

# 可重構 MIMO-OFDM 系統 於 FPGA 平台之實現

學生：蔡有仁

指導教授：李大嵩 博士

國立交通大學 電機學院 電信學程碩士班

## 摘要

正交分頻多工(OFDM)技術在新一代無線通訊系統佔有相當關鍵性的地位，它可提供高速數據傳輸，且適合操作在多重路徑所引起之頻率選擇性通道下；另一方面，多輸入多輸出(MIMO)技術可提升傳輸率及鏈路品質。因此，在新一代通訊系統中，MIMO-OFDM 將成為極具有潛力之關鍵技術之一。在本論文中，吾人在 PC 上開發一套通訊系統軟體，經由該軟體上的通訊參數設定後，予以重新建構 MIMO-OFDM 系統模式與基頻收發機結構，其中，通訊參數包含通訊系統模式、收發機傳送與接收兩架構與 RF 模組等相關設定；並接著使用自行研發 FPGA 數位平台，整合了 DAC、ADC、RF 與 USB 等模組，來完成通訊系統硬體，最後由 USB 來連結兩系統的運作，而完成 2x2 MIMO-OFDM 無線通訊系統的整合。在系統實現上，吾人使用了即時影像技術來做為傳送與接收，並透過 USB 將訊號傳回 PC 進行顯示與分析，基於目前系統架構上，使本論文所實現的 MIMO-OFDM 系統能具有可重構無線電之概念。

# Realization of Reconfigurable MIMO-OFDM System on FPGA Platform

Student: Yu-Jen Tsai

Advisor: Dr. Ta-Sung Lee

Degree Program of Electrical and Computer Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

In recent years, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) becomes a key technology in the development of new wireless communication systems. It enables high data rate transmission and is suitable for frequency selective channels caused by multipath propagation. On the other hand, multiple-input multiple-output (MIMO) technique has a great potential of delivering either a dramatic increase of throughput or improvement of link quality. Combined with the MIMO technique, OFDM systems become more suited to next generation wireless communications. In this thesis, a complete verification tool and environment for  $2 \times 2$  MIMO-OFDM are developed. First, a PC application software is developed; most of the communication parameters, including adopted transmitter and receiver algorithm and structure, RF related settings, and so on, are all configurable on this tool. Second, a couple of self-designed FPGA boards are implemented. In particular, DAC, ADC, RF, and USB modules are integrated into this platform. Finally, to verify the system, real time video frames are transmitted from and received by PC through the USB interface, and the received picture and post analyzed results are calculated and displayed on PC. Based on this system, a MIMO-OFDM system combined with Reconfigurable radio concept can be verified and analysed.

## 誌謝

首先我由衷感謝指導教授李大嵩教授，在論文研究與求學態度上給予詳盡的指導，再來要感謝潘建宏學長、林志遠學長以及楊雯芳學長在研究上的協助，還有要感謝通訊系統設計與訊號處理實驗室的同學與學弟妹們的幫忙，與特別要感謝陳彥宇同學說明論文寫作之撰寫技巧，最後我要感謝我的家人，給我最大的精神鼓勵與支持，讓我可以順利完成研究所學位，同時把這份榮耀獻給我所愛的家人。



# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	ix
中英詞彙對照表.....	x
第一章 緒論.....	1
第二章 MIMO-OFDM技術原理與基頻收發機架構.....	4
2.1 正交分頻多工技術原理.....	4
2.2 多輸入多輸出技術原理.....	8
2.2.1 空間多樣技術.....	9
2.2.2 空間多工技術.....	11
2.3 自行研發基頻收發機架構.....	14
第三章 MIMO-OFDM無線通訊系統平台介紹.....	18
3.1 自行研發FPGA數位系統平台.....	20
3.2 DAC模組與ADC模組.....	24
3.3 RF模組.....	28
3.4 USB模組.....	32
3.5 通訊量測儀器.....	34
3.6 MIMO-OFDM 通訊系統平台發展過程心得.....	37

<b>第四章 MIMO-OFDM無線通訊系統實現與分析</b> .....	39
4.1 資訊輸入的設定選單.....	41
4.2 RF晶片控制的設定選單.....	43
4.3 通訊系統行程的設定選單.....	44
4.4 MIMO-OFDM通訊系統實現與分析.....	47
4.4.1 MIMO-OFDM向量訊號之時域、頻域分析.....	48
4.4.2 MIMO-OFDM通訊系統估測分析.....	49
4.4.3 MIMO-OFDM通訊系統性能分析.....	50
4.5 MIMO-OFDM通訊系統結合影像應用之實現.....	51
4.6 通訊系統應用平台發展過程心得.....	52
<b>第五章 結論</b> .....	53



## 圖目錄

圖 2-1	FDM與OFDM頻寬效益 .....	6
圖 2-2	OFDM訊號之時域與頻域 .....	6
圖 2-3	OFDM保護區間與循前置區段 .....	7
圖 2-4	OFDM訊框與CP經FFT生成之頻譜 .....	7
圖 2-5	2×2 MIMO-OFDM系統架構 .....	8
圖 2-6	MIMO-OFDM系統效能 .....	9
圖 2-7	V-BLAST資料偵測模擬 .....	14
圖 2-8	自行研發MIMO-OFDM系統之功能架構 .....	16
圖 2-9	IEEE802.11A封包之生成流程 .....	16
圖 2-10	IEEE802.11A封包結構 .....	16
圖 2-11	IFFT之子載波對應圖 .....	17
圖 2-12	自行研發MIMO-OFDM封包之生成流程 .....	17
圖 2-13	自行研發MIMO-OFDM封包波型 .....	17
圖 3-1	通訊系統平台與通訊量測儀器 .....	19
圖 3-2	通訊系統平台的各模組功能說明 .....	19
圖 3-3	MIMO-OFDM通訊系統應用平台之量測環境 .....	20
圖 3-4	MIMO-OFDM通訊系統平台功能架構 .....	22
圖 3-5	MIMO-OFDM通訊系統平台 .....	22
圖 3-6	FPGA程式語言發展流程 .....	23
圖 3-7	XILINX-ISE發展系統之工作畫面 .....	23
圖 3-8	ADC與DAC整合模組 .....	25

圖 3-9	DAC生成短序文之波形 .....	25
圖 3-10	DAC晶片功能架構 .....	26
圖 3-11	DAC晶片控制時序規範 .....	26
圖 3-12	ADC晶片功能架構 .....	27
圖 3-13	ADC晶片控制時序規範 .....	27
圖 3-14	射頻模組與MAX2827 晶片 .....	29
圖 3-15	RF模組晶片功能架構.....	29
圖 3-16	VSA軟體分析RF模組效能畫面.....	30
圖 3-17	RF模組接收向量訊號波形.....	30
圖 3-18	RF模組控制時序波形.....	31
圖 3-19	RF模組控制時序規範.....	31
圖 3-20	USB模組 .....	32
圖 3-21	USB晶片內部功能架構.....	33
圖 3-22	USB模組轉換USB訊號至序列訊號波形 .....	33
圖 3-23	頻譜儀器與工作畫面.....	35
圖 3-24	頻譜儀器原理架構.....	35
圖 3-25	向量訊號分析儀器與視窗軟體工作畫面.....	36
圖 3-26	向量訊號分析儀器原理架構.....	36
圖 4-1	MIMO-OFDM通訊系統應用平台功能架構 .....	40
圖 4-2	BORLAND C++ BUILDER 6 工作畫面.....	40
圖 4-3	通訊系統應用平台執行影像處理的工作畫面.....	42
圖 4-4	通訊系統應用平台與MATLAB的資料存取.....	42
圖 4-5	RF晶片設定畫面 .....	43
圖 4-6	通訊系統應用平台行程設定架構.....	45
圖 4-7	通訊系統應用平台行程設定畫面.....	46
圖 4-8	自行研發向量訊號分析儀功能架構.....	47

圖 4-9	MIMO-OFDM接收訊號時域、頻域顯示 .....	48
圖 4-10	MIMO-OFDM通道估測、框碼位置、頻率偏移 .....	49
圖 4-11	MIMO-OFDM解調向量訊號星座圖 .....	50
圖 4-12	MIMO-OFDM通訊系統結合影像應用行程架構 .....	51





## 表目錄

表格 2-1 MIMO-OFDM封包參數.....	15
表格 4-1 MIMO-OFDM系統通信參數.....	46



## 中英詞彙對照表

4G	the fourth generation, 第四代
ADC	analog to digital converter, 類比數位轉換
AMPS	advanced mobile phone services, 先進移動電話服務系統
BB	baseband, 基頻
BCB6	Borland C++ Builder 6, PC 視窗程式的開發軟體
BER	bit error rate, 位元錯誤率
CDMA	code division multiple access, 分碼多工擷取
CP	cyclic prefix, 循環前置區段
CSD	cyclic shift diversity, 循環位移多樣
DAB	digital audio brocasting, 數位廣播
DAC	digital to analog converter, 數位類比轉換
DVB-T	terrestrial digital video broadcasting, 數位電視
FDM	frequency division multiplexing, 分頻多工
FFT	fast Fourier transform, 快速傅利葉轉換
FIFO	first in first out, 先進先出
FPGA	field programmable gate array, 場式可程式閘陣列
GI	guard interval, 保護區間
GSM	global system for mobile communications, 全球移動通信系統
I/O	input/output, 輸出入
I/Q	inphase/quadrature, 向量訊號之實/虛部相位值
ICI	inter-carrier interference, 載波間干擾效應

IEEE	institute of electrical and electronics engineers, 電氣和電子工程師學會
IF	intermediate frequency, 中頻
ISI	inter-symbol interference, 符元間干擾效應
IFFT	inverse fast Fourier transform, 快速傅利葉反轉換
LSB	least significant bit, 最低有效位元
LA	logic analyzer, 邏輯分析儀
LED	light emitting diode, 發光二極體
MATLAB	matrix laboratory, 矩陣數值分析
MIMO	multiple input multiple output, 多輸入多輸出
MMSE	minimization of mean square error, 最小平均平方錯誤法
MRC	maximum ratio combining, 最大組合率
OFDM	orthogonal frequency division multiplexing, 正交分頻多工
OSC	oscillator, 震盪源
PAPR	peak to average power ratio, 峯值對平均功率比
PC	personal computer, 個人電腦
PHY	physical layer, 實體層
PLL	phase-locked loop, 相鎖迴路
QoS	quality of service, 服務品質
RF	radio frequency, 射頻
STBC	space-time block coding, 空時區塊編碼
TI	Texas instruments, 德州儀器
TX/RX	transmitter/receiver, 傳送端/接收端
USB	universal serial bus, 通用性串列匯流排
V-BLAST	vertical-Bell laboratories layered space-time
VSA	vector signal analyzer, 向量訊號分析儀

W-CDMA	wideband-CDMA, 寬頻分碼多工擷取
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, 微波存取全球 互通
WLAN	wireless local area network, 無線區域網路
ZF	zero forcing, 零強制法
beamforming	波束成形
carrier frequency	載波頻率
channel estimation	通道估計
constellation mapping	星狀圖對應
data stream	資料流
decision feedback	決策回饋
delay effect	延遲效應
diversity gain	多樣式增益
Doppler effect	都普勒效應
fixed point	定點
floating point	浮點
frequency domain	頻域
frequency estimation	頻率估計
frequency response	頻率響應
guard band	保護頻帶
linear combinatorial weight	線性組合權值
long preamble	長序文
interference cancellation	干擾消除
noise power	雜訊能量
Nyquist-rate	奈奎斯特取樣率
phase tracking	相位追蹤



pilot subcarrier	導引子載波
pseudo-inverse	擬反矩陣
selective fading	選擇性衰弱
spatial diversity	空間多樣
spatial multiplexing	空間多工
subcarrier	子載波
time domain	時域
transceiver	收發機



# 第一章

## 緒論

在近年來，隨著生活科技資訊在時代變遷的成長下，帶動了無線通訊系統技術快速地蓬勃發展，至今無線通訊系統技術已發展邁入第四代架構，對於無線通訊系統技術的各代通訊技術架構內容將做一敘述之：在第一代無線通訊系統技術使用類比訊號調變技術，主要以傳送語音與控制訊息為主要，在當時有先進移動電話服務系統(advanced mobile phone services, AMPS)之建立，該系統建造與使用約在 1970 年至 1980 年之間；在第二代無線通訊系統技術使用數位調變技術來收發通訊資訊，在當時有如全球移動通信系統(global system for mobile communications, GSM)與分碼多工擷取系統(code division multiple access, CDMA)，該系統建造約在 1980 年代；在第三代無線通訊系統技術則提供給用戶端高速率的數據服務，主要採用寬頻分碼多工擷取系統(wideband-CDMA)，其輸送數據速率在最佳條件能達到 2 Mbps，該技術約在 1990 年代迅速發展，至今仍然繼續地發展；目前面臨一些存在的架構技術問題，如在高速率數據傳送過程中受到過度干擾時，會導致無法維持優質的服務質量(Quality of Service, QoS)；在第四代(4G)無線通訊系統技術則具有更高速率數據傳輸的能力，並可連結開放式網路的系統架構，適合高頻寬無線通訊之所需。實際上，在為了高傳輸頻寬需求下，多輸入多輸出正交分頻多工技術已經為提升下一代無線通信系統[1]的數據傳輸速度認為是一個有希望的解決辦法。

正交分頻多工技術(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)[2][3]已經是一種普遍使用在通訊系統產品上，利用快速傅利葉轉換(fast Fourier transform, FFT)做為調變，為一種多載波調變技術，可以使頻寬使用效益大為提升，利用加入保護區間(guard interval, GI)有效解決多路徑效應所產生的碼框干擾(inter-symbol interference, ISI)，在傳送通道上因使用平行的正交子載波通道之技術，有效克服因選擇性頻帶衰弱的因素使系統性能降低，並且可使接收機在一個緩慢的通道變化下有能力將資料正確地解碼出來。因此，正交分頻多工技術常在通訊標準被採用之，例如數位廣播(digital audio brocasting, DAB)、數位電視(terrestrial digital video broadcasting, DVB-T)、無線區域網路(wireless local area network, WLAN)、WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)等規範。

多輸入多輸出技術(multiple input multiple output, MIMO)[4]-[7]也是近年來受到重視與使用，是利用多根收發天線與在空間通道差異性的一種技術[8]-[10]，此訊技術的優勢可提升傳輸速率與鏈路品質；MIMO 分為兩類技術架構，第一類為空間多樣(spatial diversity)技術架構，是透過在空間差異最大化時進而提升鏈路品質，一個典型的例子是空時區塊編碼(space-time block coding, STBC)[11]-[13]，第二類為空間多工(spatial multiplexing)技術架構[14]，為使用各獨立資訊來傳送並經由空間多路徑方式增加傳輸速率，一個典型的例子是 V-BLAST(vertical-Bell laboratories layered space-time) [15]。

在本論文中，吾人整合連結了自行研發 MIMO-OFDM 通訊系統平台與個人電腦(personal computer, PC)所發展的通訊系統應用平台之視窗軟體，並於通訊系統應用平台上發展了通訊系統參數設定功能來重新建構所需的收發機架構，並完成實現 MIMO-OFDM 無線通訊系統的目標。在本論文各章組織內容如下安排：第二章內容介紹多輸入多輸出正交分頻多工技術原理與自行研發基頻(baseband, BB)收發機(transceiver)架構功能，在多輸入多輸出技術上可分為空間多樣技術與空間多工技術兩類，並對於此兩類技術使

用數學式推導來說明。第三章內容介紹自行研發 FPGA(field programmable gate array)數位系統平台，在自行研發 FPGA 數位系統平台中整合了 ADC(analog to digital converter)、DAC(digital to analog converter)、RF(radio frequency)與 USB(universal serial bus)等模組，並於各小節內容描述之。第四章內容介紹在 PC 上發展的通訊系統應用平台之視窗軟體，說明 MIMO-OFDM 無線通訊系統的收發機架構設定方式與完成實現之過程，並對接收機所接收的向量訊號做各階段的分析與檢視功能說明，第五章為本論文總結。





## 第二章

### MIMO-OFDM 技術原理與基頻收發機架構

在本章內容中，首先介紹正交分頻多工技術的相關原理與優缺點，接著介紹多輸入多輸出技術，在多輸入多輸出技術上可分為兩種傳輸技術架構，分別為空間多樣技術與空間分工技術之兩架構，並針對此兩種技術架構原理之數學式做一推導與說明之，最後介紹自行研發 MIMO-OFDM 之基頻收發機架構與封包格式。

#### 2.1 正交分頻多工技術原理



在第一代無線通訊系統中，使用類比單載波調變技術方式來傳送訊息，而各通道載波之間都會預留保護頻帶(guard band)做為防止兩通道之間的干擾保護如圖 2-1 上所示，並使用多個載波做為傳送時，加以提升資料傳送量，此通訊技術稱為分頻多工(frequency division multiplexing, FDM)技術，到後來數位訊號處理器的技術成熟，當時的子載波(subcarrier)的生成由類比電路轉至數位訊號處理形式，在數位訊號處理中藉由反快速傅利葉轉換(inverse fast Fourier transform, IFFT)使各個子載波形成正交關係並使得頻寬重疊使用，使用頻寬如圖 2-1 下所示為大幅減少頻寬的使用量，此通訊技術稱為正交分頻多工技術。

在正交分頻多工技術中，因藉由IFFT運算產生頻域(frequency domain)對時域(time domain)的轉換，如圖 2-2 左所示在IFFT轉換時域中所產生的各載波訊號，如圖 2-2 右所示各載波的頻率響應(frequency response)；在正交分頻多工通訊系統中因為使用多載波做為傳送緣故，使得子載波有各個的傳輸路徑而產生多重路徑延遲效應(delay effect)，加上移動中形成的都普勒效應(Doppler effect)時，使得在接收端無法同一時框收完所有的子載波訊號，在各載波有時間上的不一致時，因而產生符際干擾現象，為了消除此干擾現象則在每一正交分頻多工的符元訊框中加上保護區間來解決，如圖 2-3 所示其保護區塊的訊號則由正交分頻多工區塊尾部資訊拷貝至前端形成一段連續循環訊號，又稱為循環前置區段(cyclic prefix, CP)，如圖 2-4 所示看出在保護區間的訊號經頻譜轉換的頻譜是相同的，因而可以解決符際干擾問題。

由於正交分頻多工是使用許多子載波做為傳輸，因此每個子載波被分配到的頻寬則變的很小，因此在一個慢速變化的整體通道上，每個子載波可視為平坦的通道響應，可以使用僅一個向量參數來代表此通道的通道響應，因此對於接收機的處理則變的更容易，如並行的收集各子載波在各平坦的通道響應上。在於一個選擇性頻帶衰減的頻率響應上，因僅對少數的子載波產生影響，這對於一個正交分頻多工系統上形成一種優勢，因此可以增加系統的傳送容量，並對正交分頻多工技術的優缺做一整理，如下所示：

