連結具備更佳的抗干擾能力。由於同時存在於同一個網路環境中的子群組數量並不會太多，因此網狀結構所帶來的頻寬使用不當之效應亦被降到最低。如果子群組內及子群組間皆採用樹狀結構，如圖 1-20 所示，則每一個節點都僅有一父節點存在。倘若某一連結發生斷裂，其將造成與斷裂路徑以下的所有節點失去連結。例如，路徑 A 的斷裂將造成子群組 1 和子群組 2 間的連結消失；同樣地，路徑 B 的斷裂會造成子群組 1 和子群組 3 之間完全無法傳送資料。然而，如果採用我們所提出的演算法，子群組間利用網狀結構來加強連結，如圖 1-21 所示，則在相同的情況下，即使路徑 A 和路徑 B 皆斷裂，亦能保持三個子群組間之聯繫。這是由於網狀結構提供了不只一條的連結路徑，無形中加強了子群組間的結構性。

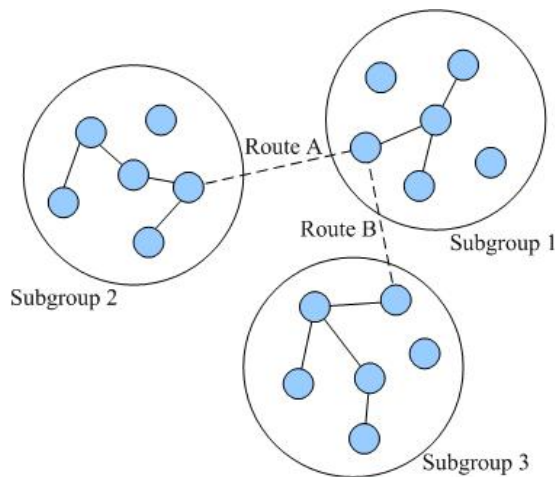


圖 1-20 所有節點間皆採用樹狀結構連結

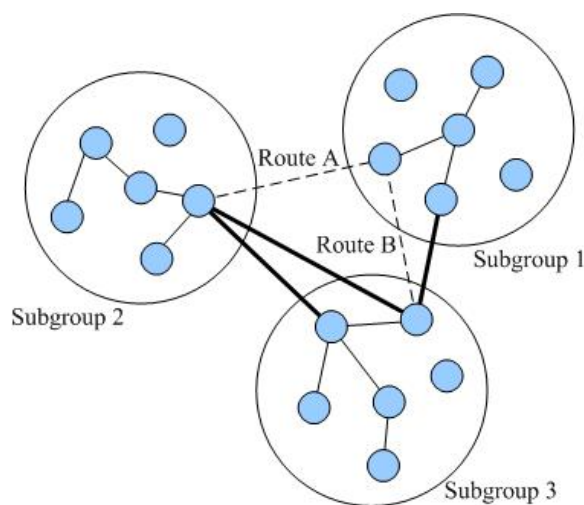


圖 1-21 子群組間採用網狀結構連接



在群組移動模式中提出的混合式擇路協定將考量行動節點動態移動所造成的群組合併 (Merge) 與分裂 (Split)。根據環境參數與距離訊息動態在此兩種結構間做調整，以有效降低控制封包數量，並進而增加資料傳遞的效率。每個節點隸屬於哪個子群組的判斷方式是利用中心節點的觀念。只要某一節點距離中心節點在預設的跳躍數 (Hop Count) 內，且與上一個跳躍點之距離在一定的範圍內，則此節點將成為這個中心節點所在的子群組成員。利用在 HELLO 訊息內所含的資訊，可決定節點是否需要加入或離開其所屬子群組。至於子群組間的合併與分裂運作並不需要額外特別的機制，而是單純利用節點是否加入或離開子群組而運作。當二個子群組接近時，子群組內較接近另一子群組的節點將因為達到轉換子群組的條件而轉換成為另一個子群組之成員。隨著二個子群組間更加接近，某一個子群組的所有節點將會加入另一個子群組而完成合併之運作。當子群組內的一群節點同時往某個方向離開子群組時，首先遠離子群組的節點會隨著距離的增遠而無法達到成為該子群組成員之條件，進而運行離開子群組的動作，並自我形成一個新子群組的中心節點。隨後遠離隸屬子群組之節點將根據條件判斷是否加入新形成之子群組，亦或自己成為另一個新子群組的中心節點，如此持續進行分裂的動作。特別要注意的是，利用上面方法所產生的中心節點與其他中心節點產生演算法不同之處在於中心節點不是固定的節點，而是根據當時各節點的分佈情況跟移動方式自然會有一些節點擔任中心節點的工作。此外中心節點也不需額外提供維持子群組的機制。

在路徑選擇的機制上，大部分多重擇路協定採用跳躍點數量來當做考量選擇的依據。本計畫模組中提出的混合式多重擇路協定除了考量跳躍點數量外，亦採用接收訊號的強度。接收訊號強度相較於傳統跳躍點數量考量而言，提供多重擇路協定一個更具消息量的指標。利用上面所述之觀念，採用樹狀結構網路跟網狀網路結構的結合，構成一個特殊的網路結構概念。

整體而言，本計畫將深入探討適合於行動 Ad-Hoc 通信網路技術的架構及效能，並藉由擇路協定設計、各層模式的建構、行動性模型系統等關鍵功能模組的細校，獲致一個能符合實際需求的 UWB Ad-Hoc 無線通信網路實驗平台系統。計畫之研究工作步驟略述如下：

#### Step1：細校所發展的混合式多重(Multicast) Ad-Hoc 擇路協定

混合式 Multicast 擇路協定乃針對群組移動模式(Group Mobility Model)作為設計考量的擇路演算法。此演算法的主要精神是在每個子群組之內使用樹狀結構 (Tree)來建立路徑，如此可以降低控制封包數量。而且位於相同子群組之節點，因彼此間移動的距離範圍較小，所以連結的維持較容易，無形中亦彌補了樹狀結構缺點之隱憂。至於子群組間的聯繫，網狀結構 (Mesh)是我們所採取之建構架構。網狀結構將可提供子群組間的路徑連結性具備更多的抗干擾能力，由於存在於一個網路環境中的子群組數量不會太多，因此亦能把網狀結構所衍生的頻寬使用不當效應問題降到最低。

在本計畫中，我們將用網路架構模擬器 (The Network Simulator, ns-2) 來實施模擬，以實行所發展的混合式 Multicast 擇路協定演算法。ns-2 是一種離散式事件的模擬器，用以提供有線及無線網路中擇路、TCP、以及多重播送 (Multicast) 協定等各種網路架構、型態和活動的模擬。此外將利用 ns-2 的 Network Animator (nam)程式，來顯現出網路模擬的結果與紀錄。模擬系統中將建立不同行動節點的網路模型，這些節點隨機散佈於特定區域內。此外，在模擬系統中利用下列模擬參數用以細校所發展的混合式 Multicast 擇路協定：

1. 各節點的廣播範圍(Radio Propagation Range)。
2. 通道傳輸容量(Channel Capacity)。
3. 網路區域分割(Network Partitions)。
4. 各節點之鄰近節點的平均數目：即各節點直接傳遞範圍(Beacon Range)內的平均節點數目。

## Step2：建構點對多點(multicast)之多重跳躍式實驗平台與效能場測

有鑑於本研究能夠有效實際驗證 Ad-Hoc 擇路協定之功能與效能，將整合 WLAN IEEE 802.11b 通訊實體技術作為 Ad-Hoc 通訊雛形設備，並進行共 6~9 個節點，於實地環境之點對多點之多重播送(multicast)無線通信連接測試。如圖 1-22 所示，呈現本研究 Ad-Hoc 雛形設備之系統方塊圖規劃。

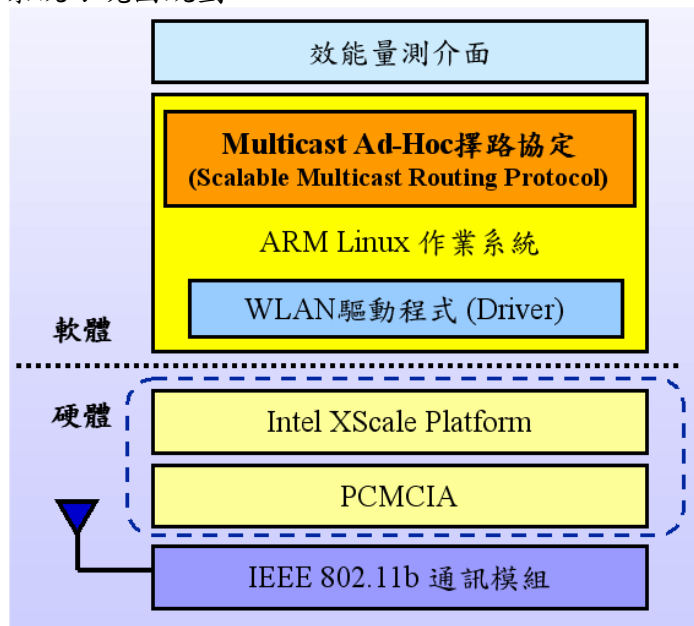


圖 1-22 本研究多重跳躍式實驗平台之系統方塊圖

在通訊效能之量測與評估方面，Ad-Hoc 多重跳接傳輸之通訊效能評估主要以傳輸層 (Transport Layer) 之資料傳輸速率 (Data Throughput) 為主，另外為了評估 Ad-Hoc 擇路演算法之效能，可根據傳輸路徑搜尋時間與修復所需的時間 (Recovery Time)，以及平均之路徑存活時間 (Averaged Path Lifetime) 作為參考依據。茲將本研究預定之效能評估項目列示於下表：

表 1-1 Ad-Hoc 通訊系統與擇路演算法之實地效能評估項目

效能評估項目	說明
TCP 傳輸效能	透過量測軟體進行傳輸端點間之資料傳輸速率效能量測，傳輸時使用 TCP 協定，以驗證 ad-hoc 通訊系統在 <b>連接導向</b> 傳輸模式之效能。
UDP 傳輸效能	透過量測軟體進行傳輸端點間之資料傳輸速率效能量測，傳輸時使用 UDP 協定，以驗證 ad-hoc 通訊系統在 <b>非連接導向</b> 傳輸模式之效能。
傳輸路徑搜尋與修復時間	於量測實驗中控制傳輸路徑發生斷線，以觸發擇路演算法之路徑修復功能，並計算新路徑搜尋與修復所需之時間。
路徑存活時間	統計平均之路徑存活時間，以驗證 ad-hoc 通訊系統之穩定性。

為了驗證本研究 Ad-hoc 無線通信網路擇路演算法在現實傳播環境應用之效能，本研究將根據不同的實測環境，以及不同的實驗項目，進行完整且具系統性的效能量測與分析。本年度主要以點對多點之多重播送(multicast)連線效能之功能驗證與效能量測為主，研究使用以 TCP/IP 協定為基礎之量測軟體，紀錄傳播實驗進行時，各項效能量測數據，以便進行後續的效能分析工作。

預計點對多點之效能量測網路規模將小於 10 個節點，相當於國軍目前一個『班』之

編制。根據網路中節點的移動特性，可分為下面三種量測情境。

1. 固定節點間之量測：網路中所有節點為固定，網路拓樸將以網狀網路（Mesh Network）為主，進行點對點與單點對多點之效能量測。
2. 移動節點與固定節點間之量測：網路中資料發送端為固定，資料接收端控制為移動狀態；移動速度以一般人員走動之速率為基礎。網路拓樸將以網狀網路（Mesh Network）為主，進行點對點與單點對多點之效能量測。
3. 移動節點間之量測：網路中所有節點皆為移動狀態，移動速度以一般人員走動之速率為基礎，節點移動模式可採用隨意運動方式，或是模擬班兵於戰場上可能的移動模式等方式進行；參考點群體移動模式(Reference Point Group Mobility Model, RPGMM)為一般文獻上所公認之班兵群體移動模式之一，在此種移動模式之下，隸屬於某一群體的節點將根據事先訂定之參考點為中心，如地理上的位置、邏輯位置或相對方向、或是特定移動參考點(commander node)，再不過度遠離該參考點的前提下，進行隨意移動。本計畫之實地測試亦將參考此種移動模式。

上面幾種測試將以資料傳輸速率之效能量測為基礎，並根據量測過程中所記錄之量測資料，於後續資料分析與處理中歸納取得平均路徑存活時間與平均路徑修復時間等效能量測結果。

由於接收信號電功率小大與無線電多路徑傳播現象均會直接影響，無線通訊系統的效能如封包傳輸延遲（Packet Delay）及資料傳輸速率（Data Throughput），而這些現象又與傳播環境、距離及人員移動速度有關，於是在進行實測情境規劃時，應仔細分類量測情境，期能包含系統運作時的各種實際狀況。規劃進行之 MANET 效能量測環境與情境主要分為下面二項：

1. **室內傳播環境**：網路節點為網狀排列，其中傳輸資料發送端(Tx)分別透過 1-hop、2-hop、3-hop 路徑傳送至多個(約 5 個節點)資料接收端(Rx)，量測情境包括上述固定節點間之量測(所有節點均固定)與移動節點與固定節點間之量測(Tx 保持固定，中介節點或 Rx 移動)。除了量測資料傳輸速率，並測試 ad-hoc 擇路協定之路徑修復(path recovery)功能，觀察中介節點移除時，端點間傳輸效能之影響以及擇路協定進行路徑修復的能力；針對單點對多點之多重播送效能量測中，量測每個接收端之平均資料傳輸速率，以及多個接收端之資料傳輸速率總和，以評估多重播送模式之通訊效能。如下圖所示，於量測實驗中進行 Ad-Hoc 多重播送實驗，根據多個資料接收端之總和（如下圖之 Rx1、Rx2、Rx3），作為 Ad-Hoc 多重播送模式以及擇路演算法之效能評估基礎。

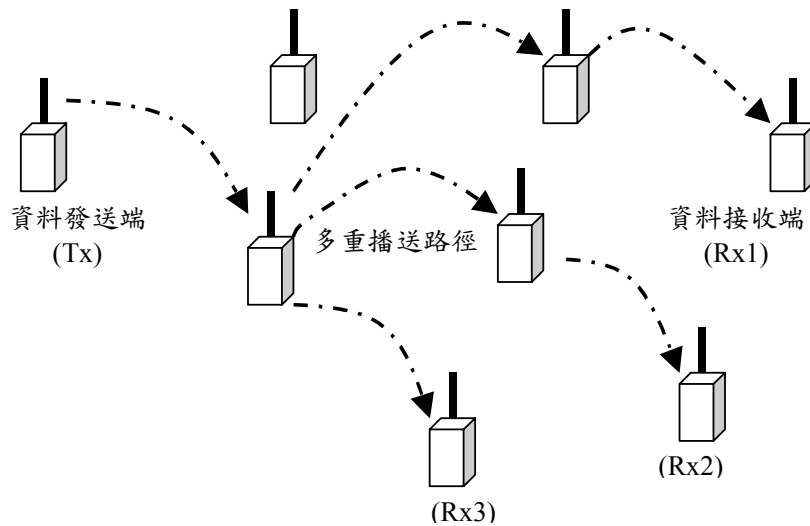


圖 1-23 多重跳躍式實驗平台之室內點對多點效能測試情境

2. **室外傳播環境：**網路節點為網狀排列，其中傳輸資料發送端(Tx)分別透過 1-hop、2-hop、3-hop 路徑傳送至多個資料接收端(Rx)。量測情境包括移動節點與固定節點間之量測(Tx 保持固定，中介節點或 Rx 移動)或移動節點間之量測(所有節點均移動)，其中移動節點之移動模式將參考學理上之 RPGMM 群體移動模式進行，用以模擬班編制之數位戰士間進行資料通訊；如下圖所示，所有節點在每單位時間內使用大致相同的速率移動，(如 Tx 將視為 PRGMM 中群體移動之參考點(commander node)，其他移動節點將參考 Tx 所在位置與移動方向，決定下個單位時間所要到達的地理位置，該而該位置之選定採不離開以 Tx 為圓心、半徑為特定長度(如 100m)之圓形區域內。

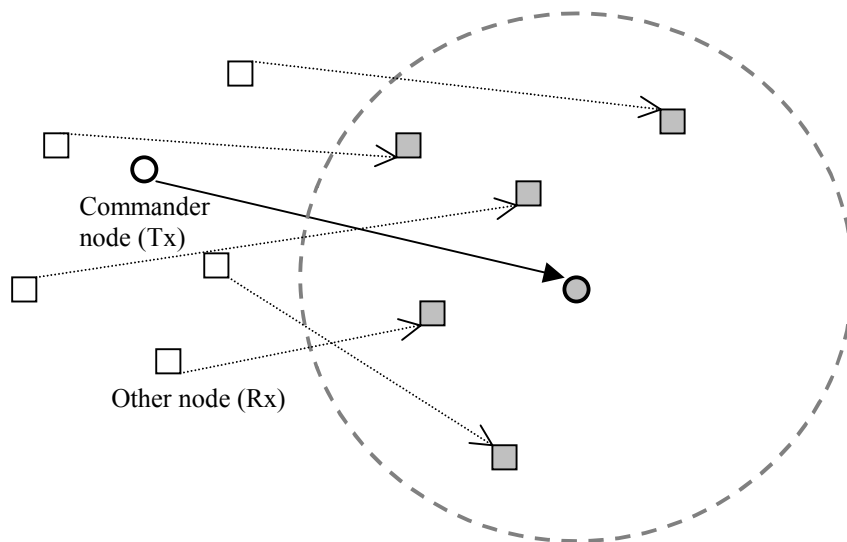


圖 1-24 採用 RPGMM 群體移動模式之數位戰士班兵移動行為案例

為考慮在不同量測環境下的效能表現。本年度所考慮之室外量測環境主要包括：

- 位於空曠地之視線內傳播(Line-of-sight, LOS)
- 位於樹林、草地、土坡具輕度遮蔽之傳播環境，遮蔽體包括固定之樹木、行動之路人、車輛等

## 2. UWB 天線設計與量測

### 2.1 前言

超寬頻(Ultra-wideband)系統是一種短距離傳輸並兼具極高速和低耗能的技術。UWB 俱備高資料傳輸速率，低傳輸功率，在 2 公尺傳輸範圍內，其傳輸速率大於 480Mbps，在半徑 10 公尺，傳輸速率也有 100Mbps；如圖 2-1 所示，縱軸代表距離(Rang)，橫軸代表最大資料流量(Peak data rate)超寬頻與現有的無線技術不同，這是一向不需要使用載波(carrier)，而是發射脈衝電波(impluse)來傳輸數據的技術[0]。因此需要很大的發射頻寬，並可降低使用功率達到低耗電量的要求。UWB 運用於通信系統上可建構個人通信網路。成員間可彼此分享資料，達到在戰場上協同作戰的能力。在平時除可用以連接無線設備外，也可利用其高頻寬(2 公尺內可達 480Mbps)之特性用以建構無線之多媒體傳輸系統，以多媒體的方式遂行教育訓練等任務。

超寬頻天線有許多用途，當提供足夠能量給脈衝雷達系統時，超寬頻天線可以偵測辨識目標。在雷達截面掃描的領域裡，單一的超寬頻天線可以取代很多的窄頻天線，並且可以覆蓋到所有我們想掃描的頻段，由於單一的超寬頻天線可以節省許多的空間與體積並提供許多的通訊頻道，因此再衛星通訊上也十分的實用。但是我們並不想為了寬頻的效能犧牲掉其他一些天線的特性，例如增益(gain)和指向性(directionality)。

然而超寬頻天線也有許多其他的應用，例如在寬頻和展頻的技術上，在雷達上可以運用很短的脈衝來辨識目標[1]，此外在電磁量測以及瞬時的電磁現象上亦有許多應用。在實際的應用上，超寬頻的實現是利用激發的脈衝或瞬間打出的訊號來達成。訊號波形改變的發生原因決定在於輻射或接收天線種類的不同，這些天線包括簡單的 monopole 和 dipole 天線或是更複雜的天線，例如 reflectors 天線、shields 天線以及 bow-tie 天線、horn 天線和 microstrip patch 結構的天線等等。在超寬頻天線研究上，將時域(time domain)技術和頻域(frequency domain)技術相比，利用時域(time domain)的技術是比較適當的。由於電腦硬體和軟體的進步，數值技術已經被用來解決許多在時域的電磁天線研究議題，例如 FDTD 便是以時域為架構的數值模擬。

傳統的寬頻天線中有行進波天線(Traveling-Wave Wire Antenna), 偶極圓錐天線(Biconical Antenna), 單極圓錐天線(Monoconical Antenna), 盤錐形天線(Disccone Antenna), 袖型天線(Sleeve Antenna), 螺旋天線(Spiral Antenna)和對數週期天線(Log-Periodic Antenna), 不過其中適用於超寬頻系統的只有偶極圓錐形天線、單極圓錐形天線和盤錐形天線。因其不僅有很大的輸入阻抗頻寬(Large input impedance bandwidth)、其輻射場型(Radiation pattern)也能控制在一定的頻寬中。但是以上的天線皆是 3D 立體結構，並非 2D 平面結構，所以在應用上將有所限制而製造成本與製造難易度也將會提高。所以這次的計畫將致力於研究 2D 平面式寬頻天線，並設法將體積縮小化以利於行動通訊應用。

依據需求單位的需求，研製研擬中的超寬頻(UWB)射頻前端收發模組。其中收發模組中之各個元件如低雜訊放大器、功率放大器、升降頻混頻器、各類濾波器、壓控震盪器、與頻率合成器等，都已於前一年順利完成。今年將這些電路元件加以整合完成模組，並與其他分項完成介面定義。

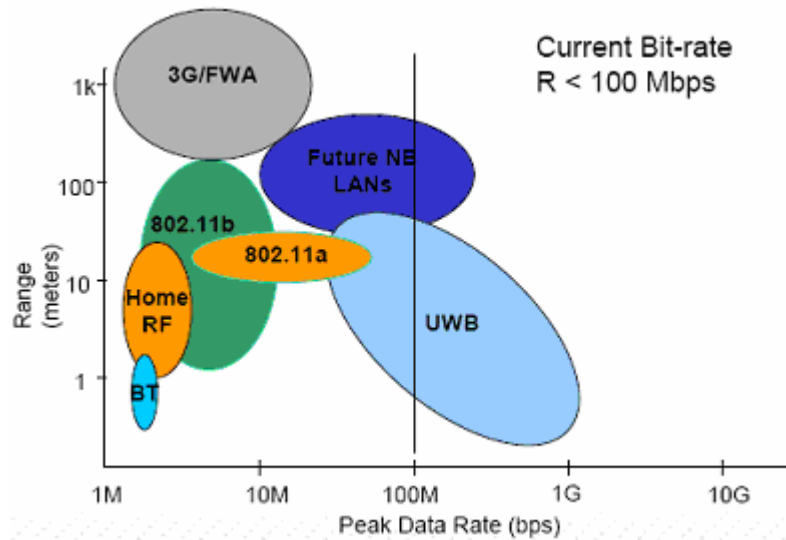


圖 2-1

## 2.2 研究方法

一般常見的寬頻天線有螺旋天線 (Spiral antenna)如圖 2-2、雙錐形天線 (Biconical antenna)如圖 2-3、對數週期天線 (Log-periodic antenna)如圖 2-4、盤錐形天線 (Discone Antenna)如圖 2-5 等，這類型的天線為滿足寬頻的使用，在天線的外形上常需有較特殊的設計，如漸細的設計(taper)，一般常見使用在 UWB 的韋瓦第天線(Vivaldi antenna)亦是如此，故對於天線的選取及設計方面將有這些考量。

本次計畫天線主要的設計規格(Spec.)如下：

1. UWB 天線需具備良好的饋入匹配(Return Loss < -10dB)在 900MHz~1200MHz 頻段之間。
2. UWB 天線需具備全方向性場型(Omnidirectional pattern) 在 900MHz~1200MHz 頻段之間
3. UWB 天線傳輸相位被要求線性在 900MHz~1200MHz 頻段之間。
4. UWB 天線被要求盡可能小外形尺寸，以達到整體無線系統小型化的目的。

我們會針對一些不同種類天線做研究，例如 slotline 天線可以用來傳遞寬頻的電磁波；slotline 亦可以應用在韋瓦第天線(Vivaldi antenna)。韋瓦第天線(Vivaldi antenna)是在微波基版兩面做喇叭狀刻蝕，兩個錐狀的金屬依附在銅板的兩側，由 coax-to-slotline (C/S) 的傳遞訊號以達到寬頻。韋瓦第天線有一些特性，如逐漸彎曲的曲線[5, 6]、以及在不同的頻率由天線不同的部分輻射[5, 7]。事實上操作的頻寬受限於由傳輸線輸入天線上的狹縫，以及受限於天線的終端尺寸大小。

然而，在韋瓦第天線設計上，有兩樣設計重點：

- (1) 在主要的傳輸線（通常是以微帶線）將訊號輸入狹縫時，需要在很大的操作頻寬裡有很低的反射係數來匹配天線。
- (2) 為了在很大的操作頻寬內達到需求的波束寬 (beamwidth) side lobes 和 back lobes，天線的尺寸和形狀的決定亦為非常重要。

由於電腦硬體和軟體的進步，數值技術已經被用來解決許多在時域的電磁天線研究議題，故本計畫會用電腦來演算數值分析，更有效率的讓所設計之超寬頻天線擁有更好的效能，以獲得更精確的資訊。我們將以 IE3D (MOM)和 HFSS (FEM)電磁模擬軟體來設計超寬頻天線，以研探不同種同類的超寬頻天線的性能分析。在實際量測方面:S 參數(S parameters): 網路分析儀(Network analyzer);天線阻抗與電壓駐波比(Antenna impedance and VSWR):由量測出的 S 參數計算出來;輻射場型(Radiation pattern):交大無反射實驗室(NCTU anechoic chamber)

在本文中所討論的 UWB 天線，期望可以具有實際應用價值，故在設計此 UWB 天線時，將依據下列幾個出發點進行研究與改進：

1. 平面印刷式天線 (Printed Antenna)
2. 使用單純的天線結構例如單極天線 (Monopole Antenna),槽孔天線(slotline antenna)
3. 以下為常見的寬頻天線之架構如下所示：

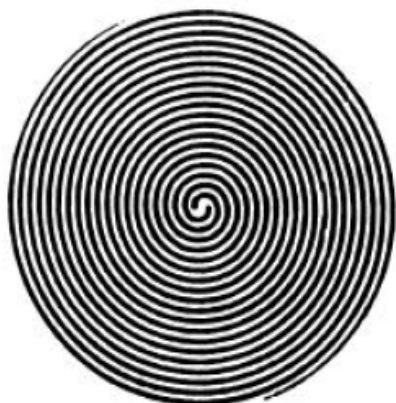


圖 2-2

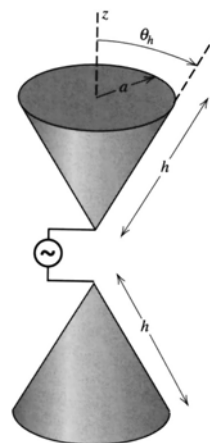


圖 2-3

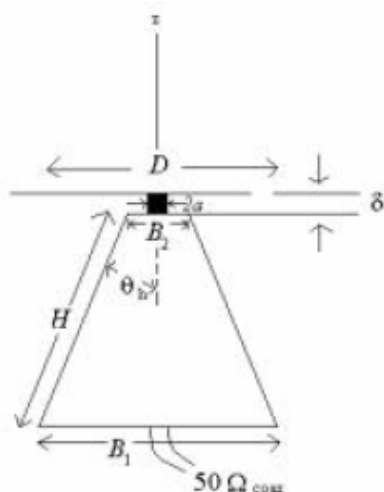


圖 2-4



圖 2-5

### 2.3 天線設計

由於此次計畫所要求之規格為操作於 UHF 頻段，操作頻寬在 VSWR: 2:1 的範圍內且頻寬為 900MHz-1200MHz 以滿足 UWB 之需求，並且要求此 UWB 天線模組具有全向性 (omni-directional) 的輻射場型。由於要求 omni-directional 的輻射場型，故設計理念由最原始的雙極天線 (dipole antenna) 出發。但由於 dipole antenna 並不寬頻，所以設計方向便以 dipole 作為變形的寬頻天線例如平面式單極天線 (planar monopole antenna)。此計畫天線製作在厚度為 0.8mm 的 FR4 基板上，尺寸為 10cm X 5cm，我們可以藉由調整 Ground 的形狀來調整共振頻率與頻寬來達到我們的要求，天線之形狀與尺寸如圖 2-6 所示。

#### Practical antenna

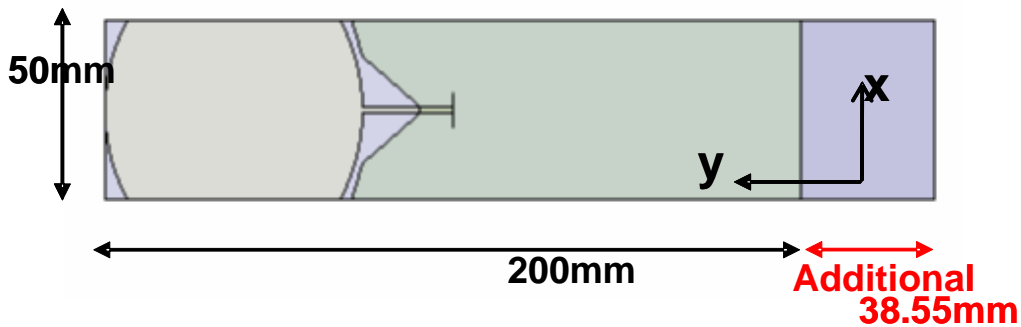


圖 2-6

- a : 適度的調整 a 之長度,可以改善 S 參數 (S-PARAMETER),,,如果  $S_{11}$  參數沒有在  $< -10$  db,則匹配不好,則能量無法潰入,會影響天線的效能。
- b : b 的長度決定了低頻的頻率,如果 b 的長度加大則低頻率就會往下降,反之縮短 b 之長度,則低頻會往上升。
- g : 調整 g 之寬度,可以使匹配變好 (input impedance),更接近 50 歐姆  
其原理概念主要是增加一個電容效應,使其與電感效應相消(依據 SMITH CHART) 其歸一 (NORMALIZE) 組抗點會更靠近原點 (如圖 2-7)

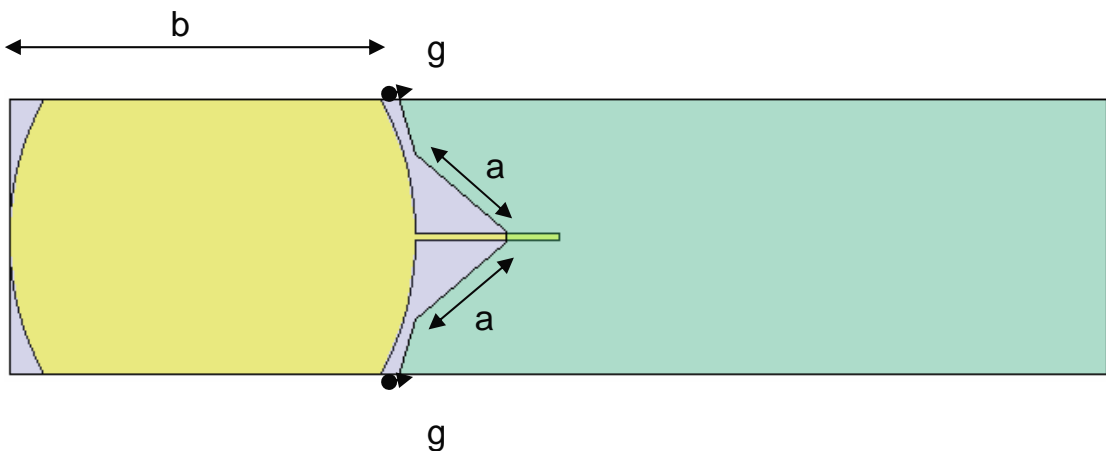
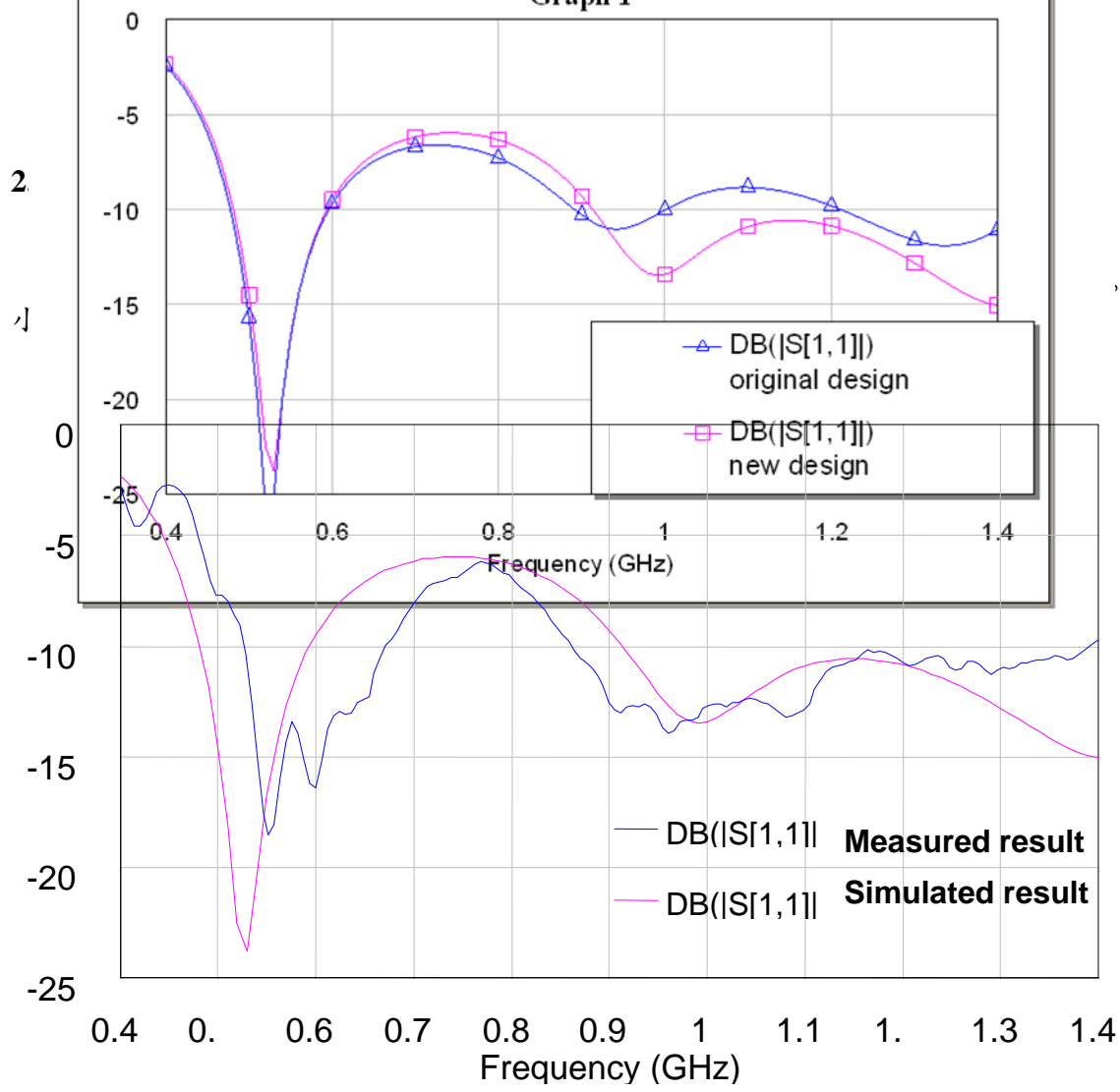


圖 2-7

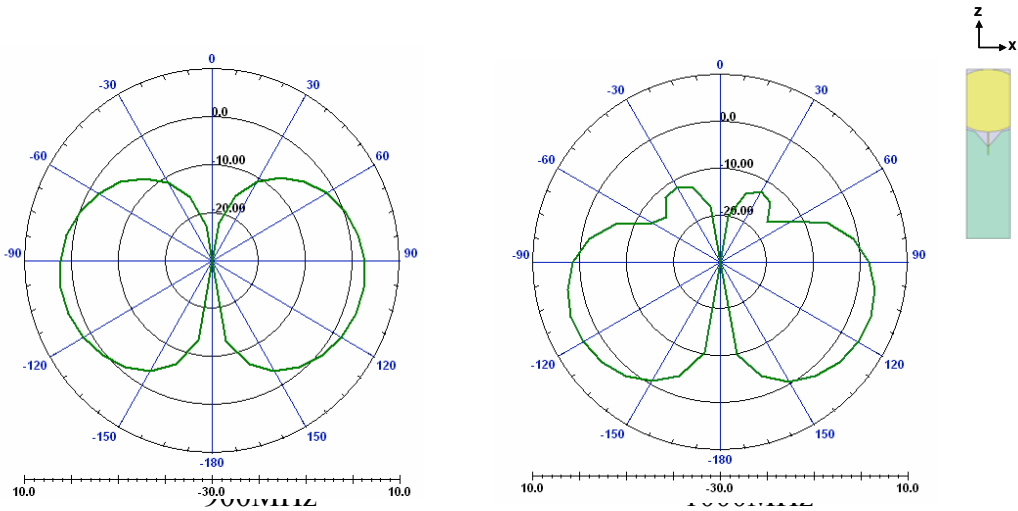


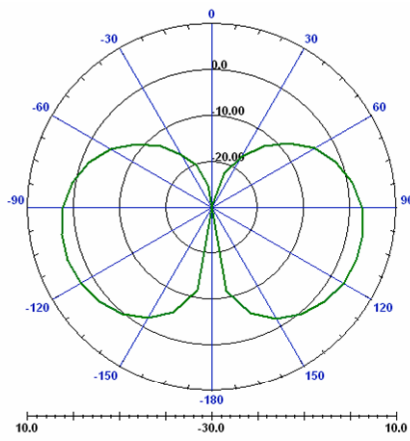


反射波很

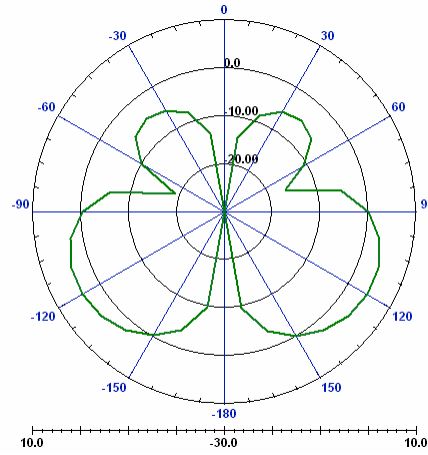
圖 2-8

模擬場型 (E-plane)

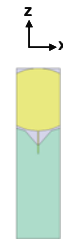




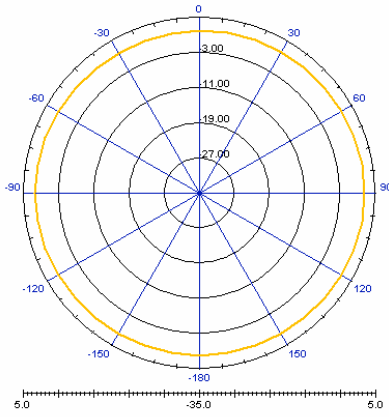
1100MHz



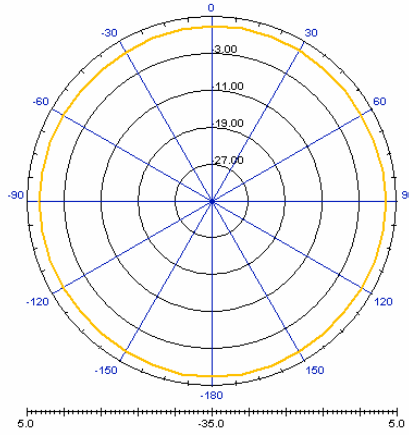
1200MHz



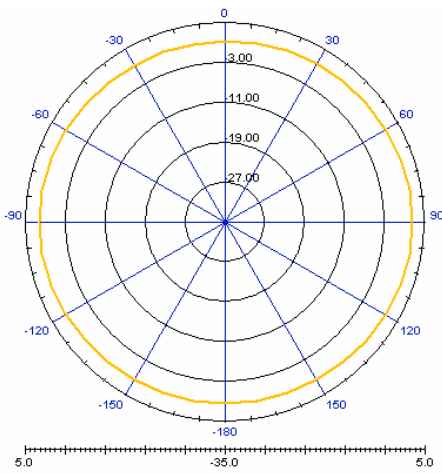
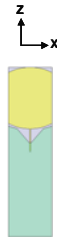
模擬場型 (H-plane)



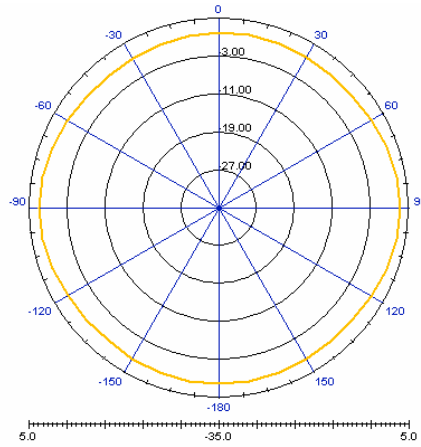
900MHz



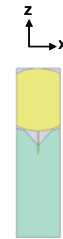
1000MHz



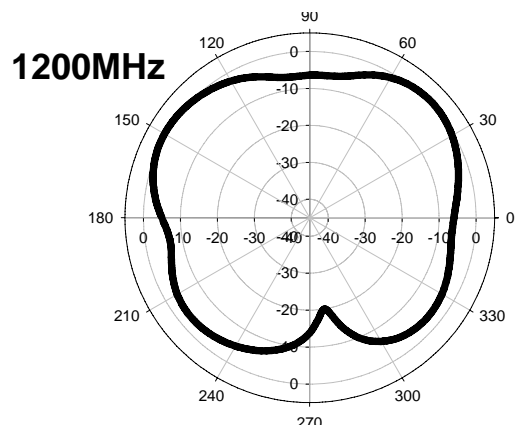
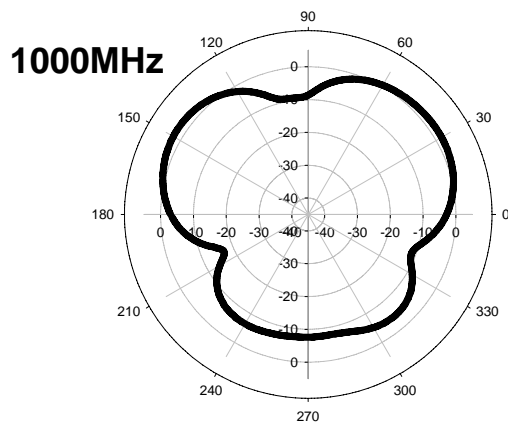
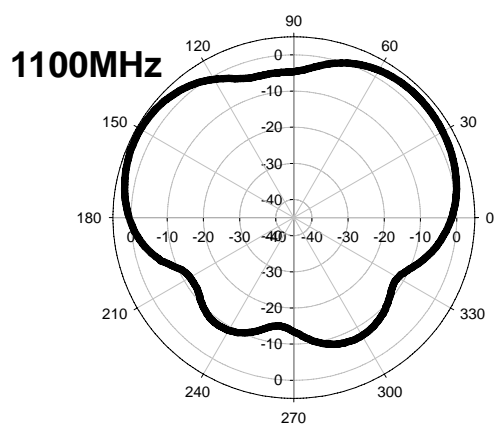
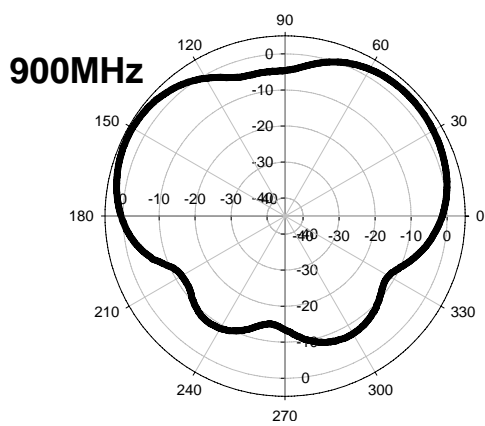
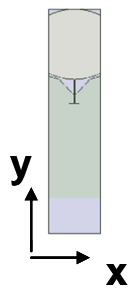
1100MHz



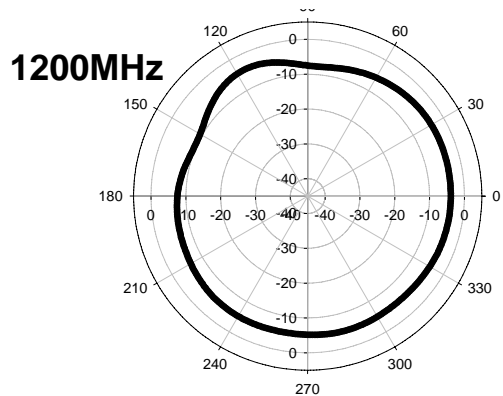
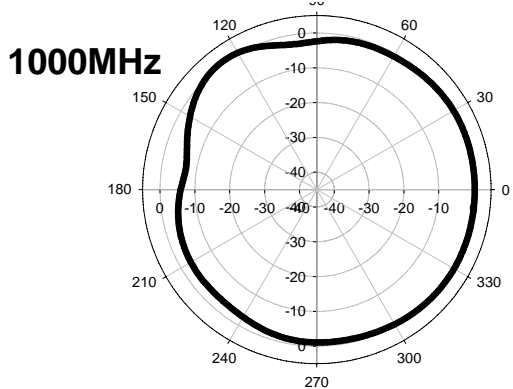
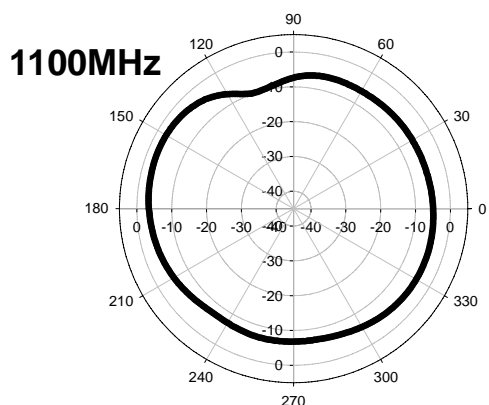
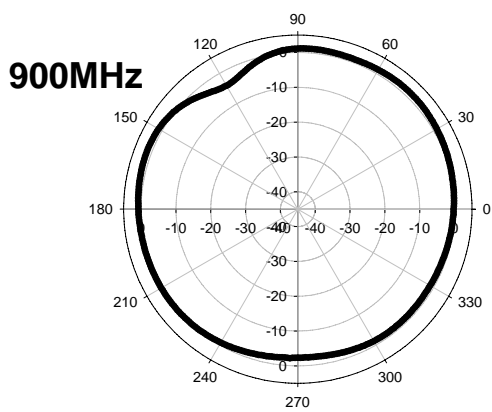
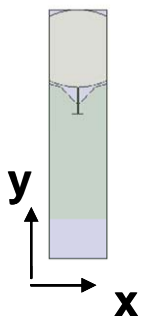
1200MHz



實際量測與模擬之比較 (From NCTU anechoic chamber) (E-plane)



(H-plane)



## 2.5 結論以及未來展望

對於此無線通訊計畫,天線模組已發展十分完整,經過多次的模擬以及精確量測過後得知,增益(GAIN)在 900-1200 MHz 很理想.,對於天線方面,雖然在效能方面都已達到工研院的需求,但我們並不引以為傲,對於此天線,我們希望能夠在縮小尺寸,縮小面積,這樣不論理論或實用方面,都能得到很大的突破,這也是未來我們所希望達成的目標。

### 3. 超寬頻射頻傳收機模組

本計劃中將介紹超寬頻的射頻傳收機模組，以完成 UWB 之通訊機。其中包括下列各個微波關鍵性電路，包含：UWB 射頻濾波器、UWB 功率放大器、UWB 低雜訊放大器、頻率合成器、寬頻升降頻混頻器、寬頻微波開關、及微波功率偵測器等。首先，我們將介紹一般的無線通訊系統，並對傳送路徑與接收路徑分開討論。最後，再實作所有主要的電路元件實作並整合成電路模組。

#### 3.1 前言

軍用無線通信系統有別於商用無線通信系統，在使用情景上需具靈活性、機動性與強韌性。當頻率在500MHz以上而且relative bandwidth 超過25%以上，則整個系統可以稱作超寬頻頻寬。這種高寬頻接收模組在最初是設計給軍隊上的使用，本計劃之通訊頻帶設定在0.9~1.2GHz，頻寬約為29%。

#### 3.2 研究方法

##### 3.2.1 UWB RF 收發機

圖一為射頻收發模組系統之基本架構圖，圖中利用3-1個3.3GHz到3.6GHz的寬頻頻率合成器產生本地震盪訊號，經由功率分配器等分送入二個寬頻的升頻/降頻混頻器，當作是接收路徑和傳送路徑的本地震盪器來源。在接收的部分，將接收的900MHz到1200MHz訊號升頻到2.4GHz，再送入2.4GHz之接收/發射晶片中。在發射的部分則將2.4GHz之接收/發射晶片送出的2.4GHz訊號降頻到900MHz到1200MHz再送入有功率控制的功率放大器放大以後發射出去。經過實測傳送調變訊號的package loss 小於3%。另外計劃當中也完成了頻率合成器的跳頻轉換時間的量測，量測的結果在兩個最遠的頻段上頻率合成器跳頻所需要的暫態時間約為250us。

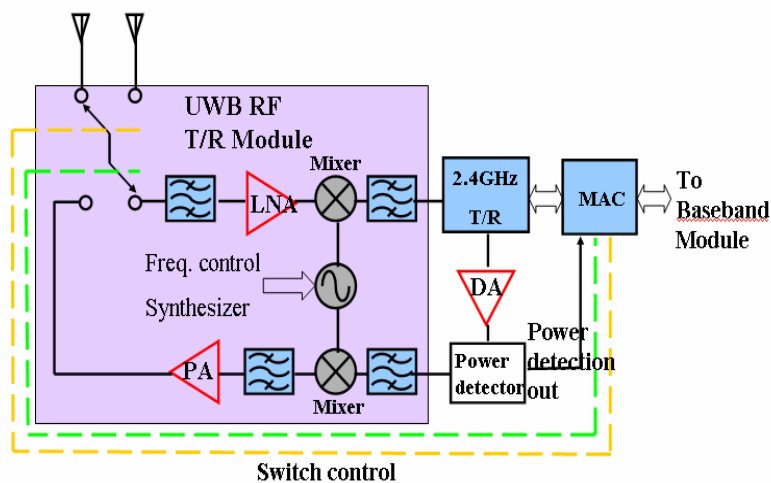


圖 3-1 UWB RF 收發機系統架構圖

### 3.2.2 RF 收發模組

圖 3-2 是整個模組的架構和所使用的關鍵零組件。這一個系統是使用半雙通的形式做成，能夠讓電腦控制何時使用發送或是接收端。在發送的路徑上，我們需要接上一個自己設計的帶通濾波器在混頻器之後，用作消除由混頻器所產生的鏡像訊號。之後便接上放大器和功率放大器將訊號放大到 30dBm。在接收路徑上，訊號從天線收下來需要先經過一個帶通濾波器來選擇目標的頻帶。另外在本地震盪器的路徑上，為了要增加 VCO 的穩定度，必須要加上一個頻率合成器的電路。最後為了要控制整個電路，必須要安裝跳針的腳位連接到 GPIO，可以由電腦來控制交換器(SWITCH)來選擇是接收端路徑運作還是發送端的路徑運作。表 3-1 為射頻模組的 LMX2433 的控制訊號腳位定義。

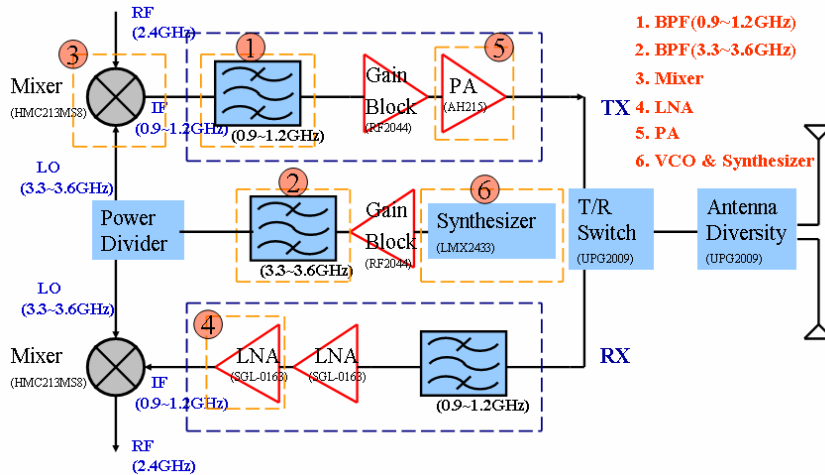


圖 3-2 RF 收發機系統使用的關鍵零組件

表 3-1 LMX2433 控制訊號腳位定義

CLK	I/P	3-wire interface serial bus clock for LMX2433
DATA	I/P	3-wire interface serial bus Data for LMX2433
LE	I/P	3-wire interface serial bus LE for LMX2433
Lock indicator	O/P	3.3~3.6GHz local oscillator lock indicator.