### 優勢

- 高效率的頻寬使用
- 使用 FFT 與 IFFT 的轉換使其系統實現更為簡單
- 對於頻率選擇性衰弱(selective fading)與干擾有其穩定性
- 就連接適應而言多子載波提供更高的靈活性
- 在多路徑通道衰減上，仍保有高速率傳輸的適合性

## 缺點

- 有較高的峯值對平均功率比(peak to average power ratio, PAPR)，而須用較昂貴的線性放大器使其射頻訊號做正確的線性放大予以傳送。
- 內部頻率干擾(inter-carrier interference, ICI)或相鄰符際干擾產生時，對各子載波的訊號失去正交並形成相互干擾，導致資料位元錯誤率(bit error rate, BER)快速上升

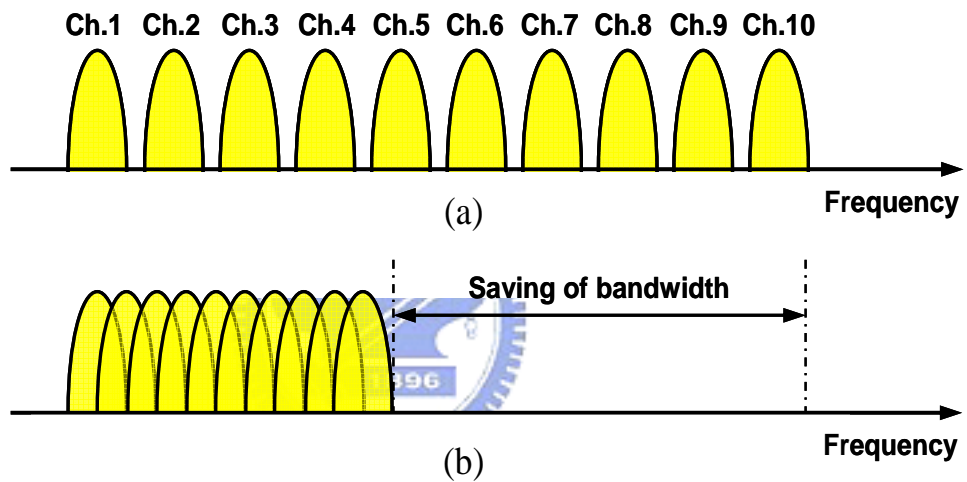


圖 2-1 FDM 與 OFDM 頻寬效益

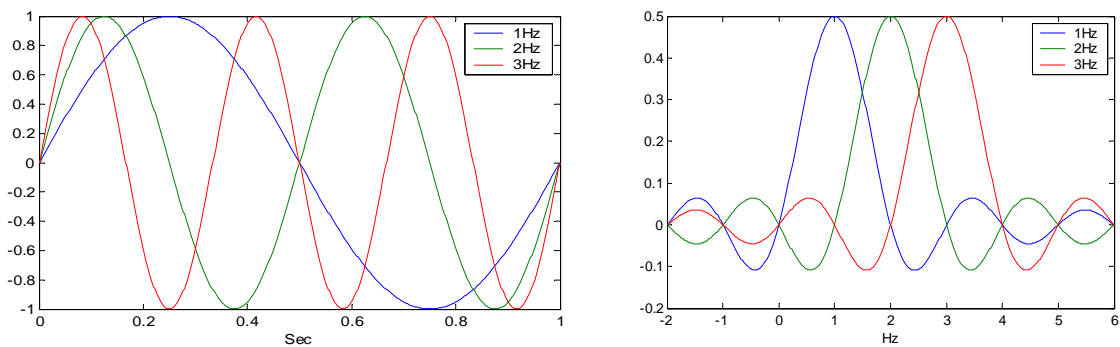


圖 2-2 OFDM 訊號之時域與頻域

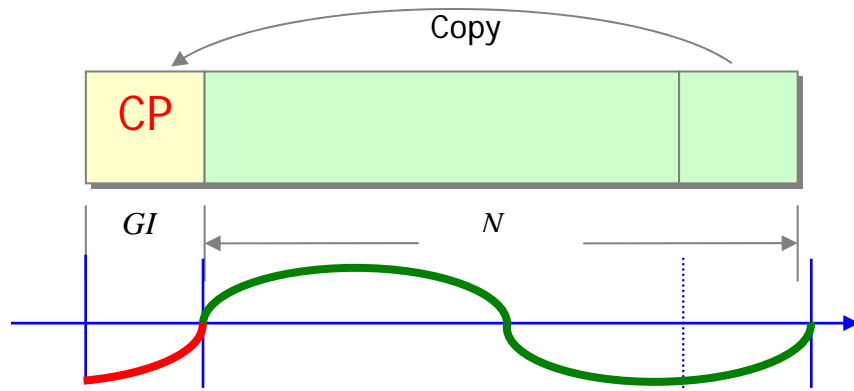


圖 2-3 OFDM 保護區間與循前置區段

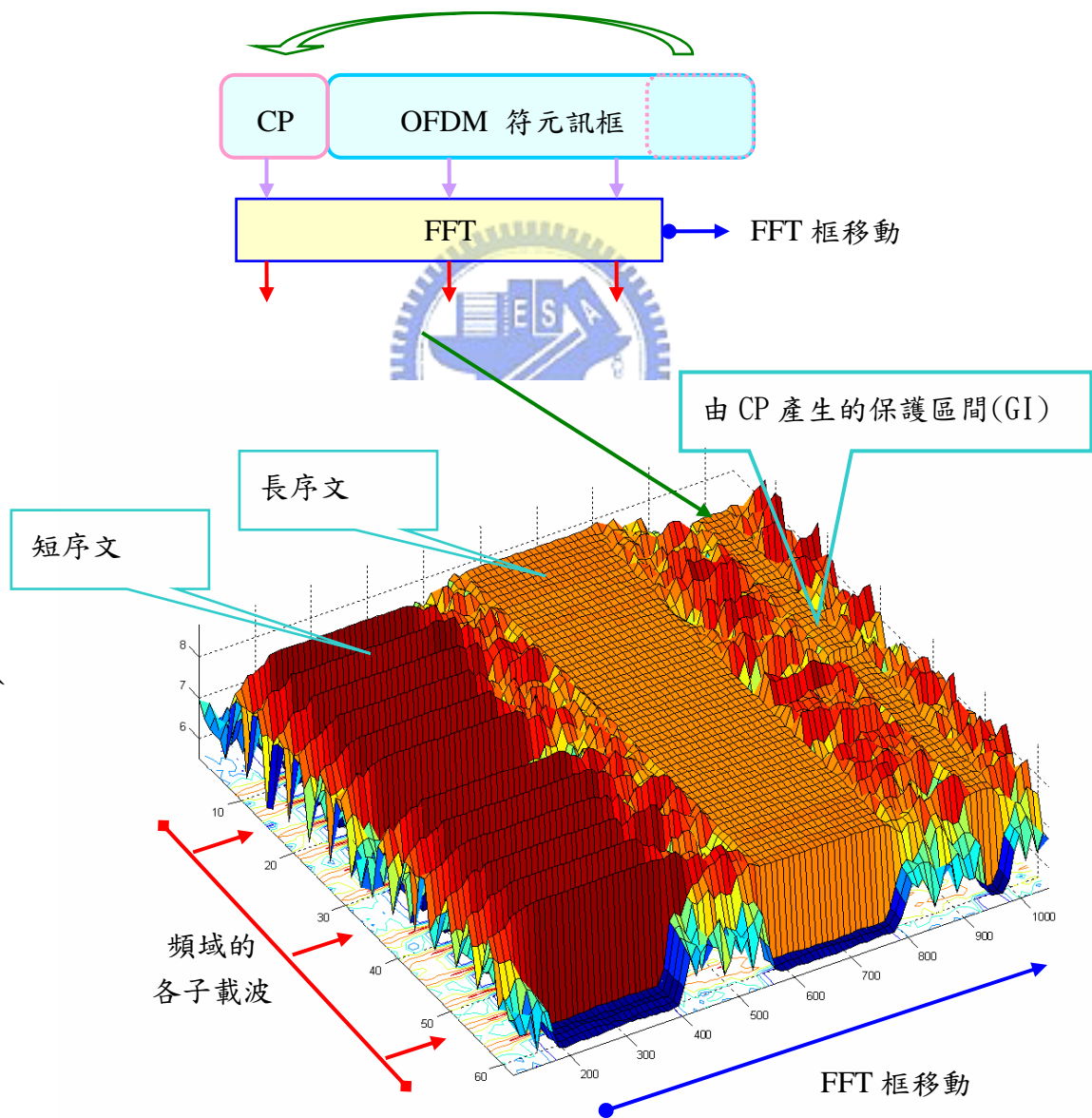


圖 2-4 OFDM 訊框與 CP 經 FFT 生成之頻譜

## 2.2 多輸入多輸出技術原理

MIMO技術是一種在原使用的頻寬條件下能對系統提升鏈路品質與傳輸率，所具有的優勢已成為下一代無線通訊系統所採用最具可能性的使用方案之一，主要架構是在無線通訊系統上利用多天線的傳送與多天線的接收，使在空間上產生多路徑訊號增益效果而減少訊號在空間傳送中的多路徑衰減，因此能對無線通訊系統之效能有所改善，因此，MIMO技術已成為在實體層(physical layer, PHY)上最具有效提昇效能的方法。MIMO技術是指在空間通道響應的多輸入多輸出，也就是使用多個傳送天線當作空間通道的輸入與並用多個接收天線當作空間通道的輸出，如圖 2-5 所示；MIMO技術在傳輸之運算處理分為兩類型架構，為空間多樣技術與空間分工技術架構，在空間多樣技術，首先在傳送端的資料會先經過STBC之編碼，然後由多接收天線的多樣與空時區塊解碼，經由解碼後可以達到干擾消除(interference cancellation)與訊號多樣式增益(diversity gain)，因而提升接收性能，但傳輸率則維持不變；空間分工技術則在各個傳送天線傳送不同的獨立資料，在接收端使用V-BLAST執行權值計算與干擾消除，在  $2 \times 2$  天線架構中，資料傳輸率將比空間多樣式系統多一倍，因此可以提高資料傳輸容量，但接收性能則比空間多樣式技術差，兩技術性能如圖 2-6 所示。

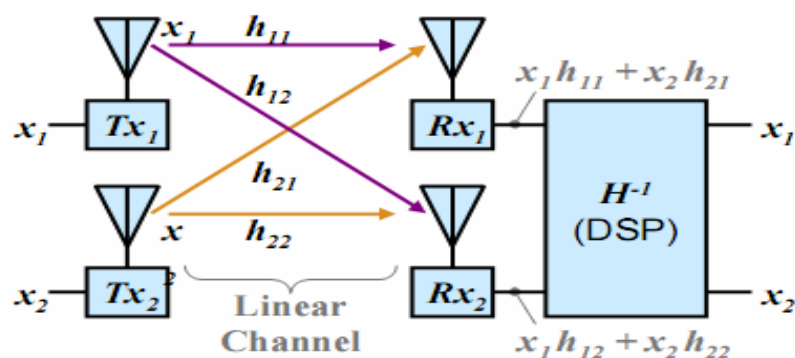


圖 2-5  $2 \times 2$  MIMO-OFDM 系統架構

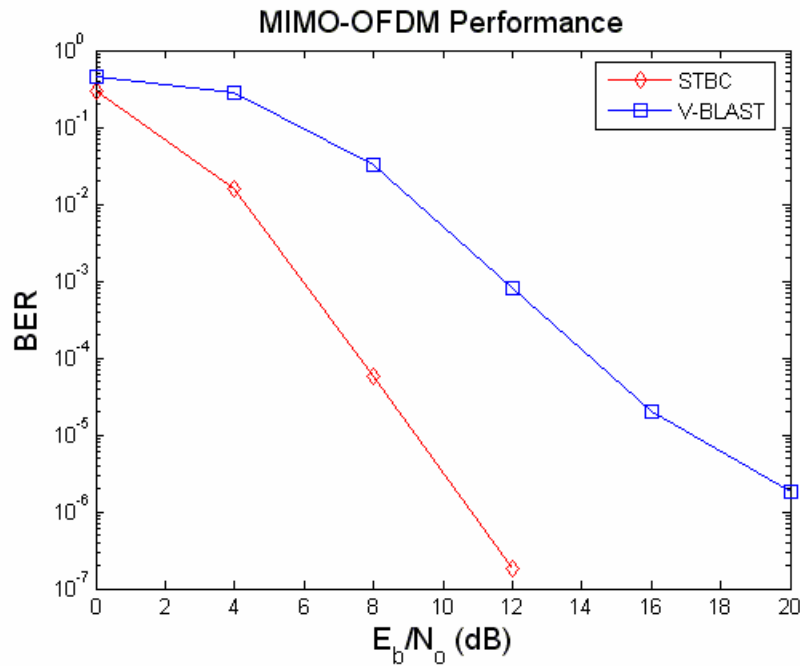


圖 2-6 MIMO-OFDM 系統效能

### 2.2.1 空間多樣技術



在無線通訊系統中，廣泛使用空間多樣技術來解決多路徑衰弱現象並與提升鏈路品質，在系統上不需要提高傳送功率與增加使用頻寬，只需在傳送端的資料先經過空時區塊編碼器之編碼，再將編碼資料經射頻調變傳送至通道中，接收端從空間通道接收射頻訊號並轉換為基頻資訊後，將資訊經過空時區塊解碼器後可達成消除干擾與訊號多樣式增益之效能，最後將資料正確解碼還原之。空時區塊編碼主要用在多根傳送天線的架構下，對於傳送端的一種編碼技術，主要藉由接收天線對於多根傳送天線產生多樣的增益，在此多路徑多樣增益下可有效地對抗通道雜訊與增加系統接收效能，並且在接收端不需回授任何訊息於傳送端，可以將低接收端的系統複雜度，因此多樣技術多採用空時區塊編碼為主。在空時區塊編碼的多樣增益上，是依據系統的傳送天線與接收天線為計算，當一系統傳送天線數為



Tn 根，接收天線數為 Rn 根，可於接收端收到 Tn 與 Rn 兩天線數相乘之多樣增益，例如在一個 2×2 天線架構中，可在接收端得到四倍之多樣增益。

在一個 2×2 MIMO 空間多樣的系統中，設有兩傳送資料在頻域子載波通道分別為  $X_1^k$  與  $X_2^k$ ，使用空時區塊編碼過程後其數學模型如(2.1)式所產生之矩陣。

$$\begin{bmatrix} X_1^k \\ X_2^k \end{bmatrix} \xrightarrow{STBC} \begin{bmatrix} X_1^k & -(X_2^k)^* \\ X_2^k & (X_1^k)^* \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

在接收端的兩接收天線接收經過MIMO空間通道的傳送訊號，分別收到兩個資料為  $Z_1^k$  與  $Z_2^k$ ，並定義  $H_{pq}^k$  變數為通道頻率響應，其中  $k$  為子載波索引值和  $p$  為所傳送之天線索引值與  $p$  為所接收天線索引值，如(2.2)式所示。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Z_1^k(n) & Z_1^k(n+1) \\ Z_2^k(n) & Z_2^k(n+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{11}^k & H_{21}^k \\ H_{12}^k & H_{22}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^k & -(X_2^k)^* \\ X_2^k & (X_1^k)^* \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} X_1^k \cdot H_{11}^k + X_2^k \cdot H_{21}^k & -(X_2^k)^* \cdot H_{11}^k + (X_1^k)^* \cdot H_{21}^k \\ X_1^k \cdot H_{12}^k + X_2^k \cdot H_{22}^k & -(X_2^k)^* \cdot H_{12}^k + (X_1^k)^* \cdot H_{22}^k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

在接收機所估測的MIMO空間通道響應定義為  $\hat{\mathbf{H}}^k$  時，所估測得到的  $\hat{D}_1^k$  與  $\hat{D}_2^k$  之值如(2.3)式所示。

$$\begin{aligned} \hat{D}_1^k &= (\hat{H}_{11}^k)^* \cdot Z_1^k(n) + \hat{H}_{21}^k \cdot (Z_1^k(n+1))^* + (\hat{H}_{12}^k)^* \cdot Z_2^k(n) + \hat{H}_{22}^k \cdot (Z_2^k(n+1))^* \\ \hat{D}_2^k &= (\hat{H}_{21}^k)^* \cdot Z_1^k(n) - \hat{H}_{11}^k \cdot (Z_1^k(n+1))^* + (\hat{H}_{22}^k)^* \cdot Z_2^k(n) - \hat{H}_{12}^k \cdot (Z_2^k(n+1))^* \end{aligned} \quad (2.3)$$

當估測  $\hat{\mathbf{H}}^k = \mathbf{H}^k$  時， $\hat{D}_1^k$  與  $\hat{D}_2^k$  所得估測之值可為(2.4)式所示，其中  $(|H_{11}^k|^2 + |H_{21}^k|^2 + |H_{12}^k|^2 + |H_{22}^k|^2)$  其為多樣增益，共可得四倍多樣增益。

$$\begin{aligned} \hat{D}_1^k &= (|H_{11}^k|^2 + |H_{21}^k|^2 + |H_{12}^k|^2 + |H_{22}^k|^2) \cdot X_1^k \\ \hat{D}_2^k &= (|H_{11}^k|^2 + |H_{21}^k|^2 + |H_{12}^k|^2 + |H_{22}^k|^2) \cdot X_2^k \end{aligned} \quad (2.4)$$

## 2.2.2 空間多工技術

空間多工與空間多樣都是建構在多輸入多輸出空間通道的技術架構，由上節內容知道空間多樣是針對訊號的多樣增益所提升的系統效能，但無法提昇系統傳輸速率，而空間多工則是一種提昇系統傳輸速率的演算技術；在一個空間多工技術的通訊系統中，傳送端的系統只需在不同的傳送天線上輸送各獨立的資料流(data stream)，但由於空間通道的波束會形成 (beamforming) 效應，會有過於一致性的傳送訊號在空間上形成能量相互抵銷，因此，在傳送端的系統上，只要在各傳送端上對資料流做不同的循環位移多樣處理(cyclic shift diversity, CSD)，就能消除該效應之發生，由此可知，在空間多工技術的傳送端系統不需要做複雜的編碼演算技術，只須在各傳送天線傳送獨立的資料流即可，因此，在傳送端的傳輸速率已經跟隨傳送天線數目的增加而提升。

在接收端的通訊系統，廣泛使用 V-BLAST 演算技術架構來解空間多工的接收訊號，其解碼演算原理主要利用空間通道的各差異性，利用此差異性，即可還原傳送之資料，在數學上類似解多重方程式的方法將資料解出來，因此在接收機端的天線數目，必須大於或等於傳送端的天線數目。在 V-BLAST 之演算程序中，共有分兩階段演算的偵測法，第一階段如上述的解多重線性方程式，即為計算線性組合權值(linear combinatorial weight)，其演算又可分為兩種方法，為零強制法(zero forcing, ZF)與最小平均平方錯誤法(minimization of mean square error, MMSE)等方法；在 V-BLAST 的第一階段偵測法中，主要演算為使用解線性方程使其各方程之間干擾消除，得到第一階段之偵測權值；當使用零強制法計算權值時，在演算中使用到反矩陣，同時會將雜訊做放大的可能；當使用小平均平方錯誤法計算權值時，必須先計算雜訊能量(noise power)，因此在權值計算時，不會有雜訊放大之