#### 收發模組實體電路

RF 收發模組實體電路詳見圖 3-3。圖 3-3 中實體電路尺寸 240mm × 54mm，射頻 (0.9~1.2GHz) 比例頻寬 28.57%，圖三右邊是超寬頻天線，而在混頻器的背面則分別接到中頻模組 (2.4GHz) 的輸入和輸出端，這個射頻收發模組需要一個 DC 直流電源和許多個邏輯控制接腳，在左側的是寬頻頻率合成器，透過 3-wire interface 可以控制跳頻，範圍為 3.3~3.6GHz，減去中頻收發 IC 的 2.4GHz，最後送到天線的射頻為 0.9~1.2GHz，即本系統使用的載波頻率。除了跳頻的功能以外，邏輯控制訊號並可以在接收與發射時分別切換 PA 和 LNA 來減少功率的消耗。

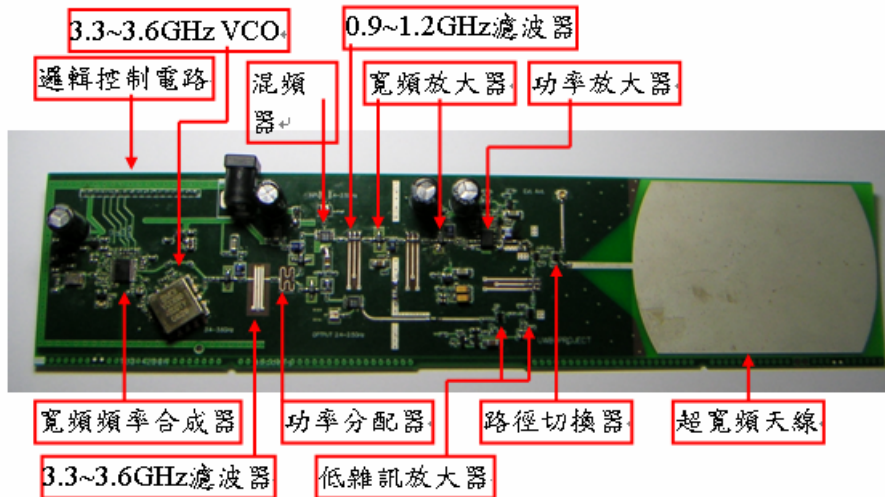


圖 3-3 RF 收發模組實體電路

### 3.2.3 IF 收發模組

圖3-4為中頻收發模組系統之基本架構圖，中頻收發模組主要是一顆收發晶片(AL7320)組成。基頻訊號由I/Q輸入或輸出 AL7320，在傳送部份，將基頻訊號升頻到2.4GHz的中頻訊號再送入射頻模組。在接收部分將從RF收發模組接收到的2.4GHz中頻訊號再降頻到基頻。AL7320在初始化時，register會透過3-wire interface設定中頻的載波頻率，收發模式，和增益等。表3-2為中頻模組的AL7320晶片控制訊號腳位定義。圖3-5為IF收發模組實體電路。

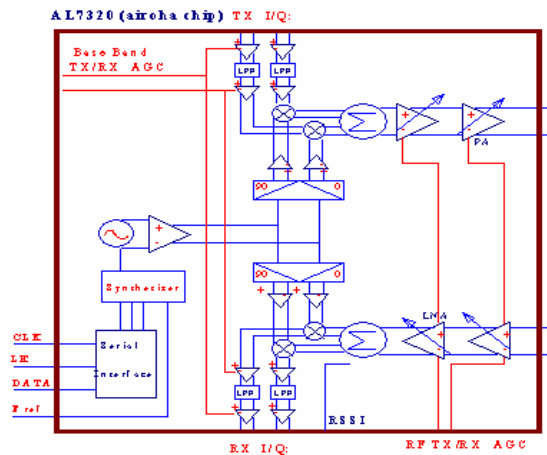


圖 3-4 IF 收發模組架構圖

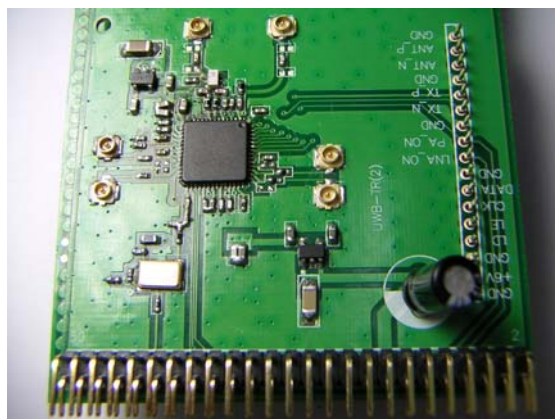


圖 3-5 IF 收發模組實體電路

表 3-2 AL7230 控制訊號腳位定義

TX_P	I/P	T/R switch control signal: Transmite (H), Receive (L)
TX_N	I/P	T/R switch control signal: Transmite (L), Receive (H)
Ant_P	I/P	antenna switch control signal: external antenna (H) internal antenna (L)
Ant_N	I/P	antenna switch control signal: external antenna (L) internal antenna (H)
PA_ON	I/P	Power amplifier control signal : Turn On (H), Turn Off (L)
LNA_ON	I/P	LNA control signal : Turn On (H), Turn Off (L)
CLK_2	I/P	3-wire interface serial bus clock for AL7230
DATA_2	I/P	3-wire interface serial bus Data for AL7230
LE_2	I/P	3-wire interface serial bus LE for AL7230
PLL_ON	I/P	Control PLL AL7230 : On (H), Off (L)



## 4. UWB 基頻模組

本模組之研究方法為針對900 MHz-1200 MHz頻段進行分頻處理，但考慮到900 MHz-960 MHz的部份已經被GSM等系統使用[1]，因此僅採用960 MHz-1200 MHz共約240 MHz的頻帶，吾人將此頻段分為多個頻道，在這些不同的頻道間使用跳頻(Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS)展頻技術；而在每個頻道之內吾人則使用直接序列展頻(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)技術。本系統採用軟體無線電之設計概念，使系統能依使用者需求動態調整系統參數，彈性地分配此兩種技術在系統中之比重。因此，吾人所設計之UWB系統架構同時具有直接序列展頻及跳頻展頻之優點。

### 4.1 前言

展頻(Spread Spectrum, SS)技術[2]- [5]最早於1940年代被發掘，並且在1950年代開始被應用於軍事通訊系統。展頻系統是將原本的窄頻信號頻寬擴展至較寬的頻寬，如此一來可獲得一處理增益(Processing Gain)，在此處理增益的幫助之下可以使系統在較低的傳輸能量下，保持良好的抵抗雜訊能力。

展頻通訊通常分為跳頻(Frequency Hopping, FH)展頻以及直接序列(Direct Sequence, DS)展頻兩種模式，分別具有以下優點：

#### (1)跳頻展頻：

- a. 極具保密特性。
- b. 無近遠問題(Near-Far Problem)。

#### (2)直接序列展頻

- a. 能有效抵抗干擾。
- b. 可藉由調整處理增益彈性改變資料率。

吾人所設計之UWB系統採用軟體無線電之設計概念架構，使系統能依使用者之需求動態調整系統參數，彈性地分配此兩種技術在系統中之比重，因此同時具有直接序列展頻與跳頻展頻之優點。

### 4.2 UWB 基頻收發機系統模擬平台介紹

為了實現UWB基頻收發機系統，吾人使用搭載了DAC模組、ADC模組、和有DSP處理能力的綜合平台做系統的驗證與實現。圖4-1為基頻模組平台全貌。以下各章節將對平台上的每個模組做介紹。

#### 4.2.1 Lyrtech VHS-DAC

圖4-2為Lyrtech VHS-DAC模組全貌。VHS-DAC模組的功能在於將數位訊號重建得到類比訊號。此模組提供8個輸出的通道，可將14個位元的數位訊號轉換成類比訊號；支援的最高取樣頻率為 125 MHz。此模組包含一個Xilinx Virtex II FPGA系列的XC2V3000晶片，吾人將其用在複雜度較低的傳送端。

VHS-DAC模組提供了GPIO和FPDP兩種輸入輸出介面。此模組提供的GPIO有34個腳位，傳輸速度可以支援到80 MHz；FPDP可支援到400 MB/s的傳輸速度。VHS-DAC模組可

利用GPIO來接收外界資料，因此吾人將VHS-DAC放在傳送端，並且利用GPIO和MAC層溝通。

#### 4.2.2 Lyrtech VHS-ADC

圖4-3為Lyrtech VHS-ADC模組全貌。VHS-ADC模組的功能在於將類比訊號經由取樣得到數位訊號。此模組提供8個輸入通道，可轉換成14個位元的數位訊號；支援的最高取樣頻率為 105 MHz。此模組包含一個Xilinx Virtex II FPGA系列的XC2V6000晶片，有更快的處理速度和效能，適合複雜度高的接收端使用。

VHS-ADC模組亦提供了GPIO和FPDP兩種輸入輸出介面。此模組提供的GPIO有34個腳位，傳輸速度可以支援到80 MHz；FPDP可支援到400 MB/s的傳輸速度。VHS-ADC模組可利用GPIO傳送接收資料。吾人將VHS-ADC放在接收端，並且利用GPIO和MAC層溝通。

### 4.3 UWB 基頻收發機系統模擬平台實現

基頻模組的接收端是透過Matlab simulink介面裡提供的Xilinx Blockset來做電路實現，通過編譯之後再利用system generator產生bit stream檔來讓VHS-DAC和VHS-ADC裡的FPGA執行。

#### 4.3.1 基頻模組傳送端

圖4-4為基頻傳送端的電路圖。Lyrtech VHS-DAC收到來自MAC模組的資料後，先將其調變，然後乘上偽雜訊數碼，進行直接序列展頻處理。之後，在展頻後的訊號之前，加上一串前置訊號，組成欲傳送的訊框，並利用cable線與RF模組連結，將此組訊框傳送出去。此外，基頻傳送端模組與接收端模組，都各有一組電路專門與MAC模組和RF模組溝通。

#### 4.3.2 基頻模組接收端

當訊號以類比的形式藉助空氣為傳播媒介傳送至接收端時，首先RF模組會將帶有信息的訊號擷取下來，再傳送給負責接收端處理的VHS-ADC FPGA晶片。此時VHS-ADC會先根據訊號的特性和所需的精細度進行取樣，將其轉換成數位訊號，之後根據此轉換得到的數位訊號進行信號處理的動作。

吾人在基頻模組接收端設計上，除了原先基本的展頻系統架構（解展頻）外，還要針對一些射頻失真的狀況來設計一些功能區塊，以便維持整套通訊系統的完整性，其中包括：同步，與傳送端調變相對的解調及抗干擾等。

圖4-5是由Xilinx Blockset所組成的接收端電路實現圖。由於本系統在傳送端為四倍超取樣頻率，所以通過接收端的平方根升餘弦濾波器(Root Raised Cosine Filter)之後，先在做時間上解多工（Time division De-multiplexer）的動作，再進行以下的信號處理。

##### 4.3.2.1 同步

在接收端的部分，吾人藉由偵測長封包前置資料(Long Preamble)來獲得同步的資訊，也就是所謂碼擷取技術。如圖4-6所示，接收到的封包經過所設計的匹配濾波器之後會產生一個極大值，接收端就可以藉此判斷出封包的起始位置。

封包的起始時間決定後，基於多重路徑效應的影響，所以在接收端會產生數個極大值，如圖4-7所示，吾人必須將匹配濾波器的輸出做排序的處理後，才能找出所有多重路徑的起始位置。

吾人藉由設計一個適當的臨界質 (threshold) 選出穩定性最高的路徑進行以下的信號處理動作。

#### 4.3.2.2 解展頻

由於在傳送端時，欲傳送之訊號使用一組特殊設計之偽雜訊數碼進行直接序列展頻處理，即為所要傳送之展頻信號。此信號在接收端接收之後以相同的程序進行解展頻，在接收端所使用的偽雜訊數碼必須與傳送端所使用的一致，才能正確解出所傳送的資訊，也因此能達到保密及多用戶區隔的效果。

如圖4-8的電路實現圖，資料通道的部份是以IEEE 802.11b中所定義的11碼片之巴可碼序列 (Barker Code) 對訊號進行解展頻，其中此11碼片長之巴可碼序列如下： $+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, -1, -1, -1$ 。

而在控制通道的部份，也就是傳送已知的指標 (pilot) 信號其解展頻方式如同圖四，但是使用另外一組同樣是11碼片長，但是和先前的巴可碼正交的另外一組展頻碼進行解展頻，此11碼片長之巴可碼序列如下： $+1, +i, -1, +i, -1, -i, -1, +i, -1, +i, +1$ 。

#### 4.3.2.3 解調和傳送

將經過解展頻的訊號，一樣分為資料通道和控制通道分別進行DBPSK和DQPSK解調後，得到實際傳送端欲傳送的資訊，其電路實現圖為圖4-9、圖4-10，最後透過GPIO的溝通介面，將資料傳送給MAC模組。

### 4.3.3 基頻模組與 MAC 模組的聯結

基頻模組與MAC模組的溝通是使用GPIO，其中MAC模組的傳送端和接收端，分別與基頻模組中的Lyrtech VHS-DAC和Lyrtech VHS-ADC上的GPIO相連，所用到的皆為GPIO的24、26、28，和31號腳位，分別代表Data、Enable、Carrier Sense，和Clock，如圖4-11和圖4-12所示。

#### 4.3.3.1 控制訊號與工作流程

基頻模組透過Lyrtech VHS-DAC上GPIO的第31號腳位 (Clock) 持續送給MAC模組一個2M bps的時脈，這也表示基頻模組與MAC模組是以這個速度來溝通，且當基頻端已準備好接收MAC模組的訊號時，會將第28腳位 (Carrier Sense) 拉至高電壓位準，用以告知MAC模組可以開始傳送資料。而MAC模組透過GPIO的第24腳位 (Data) 將資料送給基頻模組，並伴隨著第26腳位的enable訊號；意即當第26腳位是高電壓位準時，基頻模組才會將第24腳位 (Data) 收到的訊號當作資料處理。

MAC模組的接收端與基頻模組上的Lyrtech VHS-ADC的GPIO相連，所用到的是GPIO的24、26、28，和31號腳位，分別代表Data、Enable、Carrier Sense，和Clock，如圖4-12所示。

ADC模組與DAC模組的設定相似，不同之處在於，ADC模組上GPIO的第24腳位 (Data) 提供基頻模組將資料送給MAC模組之用，並且也伴隨著第26腳位的enable訊號，以利MAC模組判斷是否有資料傳輸。

#### 4.3.3.2 系統驗證

圖4-13是介面測試的示意圖，MAC模組與基頻模組的驗證可分為兩部份，分別是MAC模組傳送端與基頻模組Lyrtech VHS-DAC的聯結測試，以及基頻模組Lyrtech VHS-ADC與

MAC模組接收端的聯結測試。

第一部份的驗證，為MAC模組傳送端與基頻模組Lyrtech VHS-DAC的聯結測試。由MAC模組傳送一組特定的訊框至基頻模組，當基頻模組收到後，會再經由GPIO其他驗證用的腳位輸出給邏輯分析儀，經由邏輯分析儀顯示的結果，可判斷是否成功接收來自MAC模組的訊框。圖4-14至圖4-16為驗證之結果，其中圖4-14為MAC模組終端機顯示其所傳送的訊框（0 1 2 3 ... ff），而圖4-15及圖4-16則為邏輯分析儀讀取基頻模組所收到的結果。

第二部份的驗證，為基頻模組Lyrtech VHS-ADC與MAC模組接收端的聯結測試。基頻模組會傳送一組特定的訊框（ff 1 1 ... 1）給MAC模組，當MAC模組收到後，再將其顯示於終端機之上，圖4-17為MAC模組收到訊框後顯示於終端機之上的結果。

#### 4.3.4 基頻模組與 RF 模組的聯結

原始訊息經過映射、展頻後的訊號，會透過基頻系統的D/A轉換器輸出，之後的調變、升頻等動作必須由RF模組來完成；同樣地，接收端的RF模組將訊號降頻、解調之後，再經由基頻模組的A/D轉換器進行後續的接收動作。

本系統使用之RF模組為半主動元件，頻率、增益的設定等等初始化動作，須由外部元件，也就是基頻模組來進行控制，基頻系統與RF模組之間使用GPIO作為溝通橋梁。

##### 4.3.4.1 系統架構

RF模組的基本架構如圖4-18所示，基頻要控制的部分可大致分為UWB射頻元件(LMX2433)與中頻收發IC(AL7230)兩種。在初始化的階段，吾人將設定中頻收發IC，使其傳送（或接收）2.4GHz調變的訊號；接著再設定UWB射頻元件，將真正傳送（接收）的調變頻率降下來。

UWB射頻元件之輸出頻率可以藉由GPIO來設定，範圍為3.3~3.6GHz，減去中頻收發IC的2.4GHz，可得到真正送到天線端的頻率範圍為0.9~1.2GHz，即本系統使用的載波頻率。跳頻的動作也是在這裡完成，當系統要跳頻的時候，只需透過GPIO傳送指令給UWB射頻元件即可。接收機部分，除了資料訊號線方向相反之外，控制訊號線仍為基頻→RF。

##### 4.3.4.2 控制訊號

控制訊號方面，UWB射頻元件與採用3-wire interface，由三種訊號線所組成：CLK, DATA, LE (Latch Enable)，方向為基頻→RF（請參考表4-1、圖4-11和圖4-12）。IC由DATA讀入24-bit的序列資料，當LE致能時，再依照資料指定的register位址將內容寫入指定的位置。此外還有一條訊號線：LD (Lock Indicator)，方向為RF→基頻，功能為告知基頻RF模組是否跳頻完成。

IC初始化的動作，基本上就是將每一個register給予一適當的值，其中包含頻率、增益等等設定；初始化過後，跳頻的動作只需藉由設定UWB射頻元件內的其中一個register即可完成，因此所需的時間很短。

中頻收發IC也具備上述的3-wire interface，除此之外，還有一些額外的控制訊號腳位（請參考表4-2、圖4-11和圖4-12），負責控制天線的選擇，收發模式的設定，以及放大器的開關與否。

##### 4.3.4.3 工作流程

RF模組與基頻模組之間的互動大部分集中在系統初始化的時候，除此之外就是跳頻的動作。本系統設計的跳頻頻段有11組，如表三所示。

從系統開機開始，與基頻RF模組的工作流程如圖4-19所示。在RF的兩個IC都初始完成之後，當跳頻的指令下達時，基頻會命令LMX2433跳至下一組頻段，當LMX2433完成切換頻率後，LD就會升回1以告知基頻模組跳頻完成；同時，AL7230也會針對目前的跳頻頻率修改其增益設定，目的是為了使同樣的基頻訊號在不同的頻率下輸出都能達到相同的功率。

#### 4.3.4.4 系統驗證

LMX2433的跳頻誤差經過測量，在11組設定下與理想值的差異皆小於系統規劃的1.375MHz，表現良好。(圖4-20、圖4-21分別為第1組及第10組設定的輸出結果)

AL7230的測量重點在於調整每個頻段的增益設定，將RF模組最終的輸出的功率調整一致。由圖4-22、圖4-23可以看到，在不同跳段下，頻譜分析儀量得的訊號強度十分接近。



圖 4-1 基頻模組平台全貌。



圖 4-2 Lyrtech VHS-DAC 模組。



圖 4-3 Lyrtech VHS-ADC 模組。

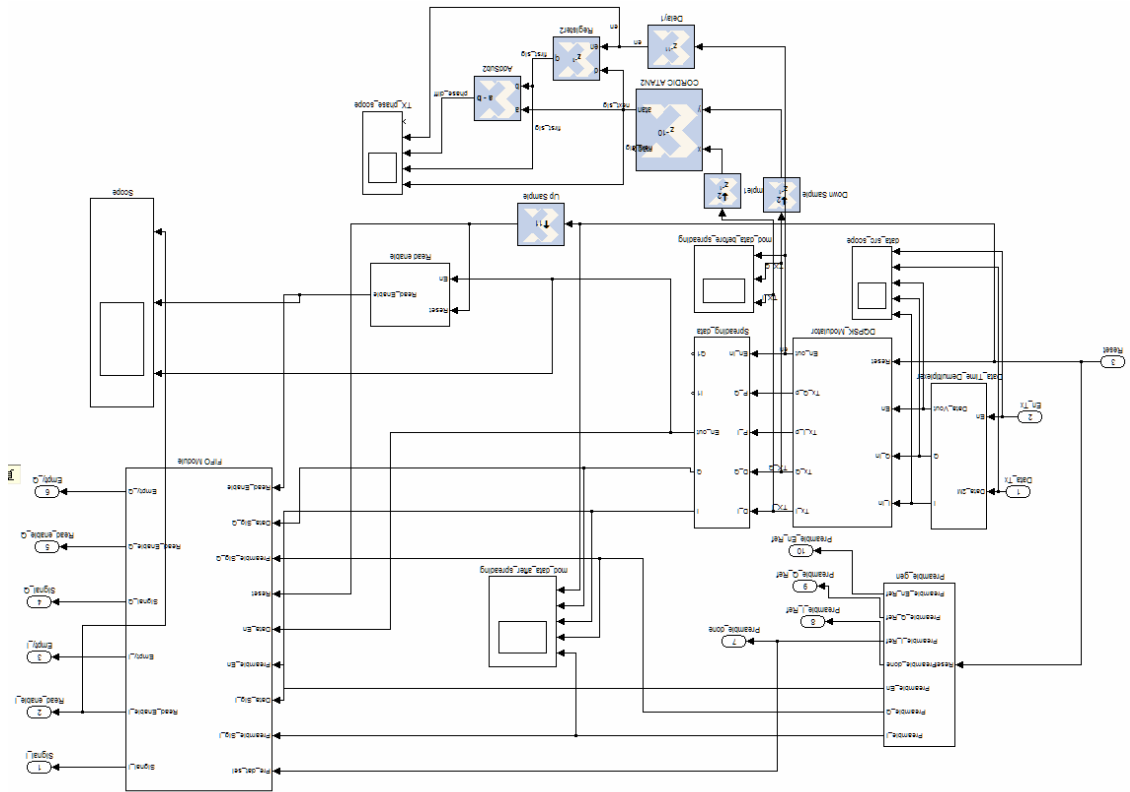


圖 4-4 傳送端實現電路圖

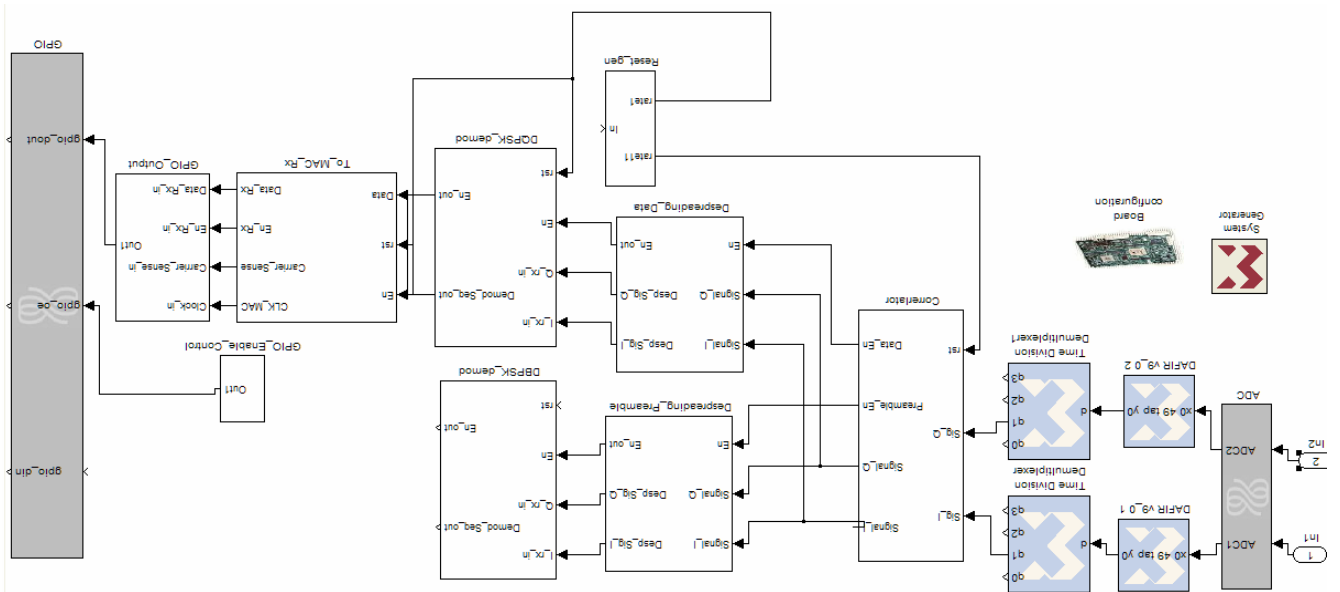


圖 4-5 接收端實現電路圖

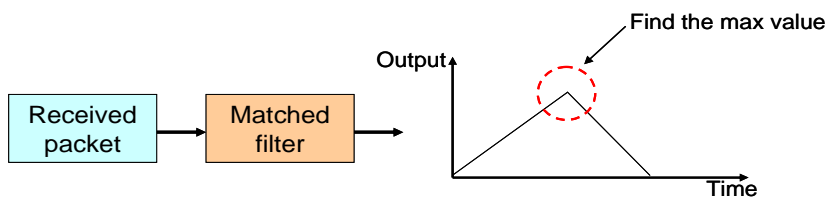


圖 4-6 碼擷取

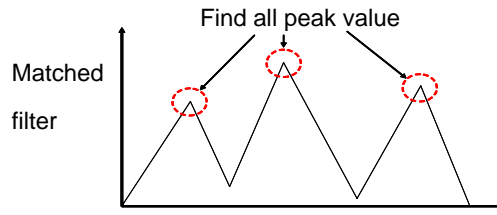


圖 4-7 路徑搜尋

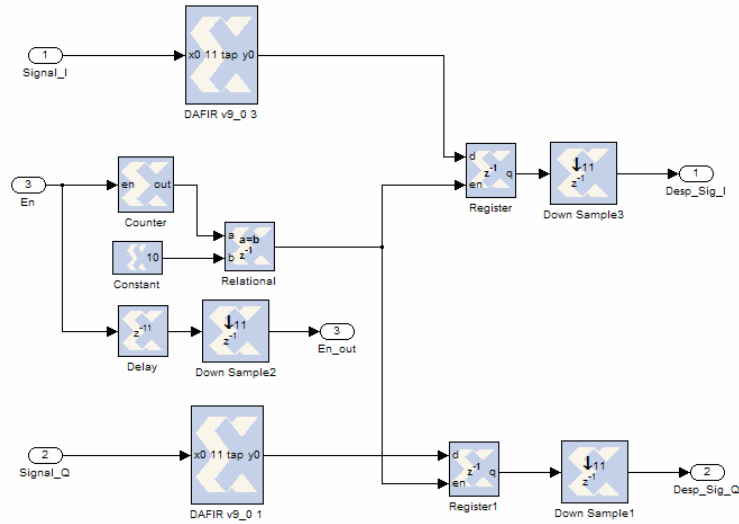


圖 4-8 資料解展頻電路實現圖

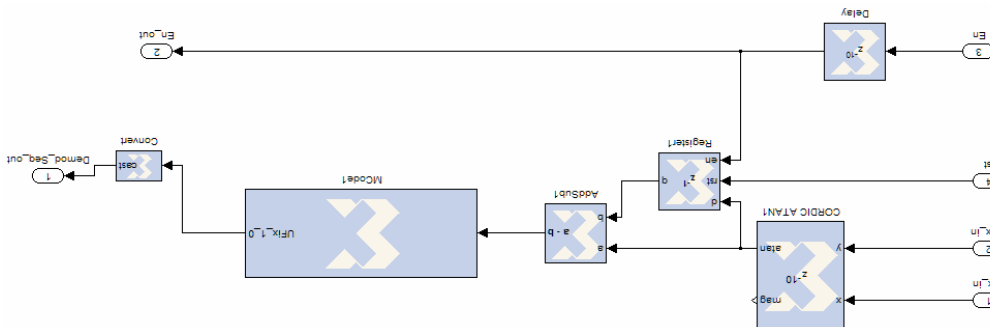


圖 4-9 DBPSK 解調電路實現圖

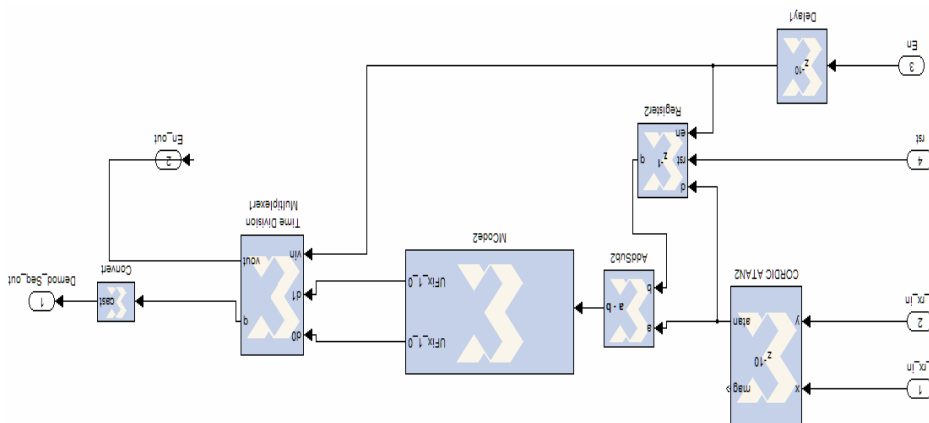


圖 4-10 DQPSK 解調電路實現圖

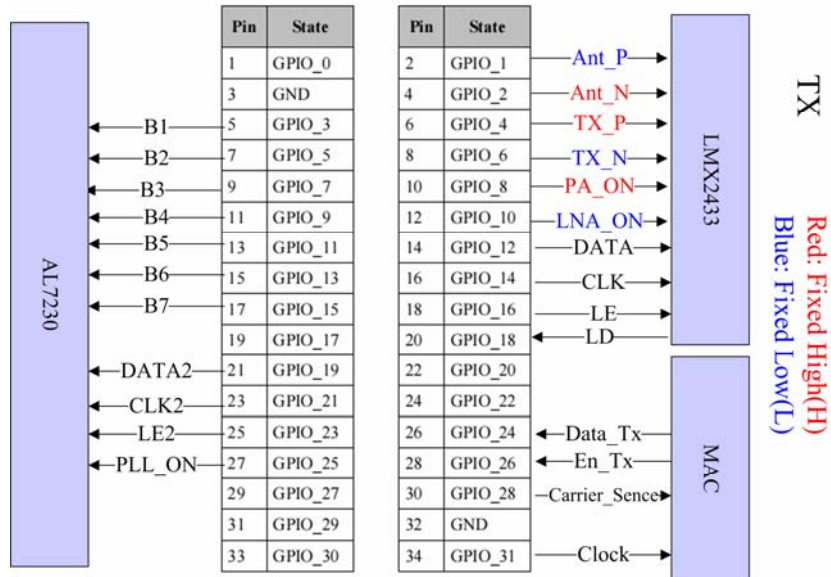


圖 4-11 基頻模組傳送端 GPIO 控制訊號定義。

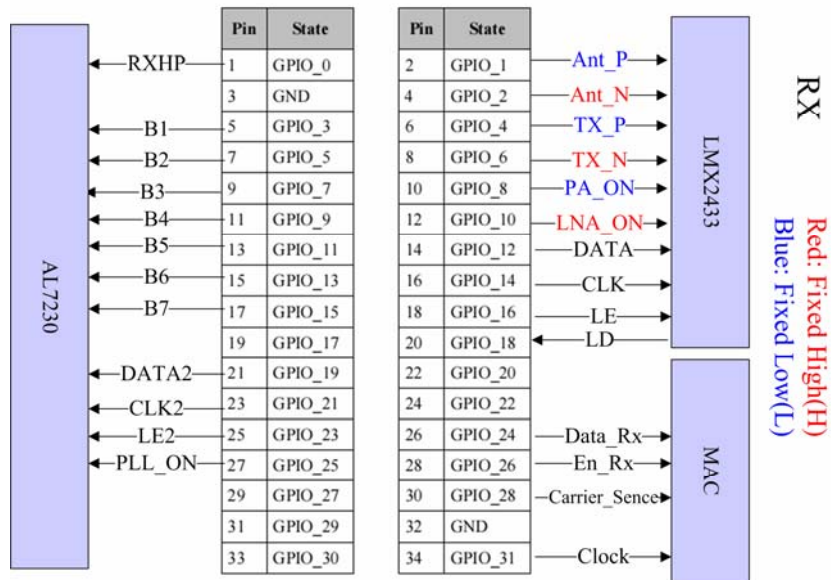


圖 4-12 基頻模組接收端 GPIO 控制訊號定義。

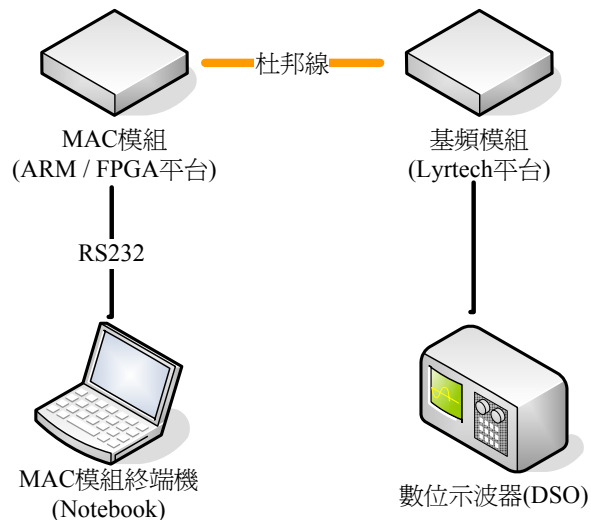


圖 4-13 MAC 與基頻模組連測示意圖



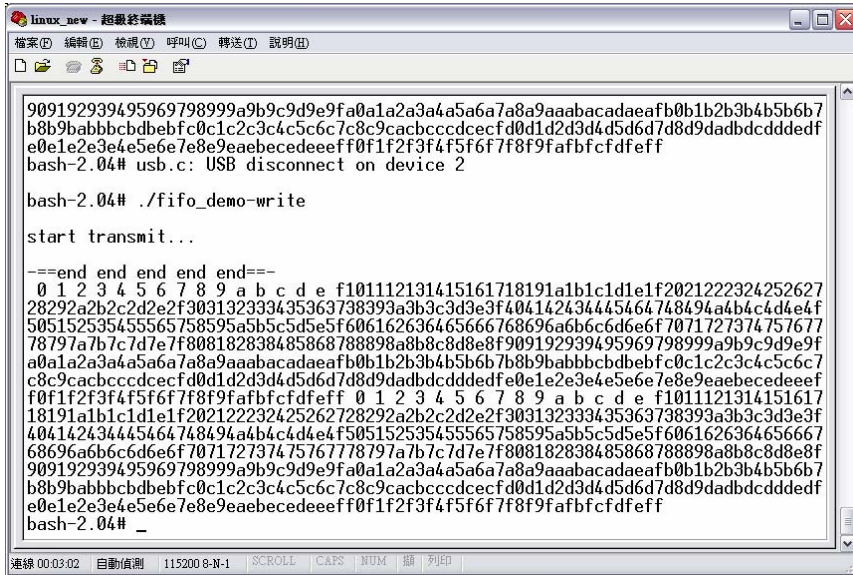


圖 4-14 MAC 模組傳送之訊框

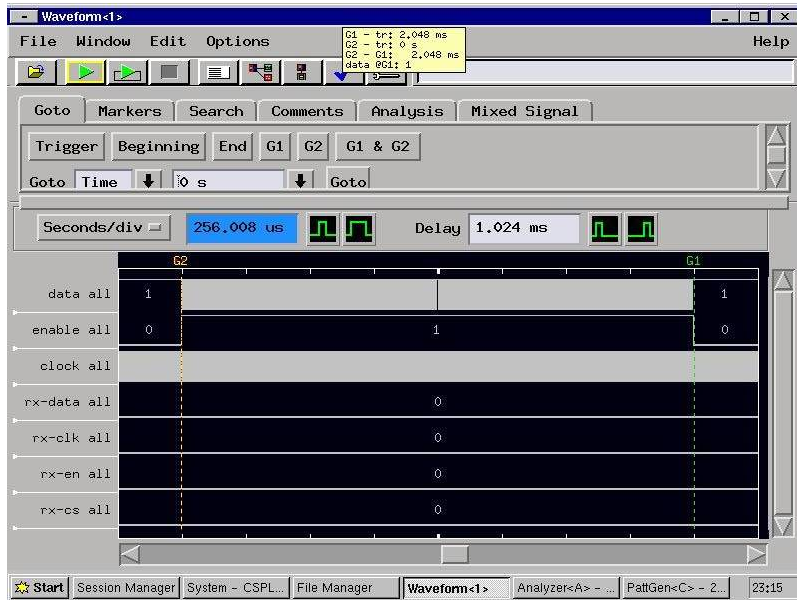


圖 4-15 邏輯分析儀收到之結果 (一個訊框)



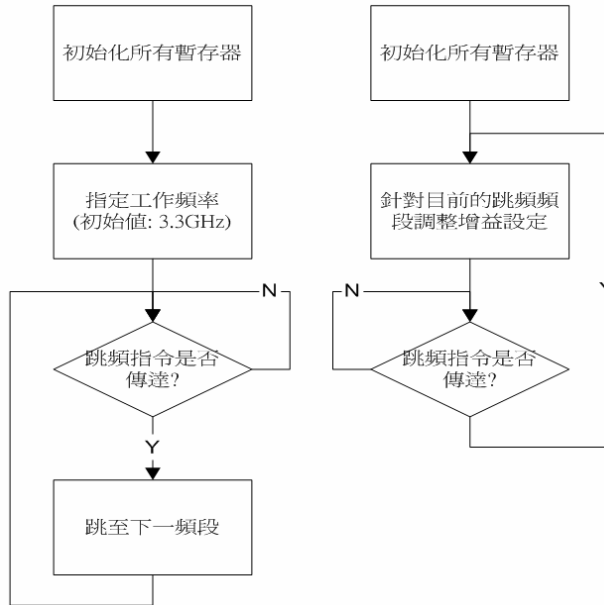


圖 4-19 基頻-RF 介面工作流程

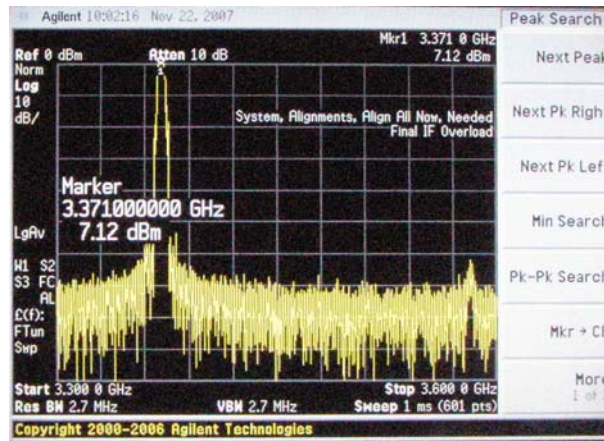


圖 4-20 LMX2433 跳頻誤差測試 (第 1 組)

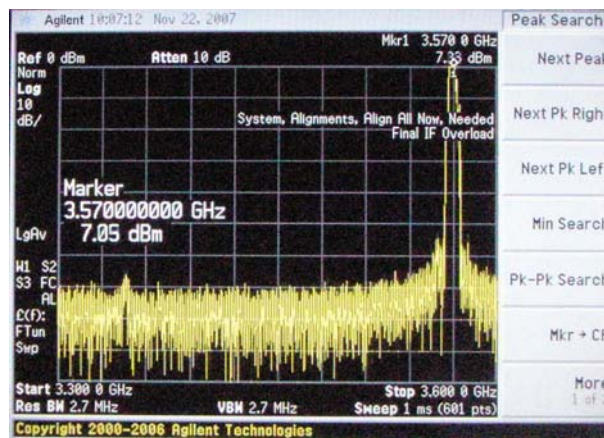


圖 4-21 LMX2433 跳頻誤差測試 (第 10 組)

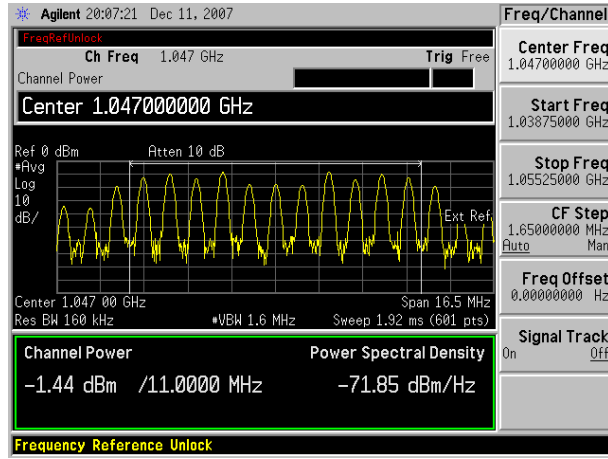


圖 4-22 RF 模組輸出 (增益設定第 5 組)

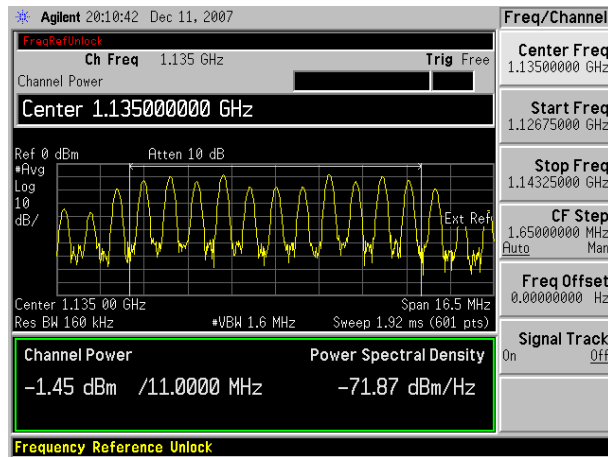


圖 4-23 RF 模組輸出 (增益設定第 9 組)

表 4-1 LMX2433 控制訊號腳位定義

CLK	I/P	3-wire interface serial bus clock for LMX2433
DATA	I/P	3-wire interface serial bus Data for LMX2433
LE	I/P	3-wire interface serial bus LE for LMX2433
Lock indicator	O/P	3.3~3.6GHz local oscillator lock indicator.

表 4-2 AL7230 控制訊號腳位定義

TX_P	I/P	T/R switch control signal: Transmite (H), Receive (L)
TX_N	I/P	T/R switch control signal: Transmite (L), Receive (H)
Ant_P	I/P	antenna switch control signal: external antenna (H) internal antenna (L)
Ant_N	I/P	antenna switch control signal: external antenna (L) internal antenna (H)
PA_ON	I/P	Power amplifier control signal : Turn On (H), Turn Off (L)
LNA_ON	I/P	LNA control signal : Turn On (H), Turn Off (L)
CLK_2	I/P	3-wire interface serial bus clock for AL7230
DATA_2	I/P	3-wire interface serial bus Data for AL7230
LE_2	I/P	3-wire interface serial bus LE for AL7230
PLL_ON	I/P	Control PLL AL7230 : On (H), Off (L)

表 4-3 跳頻頻段

設定組別	頻率(MHz)	設定組別	頻率(MHz)
1	959	7	1091
2	981	8	1113
3	1003	9	1135
4	1025	10	1157
5	1047	11	1179
6	1069		

#### 4.4 參考文獻

1. <http://www.dgt.gov.tw>
2. J. Viterbi, *CDMA: Principles of spread spectrum communications*, Addison-Wesley, 1995.
3. R. L. Peterson, R. E. Ziemer and D. E. Borth, *Introduction to spread-spectrum communications*, New York: Prentice Hall, 1995.
4. S. Haykin, *Communication Systems, 4th ed.*, John Wiley and Sons, New York, 2000.
5. B. Sklar, *Digital Communication, 2nd ed.*, Prentice-Hall Upper Saddle River, NJ, 2001.
6. IEEE 802.11b Standard, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band," 1999 Edition
7. S. Golomb ,and R. Scholtz, "Generalized Barker sequences" *Information Theory*, IEEE Transactions on, vol. 44, pp.533-537, Oct., 1965
8. L. Yang, and L. Hanzo, "Software-defined- radio-assisted adaptive broadband frequency hopping multicarrier DS-CDMA" *Communications Magazine, IEEE* , vol. 40, pp. 174-183, 2002.
9. W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994.
10. IEEE 802.11a Standard, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: high-speed physical layer in the 5 GHz band"1999 Edition.
11. N. W. K. Lo, D. D. Falconer and A. U. H. Sheikh, "Adaptive equalization for co-channel interference in a multipath fading environment," *IEEE Trans. Commu.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1441-1453, Feb./Mar./Apr. 1995
12. M. K. Simon, "Noncoherent Pseudonoise Code Tracking Performance of Spread Spectrum Receivers,"*IEEE Trans. Commu.*, vol.COM-25, pp.327-345, March, 1977
13. Natali F, D., "AFC tracking algorithms," *IEEE Trans. Commu.*, vol.COM-32, no. 8,pp. 935-974, Aug., 1984.
14. ITU-R M.1225: "Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000
15. J. H. You, C. H. Park, M. C. Ju, K. W. Kwon, and J. W. Chou, "Adaptive frequency hopping scheme for interference-limited WPAN applications," *ELECTRONICS LETTERS*, vol. 37, no. 15 July, 2001

## 5. MAC 模組模組之開發設計與實作

### 5.1 MAC 模組之開發與實作

媒體存取控制(MAC)位於實體層之上，負責控制資料的傳輸，讓上層協定的資料可以正確無誤地經由傳輸媒體(即UWB Tx/Rx實體層)傳遞與接收。因此，媒體存取控制的主要功能是對被共用媒體的存取控制與以媒體存取層級的訊框交換協定來確保資料能可靠地傳遞。

#### 5.1.1 MAC 協定

本計畫之MAC協定將以分散式協調功能 (Distributed Coordination Function, DCF)為基礎，採用類似Ethernet的載波偵測多重存取/碰撞避免(Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA)技術，來提供工作站傳送非同步訊框。工作站要傳送訊框時必須先偵測是否有其他工作站正在傳送訊框，即偵測傳輸媒體是否忙碌，一旦得知媒體呈現空閒，此時仍不能立即傳送訊框，要依訊框的優先權等級等待一段適當的訊框間隔時間後，如果傳輸媒體仍保持空閒才能將訊框送出去。但是依此方式，相同優先權等級的訊框在傳送時仍有可能無可避免地同時傳送而造成碰撞。為了避免碰撞，便須以競爭視窗(Contention Window, CW)，即隨機延遲一段時間傳送的機制來避免碰撞。

為了確保資料傳輸的可靠性，我們將使用RTS (Request To Send)/CTS (Clear To Send)機制與回應(acknowledgement, ACK)機制等來確保資料可以正無誤地傳送到目的端。如果來源工作站在回應時間終了仍未收到ACK訊框，造成無法判斷目的工作站是否正確收到訊框，則來源工作站必須重送訊框。由於無線電波的傳遞會因距離而衰減，因此在無線環境下傳輸資料會遇到隱藏節點問題 (hidden node problem)。隱藏節點問題可使用RTS/CTS機制來克服，透過RTS/CTS短訊框通知鄰近地區所有工作站即將進行訊框交換，可將隱藏點的干擾降到最低。

#### 5.1.2 MAC 模組之軟硬體架構

媒體存取控制模組之軟硬體架構如圖 5-1 所示，以 ARM / FPGA 發展板來實現 MAC 協定與介面電路。其中，ARM 子板主要負責實現 MAC 協定，在 ARM 子板中掛載 Embedded Linux 作業系統，MAC 協定功能程式在 Embedded Linux 作業系統下執行；ARM 子板上將運行兩個程式，MAC Kernel Module 與 GPIO Controller。另外，我們使用 FPGA 子板來設計 FIFO 電路，當作與下層之基頻模組的介面電路。

上層之 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組經由網路線發送 IP 封包，由 ARM 子板中 Linux Kernel 的防火牆 Netfilter 攔截到 IP 封包，將此 IP 封包暫存後，由 MAC\_Thread 處理。封包依照 MAC 協定封裝成 data 訊框，再依照 MAC 協定的訊框交換、CSMA/CA...等程序將 data 訊框傳送。訊框傳送至下層之基頻模組的傳送過程中，GPIO Controller 透過 GPIO 接腳把需傳送的訊框傳送先至 FPGA 子板之 FIFO 硬體電路暫存，等待下層之基頻模組存取。在接收訊框方面，下層之基頻模組先將訊框傳送至 FPGA 子板之 FIFO 硬體電路暫存後，GPIO Controller 便會透過 GPIO 接腳接收訊框至 ARM 子板做處理。若媒體存取控制模組接收到由下層之基頻電路傳送的訊框，媒體存取控制模組將依照 MAC 協定進行訊框的接收程序，訊框接收完成後，媒體存取控制模組將所收到的 data 訊框重組成 IP 封包後，將 IP 封包由網路線傳送至上層之 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組。

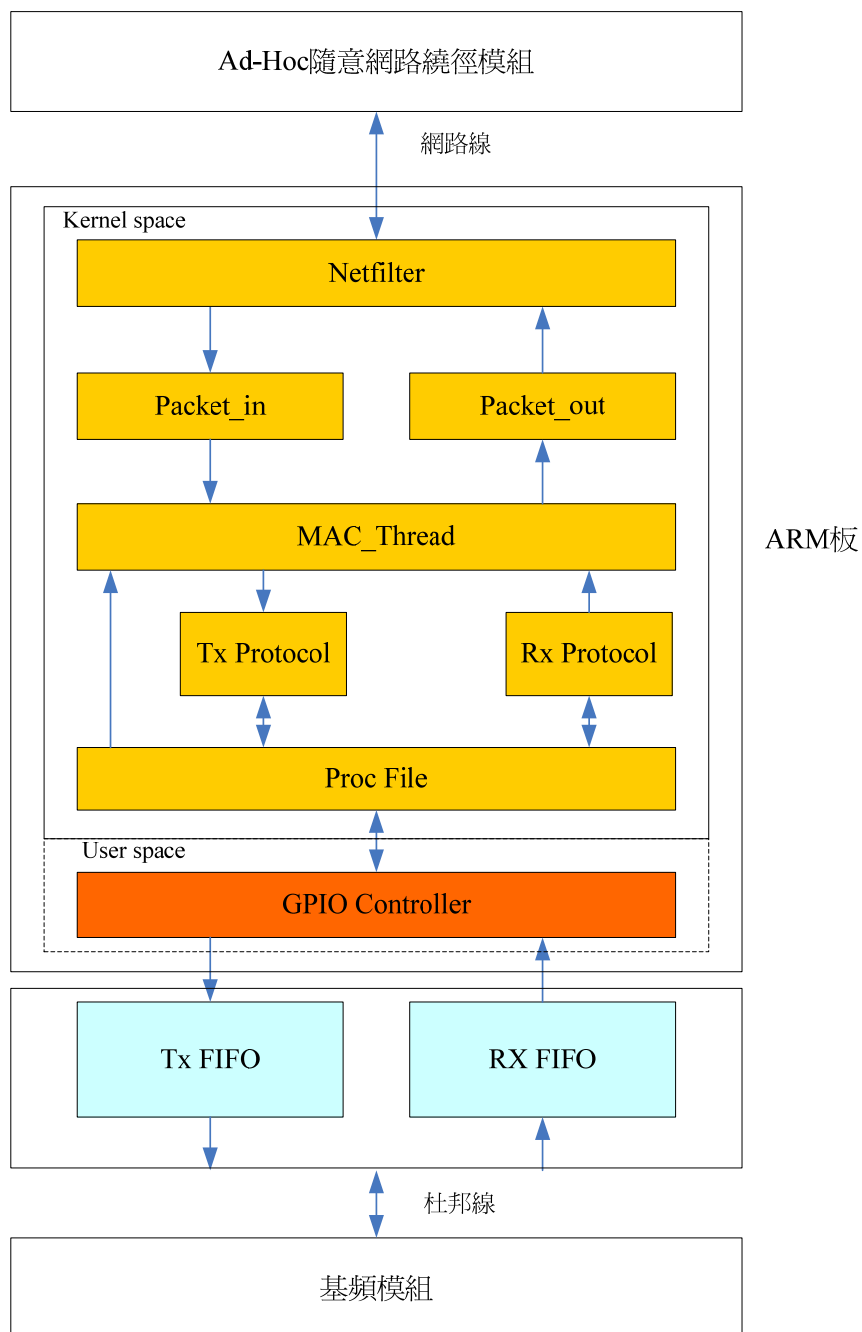


圖 5-1 媒體存取控制模組軟體架構

## 5.2 MAC 模組之設計

### 5.2.1 MAC Kernel Module

MAC Kernel Module 將在 ARM 子板所掛載的 Embedded Linux 作業系統底下運作，MAC Kernel Module 將會加入 Kernel Space 成為 Embedded Linux 下的一個 Module。MAC Kernel Module 的運作如圖 5-2 所示。一開始於系統中載入 Module，Module 被載入後首先進行各種資料結構的初始，例如訊框的結構。接著設定 Netfilter，將 MAC Kernel Module 與系統的 Netfilter 連結住。所有的初始設定完成後，就會啟動 MAC Thread，並且建立 Proc file，作為資料在 Embedded Linux 作業系統的兩個 space 間傳遞的介面。Module 便會進入工作階段，直到整個 Module 結束。