干擾，所以權值偵測效能會比零強制法好，但在演算之計算上較為複雜；在 V-BLAST 的第二階段偵測法中，採用決策回饋(decision feedback)的方式消除干擾，並同時藉由最大組合率(maximum ratio combining, MRC)得到多樣式增益，增加資料偵測的準確性。

在一個  $2 \times 2$  MIMO 空間多工的系統中，兩根傳送天線 TX1 與 TX2 的資料是獨立的，並在傳送資料分別為  $X_1^k$  與  $X_2^k$ ，如(2.5)式所示。

$$\begin{bmatrix} X_1^k \\ X_2^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TX1^k \\ TX2^k \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

傳送訊號經由 MIMO 空間的  $\mathbf{H}^k$  通道響應後，由接收端的兩接收天線  $Z_1^k$  與  $Z_2^k$  接收由，分別收到資料如(2.6)式所示。

$$\begin{bmatrix} Z_1^k \\ Z_2^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^k & H_{21}^k \\ H_{12}^k & H_{22}^k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1^k \\ X_2^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^k \cdot X_1^k + H_{21}^k \cdot X_2^k \\ H_{12}^k \cdot X_1^k + H_{22}^k \cdot X_2^k \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

在接收機所估測的 MIMO 空間通道響應定義為  $\hat{\mathbf{H}}^k$  時，如(2.7)式所示。

$$\hat{\mathbf{H}}^k = \begin{bmatrix} \hat{H}_{11}^k & \hat{H}_{21}^k \\ \hat{H}_{12}^k & \hat{H}_{22}^k \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

接著進行 V-BLAST 演算解碼程序，共分為兩階段程序處理，在第一階段使用線性組合權值演算來做干擾之消除計算，並偵測第一階段資料，偵測資料如(2.8)式所示。

$$\begin{bmatrix} \hat{D}_1^k \\ \hat{D}_2^k \end{bmatrix} = \mathbf{W}^k \cdot \begin{bmatrix} Z_1^k \\ Z_2^k \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

其中  $\mathbf{W}^k$  為線性組合權值的矩陣，依照ZF與MMSE兩演算架構給於不同定義，如ZF於(2.9)式與MMSE於(2.10)式所示。

(1)ZF :

$$\mathbf{W}^k = \left(\widehat{\mathbf{H}}^k\right)^+ = \widehat{\mathbf{H}}^k \cdot \left(\left(\widehat{\mathbf{H}}^k\right)^H \cdot \widehat{\mathbf{H}}^k\right)^{-1} \quad (2.9)$$

(2)MMSE :

$$\mathbf{W}^k = \left\{ \widehat{\mathbf{H}}^k \cdot \left(\widehat{\mathbf{H}}^k\right)^H + \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \cdot \widehat{\mathbf{H}}^k \quad (2.10)$$

其中  $\left(\widehat{\mathbf{H}}^k\right)^+$  為通道估計矩陣之擬反矩陣(pseudo-inverse)， $\sigma_1^2$ 、 $\sigma_2^2$ 代表第一接收天線與第二接收天線估計得到之雜訊能量，計算方式如下：

$$\sigma^2 = \mathbf{E} \left\{ (\widehat{n} - \mathbf{E}\{\widehat{n}\})^2 \right\} = \mathbf{E} \left\{ n^2 \right\} - \mathbf{E}^2 \{n\} \quad (2.11)$$

當第一階段資料偵測結束，第二階段資料偵測使用決策回饋的方式進行干擾消除，並得到最大組合率，當  $\widehat{\mathbf{H}}^k = \mathbf{H}^k$  時，第二階段偵測資料如(2.12)式所示，其中  $\left(|H_{11}^k|^2 + |H_{12}^k|^2\right)$  與  $\left(|H_{21}^k|^2 + |H_{22}^k|^2\right)$  為最大組合率。

$$\begin{aligned} \widehat{D}_1^k &= \begin{bmatrix} \left(\widehat{H}_{11}^k\right)^* & \left(\widehat{H}_{12}^k\right)^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1^k - \widehat{H}_{21}^k \cdot \widehat{D}_2^k \\ Z_2^k - \widehat{H}_{22}^k \cdot \widehat{D}_2^k \end{bmatrix} = \left(|\widehat{H}_{11}^k|^2 + |\widehat{H}_{12}^k|^2\right) \cdot X_1^k \\ \widehat{D}_2^k &= \begin{bmatrix} \left(\widehat{H}_{21}^k\right)^* & \left(\widehat{H}_{22}^k\right)^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1^k - \widehat{H}_{11}^k \cdot \widehat{D}_1^k \\ Z_2^k - \widehat{H}_{12}^k \cdot \widehat{D}_1^k \end{bmatrix} = \left(|\widehat{H}_{21}^k|^2 + |\widehat{H}_{22}^k|^2\right) \cdot X_2^k \end{aligned} \quad (2.12)$$

第二階段資料偵測模擬圖如圖 2-7 所示，因為第二階段之資料偵測增加了干擾消除與MRC，因此其效能比第一階段之資料偵測還好；第一階段資料偵測使用ZF與MMSE計算權值，其中ZF的方法會由於反矩陣的運算，而使雜訊有放大的可能；MMSE的方法有考量雜訊因子，因此效能比較好，不過需要較大的運算量。

## V-BLAST

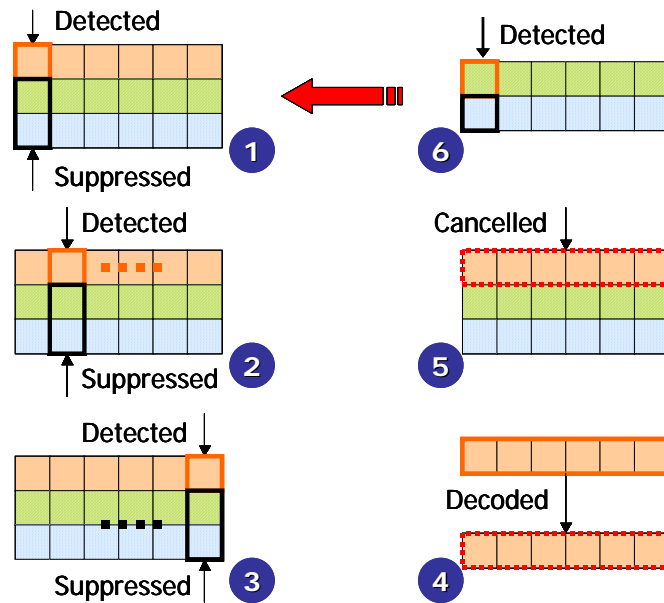


圖 2-7 V-BLAST 資料偵測模擬

### 2.3 自行研發基頻收發機架構

為了能完成MIMO-OFDM無線通訊系統之實現技術[16]，吾人在自行研發基頻收發機上，依據實驗室在關於MIMO-OFDM系統實現中所規劃的架構[17]-[19]做為一開始自行研發基頻收發機的基本架構，而為了能加快基頻收發機的實現完成，吾人將原本在對於資料流上有做訊源編碼的功能方塊予以省略，直接使用原資料流的資訊做為調制，形成一自行研發MIMO-OFDM無線通訊系統功能架構如圖 2-8 所示，於該通訊系統架構中，有OFDM所需要的FFT與IFFT轉換方塊，其IFFT使用架構與子載波對應如圖 2-11 所示，在MIMO實現上系統部分採用 2×2 天線收發機系統與空間分工技術，在空間分工演算法上使用零強制法來完成；在完成自行研發基頻收發機架構後，接著規劃基頻訊號的傳輸封包格式，此部分參考了無線

區域網路所使用的IEEE802.11a規範[20]，在該規範中於實體層章節內容中有對封包生成流程與時序結構做一詳細說明，經過整理後其IEEE802.11a的封包生成流程如圖 2-9 所示，封包結構如圖 2-10 所示。

經過自行研發MIMO-OFDM無線通訊系統功能架構與參考IEEE802.11a規範的封包生成和結構定義後，加以完成整合後，自行研發MIMO-OFDM封包生成流程如圖 2-12 所示，在此封包生成流程圖中將原本IEEE802.11a封包結構中的信號(signal)部份置換為CH2 端所使用的長序文(long preamble)；首先接收機使用短序文資訊來估測接收封包、框碼位置、頻率偏移等之同步處理技術[21]，接著使用CH1 的長序文來估測H11 與H12 通道響應值及頻率偏移，與使用CH2 長序文來估測H21 與H22 通道響應值，在藉由所規劃的兩組長序文之結構下來估測MIMO空間通道的通道響應估測後，並與使用零強制法之演算法計算後，就可以解出發射端所傳送的訊息，因此完成MIMO-OFDM無線通訊系統的運作與實現；在經由收發機系統處理後所產生的自行研發MIMO-OFDM封包波型如圖 2-13 所示，而自行研發封包的相關參數如表格 2-1 所列。

表格 2-1 MIMO-OFDM 封包參數

Number of Transmit Antennas	2
Number of Receive Antennas	2
Number of Long Preambles / Packet	2
Number of Short Preambles / Packet	10
Number of OFDM Symbols / Packet	6 (min.)
Number of Data Tones / Symbol	48
Number of Zero Tones / Symbol	12
Number of Pilot Tones / Symbol	4
FFT Size	128
Long Preamble Size	64+16 (CP)
Short Preamble Size	16
Locations of Data Tones	{-26:-22, -20:-8, -6:-1, 1:6, 8:20, 22:26}
Locations of Zero Tones	{-32:-27, 0, 27:31}
Locations of Pilot Tones	{-21, -7, 7, 21}

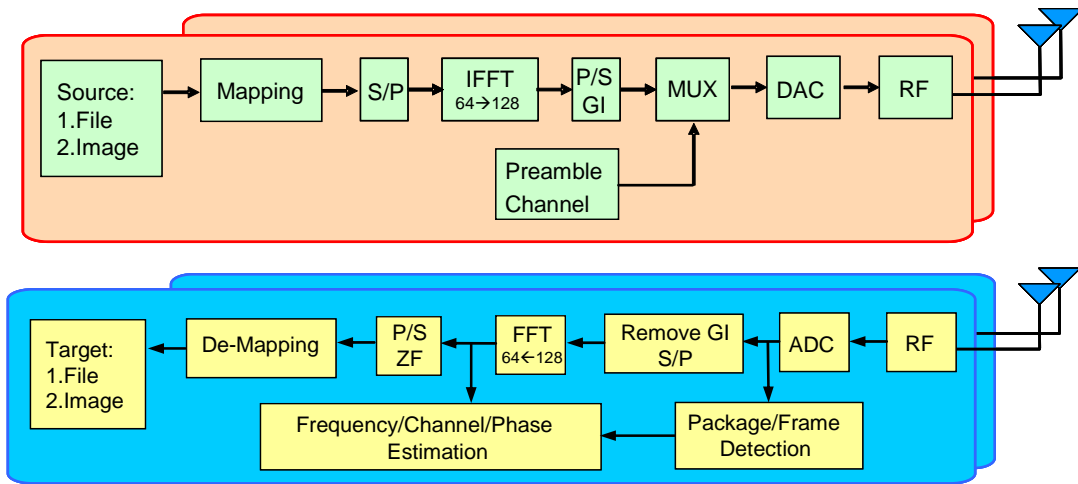


圖 2-8 自行研發 MIMO-OFDM 系統之功能架構

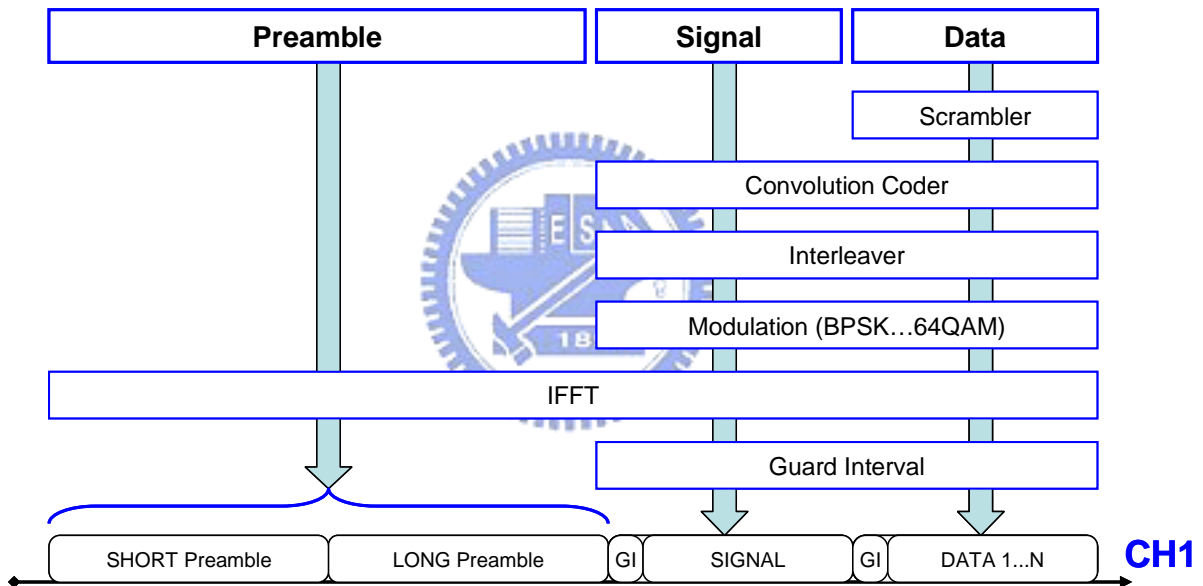


圖 2-9 IEEE802.11a 封包之生成流程

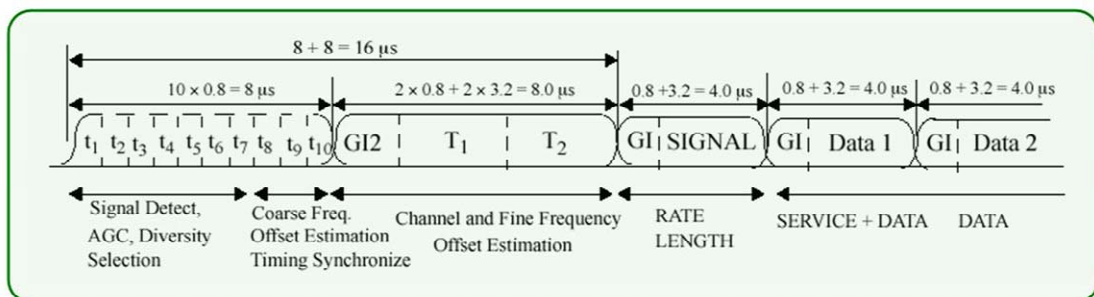


圖 2-10 IEEE802.11a 封包結構

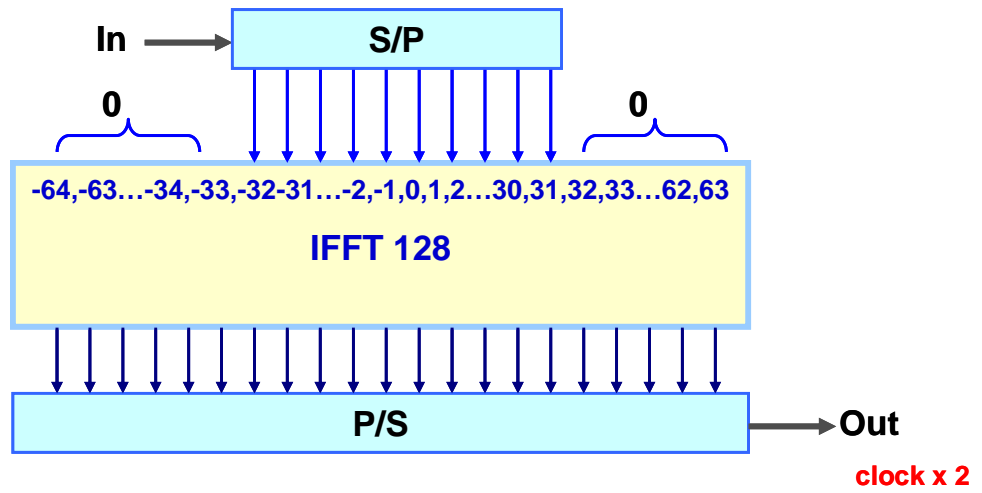


圖 2-11 IFFT 之子載波對應圖

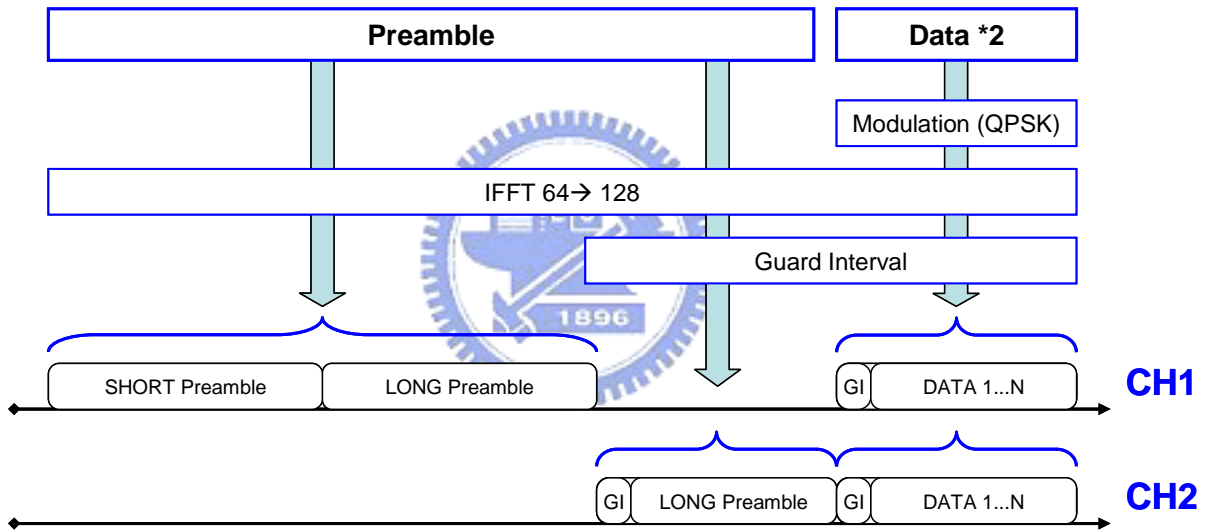


圖 2-12 自行研發 MIMO-OFDM 封包之生成流程

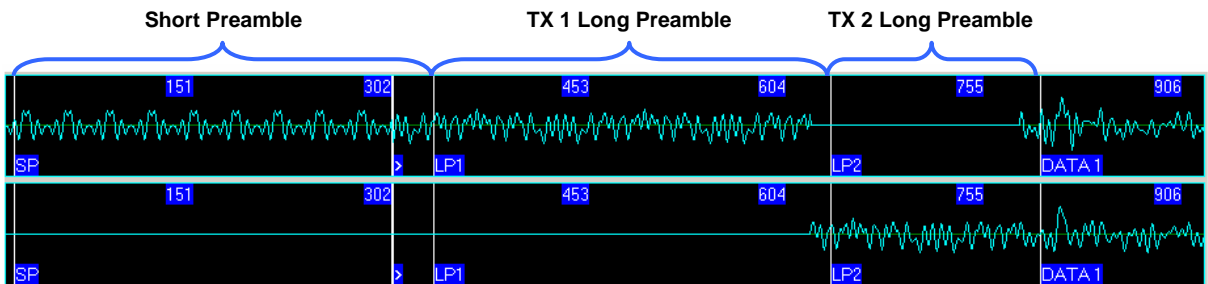


圖 2-13 自行研發 MIMO-OFDM 封包波形

## 第三章

### MIMO-OFDM 無線通訊系統平台介紹

在本章內容將介紹一自行研發FPGA數位系統平台與整合所需相關模組所架構成的通訊系統平台，達成MIMO-OFDM無線通訊系統之基頻收發機所需要的硬體架構功能需求，於各小節內容說明自行研發FPGA數位系統平台與各模組的功能與使用方式，最後做一心得總結。在自行研發FPGA數位系統平台於發展過程中，先要驗證FPGA數位系統本體功能的正常運作後，接著整合了DAC模組之驗證，再接著整合RF模組之驗證，到此一驗證階段時，射頻訊號的驗證就必須使用通訊量測儀器來量測，如圖 3-1 左所示為自行研發FPGA數位系統平台結合DAC模組與RF模組，而圖右側為使用通訊量測儀器量測之畫面。