#### 5.2.1.1 MAC 執行緒 (MAC Thread)

MAC 執行緒是 MAC Kernel Module 中最重要的部份，主要的工作為監看有無 IP 封包被系統的 Netfilter 攔截，或者有無訊框經由 GPIO 傳入。MAC 執行緒啟動後就進入休眠狀態，平常 MAC 執行緒也維持在休眠狀態，當發生有 IP 封包被系統的 Netfilter 攔截，或是有訊框經由 GPIO 傳入，相對應的程式將會喚醒 MAC 執行緒，MAC 執行緒會根據所發生的事件呼叫對應的函數(function)來處理。MAC 執行緒之流程圖如圖 5-3 所示。

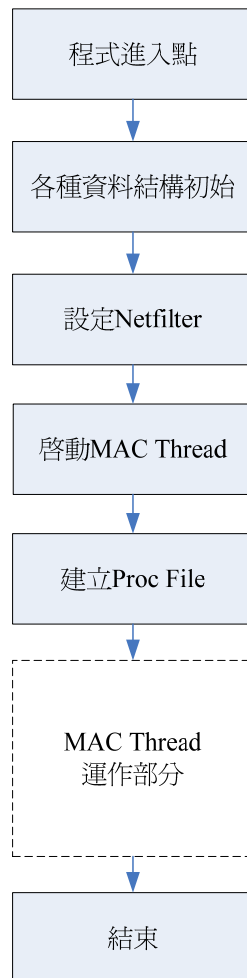


圖 5-2 MAC Kernel Module 運作流程



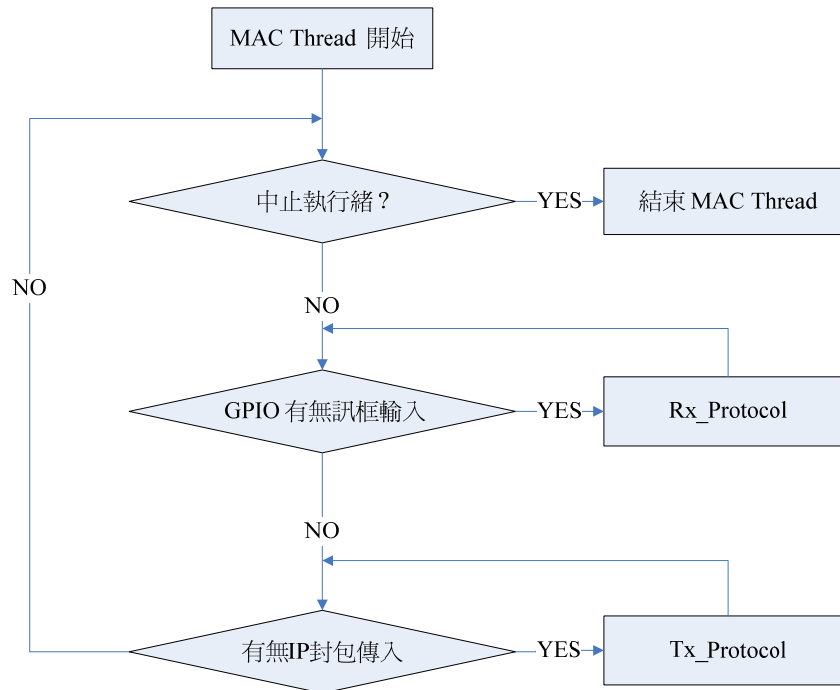


圖 5-3 MAC 執行緒流程圖

### 5.2.1.2 Tx Protocol

若有 IP 封包被 Linux 系統的 Netfilter 攔截，MAC 執行緒會將此 IP 封包交由 Tx\_Protocol 程式處理。Tx\_Protocol 程式會將封包重新封裝成 MAC 層協定之 data 訊框，接著進行 RTS / CTS 訊框交換、CSMA / CA 機制等手續，以確保資料訊框可以正確無誤的送達目的地端工作站。傳送封包之程式流程如圖 5-4 所示。

在每次傳送訊框，RTS 訊框或者 data 訊框，都將先偵測傳輸媒介是否為空閒。如果傳輸媒介不為空閒，則進入退後程序；若為空閒，則發送訊框。傳送訊框後，將等待相對應的訊框回應，若在限定的時間內沒有有效的訊框回應，則進入退後程序，並且將計數器值增加。退後程序結束後，會再次偵測傳輸媒介是否為空閒，若為空閒則再次發送訊框。如果訊框一直無法被正確的傳送，即未在限定的時間內接收到有效的訊框回應，且重新傳輸次數達到限制值，將強制結束整個傳輸程序。重新傳輸的次數紀錄在計數器裡，紀錄 RTS 訊框重新傳輸次數的計數器為 SSRC，紀錄 Data 訊框的計數器為 SLRC。傳輸 RTS 訊框後，必須在 CTSTimeout Interval 的時間內接收到對應的 CTS 訊框；傳輸 data 訊框後，必須再 ACKTimeout Interval 的時間內接收到對應的 ACK 訊框。

### 5.2.1.3 Rx Protocol

若有訊框經由 GPIO 傳入，MAC 執行緒會將此訊框交給 Rx Protocol 處理。Rx Protocol 將判斷此訊框為何種訊框，若為 RTS 訊框，將回傳相對應的 CTS 訊框；若為 Data 訊框，將回傳相對應的 ACK 訊框。接收封包之程式流程如圖 5-5 所示。

傳送 CTS 訊框時，與 Tx Protocol 相同，傳送訊框時必須先偵測傳輸媒介是否為空閒。若為空閒，則傳送訊框；但若並非空閒，將不會有任何動作。與傳輸 CTS 訊框不同，傳送 ACK 訊框時，不需要偵測傳輸媒介是否為空閒，就算傳輸媒介為忙碌，ACK 訊框也可以傳送。自下層之基頻模組接收到 Data 訊框後，Rx\_protocol 程式會將 Data 訊框交由程式 Send\_message 處理。

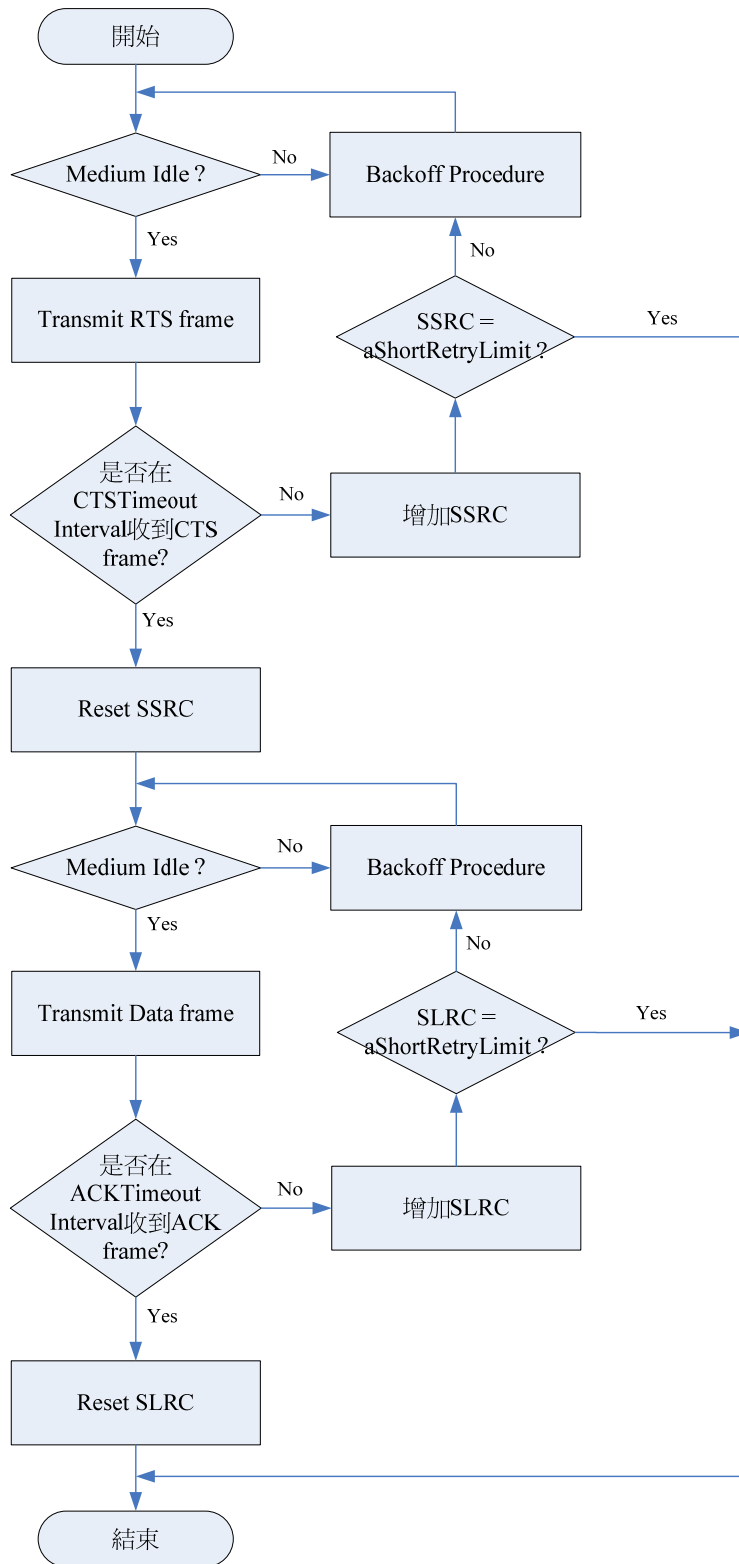


圖 5-4 傳送封包之程式流程圖

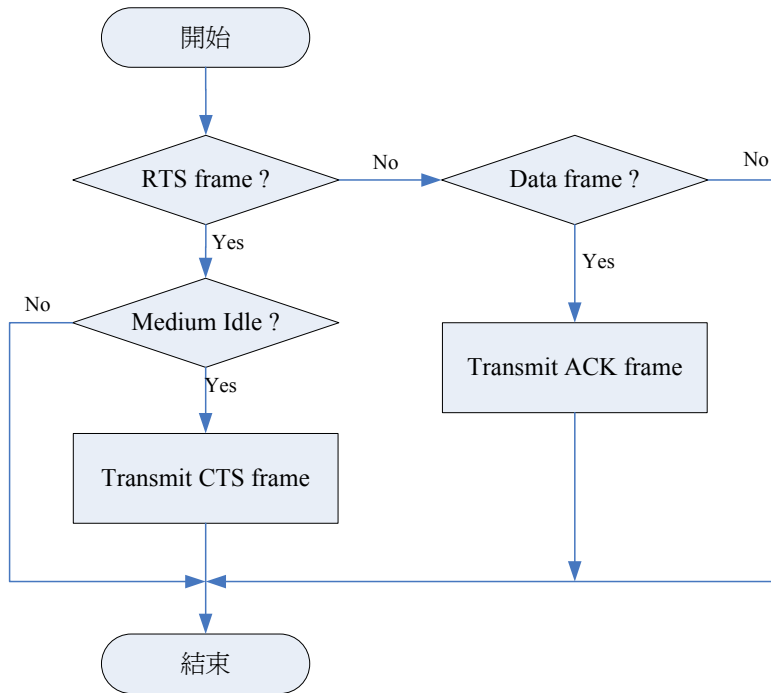


圖 5-5 接收封包之程式流程圖

#### 5.2.1.4 與上層 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組之介面程式

與上層之 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組溝通的程式主要有兩個，Packet\_in 與 Send\_message。Packet\_in 負責處理接收之 IP 封包，會透過 Linux 核心的防火牆 module 「Netfilter」將 IP 封包接收至 MAC Kernel Module；Send\_message 會透過 Linux 核心程式的 sendmsg 指令傳送 IP 封包。

Netfilter 屬於 Linux 核心底層的工作，為 Linux 核心的防火牆 module。Netfilter 在 IPv4 protocol 中有五個 hook point(檢查點)，分別為 NF\_IP\_PRE\_ROUTING、NF\_IP\_LOCAL\_IN、NF\_IP\_FORWARD、NF\_IP\_LOCAL\_OUT、與 NF\_IP\_POST\_ROUTING。如圖 5-6 所示，IP 封包從網路線傳入後，會先經過 Netfilter 架構的 NF\_IP\_PRE\_ROUTING，接著進入 Route，此時決定此 IP 封包要進入 Linux 核心或者該傳送到另一個介面。若 Route 不知道此 IP 封包該傳往哪個介面，Route 可將此 IP 封包丟棄。傳送至 Linux 核心的 IP 封包，會先經過 Netfilter 架構的 NF\_IP\_LOCAL\_IN 再傳入 Linux 核心。傳送至另一個介面的 IP 封包，在被丟回網路線之前，會先經過 Netfilter 架構的 NF\_IP\_FORWARD。所有傳入網路線的 IP 封包，會先經過 Netfilter 架構的 NF\_IP\_POST\_ROUTING。由 Linux 核心傳出的 IP 封包，會先經過 Netfilter 架構的 NF\_IP\_LOCAL\_OUT，再由 Route 決定 IP 封包傳輸方向。

任何 Kernel Module 都可以與 Netfilter 架構的 hook point 註冊，之後便可監聽所註冊的 hook point，當 hook point 有封包時，在 Kernel Module 中與 hook point 註冊的程式會被呼叫。

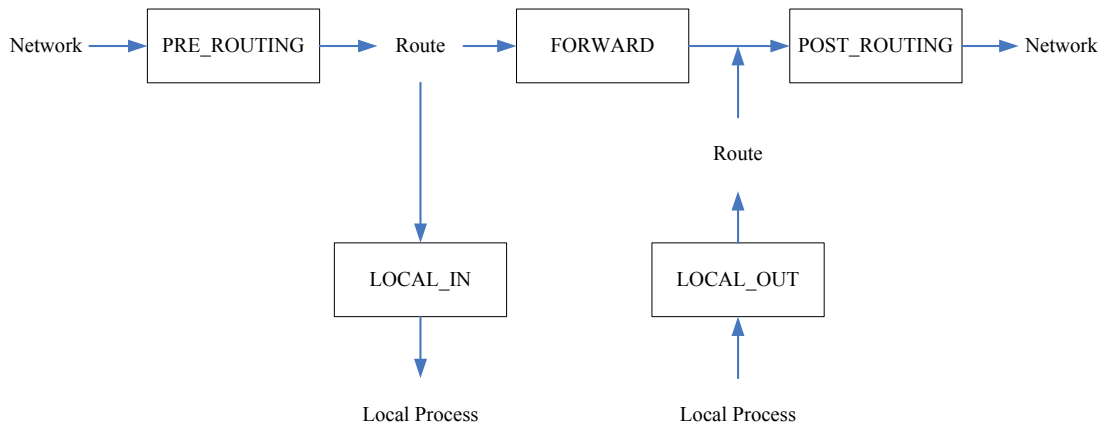


圖 5-6 IP 封包穿越 Netfilter 系統示意圖

MAC Kernel Module 被載入 ARM 子板所掛載的 Embedded Linux 作業系統運行，在初始的過程中，MAC Kernel Module 將與系統的 Netfilter 連結住。MAC Kernel Module 初始一個資料結構 input filter，在 input filter 掛上 input\_handler 程式，並設定 hook point 為 Netfilter 的 NF\_IP\_PRE\_ROUTING。接著利用函式 nf\_register\_hook(&input\_filter)向系統註冊 input filter，完成了 MAC Kernel Module 與系統的 Netfilter 的連結。完成連結後，若 Netfilter 偵測到任何的 IP 封包輸入，會將所攔截到的 IP 封包交給 input\_handler 程式處理。

由 Netfilter 偵測到由網路線輸入至本媒體存取控制模組的封包，將交由 input\_handler 處理，input\_handler 會呼叫 packet\_in 程式。packet\_in 程式先檢查此 IP 封包的來源。若為本模組所發送出去的封包，則將此 IP 封包丟棄；若並非本模組所發送出去的封包，會將此 IP 封包接收做處理，將 IP 封包由資料結構轉成適合 MAC 層協定封包處理的 bit stream 形式後，會喚醒 MAC 執行緒執行相關傳送封包的工作。

自下層之基頻模組接收到 Data 訊框後，Rx\_protocol 程式會將 Data 訊框交由程式 Send\_message 處理。Send\_message 程式將訊框中 header 去除，留下 data 部分，從 data 部分解讀出 IPv4 address、IP 封包長度...等組成 IP 封包資料結構的參數後，再利用 Linux 核心程式中 sendmsg 指令，將接收封包由網路線送至上層之 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組。

### 5.2.1.5 Linux 程式運作空間之間的介面程式 (Proc File System)

一般 Linux 作業系統會把程式的運作空間分開。作業系統的程式，例如驅動程式、Kernel Module...等，在 Kernel Space(核心空間)運作；一般使用者撰寫的程式在 User Space(使用者空間)中運作。各自有不同的記憶體空間，彼此間不會互相干擾。

如果 User Space 中運行的程式要與 Kernel Module 傳遞資料，即 User Space 中運行的程式要讀取或寫入 Kernel Space 的資料，用一般的指標或者 memory copy 無法達成。因為 Kernel Module 所在的 Kernel Space 與 User Space 的記憶體空間不同，指標只能在目前的位址空間內運作。若必須在 Kernel Space 與 User Space 間資料傳遞，則必須依靠特殊的函式。本模組採用 Proc File System 負責在兩個不同 Space 間資料傳遞。Proc File System 為一種虛擬的 File System，任何 Kernel Space 中的元件要與 User Space 溝通，可在 Linux 作業系統的 File System 下的 Proc 資料夾底下建立檔案，User Space 的程式透過讀寫這個檔案就可以與 Kernel Space 溝通。

MAC Kernel Module 載入後，會在 ARM 子板上掛載之 Embedded Linux 的 File System 下的 Proc 資料夾底下建立一個資料夾，稱為 My\_MAC，接著再此資料夾下建立五個檔案，分別為 packet、en\_packet、frame、en\_frame、和 carrier\_sense。當位於 Kernel Space 的 MAC Kernel Module 有訊框需要傳送時，會將要傳送之訊框放在檔案 packet 中；並且將檔案 en\_packet 填入”1”，用來通知 User Space 中的程式 GPIO Controller 讀取需傳送之訊框，並且透過 GPIO 傳送至 FPGA 子板上的 FIFO 電路暫存，等待傳送至下層之基頻模組。同樣的，若 User Space 中的程式 GPIO Controller 自 FPGA 子板上的 FIFO 電路接收到來自下層之基頻模組發送的訊框，GPIO Controller 會將接收之訊框寫入檔案 frame，並且將檔案 en\_frame 寫入”1”，用來通知 Kernel Space 的 MAC Kernel Module 處理接收到的訊框。GPIO Controller 也會將下層之基頻模組發送的控制訊號 Carrier Sense 寫入檔案 carrier\_sense，Kernel Space 的 MAC Kernel Module 將會利用此檔案的值判斷傳輸媒介是否為空閒。如圖 5-7 所示，位於 Kernel Space 的 MAC Kernel Module 與 User Space 中的程式 GPIO Controller 透過 Proc file 傳輸資料。

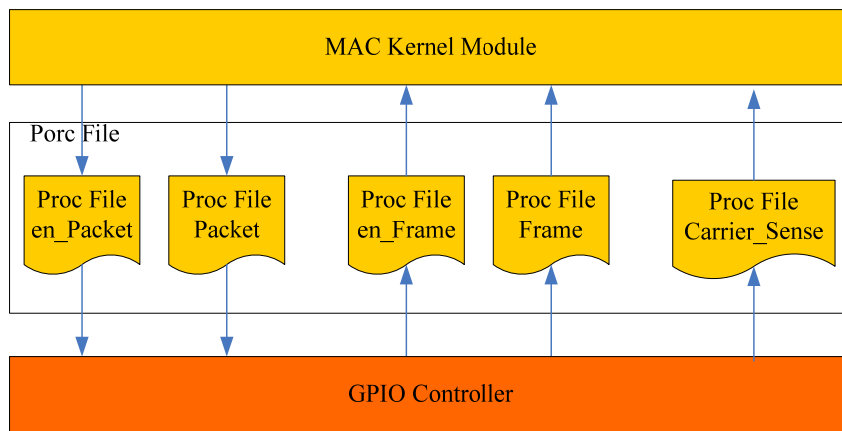


圖 5-7 Proc file

### 5.2.2 GPIO Controller

此程式主要工作為負責將 MAC Kernel Module 需要傳輸的訊框，透過 GPIO 腳位傳入 FPGA 子板的 FIFO 電路中，讓下層之基頻模組做存取。另一方面，當基頻模組傳送訊框至 FPGA 子板的 FIFO 後，GPIO Controller 程式透過 GPIO 腳位讀取 FIFO 電路中之訊框，並且將訊框傳遞給 MAC Kernel Module 處理。ARM 子板與 FPGA 子板的 GPIO 腳位規劃如圖 5-8 所示。

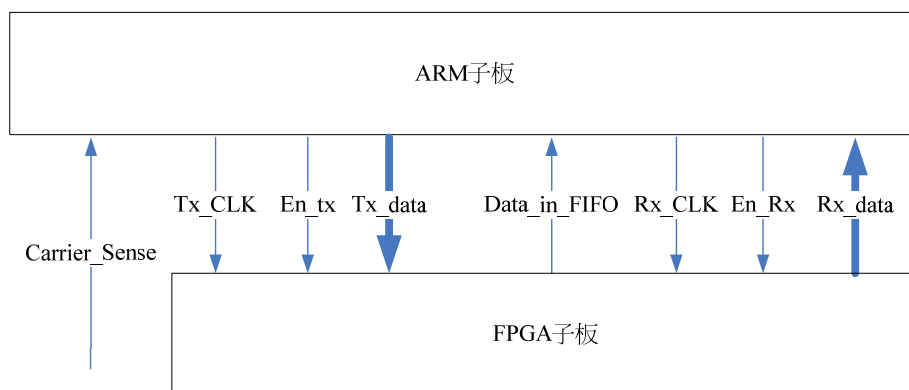


圖 5-8 ARM 子板與 FPGA 子板的 GPIO 腳位規劃圖

當 GPIO Controller 啟動後，先設定每根 GPIO 腳位為輸入腳位或為輸出腳位。接著隨時偵測 Carrier Sense 腳位，此為一控制訊號，下層之基頻模組透過此根腳位告知媒體存取控制模組目前傳輸媒介的情況，為空閒或是忙碌。接著，GPIO Controller 偵測 Data\_in\_FIFO 腳位，利用此根腳位為"0"或"1"，得知 FPGA 子板中接收端 FIFO 中是否收到由下層之基頻模組傳來的訊框，若有訊框暫存於 FIFO 中，GPIO Controller 利用 En\_Rx 及 Rx\_CLK 兩根腳位控制接收端的 FIFO，FIFO 將透過 Rx\_data 將存於 FIFO 中的訊框資料傳入 ARM 子板。當 GPIO Controller 接收到訊框資料後，利用 Proc File 將訊框傳遞給 MAC Kernel Module。GPIO Controller 由 Proc File 之 En\_Packet 得知 MAC Kernel Module 有訊框需要輸出，便透過 Proc File 之 Packet 取得須輸出之訊框，利用 En\_Tx 及 Tx\_CLK 兩根腳位控制 FPGA 子板上的接收端 FIFO，將透過 Tx\_data 將訊框存於 FIFO 中讓下層之基頻模組做存取。GPIO Controller 運作流程如圖 5-9 所示。

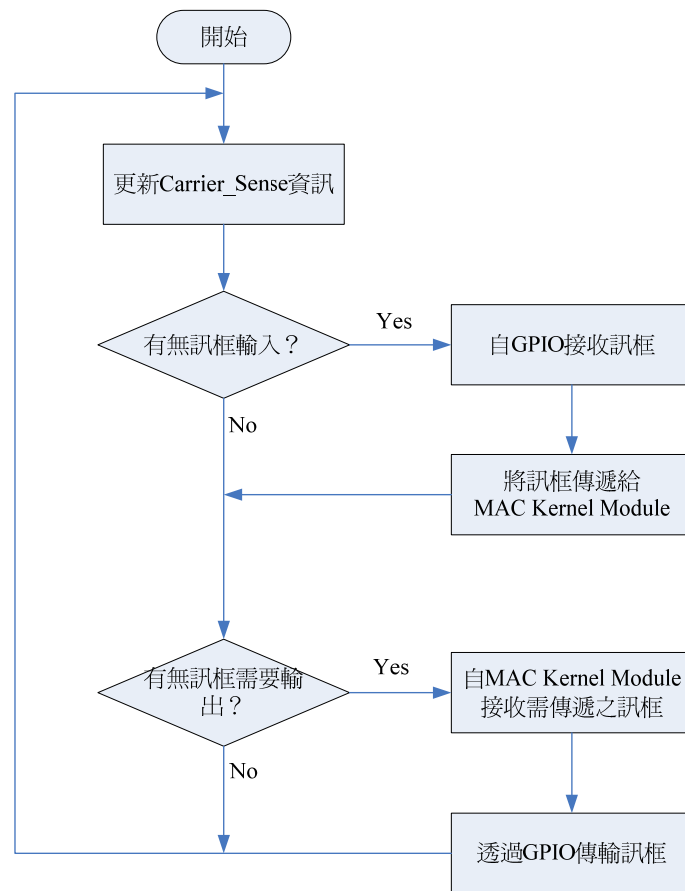


圖 5-9 GPIO Controller 運作流程圖

### 5.2.3 MAC 與基頻模組的介面電路設計

本論文將使用 FPGA 來實現 MAC 模組與基頻模組間之介面電路。MAC 模組與基頻模組間的介面腳位規劃如圖 5-10 所示。其中 Carrier\_Sense 腳位直接連接到媒體存取控制模組的 ARM 子板，其他腳位都與媒體存取控制模組的 FPGA 子板連接。在 FPGA 子板上有兩個 FIFO，分別負責傳送與接收訊框，因為與 ARM 子板是以 Byte 形式傳輸資料，與下層之基頻模組是以 Bit 形式傳輸資料，因此在 FPGA 子板上還設計了一些控制電路處理傳輸的資料形式不同的問題。MAC 模組與基頻模組間的介面腳位功能說明如下：

Tx\_CLK 與 Rx\_CLK：資料傳輸之時脈。

En\_tx：MAC 模組傳送訊框觸發腳位。

Tx\_data：MAC 模組傳送訊框之資料腳位。

En\_rx：基頻模組傳送訊框給 MAC 模組之觸發腳位，MAC 模組被觸發後開始接收訊框。

Rx\_data：MAC 模組接收訊框之資料腳位。

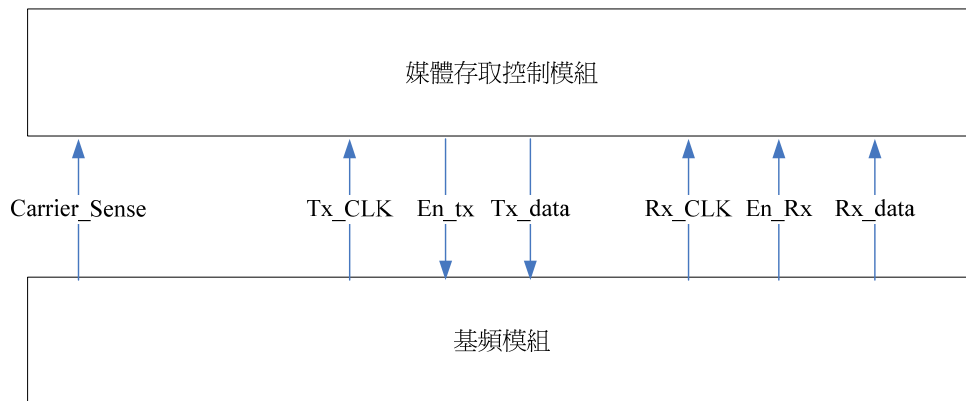


圖 5-10 媒體存取控制模組與基頻模組的腳位規劃圖

### 5.3. MAC 模組之功能測試

媒體存取控制模組的功能測試主要分成兩項：RTS/CTS 機制和 CSMA/CA 機制的測試。RTS/CTS 機制的測試主要目的在於測試訊框交換的程序是否能順利進行。CSMA/CA 機制的測試則包含 Carrier Sense 腳位是否正常工作、退後程序的進行、重新傳送的限制次數...等。

#### 5.3.1 RTS/CTS 機制之測試

RTS / CTS 機制的測試環境示意圖如圖 5-11 所示。使用兩組媒體存取控制模組，假設其名稱分別為工作站 A 與工作站 B。以兩台 Windows 電腦主機分別與兩組模組相連接，使用 Windows 作業系統下的應用程式-超級終端機當作媒體存取控制模組的顯示終端機。另外，使用一台 Linux 電腦主機與工作站 A 相連接，此台 Linux 主機的功用在於發送測試 IP 封包給工作站 A。工作站 A 擷取到 IP 封包後，開始進行 RTS / CTS 機制，將 IP 封包傳送給工作站 B。另外，使用訊號產生器產生時脈給兩塊 MAC 模組，作為模組間資料傳輸的同步使用，實際測試環境場景圖如圖 5-12 所示。

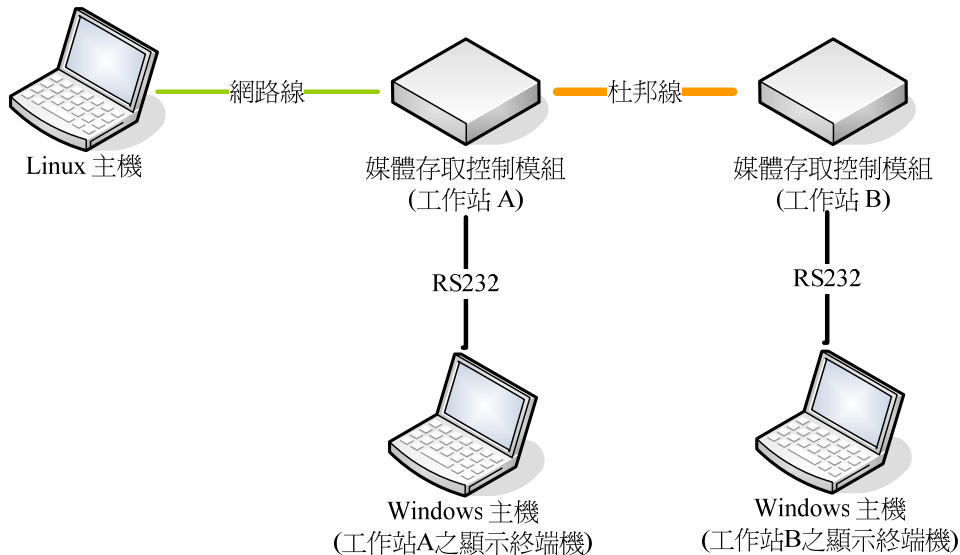


圖 5-11 測試環境示意圖



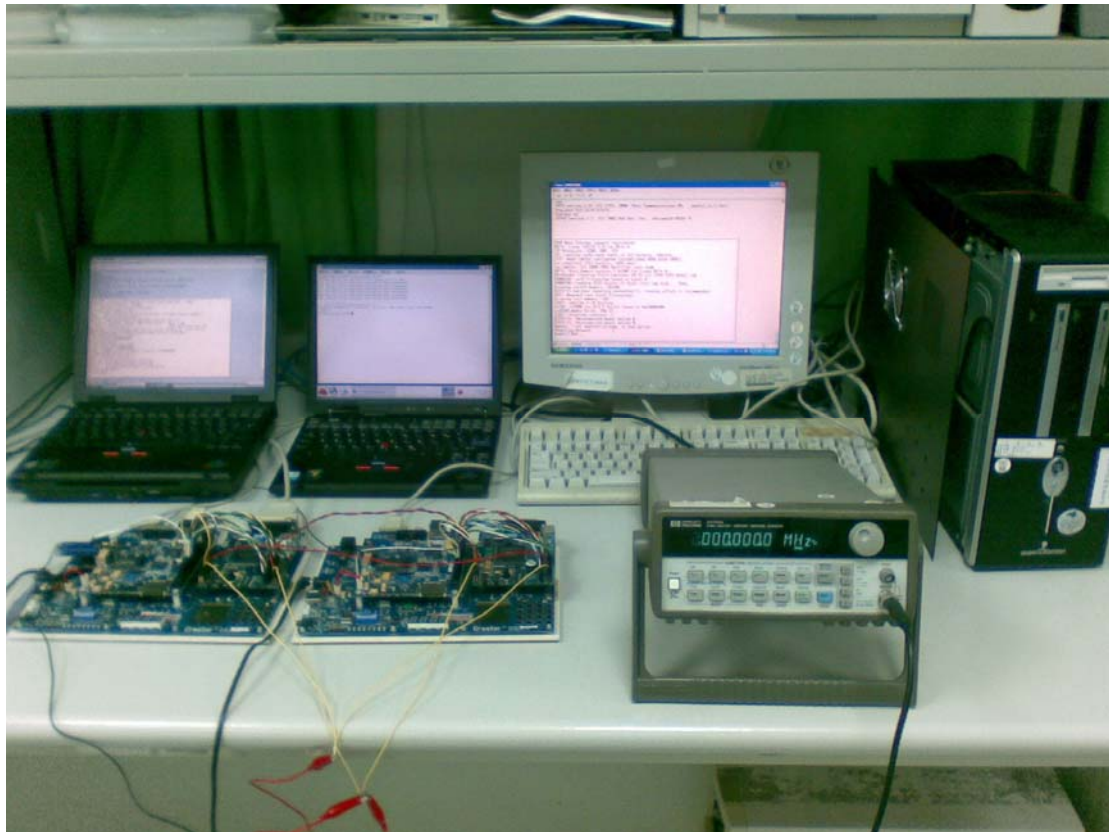


圖 5-12 實際測試環境場景圖

(順時鐘依序為工作站 A 之顯示終端機、Linux 主機、工作站 B 之顯示終端機、訊號產生器、工作站 B、工作站 A)

當兩組媒體存取控制模組啟動完成後，在 Linux 主機底下，下達 ping 指令發送 ping 封包，我們將此封包當測試用的 IP 封包。圖 5-13 與圖 5-14 分別為工作站 A 和工作站 B 的顯示終端機的顯示結果。工作站 A 攔截到測試 IP 封包，並將封包封裝成 data 訊框，如圖 5-13 的標記 A 處所示。工作站 A 開始 RTS / CTS 機制，工作站 A 傳送 RTS 訊框，以告知工作站 B 有資料要傳送，接著等待 CTS 訊框的回傳，如圖 5-13 的標記 B 處所示。工作站 B 接收到 RTS 訊框後，回傳 CTS 訊框，表示允許傳送資料，如圖 5-14 標記 A 處所示。工作站 A 接收到 CTS 訊框後，如圖 5-13 標記 C 處所示，便開始傳送 data 訊框，接著等待 ACK 訊框的回傳，如圖 5-13 標記 D 處所示。工作站 B 接收到 data 訊框後，回傳 ACK 訊框，告知確認完成資料傳送，如圖 5-14 標記 B 處所示。工作站 B 所接收到的 data 訊框內容，如圖 5-14 標記 C 處所示。工作站 A 接收到 ACK 訊框的回傳，如圖 5-13 標記 E 處所示，確認資料傳送已完成，便結束傳送程序，如圖 5-13 標記 F 處所示。另一方面，工作站 B 將接收到的 data 訊框，重新封裝成 IP 封包後，經由網路線傳遞至上層，如圖 5-14 標記 D 處所示。





若當媒體存取控制模組要傳送資料，其附近傳輸媒介為空閒，即 Carrier Sense 腳位不為”0”，但是其需要送達的目的地端附近傳輸媒介為忙碌，則傳送端在等待一段時間後，發現沒有 CTS 訊框回傳，將會進入退後程序，然後重新發送一次 RTS 訊框。如圖 5-17 標記 A 處所示，工作站 A 發送 RTS 訊框後，在等待一段時間後，並沒有 CTS 訊框回傳，便宣告 CTS Procedure 失敗，計數器 SSRC 值增加，並且進入退後程序。如圖 5-18 標記 A 處所示，工作站 B 接收到 RTS 訊框，但是其附近傳輸媒介為忙碌，即 Carrier Sense 腳位為”0”，便不會回傳 CTS 訊框。工作站 A 持續重新傳送 RTS 訊框，若工作站 B 附近傳輸媒介為空閒，即 Carrier Sense 腳位不為”0”，則工作站 B 回傳 CTS 訊框，兩工作站間的傳輸程序繼續進行，如圖 5-17 標記 B 處以及圖 5-18 標記 B 處所示。

```

packet_in: A packet is received.
Get the packet from netfilter!
DATA frame 112:
20 017C19023 A A A A A B B B B BFFFFFFFF 0 0 0 045 0 054 0 040 040 11A67
8C7E83468C7E83FF 8 0BB8419 D 0 19C525E4737D0 6 0 8 9 A B C D E F1011121314151617
18191A1B1C1D1E1F202122232425262728292A2B2C2D2E2F3031323334353637
Transmit RTS frame.
Waiting for CTS frame.
Timeout.
RTS procedure fail! SSRC = 1
Backoff :0 ~ 63, 46
Transmit RTS frame.
Waiting for CTS frame.
A frame is received.
Header:1C 0 4C1FFFF B B B B B B5422 2C0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
This is CTS frame.
transmit DATA frame!!
Waiting for ACK frame.
A frame is received.
Header:1D 0 4C1FFFF B B B B B B5422 2C0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
This is ACK frame.
Complete transmission procedure.

```

圖 5-17 傳送端工作站 A 之終端機顯示

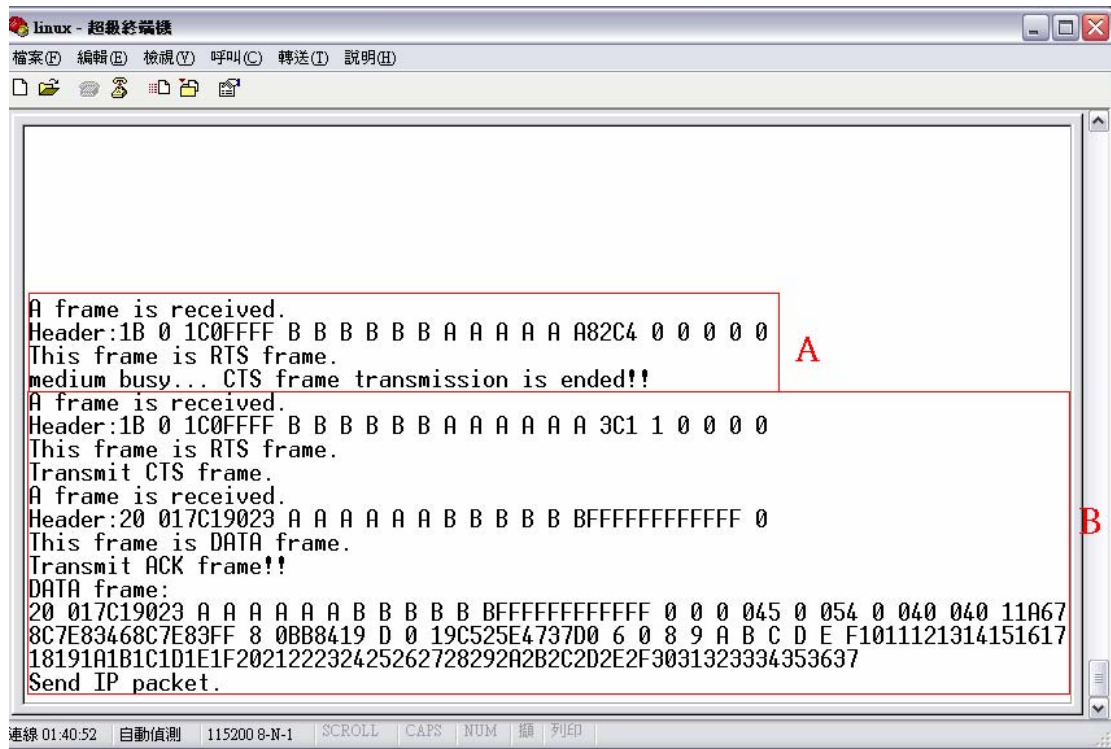


圖 5-18 接收端工作站 B 之終端機顯示

當媒體存取控制模組要傳送資料，其附近傳輸媒介為空閒，即 Carrier Sense 腳位不為”0”，便開始傳輸程序，發送 RTS 訊框，但是如果其需要送達的目的地端附近傳輸媒介一直為忙碌，即 Carrier Sense 腳位持續為”0”，目的地端的媒體存取控制模組不能回傳 CTS 訊框，傳送端的媒體存取控制模組在重新傳送到達一定次數後，仍然沒有 CTS 訊框回應，將直接結束整個傳輸程序。如圖 5-19 及圖 5-20 所示，工作站 A 持續傳送 RTS 訊框，但是由於工作站 B 的傳輸媒介仍然是忙碌，所以沒有回傳 CTS 訊框，工作站 A 在達到重新傳送次數的限制值後，結束傳輸程序。

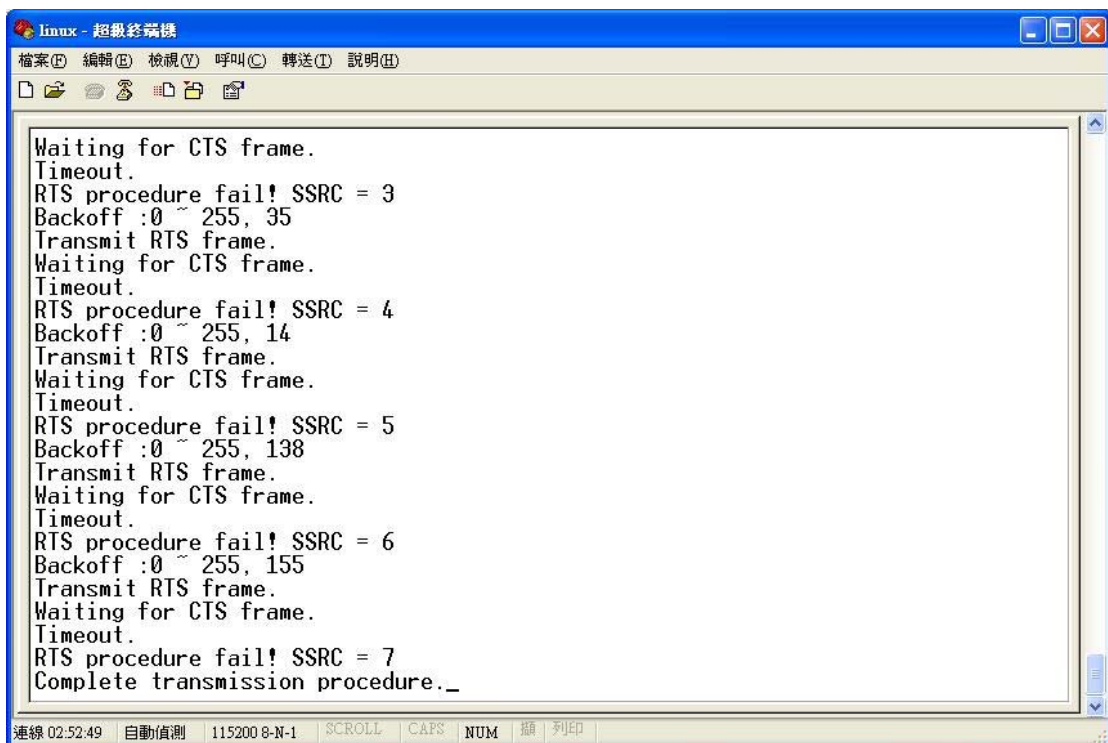


圖 5-19 傳送端工作站 A 之終端機顯示

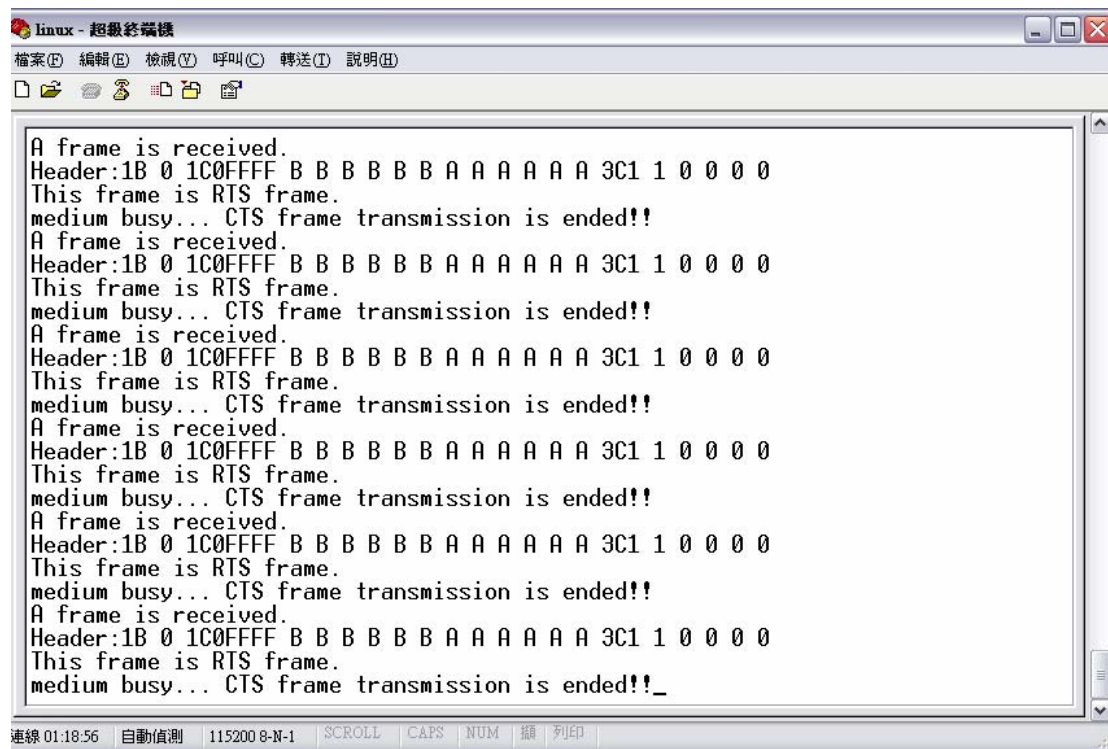


圖 5-20 接收端工作站 B 之終端機顯示

## 5.4. MAC 模組之介面測試

媒體存取控制模組主要分為兩個介面，與上層 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組之介面，以及與下層基頻模組之介面。

### 5.4.1 與 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組之介面測試

為了驗證 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組與媒體存取控制模組之間的 IP 封包收發是否相符，Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組先發送 IP 封包給媒體存取控制模組，觀察兩模組顯示出的封包內容。接著，由媒體存取控制模組回傳 IP 封包至 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組，觀察顯示出的封包內容。測試環境示意圖如圖 5-21 所示。實際測試環境場景圖如圖 5-22 所示。

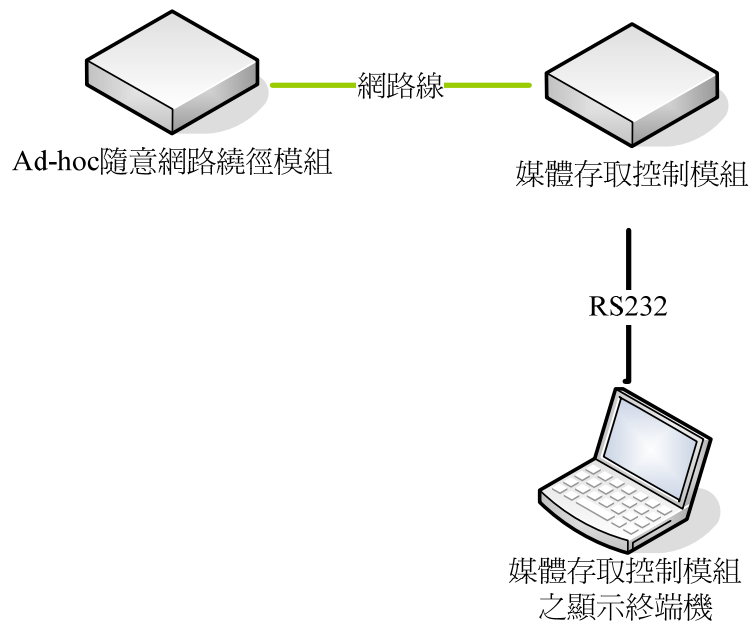


圖 5-21 介面測試環境示意圖



圖 5-22 實際測試環境場景圖

(由所至右為 Ad-Hoc 隨意網路繞徑模組、媒體存取控制模組、媒體存取控制模組之顯示終端機)







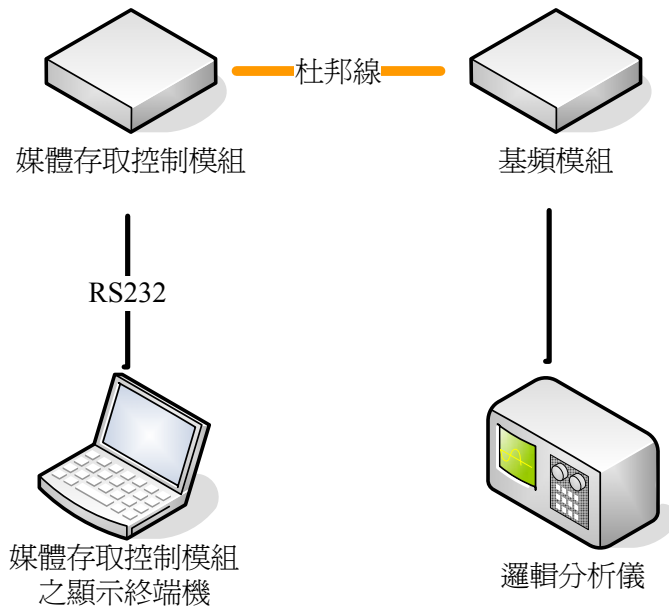


圖 5-27 介面測試環境示意圖

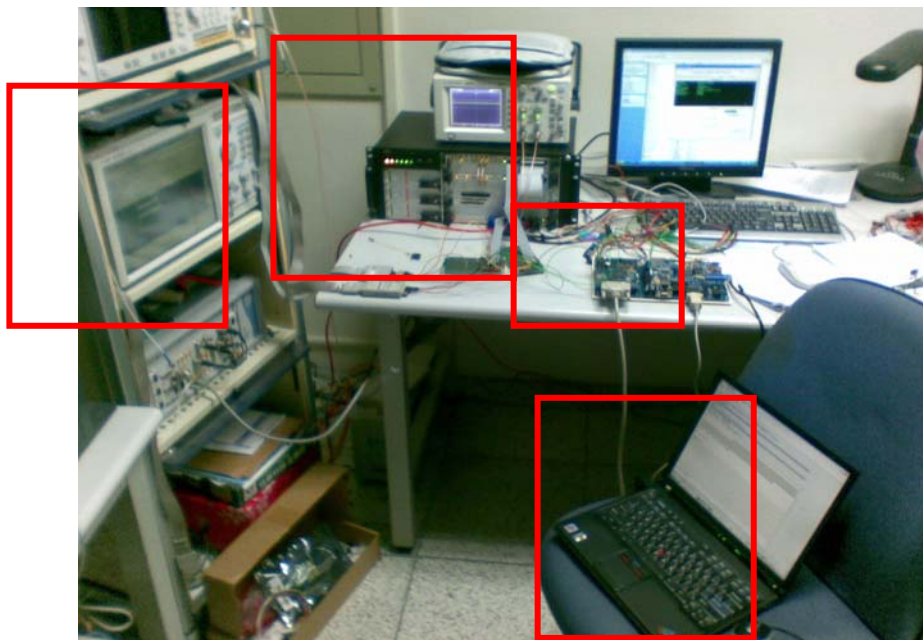


圖 5-28 實際介面測試環境場景圖

(由左而右依次為邏輯分析儀、基頻模組、媒體存取控制模組、媒體存取控制模組之終端顯示器)

如圖 5-29 所示，媒體存取控制模組產生一筆 512 Bytes 的測試訊框，將測試訊框傳送  
至基頻模組。基頻模組接收到測試訊框後，從設計好的測試腳位輸出至邏輯分析儀，由圖  
5-30 可知基頻模組所接收到的測試訊框長度與媒體存取控制模組所傳送的訊框長度相同，  
圖 5-31 顯示媒體存取控制模組送出之 Enable 腳位信號與 Data 腳位信號有對齊，且 Data 腳  
位信號也正常送出。再由邏輯分析儀將訊號列表後與 MAC 模組終端機顯示之測試訊框內  
容比較，由多次實驗結果可知，MAC 模組傳送之測試訊框與基頻模組所收取之訊框內容完  
全相同。