如圖 3-2 所示為通訊系統平台整合了DAC模組、ADC模組與RF模組，並完成兩路射頻訊號的收送，如圖 3-3 所示為MIMO-OFDM通訊系統應用平台的量測與實現，其中一組平台為傳送二路射頻訊號至天線與另一組平台由天線接收二路射頻訊號；並且可以在頻譜儀器中看出兩傳送天線的射頻功率，藉由頻譜儀器的檢視，並在由PC之通訊系統應用軟體修正後，使其射頻功率為之均勻，最後在設定為相同射頻頻率，就可以來完成MIMO-OFDM無線通訊系統之實現，並且使用向量分析軟體對整個傳送與接收過程的向量訊號做一性能分析與檢視。



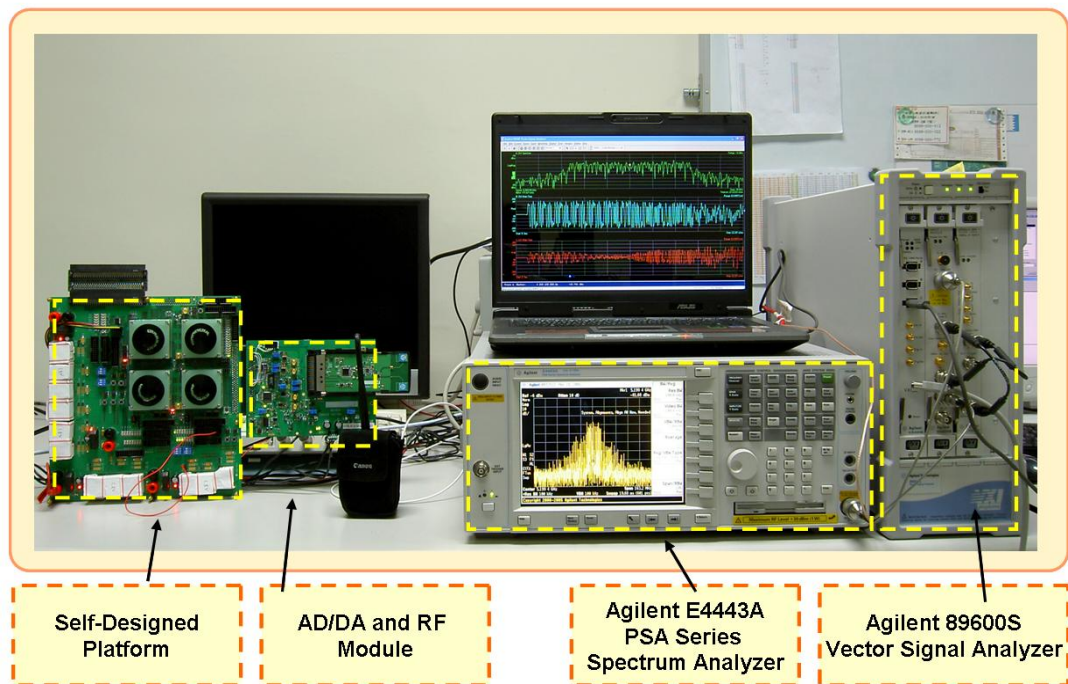


圖 3-1 通訊系統平台與通訊量測儀器

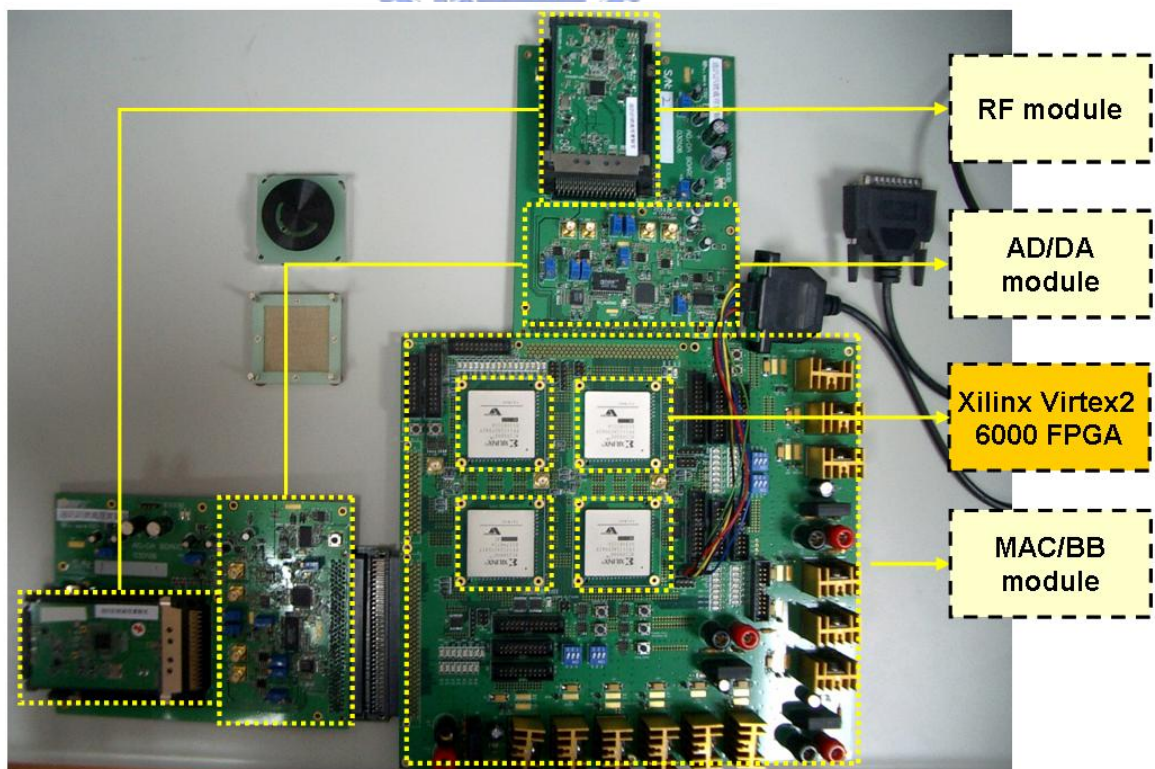


圖 3-2 通訊系統平台的各模組功能說明



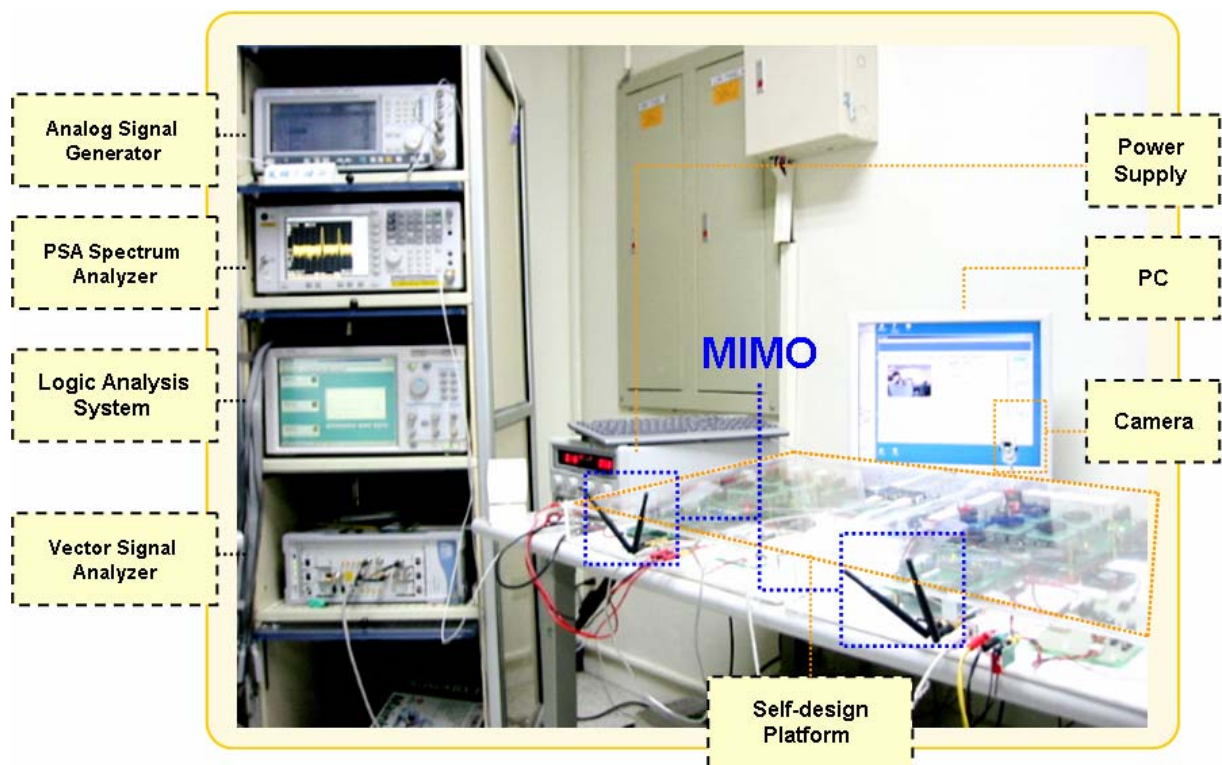


圖 3-3 MIMO-OFDM 通訊系統應用平台之量測環境

### 3.1 自行研發 FPGA 數位系統平台

為了接近一個真實的無線通信系統之實現理念下，由實驗室所自行研發 FPGA 數位系統平台，提供了由四個 FPGA 晶片所組合而成的通訊系統演算核心處理單元，並使用 FPGA 所提供數位訊號輸出接口作為與周邊數位訊號之連結介面的功能資源，在連接介面上的規劃整合了有 DAC 模組、ADC 模組、RF 模組與 USB 模組，經與各模組整合後的系統架構可做為通訊系統之應用發展，如在通訊系統的基頻訊號轉換與射頻收發的功能處理，進而可做為通訊系統的發展平台，如圖 3-2 所示；在自行研發 FPGA 數位系統平台中，共使用了 4 個 Xilinx 公司之 FPGA 產品系列，FPGA 晶片型號為 XC2-V6000，在開發時規劃使用 Verilog/VHDL 硬體語言 [22]-[24] 與 Xilinx ISE 發展系統 [25]-[27] 來完成其 FPGA 設計。

在自行研發FPGA數位系統平台上，在每個FPGA相互之間均有上百個數位訊號線相互連接，做為FPGA之間的訊號資料傳輸與系統命令控制用，FPGA在此除了做數位邏輯系統之運算處理的主要功能外，其次為介面控制功能，在介面的規劃部分，包含共兩路無線通訊通道路徑，可連接ADC模組、DAC模組、RF模組、USB模組與輸出入口(input/output, I/O)等，使其能完成MIMO-OFDM通訊系統平台功能架構，如圖 3-4 所示；最後與所需電源系統與和壓克力外殼整合組裝後如圖 3-5 所示，並在前端面板用接出所需使用的介面接口以便於連接使用，介面接口說明如下：

- (1) **雙電源輸入介面**：使用+8V/3A 與-5V/1A 之電源的規格
- (2) **USB 介面**：與 PC 系統平台的相互連結的 USB 介面
- (3) **外接天線介面**：射頻頻率為 2.4GHz 與 5.2GHz 天線頻帶
- (4) **FPGA 程式更新介面**：由 PC 的並列埠連接做 FPGA 程式更新

FPGA程式發展流程如圖 3-6 所示，先經由矩陣數值應用軟體 (matrix laboratory, MATLAB)來完成通訊演算法之浮點運算模式(floating point)，當驗證演算法功能正確後，將資源儲存型態改為定點數值模式(fixed point)，可以加快數值處理時間與減少硬體合成時之所需資源，接著與在Xilinx-ISE發展系統的發展下，如圖 3-7 所示，轉為由FPGA硬體語言Verilog/VHDL的撰寫，來實現所設計的通訊演算法之數位電路功能，並使用數位時序的模擬軟體(ModelSim SE)做為功能驗證，最後經由系統自動排列與繞線功能，產生一個可以燒錄的資料檔案，因此完成了FPGA的開發發展。在自行研發FPGA數位系統平台上，每一個FPGA都保留了兩個測試接口，用來與測試儀器的連結，例如邏輯分析儀(logic analyzer, LA)，當FPGA系統在執行或除錯時，可以藉由LA了解系統的運作狀態，並且可以儲存資訊做問題分析用；另外電路也規劃了使用發光二極體(light emitting diode, LED)來做為系統運作屬性的顯示用。