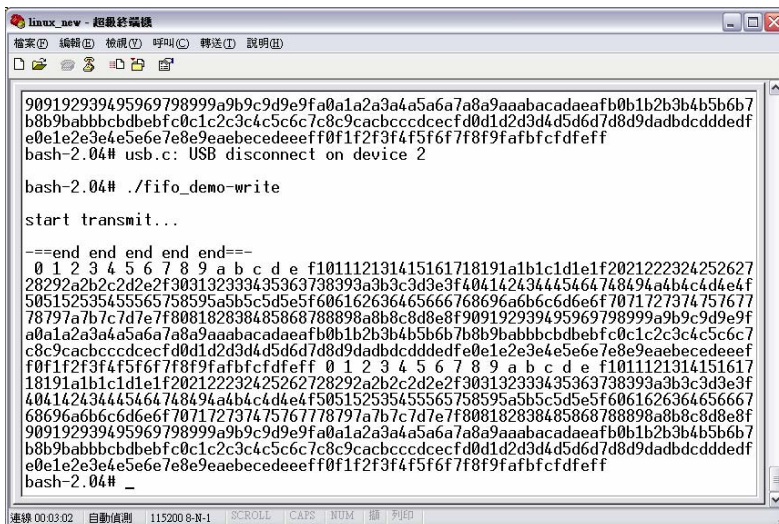


圖 5-29 媒體存取控制模組的終端顯示

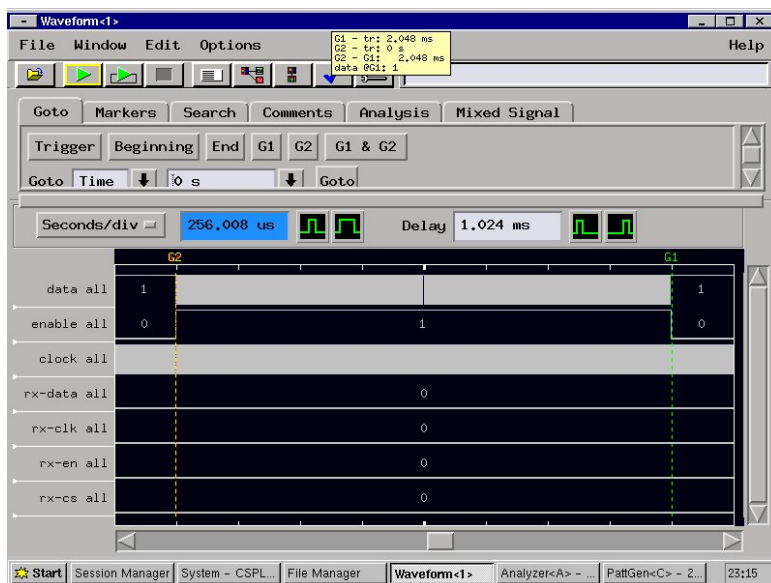


圖 5-30 邏輯分析儀擷取基頻模組接收之媒體存取控制模組測試訊框

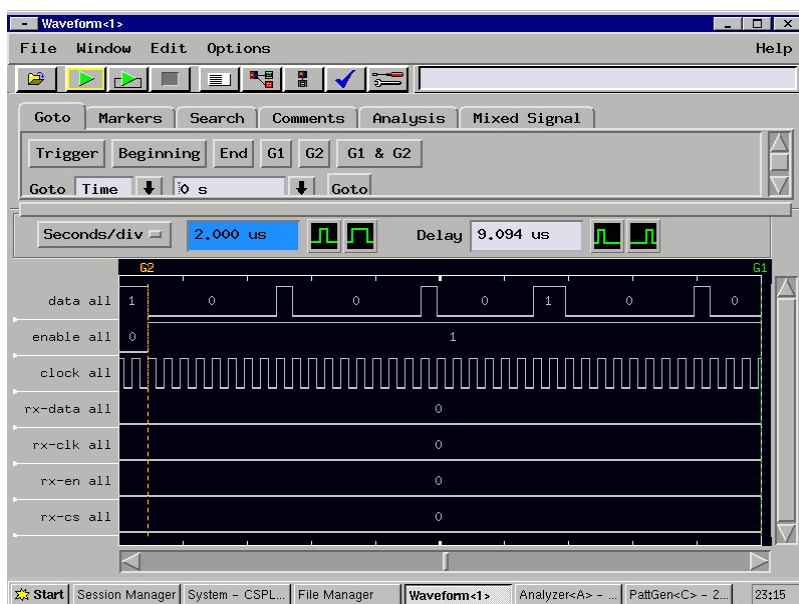


圖 5-31 邏輯分析儀擷取基頻模組接收之媒體存取控制模組測試訊框

為了驗證基頻模組傳送之測試訊框可以被媒體存取控制模組接收，基頻模組取得由邏輯分析儀所產生之測試訊框，將訊框內容從設計好的測試腳位輸出至數位示波器，並傳送給媒體存取控制模組。媒體存取控制模組接收到測試訊框後，將該訊框之內容列印於媒體存取控制模組之終端機上。邏輯分析儀產生"FF0101..."的 512 Bytes 測試訊框，如圖 5-32，輸出至基頻模組。基頻模組再將測試訊框傳送至媒體存取控制模組並由 GPIO 輸出至邏輯分析儀，圖 5-33 為邏輯分析儀擷取基頻模組傳送給媒體存取控制模組之信號。由圖 5-33 可知，基頻模組送出之 Enable 信號與 Data 信號有對齊，且 Data 信號也正常送出。圖 5-34 為媒體存取控制模組終端機顯示媒體存取控制模組接收到的測試訊框內容，經多次實驗結果，基頻模組傳送之測試訊框與媒體存取控制模組所收取之訊框內容完全相同。

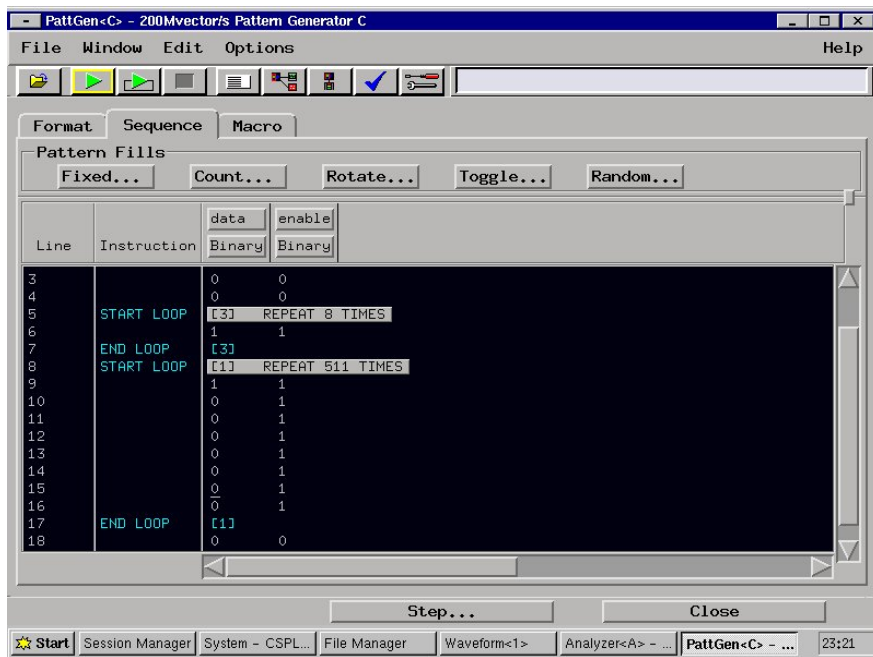


圖 5-32 邏輯分析儀產生之測試訊框內容

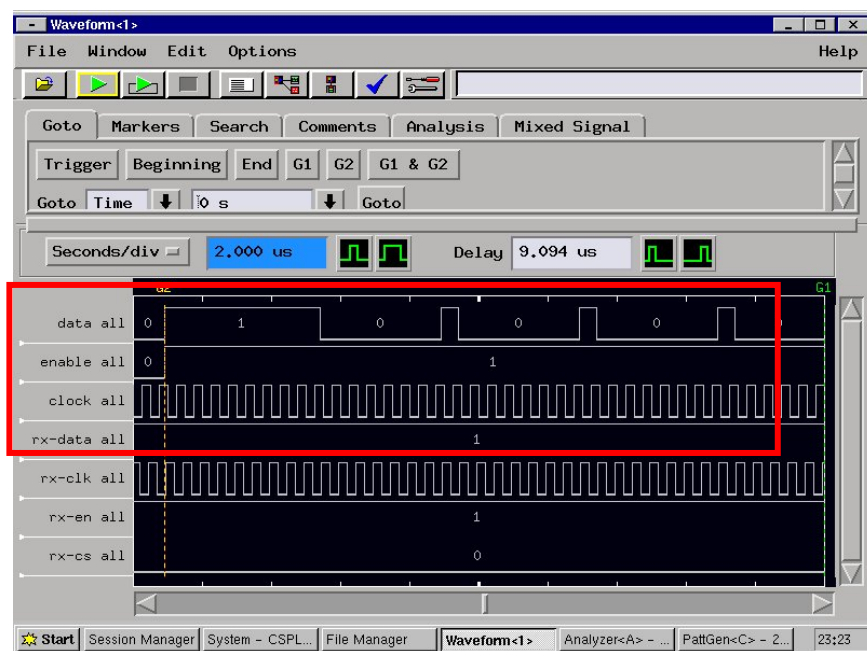


圖 5-33 邏輯分析儀擷取到基頻模組傳送給媒體存取控制模組之信號



## 6. Ad-hoc 混合式多重繞徑協定

### 6.1 簡介

在 MANET 的群播擇路協定當中，以結構來分主要有兩大類：網狀結構與樹狀結構，分別以 ODMRP 協定和 MAODV 協定為代表。樹狀結構的組織是由一個根(Group Manager)延伸出許多樹枝，每根樹枝再延伸小樹枝出去，這樣的結構比較單純，優點是要維持結構存在所消耗的頻寬資源會比較小；但相對的，每一個節點之間的聯繫穩定度比較差，在移動性較大的網路之中，為了修復連結，反而造成更多的頻寬消耗，所以樹狀結構比較適用於數量大但較靜態的網路環境。而網狀結構沒有”根”的觀念。在每一個節點之間，可能會有很多路徑可以連結，結構比較複雜，優點剛好跟樹狀結構相反，每一個節點之間的聯繫比較不容易斷，比較適用於移動性大的網路。但缺點是為了維持結構的存在，需要較多的頻寬資源，所以網狀結構比較適用於數量小但較動態的網路。

ODMRP 協定是一種有需要才傳送(On-Demand)的群播協定，透過參加要求封包(Join Request)和參加表格封包(Join Table)以及週期性廣播參加要求封包來更新群組會員以及路徑的資訊來維持繞徑的正確性與封包到達率，因為是網狀結構所以對於同一個群播成員會有很多條路徑可以到達，因此可以增加群播網路的穩定性。MAODV 協定也是一種 On-Demand 的群播協定，不過它是使用樹狀結構來構成群播網路，由群組的領導節點週期性廣播群組問候訊息來更新群組會員以及路徑的資訊，由於是樹狀結構，因此到達一個群播成員的路徑僅有一條，而且又因為維持不易，所以在封包到達率方面是比較不如網狀結構的設計。

故最終在設計群播擇路協定時，以網狀架構為主要考量，並簡化 ODMRP 實際做出 SMRP 協定，且研究在節能考量的前提下，如何設計出降低 ODMRP 中轉送節點群組(Forwarding Group)數量進而減少資料封包轉送次數達到節省整體網路能量消耗的目的。以下兩節分別介紹 SMRP 與節能考量之群播協定(ECMRP)，並分別附上驗證與模擬結果供為參考。

## 6.2 Scalable Multicast Routing Protocol (SMRP)

### 6.2.1 設計考量

由於行動運算設備常缺乏高速運算的能力以及受限的記憶體空間，所以這些設備執行複雜龐大計算時，會使得處理超過通訊要求的時間限制，雖然有些演算法可以提高空間複雜度來降低時間複雜度，但是卻因為受限的記憶體空間，也無法有效的達成。因此規則簡單、演算複雜度低及考量真實平台系統複雜度是執行團隊所提出的 SMRP 協定的設計理念。

### 6.2.2 演算法

若傳送端 S 尚未是群播成員但卻有群播的資料要傳達到遠方的群播成員，因此先將資料暫時存於自身的封包堆疊中，之後將初始化 RREQ-J 封包，並且將其廣播出去，要求加入群組。接到 RREQ-J 封包的行動節點(MN)，先檢查是否已經接收過這個 RREQ-J 封包(可利用網路序列編號與資料來源點編號判定)，若已經接收過這個封包，則將其丟棄，若尚未接收過則再將 RREQ-J 封包廣播出去，直到群播成員收到 RREQ-J 封包之後，群播成員除了繼續廣播 RREQ-J 封包外，將初始化 RREP-J 封包，沿著 RREQ-J 封包所經過的路徑回傳至 S 點，對於 RREP-J 封包所經過的 MN，將其狀態設為轉送點(FG\_FLAG SET)，如此這個 MN 則可以擔任中繼轉送的功能，當 RREP-J 封包回到 S 點時，原先儲存在 S 點封包堆疊內的資料即可以馬上廣播傳送出去，轉送點就會擔任重新廣播的中繼者，因此可以達成群播的功能。若傳送端已經是群播成員，那麼只要將群播資料廣播出去，不需要執行 RREQ-J 封包和 RREP-J 封包的路徑交涉動作。

為了維護轉送節點群組，在固定時間內重新執行 RREQ-J 封包和 RREP-J 封包的路徑交涉動作，以確保群播的連結是穩固的，透過這樣的方式可以讓 SMRP 協定對於在移動的時候可以增加穩定性。

### 6.2.3 SMRP 協定特色與比較

SMRP 協定主要是以有需要才傳送(On-Demand)的方式來運行，目的是在減低維護路徑的控制花費(Control Overhead)，而且採用網狀結構(Mesh-based Structure)，網狀結構有比較強健的穩定性，況且架構簡單，並且比樹狀結構(Tree-based Structure)容易維護，可以有比樹狀結構更少的花費。對於同樣使用網狀結構的 ODMRP 協定來說，SMRP 協定於多資料來源點(Multi-Sources)傳輸時，RREP-J 的回傳方式採用分別回傳至來源端節點，而不是如同 ODMRP 協定般將多個 RREP-J 建立為 JREP-T(Join Reply Table)回傳，將減輕回傳 JREP-T 時可能因封包碰撞或資料傳送錯誤而造成整體網路的負擔。

### 6.2.4 實作方法

在硬體方面使用研華公司的 PCM-7230 來實作群播擇路協定，擇路協定則利用 Linux Kernel 中所提供的 Netfilter 和 Socket Stack 所提供的介面函數和 Linux Kernel 溝通。Netfilter 是 Linux 核心的一個子系統，Netfilter 使得例如封包過濾、網絡地址轉換(NAT)以及網絡連接跟蹤等技巧成為可能，這些功能僅需通過使用核心網絡程式碼提供的各式各樣的 hook 既可以完成。這些 hook 位於核心程式碼中，可以是靜態鏈接或是以動態加載的模塊的形式存在。可以為指定的網絡事件註冊相對應的處理函數，數據封包的接收就是這樣一個例子。Netfilter 中定義了五個關於 IPv4 的 hook，對這些 hook 符號的定義可以在 linux/netfilter\_ipv4.h

中找到，這些 hook 列在下面的表中：

NF_IP_PRE_ROUTING	在完整性校驗(CRC Check)之後，擇路確定之前
NF_IP_LOCAL_IN	在擇路確定之後，且數據封包的目的是本地主機
NF_IP_FORWARD	目的地是其它主機的數據封包
NF_IP_LOCAL_OUT	來自本地主機的數據封包在其離開本地主機的過程中
NF_IP_POST_ROUTING	在數據封包離開本地主機之前，擇路之後

SMRP 註冊的處理函數所使用到的 hook 分別為 NF\_IP\_PRE\_ROUTING 與 NF\_IP\_LOCAL\_OUT，而註冊一個 hook 處理函數使用 nf\_hook\_ops 結構十分的簡單，nf\_hook\_ops 結構在 linux/netfilter.h 中定義，該結構的定義如下：

```
struct nf_hook_ops {
struct list_head list;
/*以下的值由使用者填寫*/
nf_hookfn *hook;
int pf;
int hooknum;
/*Hook 以升冪的優先層級排序*/
int priority;
};
```

註冊一個 Netfilter hook 需要調用 nf\_register\_hook()函數，以及使用到一個 nf\_hook\_ops 結構。nf\_register\_hook()函數以一個 nf\_hook\_ops 結構的位址作為參數並且返回一個整數型的值。

而另外使用到的 Socket Stack 也內建在 Linux Kernel 中，主要是在提供使用者網路存取的功能，擇路協定利用它來產生控制封包並且傳送封包。

### 6.2.5 模組與介面測試

Ad-hoc 群播繞徑模組(SMRP)功能符合性測試

#### 1. 測試項目表

代碼	測試項目	測試項目簡介	備註
NET-C-01	Node Join	測試新節點是否能夠加入已存在之 multicast group	
NET-C-02	Group Member Monitor	驗證來源節點是否能夠監測目前群組成員組成	

#### 2. 測試程序

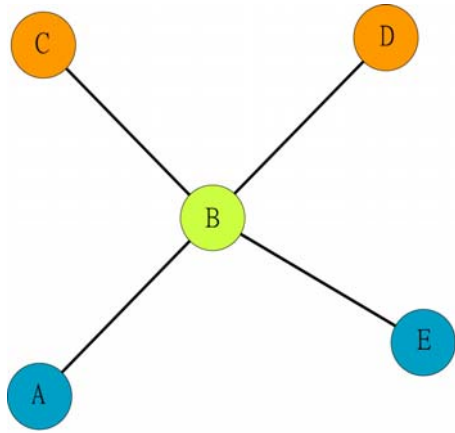
##### (1)NET-C-01：Node Join

##### (a)測試設備與系統參數

PCM-7230 嵌入式系統 5 套

##### (b)測試系統架構與場景





<註> 節點 C，D 預設為群組成員；節點 A 為初始網路架構下之封包發送節點，節點 E 為中途加入之封包發送節點。

(c)測試步驟

Step 1: 原始網路組成僅有來源節點 A，中繼 Relay Node B，群組成員 C，D.

Step 2: 新來源節點加入原始網路，進行 RREQ-J/RREP-J 路徑找尋程序

Step 3: 觀察群組成員 C，D 是否能收到來自節點 E 之封包

(d)測試結果評估標準

測試結果滿足以下條件則本功能符合：

Rule 1: 群組成員 C，D 可收到來源節點 A，E 分別發送之 128 bytes 之 IP 封包訊息。

(e)測試結果

架設網路結構如(b)的場景。並且給予位置的對應如下為：

NODE	Number
A	1
B	8
C	5
D	9
E	2

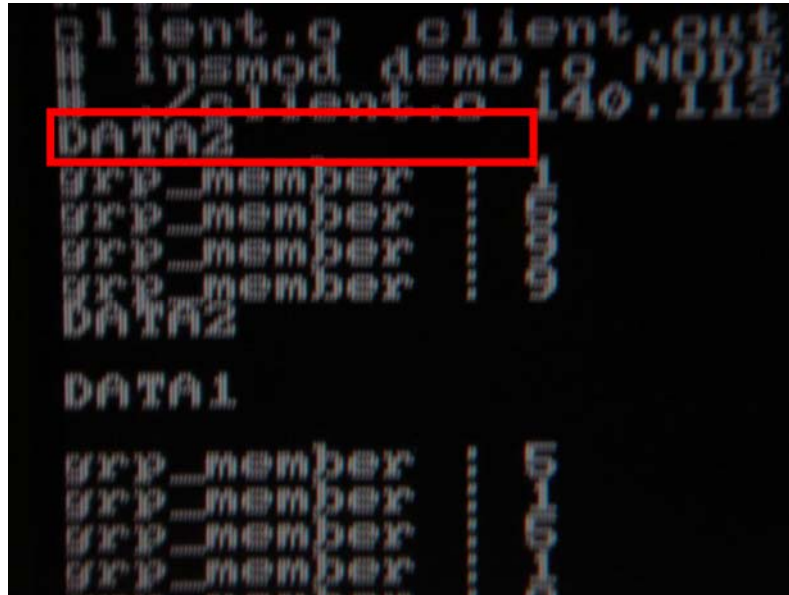
<註>這個位置的對應是方便將場景的字母代號轉換成電腦的代號。

進行 Step 1 將 A、B、C 和 D 四節點架設起來，並以 A 為來源節點，B 為 Relay Node，而 C 和 D 為群組成員節點。圖 6-1、圖 6-2 和圖 6-3 為 Node A、C 和 D 的畫面快照，用以證明原始網路已經架設完畢。



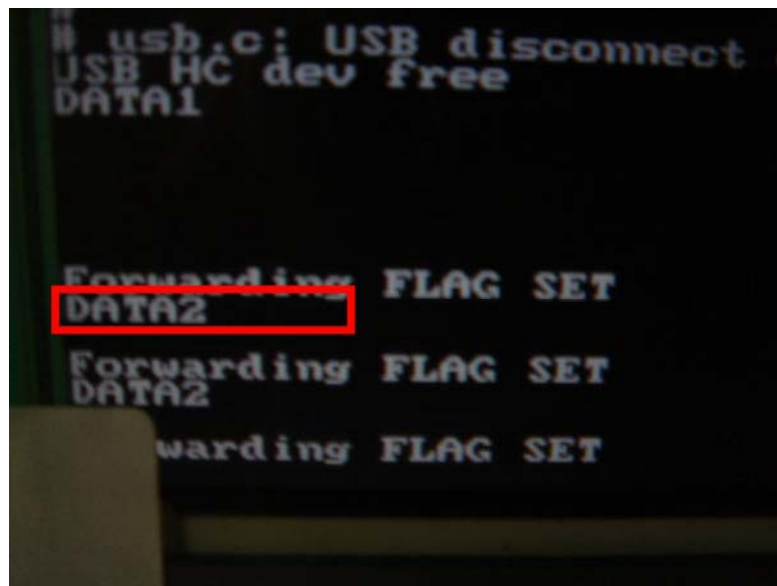
圖 6-2 和圖 6-3 出現”DATA1”證明 Node A 成功和群組成員節點相連接，並且群組成員節點成功接收到來自 Node A 封包。

接下來進行 Step 2 和 Step 3，如圖 6-4，Node E 加入群組並且傳送資料`DATA2`給群組成員。如圖 6-5 和圖 6-6，`DATA2`成功被 Node C 和 Node D 成功接收，因此 Rule 1: 群組成員 C，D 可收到來源節點 A，E 分別發送之 128 bytes 之 IP 封包訊息，已經被驗證完畢。



```
client.o client.out
1 insmod demo.o NODE
2 client.o 140.113
DATA2
grp_member : 1
grp_member : 5
grp_member : 9
grp_member : 9
DATA2
DATA1
grp_member : 5
grp_member : 6
grp_member : 6
grp_member : 1
```

圖 6-4 Node E 快照



```
# usb.c: USB disconnect
USB HC dev free
DATA1

Forwarding FLAG SET
DATA2
Forwarding FLAG SET
DATA2
Forwarding FLAG SET
```

圖 6-5 Node C 快照

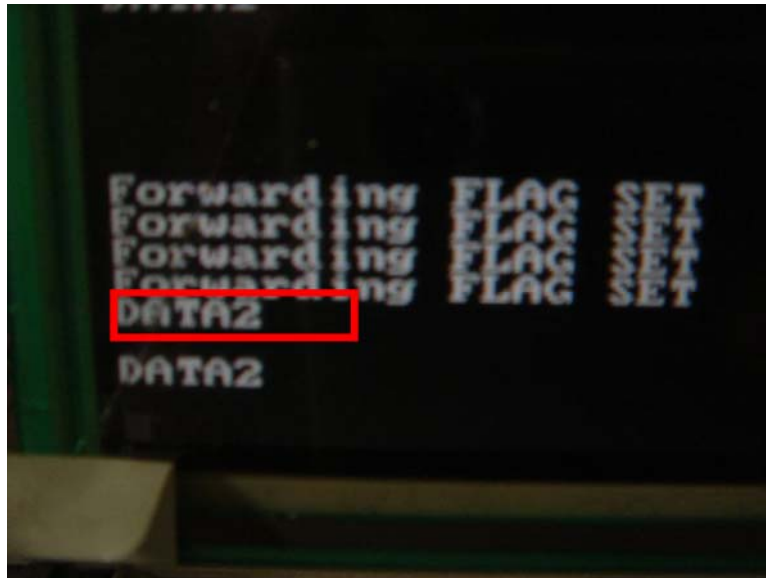


圖 6-6 Node D 快照

## (2)NET-C-02：Group Member Monitor

### (a) 測試設備與系統參數

I. PCM7230 嵌入式系統 5 套

### (b)測試系統架構與場景

同 NET-C-01

### (c)測試步驟

Step 1:初始網路架構為來源節點 A，中繼 Relay Node B，群組成員節點 C，D。

Step 2:節點 E 加入初始網路，進行 RREQ/RREP 路徑找尋程序

Step 3:由節點 A 觀察來自節點 C，D，E 之 RREP 封包以達到監測目前群組成員之功能

### (d)測試結果評估標準

Rule 1:由來源節點 A 可週期性藉 RREQ/RREP 交換程序達到監測目前群組成員之效果；由最初記錄之群組成員 C，D 爾後中途更新為群組成員 C，D，E。

### (e)測試結果

接續 NET-C-01 的測試結果，由圖 6-7 可知道現在網路中的群組成員為 Node C、Node D 和新加入的 Node E，代號分別為 5、9 和 2。因此 NET-C-02 的 Rule 1 已經成功被驗證。

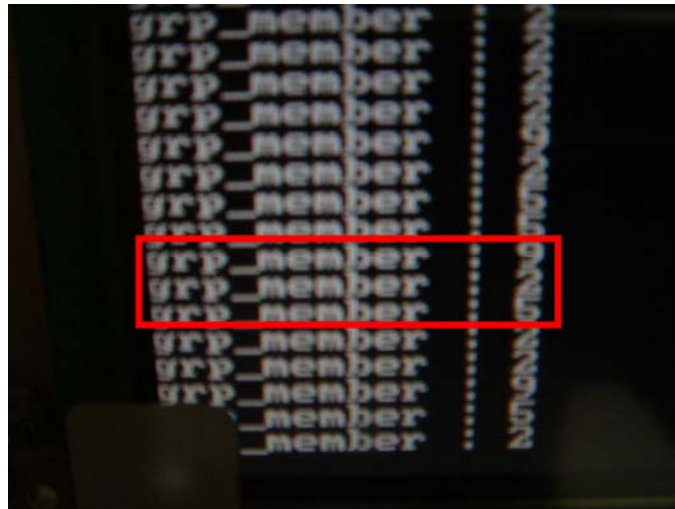


圖 6-7 Node E 加入後的 Node

### 6.2.6 MAC 模組與 Ad-hoc 模組介面測試(R6)

R6：MAC 模組與 Ad-hoc 模組間 IP 封包收送軟體介面

#### 1.測試項目表

代碼	測試項目	測試項目簡介	備註
R6-C-01	封包之接收與傳送	測試 MAC 模組可成功接收到 Ad-hoc 模組所傳送之封包(packet)，並將封包成功由 MAC 模組回傳至 Ad-hoc 模組。	

#### 2.測試程序

##### (1) R6-C-01：封包之接收與傳送

###### (a) 測試設備與系統參數

- I. ARM/FPGA 發展系統 1 套 (MAC 模組)
- II. 筆記型電腦 1 台 (做為 MAC 模組之顯示終端機)
- III. PCM-7230 嵌入式系統 1 套 (Ad-hoc 模組)