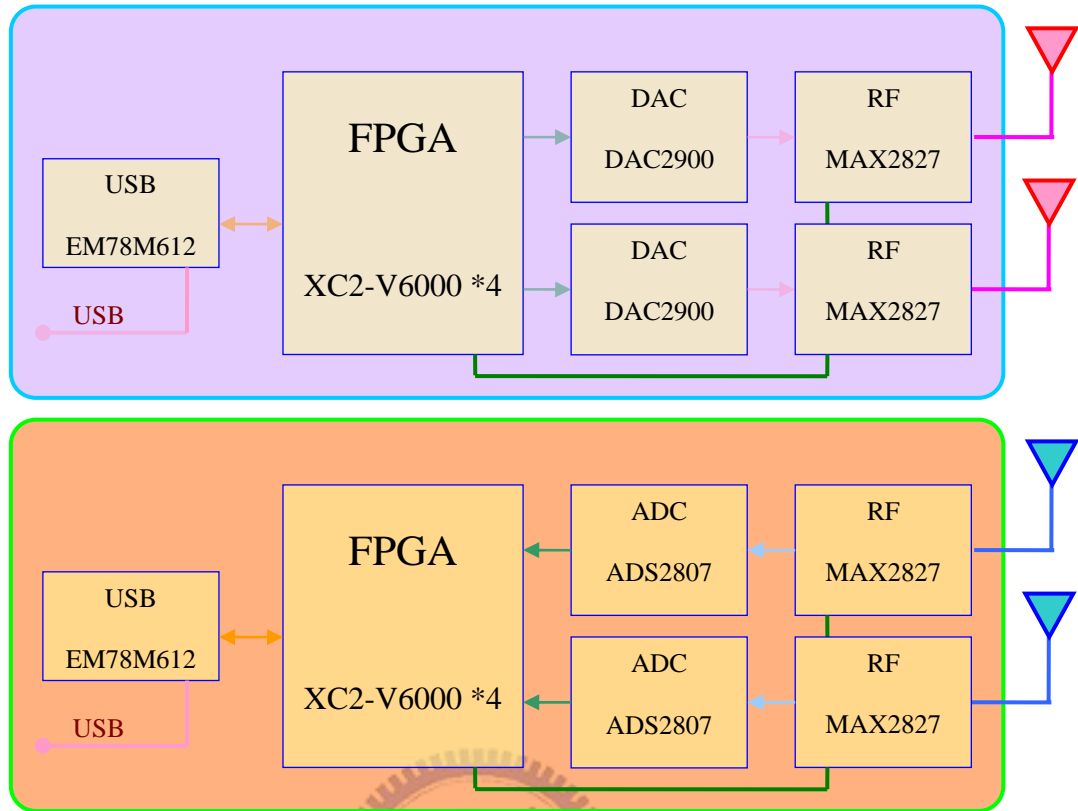


圖 3-4 MIMO-OFDM 通訊系統平台功能架構

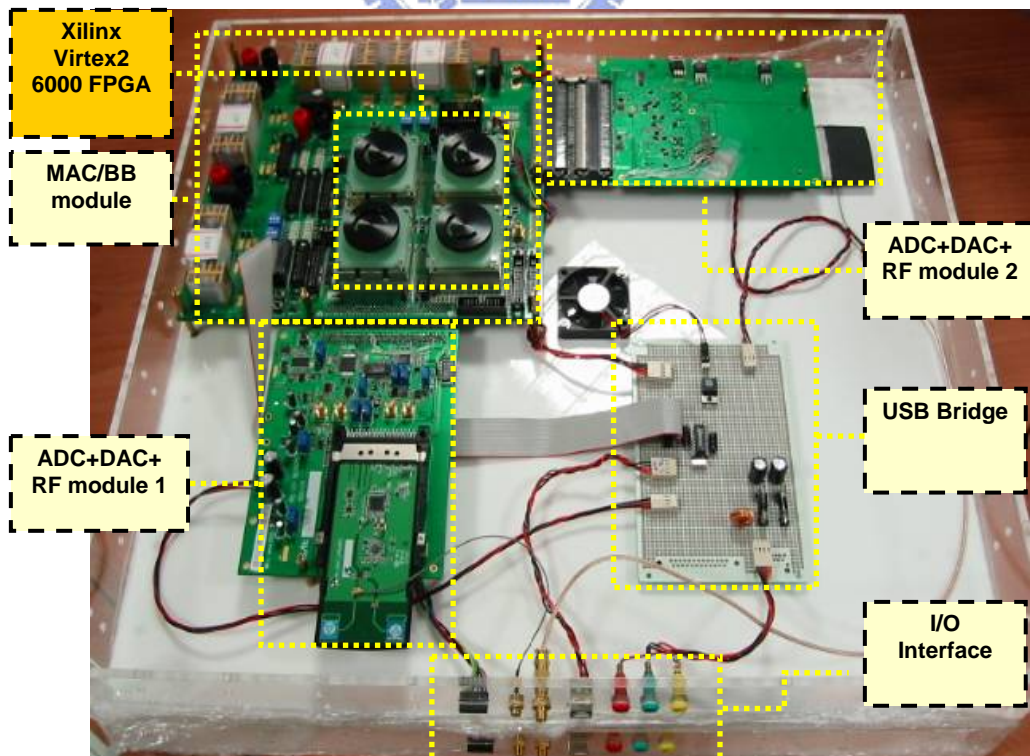


圖 3-5 MIMO-OFDM 通訊系統平台

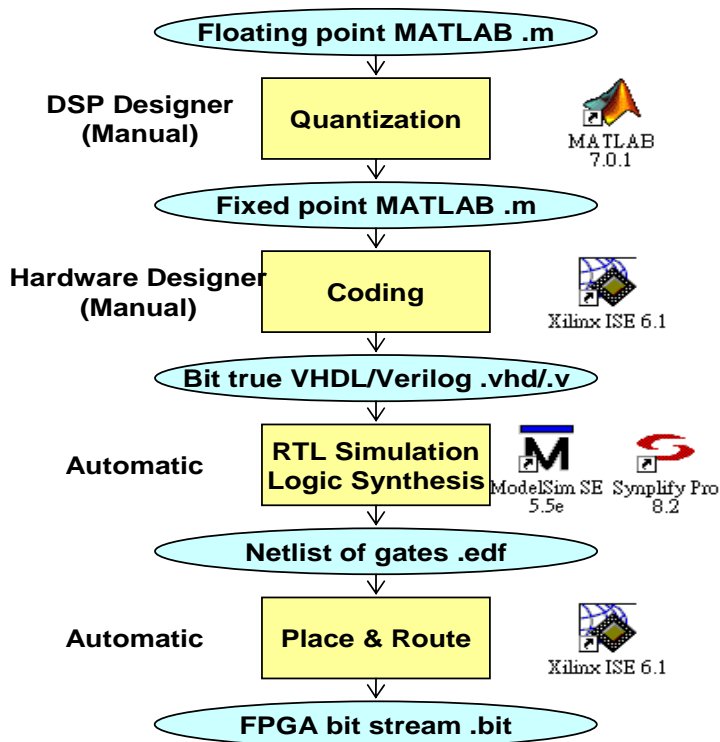


圖 3-6 FPGA 程式語言發展流程

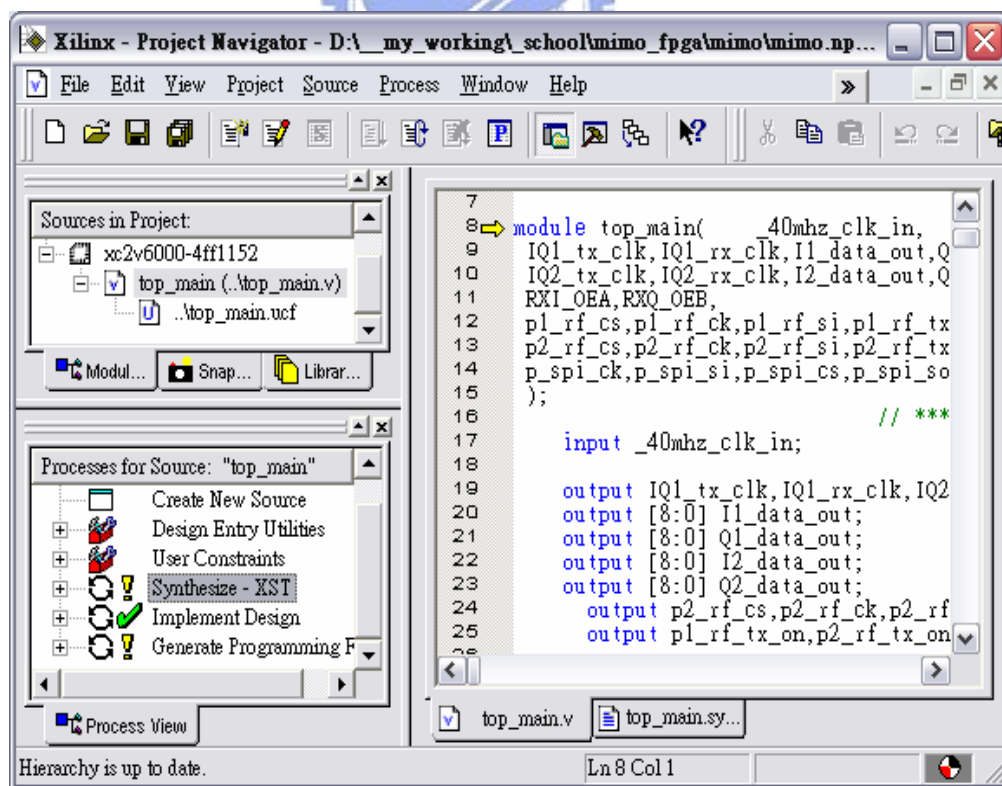


圖 3-7 Xilinx-ISE 發展系統之工作畫面



## 3.2 DAC 模組與 ADC 模組

如圖 3-8 中所示為本自行研發FPGA數位系統平台所連接使用的DAC模組與ADC模組，DAC模組與ADC模組的晶片均採用德州儀器公司(Texas instruments, TI)的訊號轉換產品系列，其DAC晶片型號為DAC2900 與ADC晶片型號為ADS2807，兩晶片相關內部方塊與時序控制等如圖 3-10 至圖 3-13 所示；在IEEE802.11a規範中定義每個射頻通道為 20MHz頻寬，所使用DAC模組規範達到 125MHz時脈傳送效能，另所使用的ADC模組規範可達到 50MHz時脈輸入效能，因此在DAC模組與ADC模組的轉換中提供高頻寬帶使用效能與符合所需的奈奎斯特取樣率(Nyquist-rate)。

如圖 3-11 所示為DAC模組的時序控制規範，藉由控制時脈腳位來輸入或讀取其資料，在由FPGA之輸出入數位訊號匯流排至ADC、DAC晶片時，規範建議將資料與時脈兩同時保持 3.5 奈秒以上，這樣可以使傳輸資料使其正確性與穩定性提高，完成資料的傳輸行程任務。在ADC與DAC兩模組上，都提供兩通道的並行轉換，因此適合用於通訊的基頻之 I/Q (inphase/quadrature)訊號生成或轉換，並且在模組上都具有很好的I/Q訊號平衡補償設計，因此可以提供極佳性能的訊號之轉換，在ADC與DAC的輸出入均使用差動訊號來處理，因為差動訊號的特質是可以有效地避免外在雜訊的干擾；並且在晶片電路中具有約 1 伏的直流電位，與可以允許在單一電源工作下使用，使工作性能落在最佳線性工作區域的優勢與特色。

如圖 3-9 所示為一DAC模組所輸出的訊號波形，圖中的示波器之波形 1 為時脈的輸入，與波形 2 為產生基頻訊號輸出，其波型為短訓練序列符元的時域波型訊號；在I/Q訊號進入RF晶片調變之前，在本模組電路中，DAC模組與ADC模組均在RF模組之間電路加入一級訊號放大器，這樣可以依照不同RF模組的規範加以調整符合其使用。

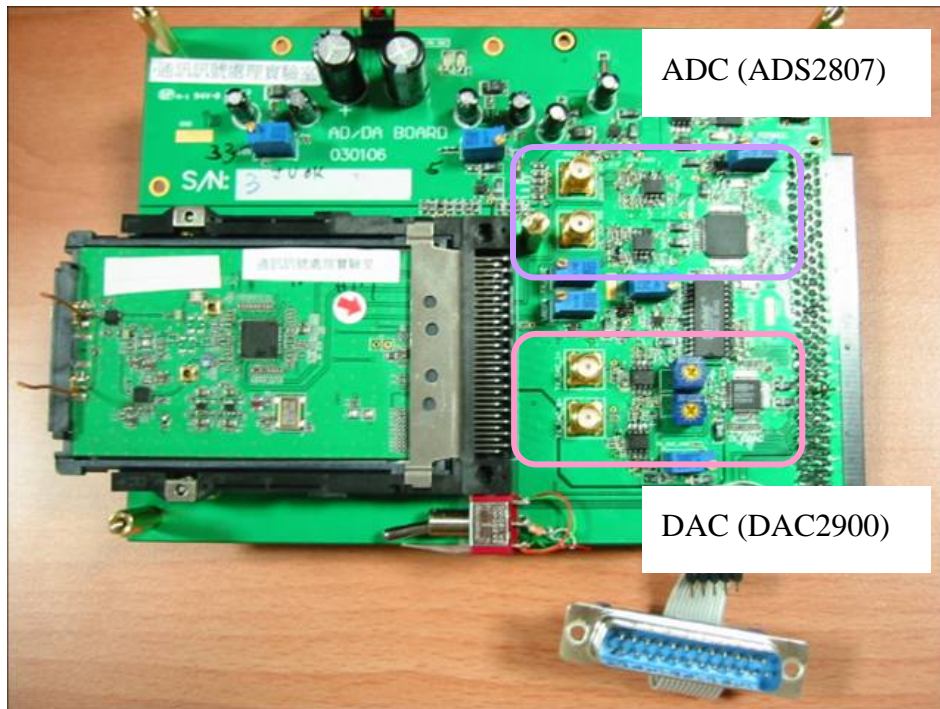


圖 3-8 ADC 與 DAC 整合模組

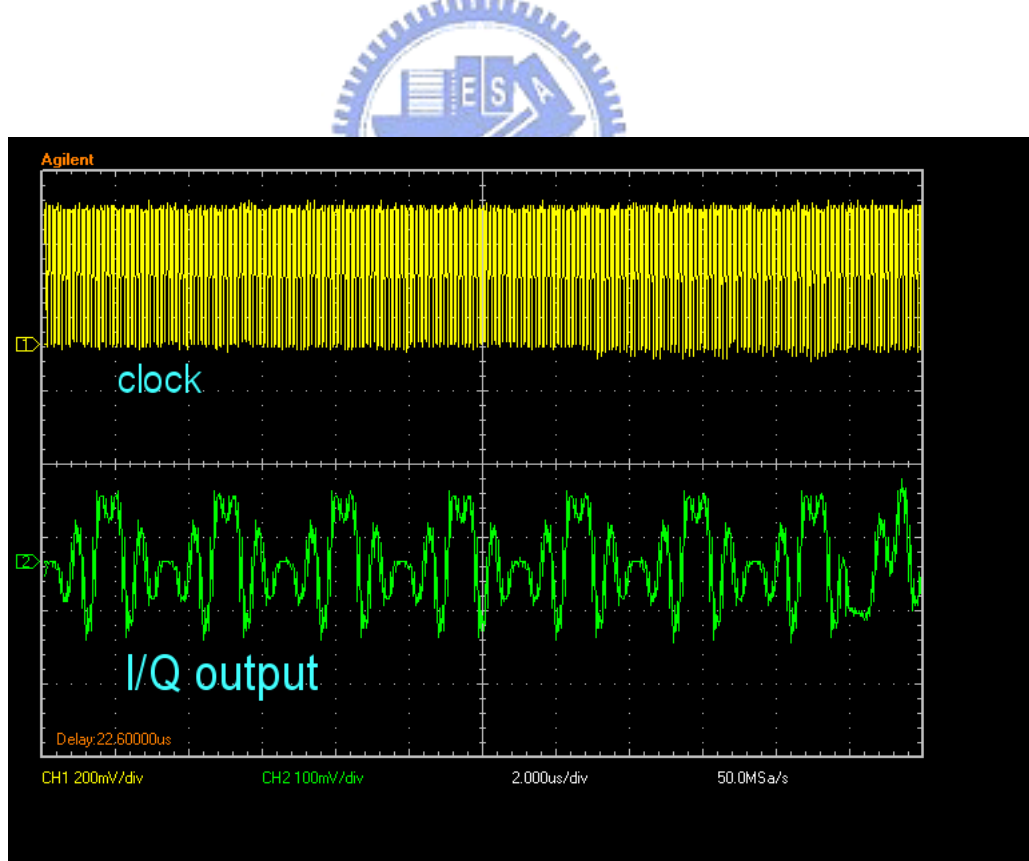


圖 3-9 DAC 生成短序文之波形

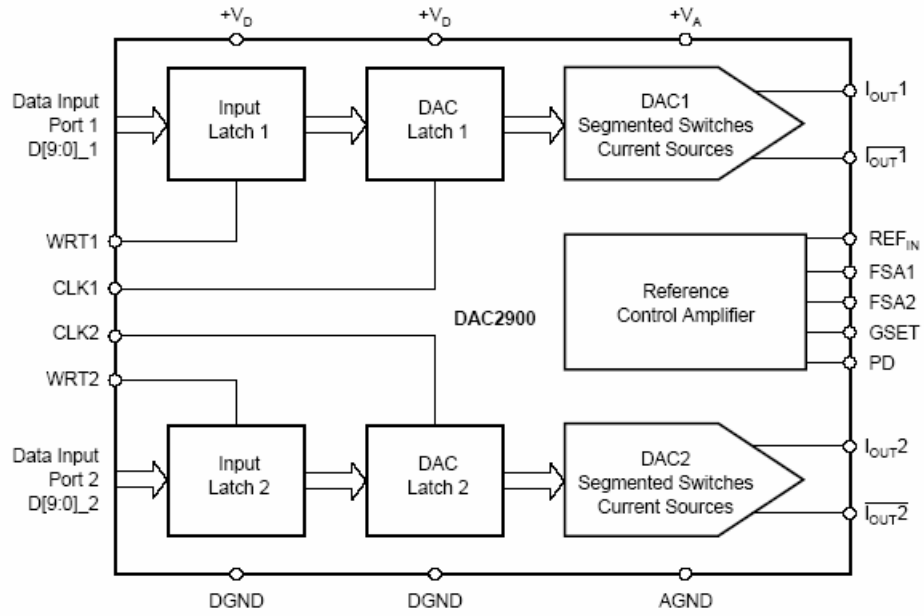
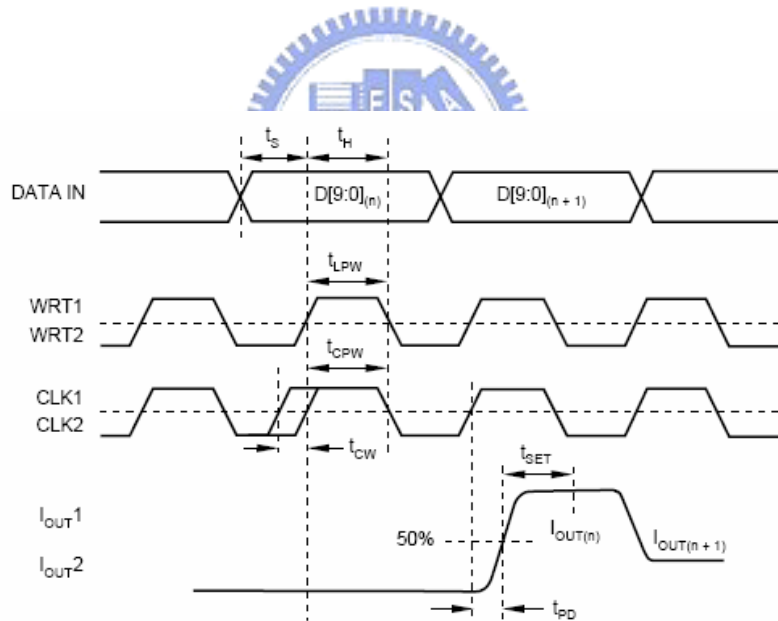


圖 3-10 DAC 晶片功能架構



SYMBOL	DESCRIPTION	MIN	TYP	MAX	UNITS
t <sub>s</sub>	Input Setup Time	2			ns
t <sub>h</sub>	Input Hold Time	1.5			ns
t <sub>LPW</sub> , t <sub>CPW</sub>	Latch/Clock Pulsewidth	3.5	4		ns
t <sub>CW</sub>	Delay Rising CLK Edge to Rising WRT Edge	0		t <sub>LPW</sub> - 2	ns
t <sub>PD</sub>	Propagation Delay		1		ns
t <sub>SET</sub>	Settling Time (0.1%)		30		ns

圖 3-11 DAC 晶片控制時序規範

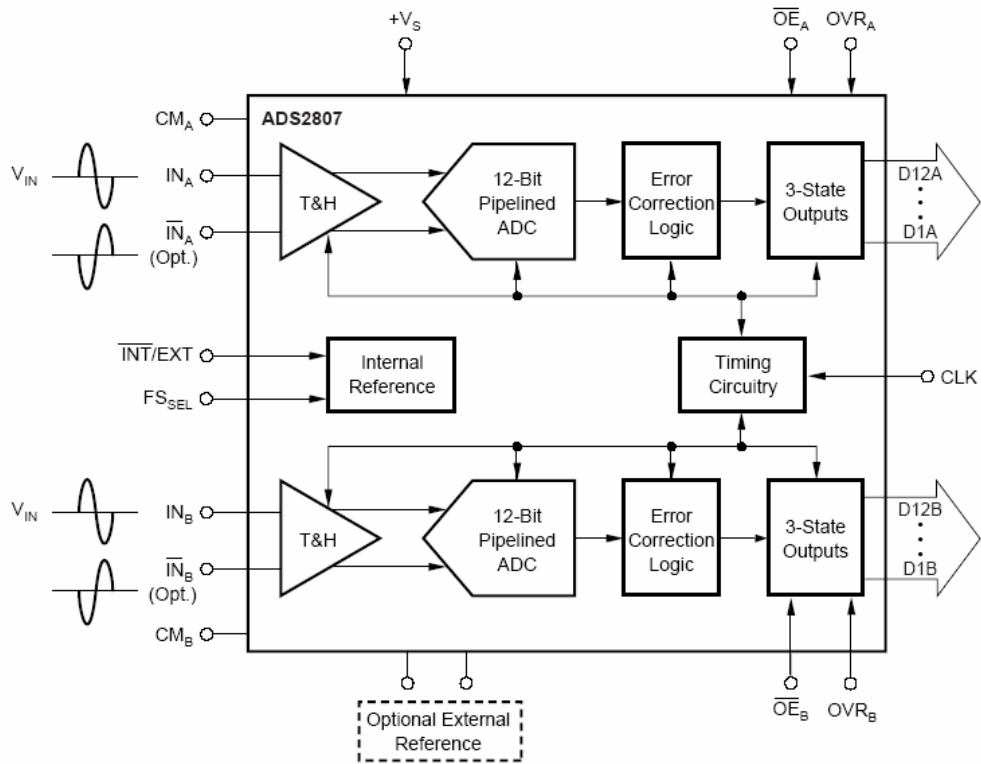
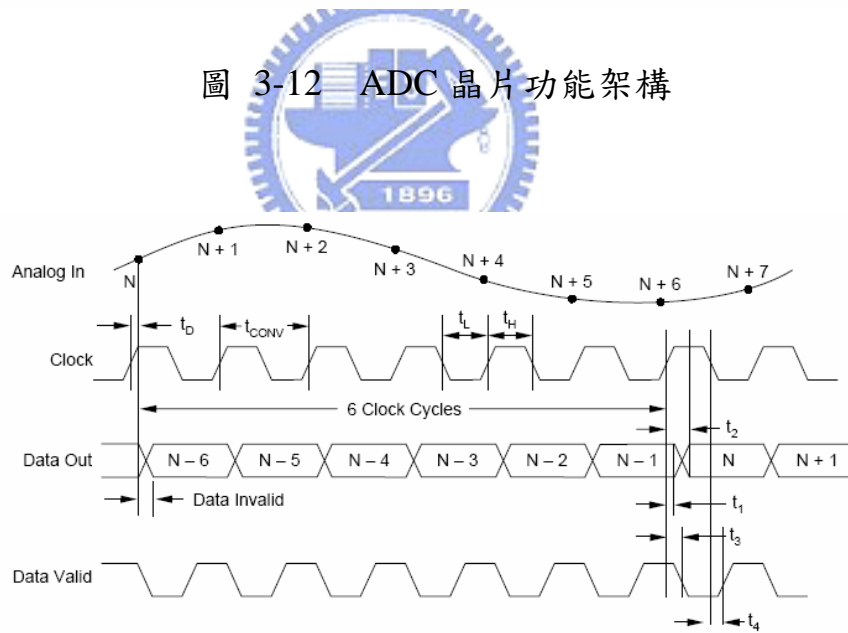


圖 3-12 ADC 晶片功能架構



SYMBOL	DESCRIPTION	MIN	TYP	MAX	UNITS
$t_{CONV}$	Convert Clock Period	20		100 $\mu$ s	ns
$t_L$	Clock Pulse LOW	9.0	$t_{CONV}/2$		ns
$t_H$	Clock Pulse HIGH	9.0	$t_{CONV}/2$		ns
$t_D$	Aperture Delay		2		ns
$t_1^{(1)}$	Data Hold Time, $C_L = 0pF$	2.7			ns
$t_2^{(1)}$	New Data Delay Time, $C_L = 15pF$ max		8.2	12	ns
$t_3$	Data Valid Falling Edge Delay, $C_L = 15pF$ max		7.5		ns
$t_4$	Data Valid Rising Edge Delay, $C_L = 15pF$ max		5.6		ns

NOTE: (1)  $t_1$  and  $t_2$  times are valid for VDRV voltages of +2.7V to +5V.