###### (b) 測試系統架構與場景

MAC 模組進行與 Ad-hoc 模組間之封包接收與傳送的介面功能符合性測試之系統架構圖如下圖所示。其中，MAC 模組是以 ARM/FPGA 發展系統實現，並以筆記型電腦做為 MAC 模組之顯示終端機來顯示 MAC 模組之訊息。Ad-Hoc 模組則以 PCM-7230 嵌入式系統實現。進行介面功能測試時，Ad-Hoc 模組發送 multicast data packet，MAC 模組使用 Netfilter 攔截網路中之封包，並將所攔截到之封包暫存於暫存器中，同時將暫存器內容顯示於 MAC 模組之顯示終端機，以驗證接收封包之正確性。當 MAC 模組接收封包並暫存於暫存器後，便使用 Linux 核心程式 sendmsg 指令將存於暫存器之接收封包由網路線送出，再由 Ad-Hoc 模組進行接收。

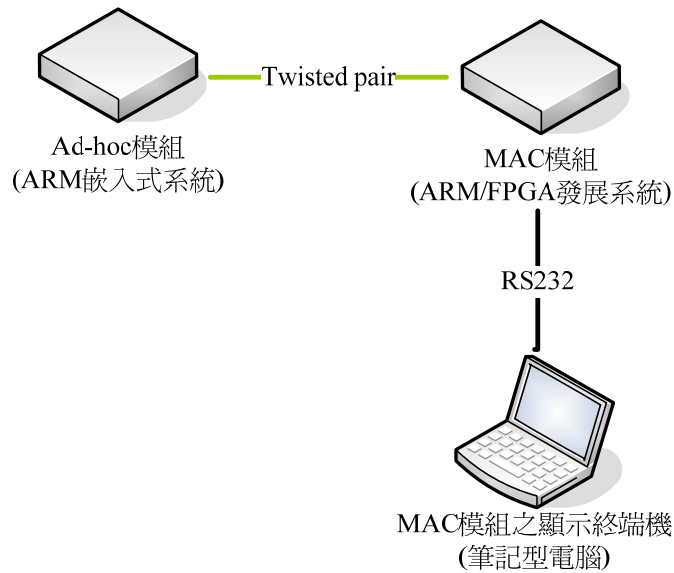


圖 6-8 R6-01 Ad hoc 模組與 MAC 模組介面測試示意圖



圖 6-9 R6-02 Ad hoc 模組與 MAC 模組介面測試實體照片  
由左而右依次為 Ad hoc 模組、MAC 模組、MAC 模組之終端顯示器

(c) 測試步驟

- Step 1：架設 R6-C-01 測試系統。
- Step 2：啟動 Ad-Hoc 模組
- Step 3：啟動 MAC 模組以及其顯示終端機。
- Step 4：Ad-Hoc 模組發送測試用 128 bytes IP packet。
- Step 5：MAC 模組接收 Ad-hoc 模組所傳送之封包，並將所接收之封包顯示於 MAC 模組之顯示終端機上，驗證接收封包之正確性。
- Step 6：MAC 模組再經由網路線將所接收之封包傳送回 Ad-hoc 模組。驗證 Ad-hoc 模組所接收之封包與 MAC 模組所傳送之封包是否一致以驗證功能正確性。









## 6.3 Energy Conserving Multicast Routing Protocol(ECMRP)

### 6.3.1 設計目標

降低網狀群播協定中整體網路資料封包傳送次數導致有效減少整體網路能量的消耗。在有線網路中，此問題等價於如何尋找出此網路的

Steiner-Tree 結構，但在無線網路下，Steiner-Tree 並非最佳減少資料封包傳遞次數之架構；主要因素是無線網路下之廣播現象所造成。由於此問題可被等價於 NP-Complete 問題，故我們提出一種啟發式演算法近似此問題之最佳網路結構。

### 6.3.2 演算法

與SMRP相同，來源節點使用On-Demand之方式建立群播路由；但每一節點與JREQ封包中新增N\_WGHT與P\_WGHT兩參數，分別代表路由與相對應節點之重要程度。Request/Reply程序於來源節點初始建立群播路徑與維護時使用，來源節點S初始時廣播記錄參數P\_WGHT之JREQ封包，當中繼節點收到JREQ封包時，中繼節點將等待一( $CT_i$ )之時間以蒐集來自不同路由之JREQ封包訊息；當 $CT_i$ 時間到期時；中繼節點將挑選眾JREQ封包中參數P\_WGHT為最大值者；並將其封包來源設為回溯至來源節點S之下一節點；當JREQ到達其中一接收端時，同樣的接收端如同中繼點亦會等待一( $CT_R$ )之時間；當 $CT_R$ 時間結束時，接收端亦擇選JREQ中參數P\_WGHT最高值者並回傳JREP封包至所擇選之節點；當所擇選之節點收到JREP封包時，該節點將自身記錄之N\_WGHT參數增加，並根據先前JREQ程序記錄回溯至來源節點S之下一節點，將之載入JREP封包回傳；如斯進行至JREP封包傳至來源節點S，之後來源節點S隨即將所暫存之資料封包廣播出去；此程序將週期性(週期長為FLDT)執行以維護來源節點至接收端之路由路徑。而中繼節點之N\_WGHT參數將於預設(CDT)時間後到期，當CDT時間結束時；N\_WGHT參數若未層更新過，將逐次遞減。當中繼點收到資料封包時，先確定其N\_WGHT參數大於零者，方廣播收到之資料封包(轉傳點)，整體網路故分為來源節點、轉傳點，與接收端點；當接收端欲離開群組成員時，並不需要額外回傳控制封包；因其自來源節點S至接收端相對應之轉傳點將逐步遞減其N\_WGHT參數；當遞減至零時將不再轉傳送資料封包。

本段落將舉此演算法之簡單實例與相對應之數學分析。如下圖3-1所示，來源節點S欲傳送資料封包至群組成員 $R_1$ 、 $R_2$ ；可以觀察到的是來源節點S所發送之JREQ封包將沿 $I_1$ 與 $I_2$ 向群組成員 $R_1$ 與 $R_2$ 傳遞；若假令初始 $R_1$ 隨機擇選 $I_1$ 為回溯點； $I_2$ 因其為唯一中繼點至 $R_2$ ，故 $I_2$ 必為 $R_2$ 之回溯點。此時 $R_1$ 與 $R_2$ 皆回傳JREP封包至來源節點S，當 $I_1$ 與 $I_2$ 收到JREP封包時；兩者皆將其N\_WGHT參數遞增(i.e.  $N\_WGHT+=1$ )；待後續request/reply程序持續進行至 $R_1$ 隨機擇選 $I_2$ 為回溯點時， $I_2$ 之N\_WGHT參數將單調遞增，因為其N\_WGHT參數值必大於 $I_1$ 的N\_WGHT參數值；故 $I_2$ 在此刻後必持續為 $R_1$ 之回溯節點；此時原來之拓撲結構 $\{S, I_1, I_2, R_1, R_2\}$ 將更改為 $\{S, I_2, R_1, R_2\}$ 進而減少資料封包轉傳次數。若以來源節點之request/reply程序為計次單位；令 $R_1$ 隨機擇選 $I_1$ 為回溯節點之機率為定值 $p$ ； $I_2$ 為 $1-p$ ，類似於Geometric Process，但因N\_WGHT參數為逐次遞減(i.e.  $N\_WGHT=-1$ )，實際上收斂至 $\{S, I_2, R_1, R_2\}$ 除第一次外，僅發生於偶數倍的Request/Reply交換程序。則上述網路平均收斂之次數 $E[T_1]$ 可如下所表示：

$$E[T_1] = 1 - p + \sum_{k=1}^{\infty} (2k) \cdot p^k (1-p) = \frac{1+p^2}{1-p}$$

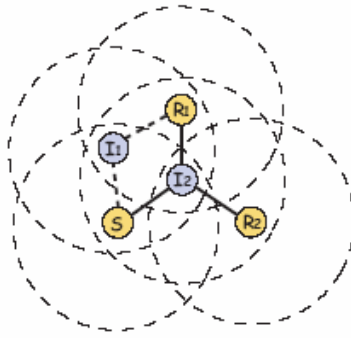


圖 6-13 來源節點 S 欲傳送資料封包至接收端 R<sub>1</sub> 與 R<sub>2</sub>；在 ECMR 協定中，將由初始網狀結構 {S, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>} 演變為 {S, I<sub>2</sub>, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>}。

### 6.3.3 模擬與結果分析

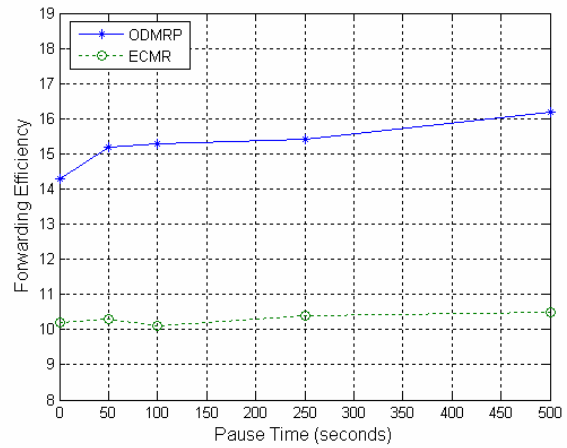
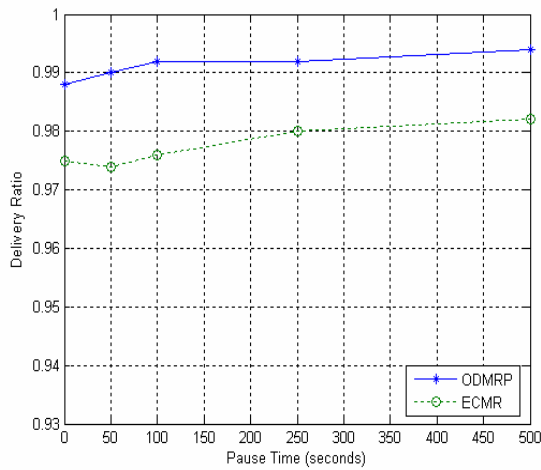
我們利用網路模擬器(The Network Simulator, ns-2.29)對此Energy Conserving Multicast Routing Protocol (ECMRP)與ODMRP進行模擬與比較；下列為模擬過程中設定的參數與比較觀察的項目。

1. 模擬區域： 1001×1001 m
2. 模擬時間： 500 sec
3. 模擬節點數： 100 Nodes
4. 模擬封包傳送方式： 1 Source Nodes, 10 Group Member Nodes
5. 模擬節點平均移動速率： v = 10 m/s
6. 模擬節點移動方式： Random Way Point Model
7. 模擬節點傳送範圍： 250m

觀察與比較項目如下：

1. 接收封包數對傳送封包數的比值(Packet Delivery Ratio)
2. 單一資料封包的平均轉傳次數(Forwarding Efficiency)

結果如圖示：



### 6.3.4 結論

在封包成功傳送率方面，因為ODMRP有比較強的連結性，所以會比ECMRP有較佳的表現，並且隨著網路的穩定度(Pause Time)上升而增加。另一方面我們比較單一資料封包平均傳送次數，因ODMRP擁有較大的轉送節點群組，平均資料封包轉傳次數大於ECMRP，故對整體網路而言較為耗能。且因轉送點群組成員(FG)定期更新其FG\_FLAG旗標，在連續性移動行為時，形成較為鬆散的網狀結構，而隨著Pause Time上升而成為較強健的網狀架構，因此平均資料封包轉傳(Relay)次數增加。

## 6.4 參考文獻

- [1] S. J. Lee, M. Gerla, and C. C. Chiang, "*On-Demand Multicast Routing Protocol*," the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol. 3, Sept. 1999, pp. 1298-1302.
- [2] PCM7230 使用手冊, 研華(advantech)公司, 2003.
- [3] S.J. Lee, W. Su, and M. Gerla, "On-Demand Multicast Routing Protocol in Multihop Wireless Mobile Networks," ACM/Kluwer of Mobile Networks and Applications, Vol. 7, pp. 441-453, Dec. 2002.
- [4] Harald Welte, "The Journey of a Packet through the Linux 2.4 Network Stack".
- [5] E.M. Royer and C.E. Perkins, "Multicast Operation of the Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol," Proc. of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking , pp. 207-218, Aug. 1999.

## 7. 總語

### 7.1 系統之整合

本計畫所規劃與開發之 UWB 隨意群播通訊全系統架構如下圖所示，前述各章已將個別 UWB 通訊核心技術實現於各模組，並運用定義明確之軟硬體介面進行各模組之間的溝通，整合後之全系統架構與其介面規範如下圖。

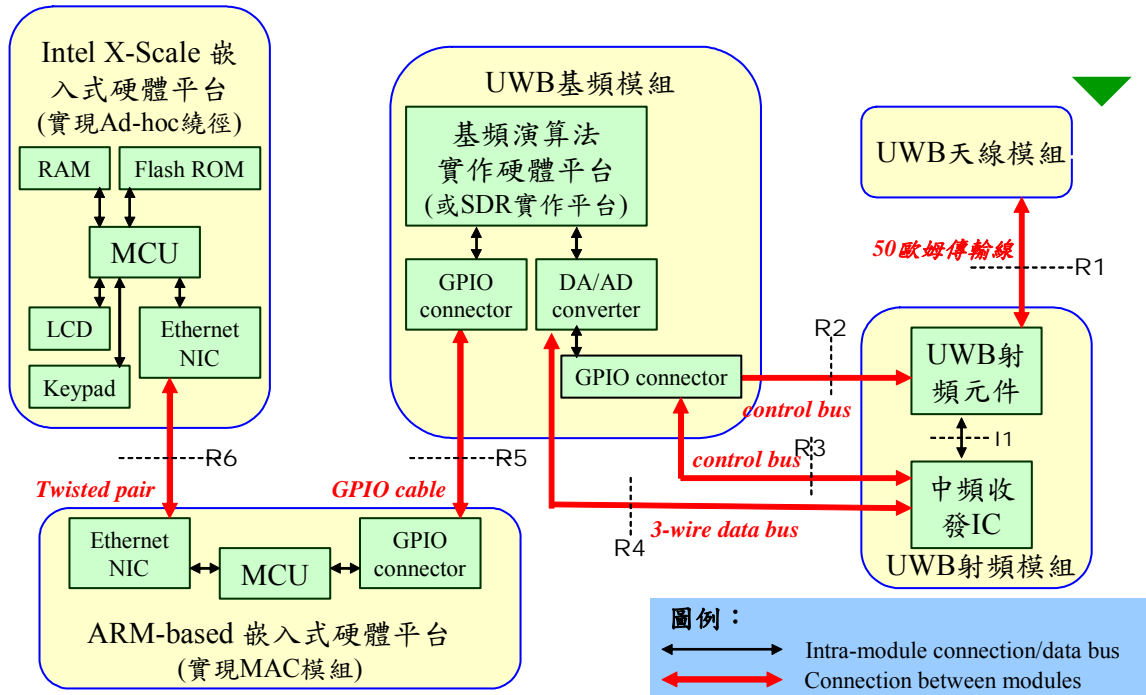


圖 7-1 本研究之超寬頻 ad-hoc 全系統架構與其介面規範

本系統架構所提出之介面包括：

- R1：UWB 天線與射頻模組之無線電訊號介面
- R2：基頻模組直接對射頻元件之控制訊號介面
- R3：基頻模組對射頻模組內中頻收發 IC 之控制訊號介面
- R4：基頻模組與射頻模組間資料訊號介面
- R5：基頻模組與 MAC 模組間資料與控制訊號介面
- R6：MAC 模組與 Ad-hoc 模組間 IP 封包收送軟硬體介面

為能瞭解該系統之完整功能，本計畫亦進行全系統功能符合性測試，『全系統功能符合性測試』係指在各模組功能符合性測試與模組間介面功能符合性測試均滿足的條件下，理論上全系統連測即可達成，由於本案系統僅有一套基頻模組，因此在全系統測試部分，主要組合 2 套 MAC、1 套基頻模組、與 2 套射頻/天線模組，進行迴路測試已驗證其全系統功能符合。

## 7.2 測試規劃

### (1) SYS-C-01：全系統迴路測試

#### (a) 測試設備與系統參數

I. 本 UWB Ad-hoc 通訊全系統 2 套(其中基頻模組於同一套硬體分別實現接收機與發送機功能)

#### (b) 測試系統架構與場景

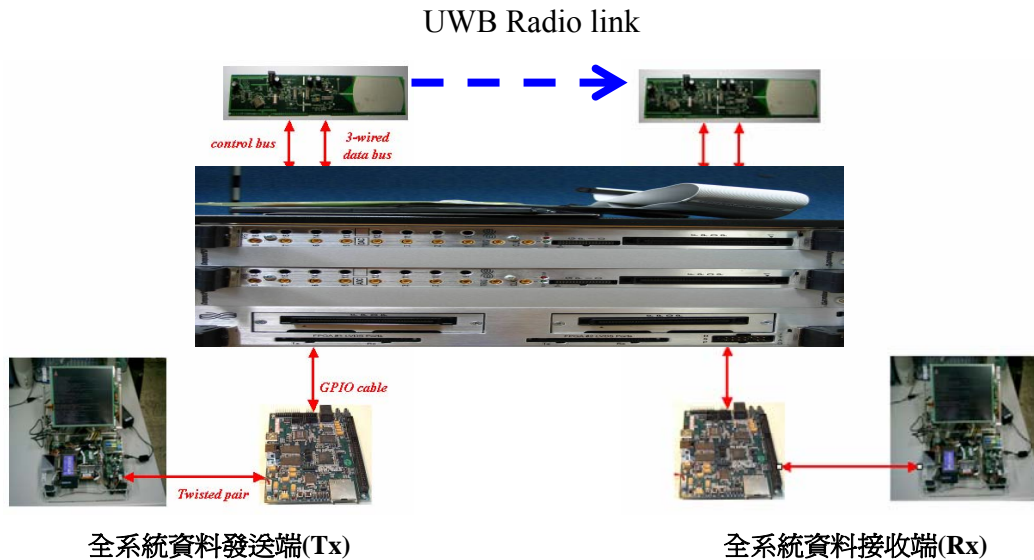


圖 7-2 全系統測試架構與其介面示意圖

#### (c) 測試步驟

Step 1: 原始網路組成模擬 2 套全系統，由於資源限制，基頻模組於同一套硬體分別實現接收機與發送機功能，全系統各模組均根據原介面規劃連接，RF、Baseband、MAC 執行必要之設定程序使各模組功能正常運作，其中 2 套 RF 與天線模組需放置於彼此訊號涵蓋範圍內。

Step 2: 自訂 Tx、Rx 兩端 Ad hoc 模組之 IP 位置，並進行適當之路由設定，使兩者 IP 位置位於同一子網域(subnetwork)以便進行後續之 Ad-hoc 1-hop 通訊，注意規範其 IP 封包從有線網路端送達全系統之 MAC 模組與後續模組進行互通

Step 3: Tx Ad hoc 模組發送一 128 Bytes 之 IP 封包，其 IP 封包的目的 IP 位址及設定為 Rx 之 Ad hoc 模組

Step 4: 所發送之 IP 封包預計將經過 Tx MAC 模組→基頻發送機→Tx RF 模組→Tx UWB 天線→UWB 無線電通道(air)→Rx UWB 天線→Rx RF 模組→基頻接收機→Rx MAC 模組→Rx Ad hoc 模組，形成單向之 loop back

Step 5: 於 Rx Ad hoc 模組利用 sniffer 軟體，監聽與擷取來自 Tx Ad hoc 模組的 IP 封包

Step 6: 比對於 Rx Ad hoc 所擷取之 IP 封包是否與 Tx Ad hoc 模組發送之封包相同

(d)測試結果評估標準

測試結果滿足以下條件則本功能符合：

Rule 1: Rx Ad hoc 擷取之 IP 封包確實與 Tx Ad hoc 模組發送之封包相同

### 7.3 測試結果

研究團隊在本年度根據定義清楚的架構，並在彼此有效相互合作、溝通之下，大致達成全系統測試之目標。下圖為本測試位於交通大學電子與資訊大樓 8 樓之實驗室與全系統測試環境：

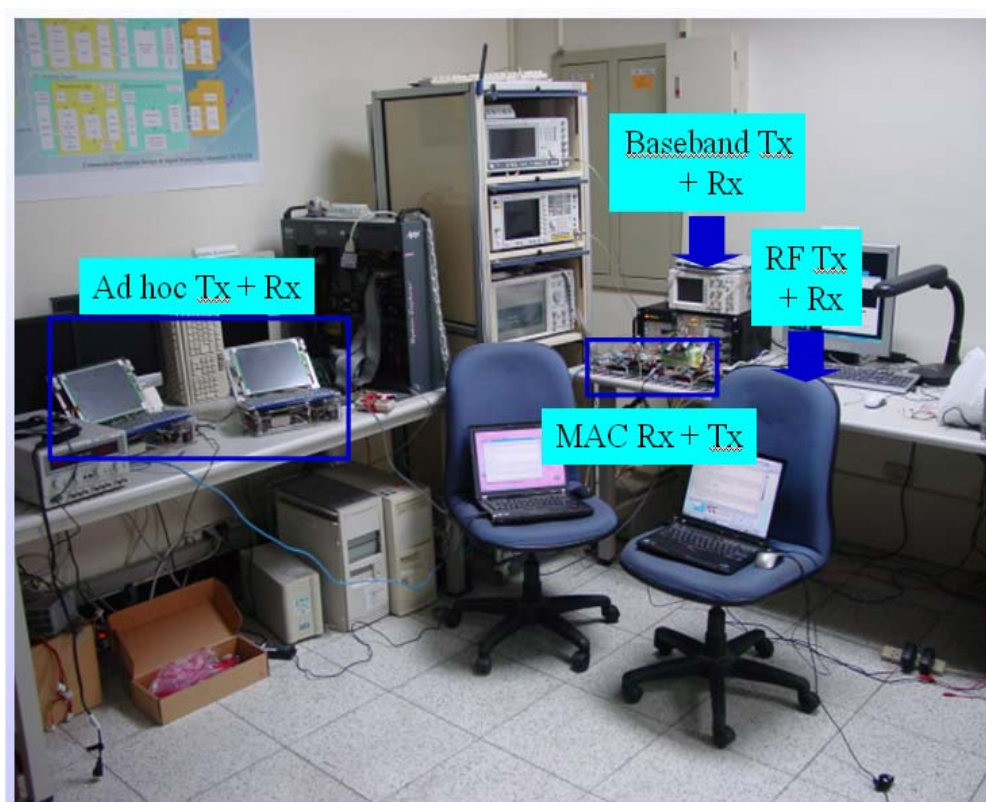


圖 7-3 本計畫實驗室與全系統測試場景

根據下面的結果得知，從 ad-hoc 模組送出的一段訊息，能夠無誤地經過 MAC 層、基頻、再透過 RF、天線 lookback 回路回傳，其間路徑我們均使用適當的監控程式或設備，驗證其訊息的完整性。總括而言，本測試現階段測試結果總結如下：

(1) R1, R2, R3, R5, R6 介面之正確率極高

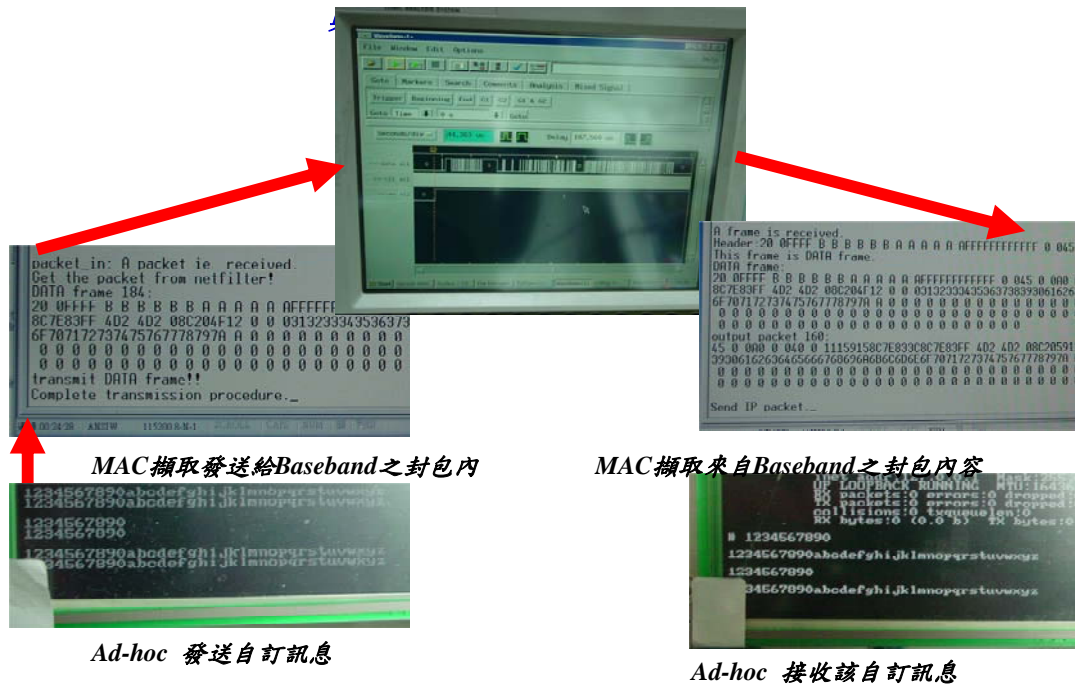
- 從 Ad hoc 經過 MAC 串通至 Baseband 功能與效能穩定
- R1 已實現於 RF 模組上，進行連測後效能影響不大
- R2, R3 控制介面皆完成已驗證無誤

(2) R4 (Baseband – RF Data Cannel)尚有頻率補償問題待解決



- 由於硬體平台限制，目前較為完整且複雜度高的基頻相關演算法並無法全盤實現於 FPGA
- 若簡化相關系統方塊，則導致通訊成功率降低
- Baseband 已完成頻率補償功能方塊的實作，經模擬結果確認功能可行，有待進一步實作方面的工程微調工作

使用邏輯分析儀確認在baseband收送



MAC擷取發送給Baseband之封包內容

MAC擷取來自Baseband之封包內容

Ad-hoc 發送自訂訊息

Ad-hoc 接收該自訂訊息

圖 7-4 全系統測試結果之驗證

## 7.4 結語

本計畫歷經兩年時間，動員六位教授、20 名學生及助理參與計畫，在 95 年配合陸軍「數位戰士」之無線通信系統運用所需；除依運用需求完成相關功能分析外，並將依序研製完成各模組之操作功能設計、效能模擬評析、軟硬體架構設計、軟硬體模組實現及軟體無線電實驗平台建構，藉以執行 Ad-Hoc 網路研發所提出之相關處理流程、關鍵技術和演算法則等效能分析，同時達成 UWB 通信媒介所提出之傳輸波形、架構設計及鏈路參數等功能驗證，最後完成 Ad-Hoc 與 UWB 兩系統與技術整合運用。於 96 年分別完成了 (1) 各模組之測試與介面整合；(2) 超寬頻 Ad-hoc 無線通訊全系統軟硬體連測；及 (3) 多重跳躍式實驗平台效能場測。

最後，感謝中科院資通所相關先進與同仁積極參與計畫之執行，使本計畫之成果能達到預期目標。