圖 3-13 ADC 晶片控制時序規範



### 3.3 RF 模組

由DAC模組與ADC模組所產生輸出入I/Q訊號後，於下一級則接至RF模組進行射頻調變解調與傳送接收，如圖 3-14 所示為RF模組，RF模組做成為卡片插槽的形式，在日後用於更換不同頻帶的RF模組之便利性；在RF模組發展上，採用達拉斯公司之RF產品系列，晶片型號為 MAX2827，晶片內部功能方塊如圖 3-15 所示，此RF晶片是規劃應用於無線區域網路之IEEE802.11a/b/g等規範使用，有兩射頻頻帶分別為IEEE802.11b/g規範的2400Mhz至 2500Mhz範圍，另一為IEEE802.11a規範的 5150Mhz至 5350Mhz範圍，如圖 3-16 所示為由頻譜儀器加向量分析儀器所測量到的載波訊號頻譜為 5.2GHz與基頻I/Q訊號所構成的星狀圖對應(constellation mapping)；MAX2827 此晶片是一個相當完整的整合性功能架構，其相關方塊功能包含有：時脈相鎖迴路(phase-locked loop, PLL)來產生載波基準訊號、前端訊號增益放大器、基頻I/Q訊號增益放大器、基頻低通濾波器、三線式數位控制單元、與訊號補償平衡處理電路等。

MAX2827 此晶片藉由三線式數位訊號來做控制，控制訊號波形如圖 3-18 所示與時序規範如圖 3-19 所示，訊號類別為資料訊號、時脈訊號與晶片致能訊號，經過三線式數位訊號此控制設定後，可以使MAX2827 工作在所指定的載波頻率(carrier frequency)以及相關射頻與基頻的增益大小，最後再設定TX與RX電源開關腳位就可以進行射頻訊號的傳送與接收。如圖 3-17 所示為RF模組在接收模式運作下，收到短序文訊號時的訊號波形，在示波器之兩路波形為I/Q訊號的各波形圖，並可以觀察到其兩路波形均有訊號輸出，但在原傳送端僅有I通道有訊號，主要為傳送端與接收端的時脈與相位並非同步之不一致所導致，但經由通訊演算法的處理後，將可以修正至正確相位，回復原來的I/Q的各別訊號值，最後將所需資訊解調還原之。



圖 3-14 射頻模組與 MAX2827 晶片

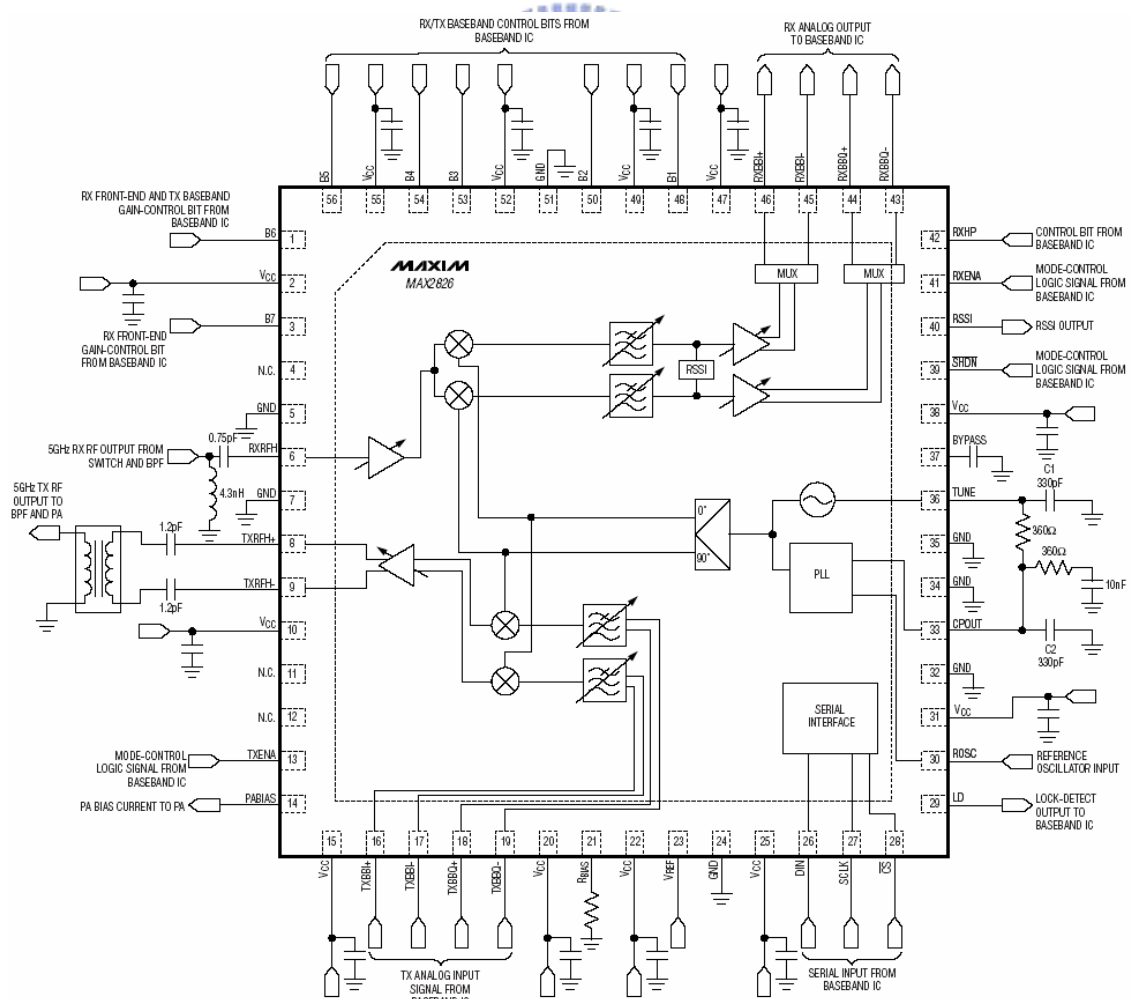


圖 3-15 RF 模組晶片功能架構

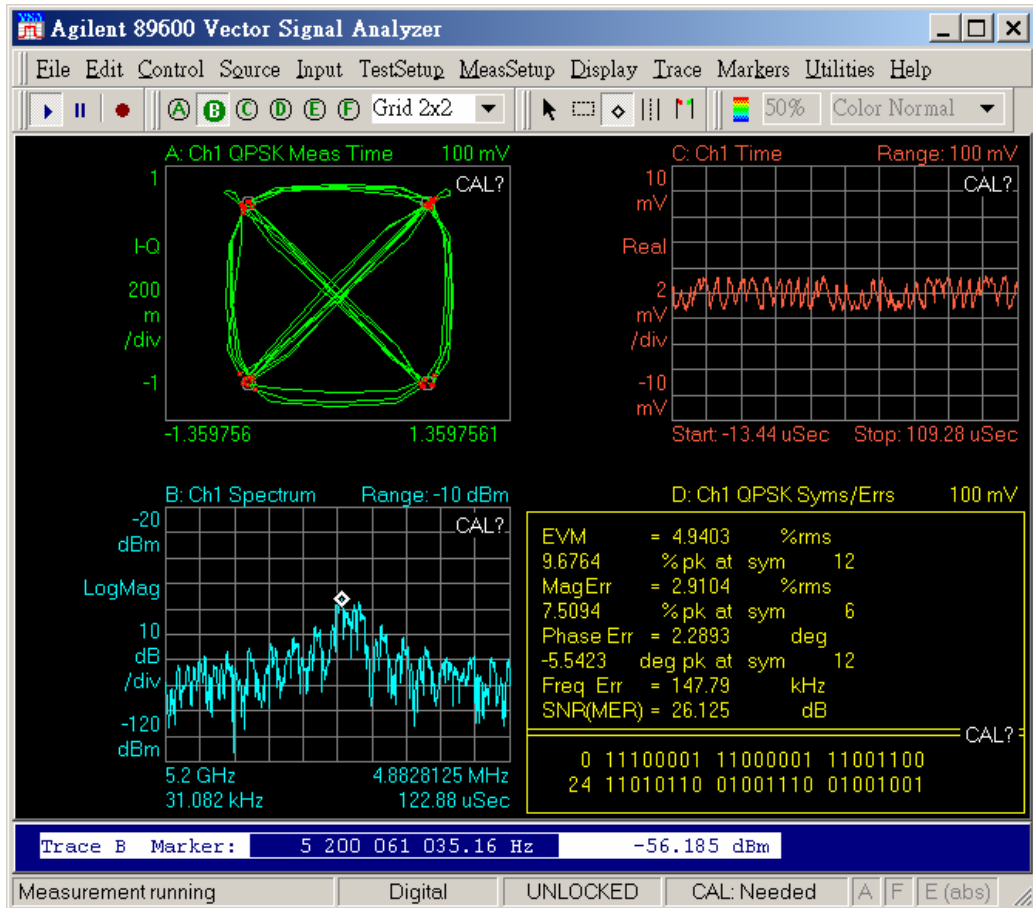


圖 3-16 VSA 軟體分析 RF 模組效能畫面

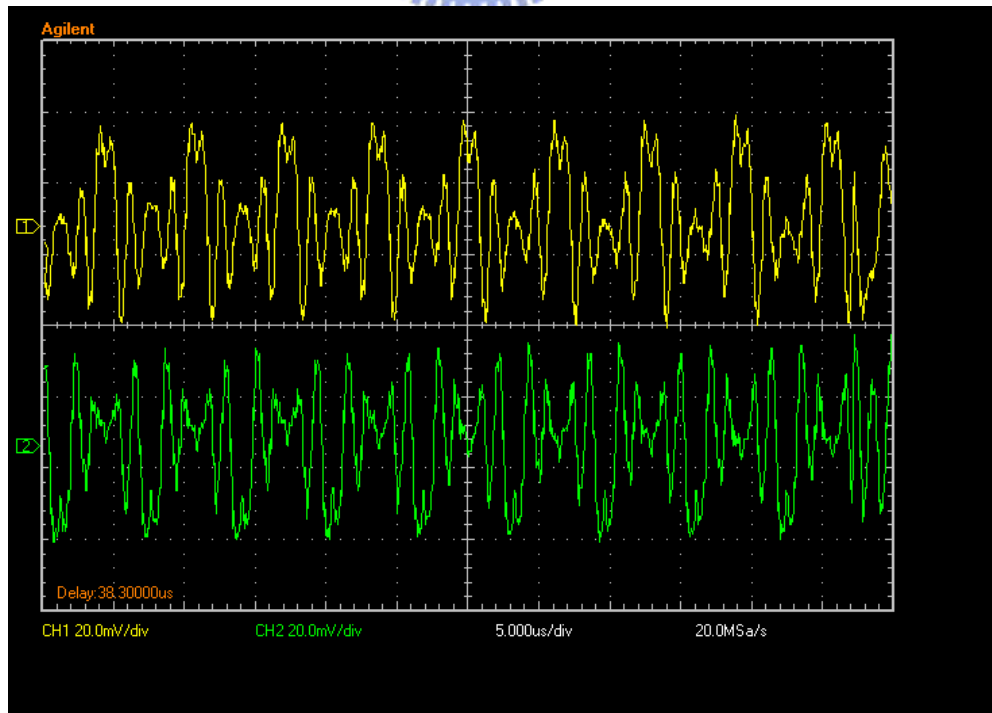


圖 3-17 RF 模組接收向量訊號波形

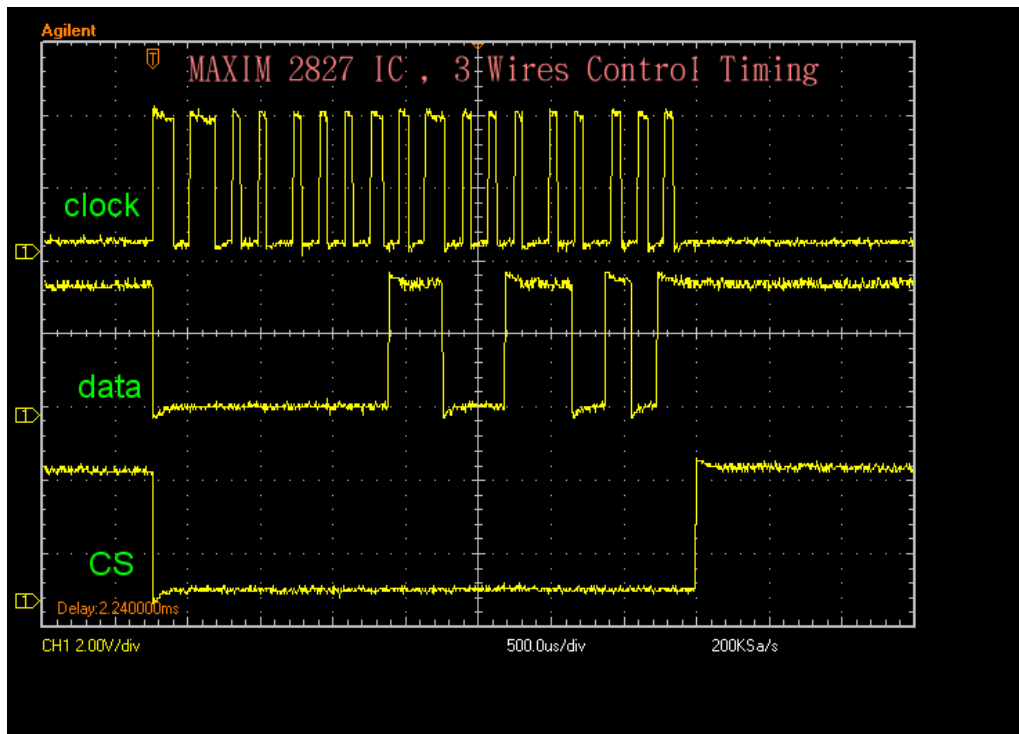
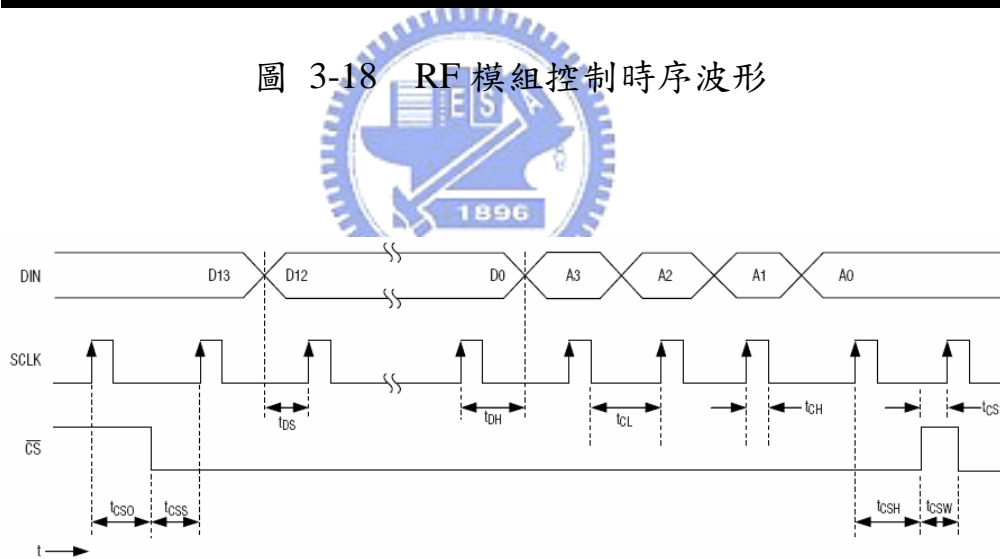


圖 3-18 RF 模組控制時序波形



PARAMETER	MIN	TYP	MAX	UNITS
SCLK Rising Edge to $\overline{CS}$ Falling-Edge Wait Time, $t_{CS0}$		6		ns
Falling Edge of $\overline{CS}$ to Rising Edge of First SCLK Time, $t_{CSS}$		6		ns
DIN to SCLK Setup Time, $t_{DS}$		6		ns
DIN to SCLK Hold Time, $t_{DH}$		6		ns
SCLK Pulse-Width High, $t_{CH}$		6		ns
SCLK Pulse-Width Low, $t_{CL}$		6		ns

圖 3-19 RF 模組控制時序規範

### 3.4 USB 模組

為了使在PC的通訊系統應用平台與自行研發FPGA數位系統平台之兩系統平台連結，選用USB模組做為兩個系統平之間控制指令與資料送收的橋樑，如圖 3-20 所示為使用USB模組，使用義隆電子之USB產品，晶片型號為EM78M612[28]與架構如圖 3-21 所示，在晶片功能上提供了USB1.1 的傳輸規範，其USB傳送速度可達 1.5Mbps，此傳輸頻寬對於在初期系統平台的整合連結與驗證測試是可以足夠使用的，未來可以升級至USB2.0 的傳輸規範，可以提供到 480Mbps的傳輸頻寬，使得系統平台能傳送高速率資訊與即時性，如用於高畫質視訊的即時傳送之應用。

USB模組在本系統平台所擔任的功能是將PC的通訊系統應用平台下達的USB命令，經過USB轉成數位訊號的準位，並且使用串列傳輸的協定方式進行溝通，並採用致能控制訊號完成其封包的同步控制，如圖 3-22 所示為USB訊號 D+ 與 D- 經接收後，經由內部韌體程式處理後，轉換為串列的數位訊號輸出入、時脈訊號與致能控制訊號等，當USB模組完成訊號轉換與傳輸後，在PC的通訊系統應用平台就可以對FPGA數位系統平台進行下達控制指令與資料收送的功能。

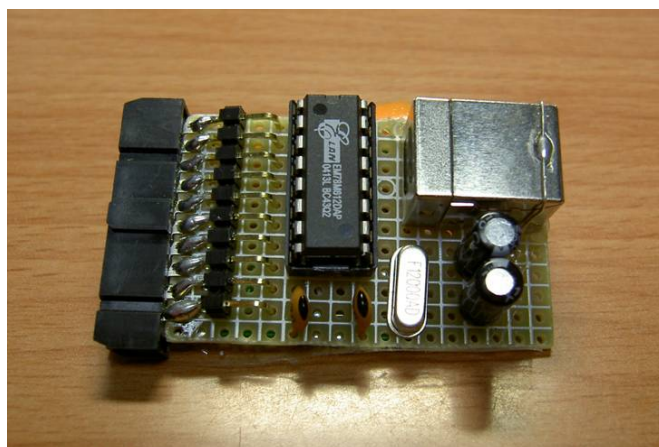


圖 3-20 USB 模組



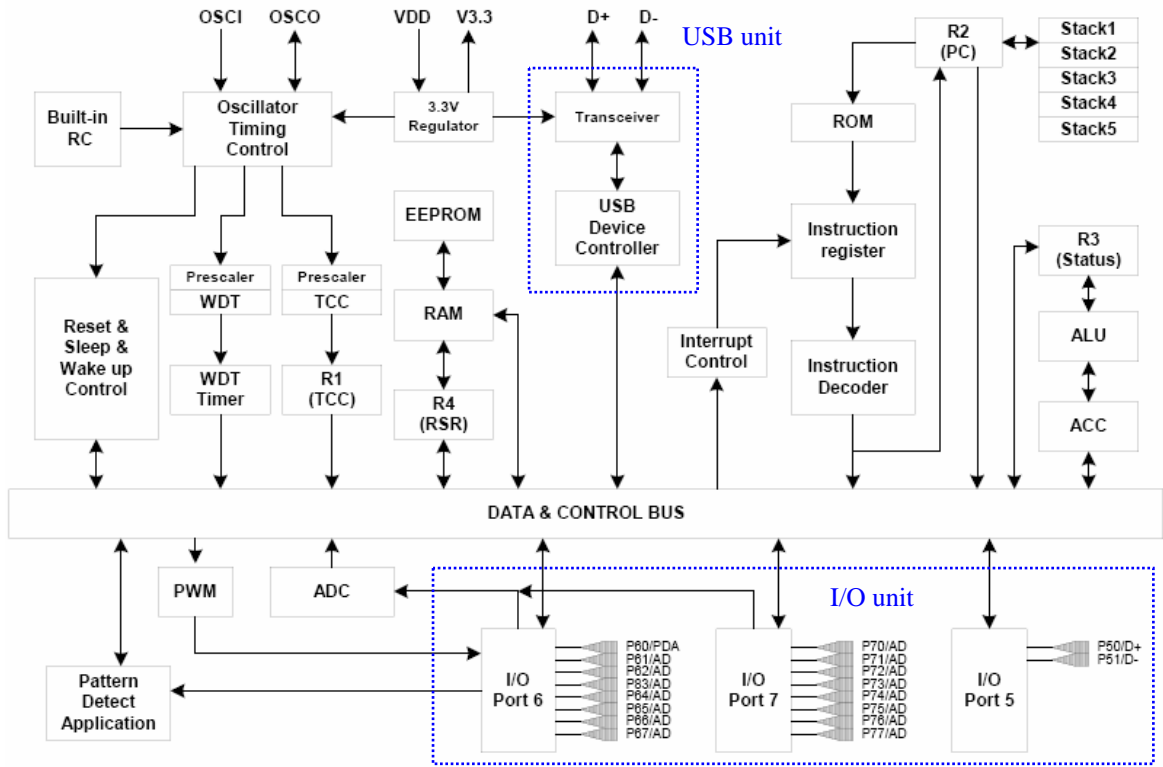


圖 3-21 USB 晶片內部功能架構

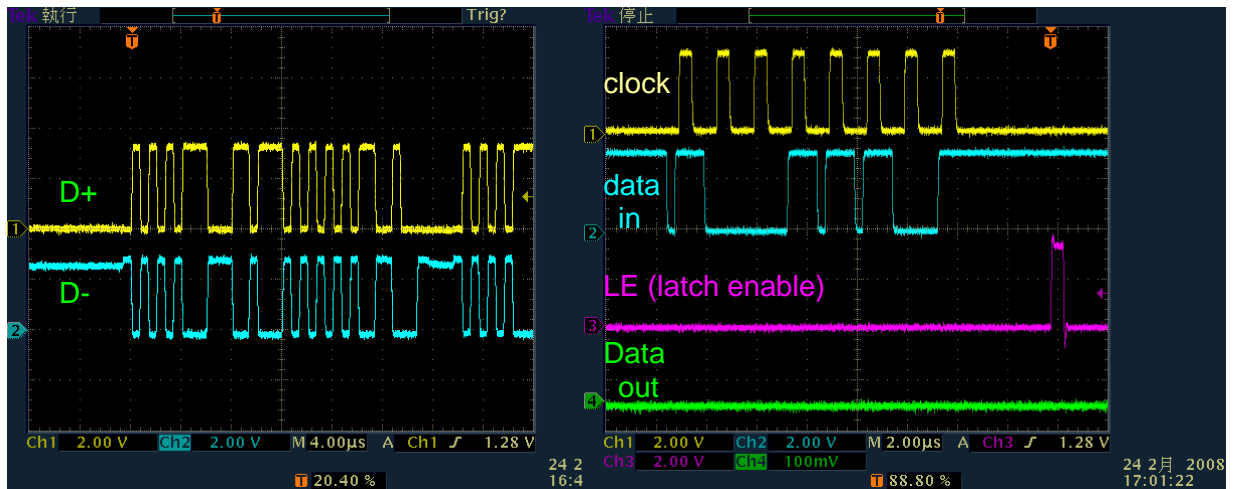
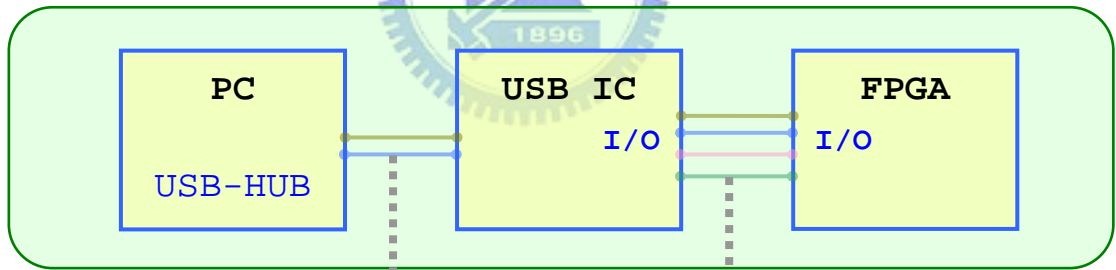


圖 3-22 USB 模組轉換 USB 訊號至序列訊號波形

### 3.5 通訊量測儀器

在通訊系統平台所整合射頻模組的射頻訊號要進行量測時，在測量上，會使用天線或衰減路徑裝置來傳送射頻訊號，可以保護量測儀器的接收總成，在通訊量測儀器的種類使用上，使用頻譜儀器來量測射頻訊號的頻譜能量，與使用向量訊號分析儀器(vector signal analyzer, VSA)與配合向量訊號分析軟體來量測向量訊號的解調性能，由上述兩種儀器來完成射頻訊號之量測，如下說明兩種在實驗室所用的通訊量測儀器之工作原理架構。

所使用頻譜儀器為安捷倫公司的E443A型號，如圖 3-23 所示為頻譜儀器本體與量測射頻訊號的頻譜工作畫面，E443A量測射頻訊號的性能可以高達 6.7GHz頻寬範圍，並以數位化的操作系統來量測所需要的頻帶範圍；如圖 3-24 所示為其頻譜儀器的原理架構，射頻訊號經輸入與降頻後形成中頻訊號(intermediate frequency, IF)，再經過快速二極體將訊號積分成頻譜能量予以顯示，吾人使用頻譜儀來量測射頻訊號的傳送，與觀察由基頻訊號調變後的頻譜；並配合 70MHz中頻訊號轉換裝置，可以與向量分析儀做系統整合使用，進行向量訊號的量測與相關通訊系統的解調性能分析。

另所使用向量訊號分析儀器為安捷倫之 89611S型號與向量訊號分析軟體，如圖 3-25 所示，在使用操作上由頻譜儀將射頻訊號接收下來，並降為 70MHz中頻訊號後，再輸入向量訊號分析儀進行處理；如圖 3-26 所示為向量訊號分析儀器的原理架構，其工作原理藉由一個轉換時脈為 95MHz的 ADC將中頻類比訊號轉換為數位訊號，再經由數位訊號處理將I/Q訊號解出來並存在先進先出(first in first out, FIFO)記憶體中，並經由連接介面使資料傳送至PC，在PC使用向量訊號分析軟體，藉由PC高速的運算來完成向量訊號；如圖 3-25 右所示，為一載波中心頻率為 5.8GHz，使用頻寬為 20MHz，並使用OFDM解調功能來將向量訊號解出來為 64QAM圖。

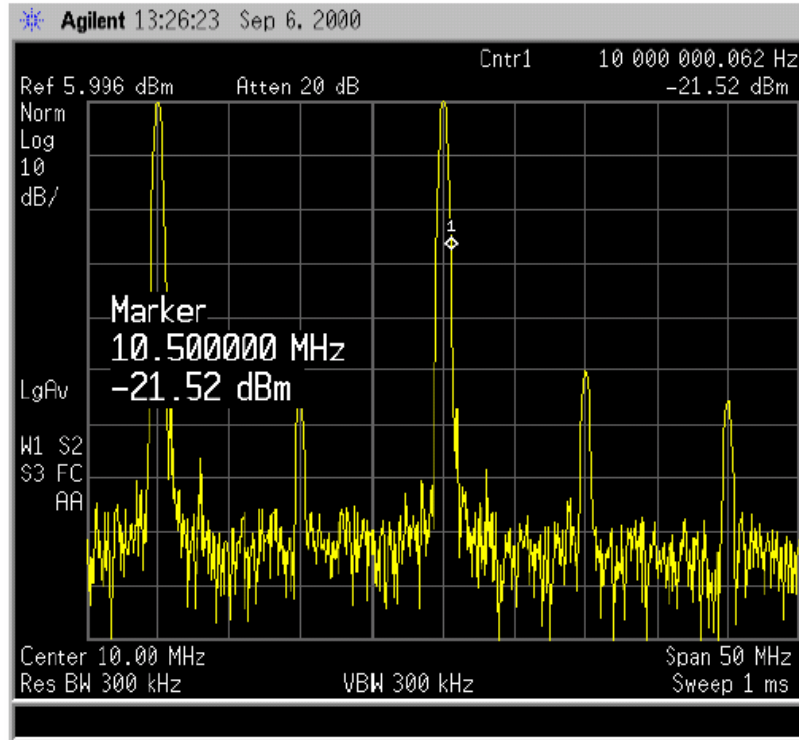
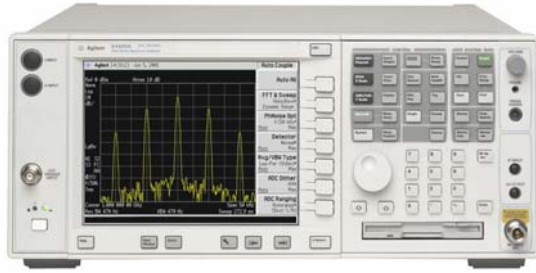


圖 3-23 頻譜儀器與工作畫面

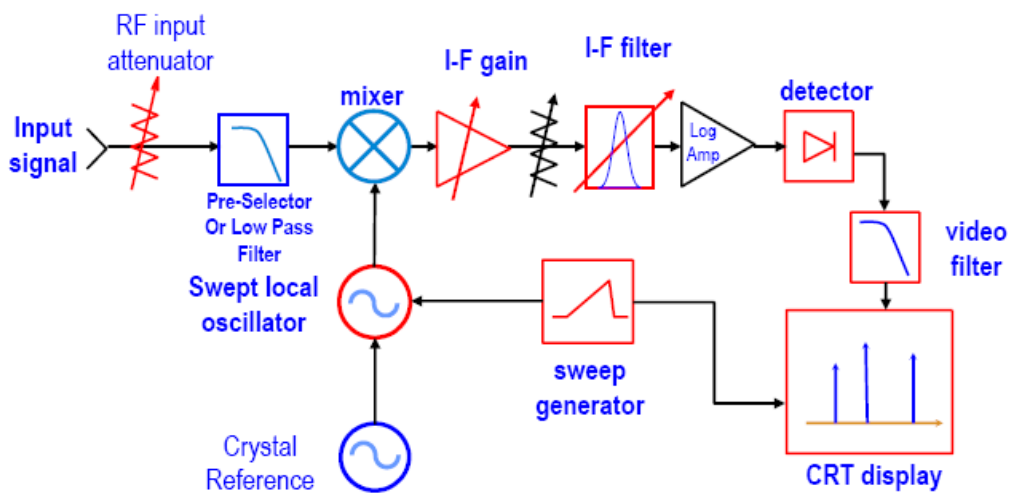


圖 3-24 頻譜儀器原理架構



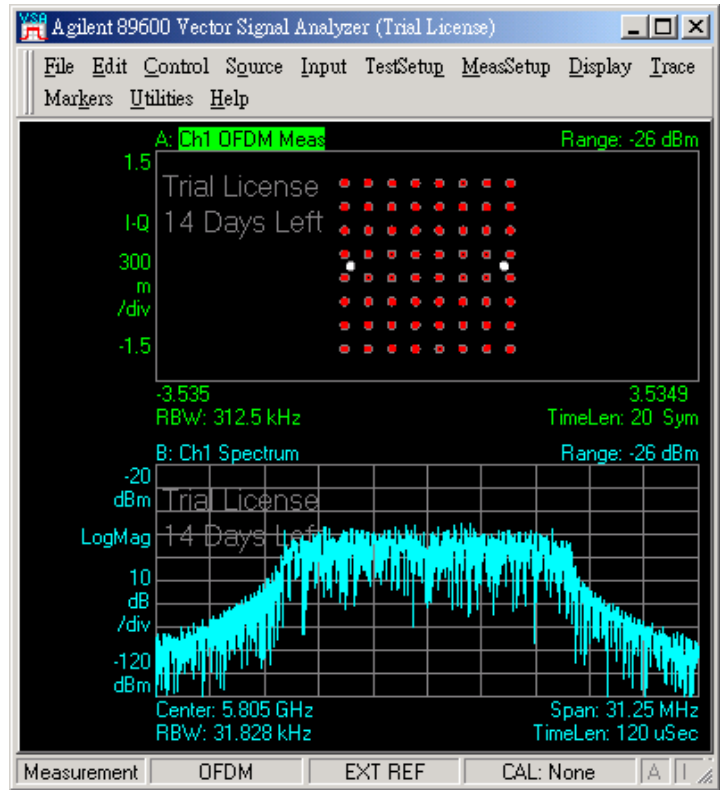


圖 3-25 向量訊號分析儀器與視窗軟體工作畫面

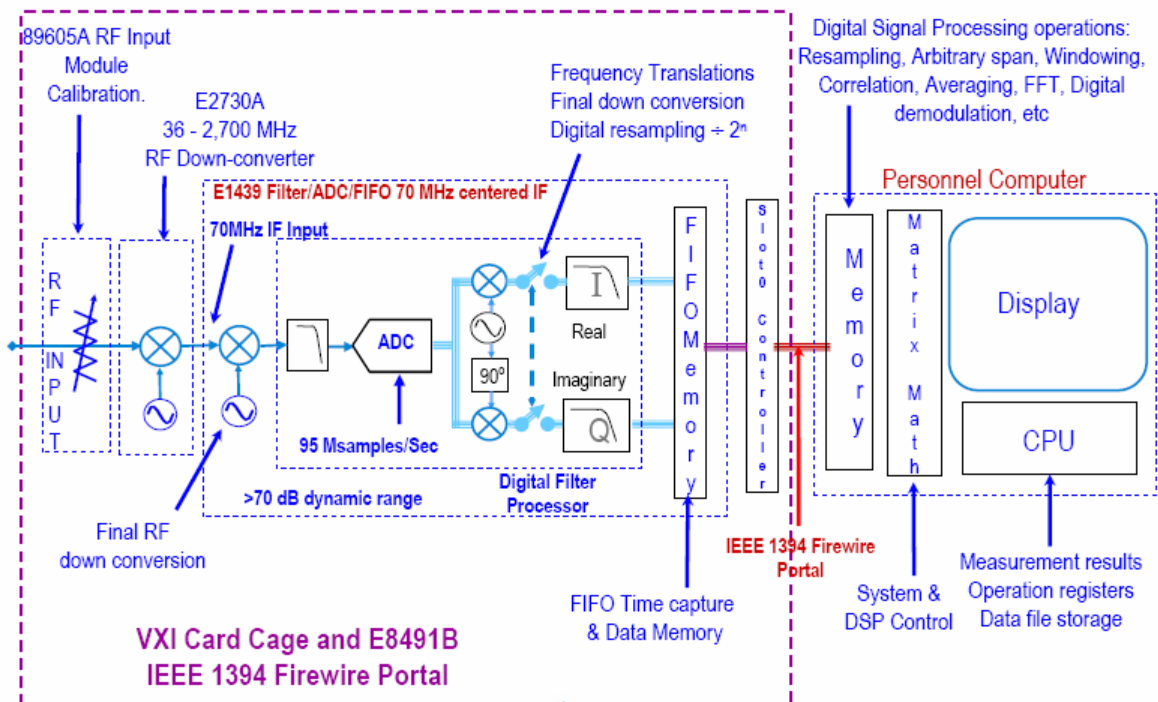


圖 3-26 向量訊號分析儀器原理架構

### 3.6 MIMO-OFDM 通訊系統平台發展過程心得

在自行研發 MIMO-OFDM 通訊系統平台於發展過程中，遇到了許多執行結果與預期不符的情況發生，通常原因是對晶片規範性能不了解時的錯誤使用，因此，在系統整合模組工程開始時，要先獨立對各模組進行測試，並量測性能值要與規範相符，對於在系統整合後才會有最佳的表現性能與強韌的執行穩定度，下面就各使用模組之注意事項做一心得敘述。

#### (1) FPGA 數位系統平台：

需有足瓦數的電源供應與在電路板上均勻佈置穩壓電容元件，由外部震盪元件(oscillator, OSC)所輸入系統的高頻時脈先經過前置數位低通濾波器或相關同步處理，由硬體語言描述的事件事項須注意在非同步時的處理與延遲效應，輸出數位訊號至終端模組的延遲與穩定時間之滿足，在系統除錯上利用邏輯分析儀器與 LED 顯示來判斷目前系統運作的情形。

#### (2) DAC 模組：

控制數位訊號符合 DAC 時序規範、輸出 I/Q 訊號之功率、輸出範圍、增益線性度、差動平衡度、頻寬等性能基礎量測。

#### (3) ADC 模組：

控制數位訊號符合 ADC 時序規範、輸入 I/Q 訊號之直流偏壓、輸入範圍、增益線性度、差動平衡度、頻寬等性能基礎量測。

#### (4) RF 模組：

三線式控制數位訊號符合 RF 時序規範，全部控制單元需重新初始設定，要有極穩定電壓源與低漂移精準系統時脈頻率，輸出入之 I/Q 訊號之量測、對射頻訊號之增益線性度、頻率響應、輸出功率、啟動穩定時間與阻抗匹配等，於 MIMO 模式時在 TX/RX

(transmitter/receiver)通訊系統平台的兩 RF 模組必須連接同一組時脈訊號。

**(5) USB 模組：**

制定數位序列訊號之輸出入協定規範、與 FPGA 連結控制之測試，數位序列之時脈訊號與 FPGA 時脈訊號之兩非同步時脈的整合同步處理，USB 與 PC 介面的軟體底層控制、資料傳輸、收送超時與熱插拔偵測的程式函式撰寫與測試。

**(6) 通訊量測儀器：**

使用最適合的解析檔位進行量測以取得最精準有效的數據，善用各功能模式取得不同的數據並加以管理存檔，日後可做為交叉比對驗證用。



## 第四章

# MIMO-OFDM 無線通訊系統實現與分析

在整合與實現MIMO-OFDM無線通訊系統過程中，參考在實驗室所實現發展的無線通訊系統平台之整合架構，並連結PC應用軟體做為通訊系統執行的控制台，並對接收機收到的數據進行分析與顯示，並結合即時視訊擷取傳送與接收顯示，使無線通訊系統與PC的應用視窗軟體整合後，展現出多彩多姿的多媒體通訊應用。在本論文中所自行研發的整合系統平台繼承原來系統架構與PC軟體視窗的控制功能外，連結了在第三章內容的FPGA數位系統平台之RF模組使用功能，並在通訊系統應用平台中加入許多可以重構通訊系統參數的設定功能，用來自定一個所需要的規範之收發機系統架構，並予以將重新建構完成，整合後的MIMO-OFDM通訊系統應用平台的功能架構如圖 4-1 所示。

為了完成通訊系統應用平台的發展及實現，並在PC上的視窗介面操作下完成設定選單功能之需求，採用Borland公司BCB6 ( Borland C++ Builder 6 ) [29][30]產品來發展視窗軟體，在當時BCB6 是一套最為容易用來發展視窗軟體的程式，如圖 4-2 所示為發展通訊系統應用平台的工作畫面。在本章內容中共有兩個主要單元，在第一單元內容中介紹在本軟體的選單介面功能介紹，包含了檔案與影像的輸出入、RF晶片設定與通訊系統執行的行程設定等；在第二單元內容中介紹在本軟體中完成實現MIMO-OFDM無線通訊系統，並以介面圖形來說明統於接收機架構中的功能方塊分析與表示。

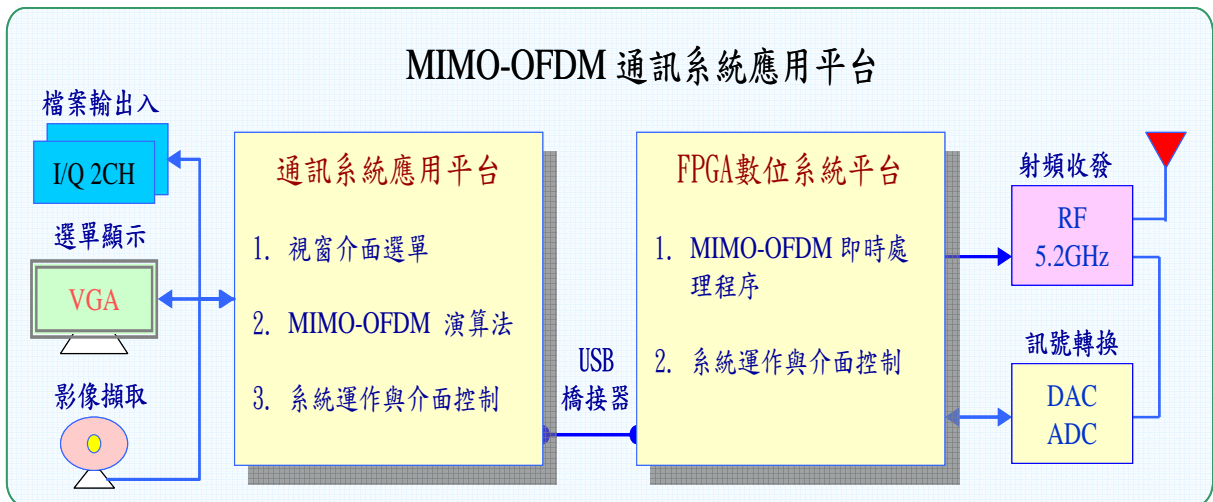


圖 4-1 MIMO-OFDM 通訊系統應用平台功能架構

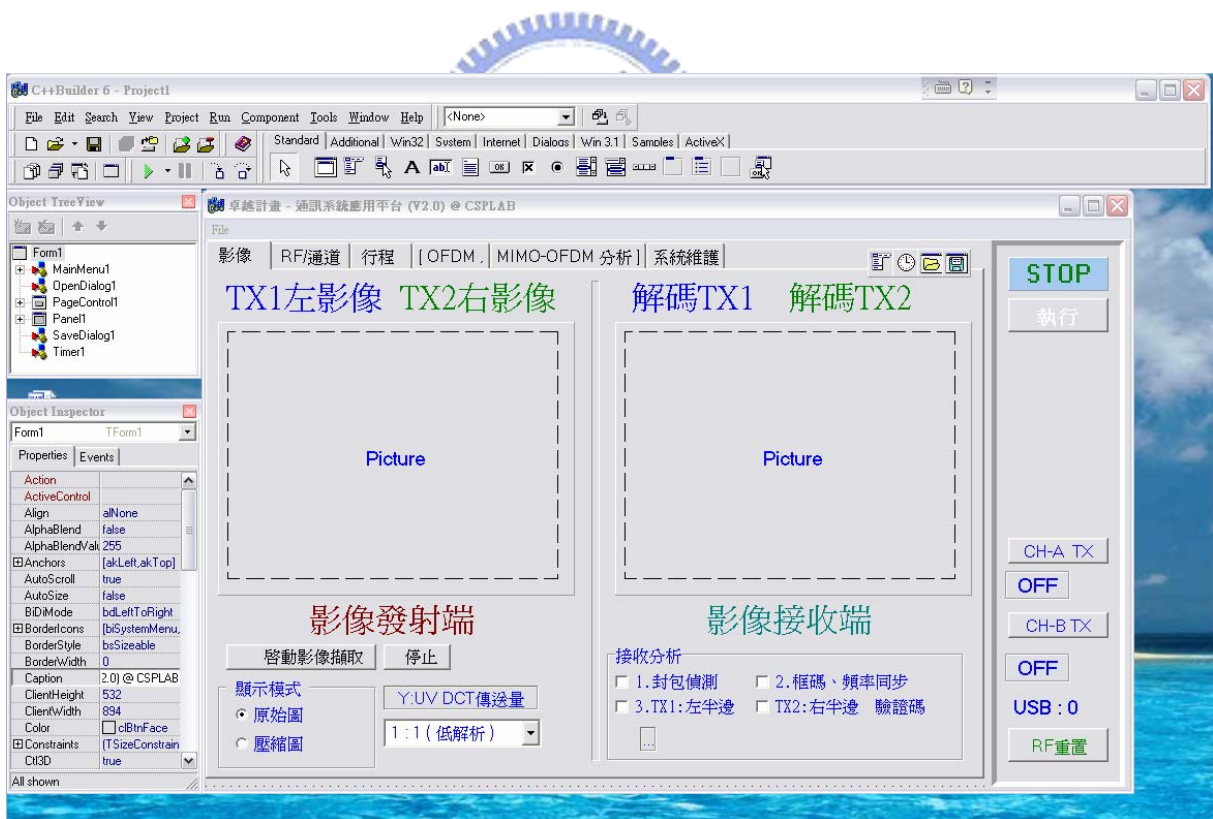


圖 4-2 Borland C++ Builder 6 工作畫面



## 4.1 資訊輸出入的設定選單

在具有資訊輸出入的通訊系統中，對於系統一開始時先將資訊輸入至系統內，然後經相關資訊編碼、基頻轉換、射頻調變與射頻訊號經由天線予以傳送之，接收部分則經反向處理後將資訊解碼出來並輸出系統；因此在本系統軟體中建立了兩種資訊模式的輸出入，分別為影像擷取的輸入與在顯示器上的顯示輸出，另一種為資料檔案的讀取與儲存。

第一種輸出入模式為使用影像做為資訊，其目的與功能則是為了所實現的MIMO-OFDM無線通訊系統能具有執行時或在展示時，可以便於解釋說明MIMO-OFDM的特色與優勢的想法而產生的，在通訊系統應用平台的軟體繼承上一代平台之影像擷取與接收顯示的方式如圖 4-3 所示；並新加入影像資訊壓縮技術使其減少龐大的數據量，然後經由壓縮後的影像資訊再輸入至通訊系統予以處理和傳送，新增加的壓縮功能可以加快影像更新速度使其影像動作有連續性。

第二種輸出入模式為使用資料檔案做為資訊，在此一資料檔案模式的規劃下，對於通訊系統演算法的研究與分析相當有幫助，因為使用此資料檔案模式做為資訊的來源時，軟體系統會將資料檔案中的原始I/Q向量數值陣列直接傳送至FPGA平台中的記憶體，然後經由FPGA行程系統予以執行傳送和接收，最後再傳回PC儲存於資料檔案內，如圖 4-4 所示為本軟體與MATLAB數值分析軟體做資料相互的存取轉移，當使用MATLAB發展一個新的通訊演算法時，使用此模式可以將MATLAB產生的TX基頻訊號在硬體平台與真實通道上傳送與接收，在經真實通道下所接收的RX基頻訊號經儲存後，由MATLAB讀取再重新分析後，可以使原本僅使用模擬通道方式的演算法，進而找到更多改善架構的地方與強化其演算法，最後使通訊系統的處理效能更為強韌之。





圖 4-3 通訊系統應用平台執行影像處理的工作畫面

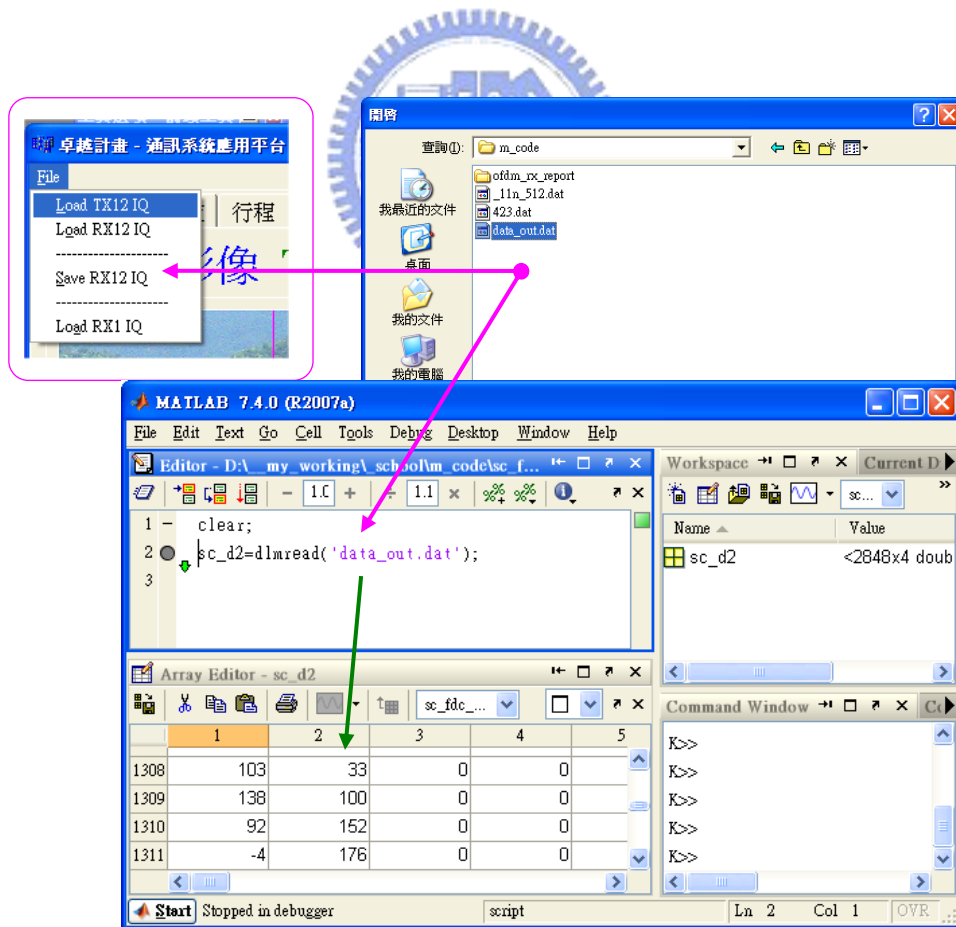


圖 4-4 通訊系統應用平台與 MATLAB 的資料存取

## 4.2 RF 晶片控制的設定選單

在RF模組中選用MAX2827 此一RF晶片為主要元件，並只須使用三線式數位訊號就可以設定RF晶片內部的控制單元，在參閱此一規範文件中，經過所需分析整理後，共有三個主要控制項目須給予設定與調整之，分別為基頻訊號增益設定、載波頻率設定與射頻訊號增益設定；如圖 4-5 所示為三個控制項目架構與為RF模組控制設定選單，在選單上使用下拉式表格選項的視窗物件做為選擇的方式，可以容易與快數地達到正確之所需要的設定值；在所規劃的MIMO-OFDM無線通訊系統架構上，著重在通訊系統實現，因此RF模組的設定是屬於靜態設定，比如在同一實驗室地點做測試與量測時，其所設定參數值與最近正常測試時設定值均在相同值附近範圍內，所需調整的變化值不多，每次都可以順利地完成。



圖 4-5 RF 晶片設定畫面

## 4.3 通訊系統行程的設定選單

在完成RF模組之規劃設定後，另需要建立一個行程控制台來連結各模組之參數選擇與收發機相關通訊參數、執行模式的功能總成，在此一行程控制台的功能選擇方式也是以下拉式選單方式來進行設定，當設定完成所需通訊參數後，一個自定規範的收發機之系統架構將重新建構完成，相關參數如表格 4-1 所示，最後下達通訊系統執行功能來使收發機運行進而實現MIMO-OFDM無線通訊系統；在行程控制台的規劃架構如圖 4-6 所示與行程設定畫面如圖 4-7 所示，相關各重要功能設定分別如下說明。

### (1) 行程模式：

行程模式的設定用來選擇是以使用真實的 MIMO-OFDM 無線通訊系統平台或以通訊系統應用軟體所模擬通道來執行系統的運作執行；當有連接 FPGA 數位系統平台時則選擇真實送收此一選項，而當沒有連接 MIMO-OFDM 無線通訊系統平台或在研發除錯階段時，則選擇模擬通道此一選項進而可以避開因硬體問題時的除錯不易，而模擬通道有提供是否經過 MIMO 效應之選項處理，並可在於模擬通道的設定功能頁來調整模擬通道的相關參數。

### (2) 資訊來源：

資訊來源的設定用來選擇 I/Q 檔案或即時影像兩種類，當選擇 I/Q 檔案模式時，可以藉由檔案的讀取與儲存與 MATLAB 應用軟體進行演算法分析與效能改進；在格式部份，在 MATLAB 上使用 `dlmread()` 與 `dlmwrite()` 兩程式函數來進行讀寫的動作。另選即時影像模式時，為呈現一個即時影像的傳送與檢視，可用於說明與展示於 MIMO 技術架構的兩倍傳輸率之優勢特點，並且可以選擇 OFDM 或 MIMO-OFDM 技術架構做為通訊系統。

### (3) TX 行程設定：

TX 行程設定的設定用來選擇與規劃於傳送系統架構的組成，包含了：設定傳送天線通道 1 與通道 2 的使用、基頻訊號的傳送時脈頻率、一個傳送封包的 I/Q 數量設定、傳送系統端是否持續傳送與基頻時脈是否反轉(用於 DAC 模組的測試) 等相關設定。

### (4) RX 行程設定：

TX 行程設定的設定用來選擇與規劃於接收系統架構的組成，包含了：設定傳送天線通道 1 與通道 2 的使用、基頻訊號的接收時脈頻率、一個接收封包的 I/Q 數量設定、基頻時脈是否反轉(用於 ADC 模組的測試)與接收封包的偵測準位 等相關設定。

當完成上述相關設定後，經執行功能啟動後，通訊系統應用平台則依照所設定項目參數將重新建構收發機之系統架構，並且透過USB模組開始與MIMO-OFDM無線通訊系統平台進行連結，當系統連結後，開始傳送相關資訊與系統參數，在最後完成設定後，在於接收端系統會進入接收偵測狀態，等待傳送端的訊號，待傳送與接收行程完畢後，再透過USB模組將資料傳回通訊系統應用平台做相關處理；其傳送與接收的流程如圖 4-6 所示，使MIMO-OFDM無線通訊系統因而得以完成實現。

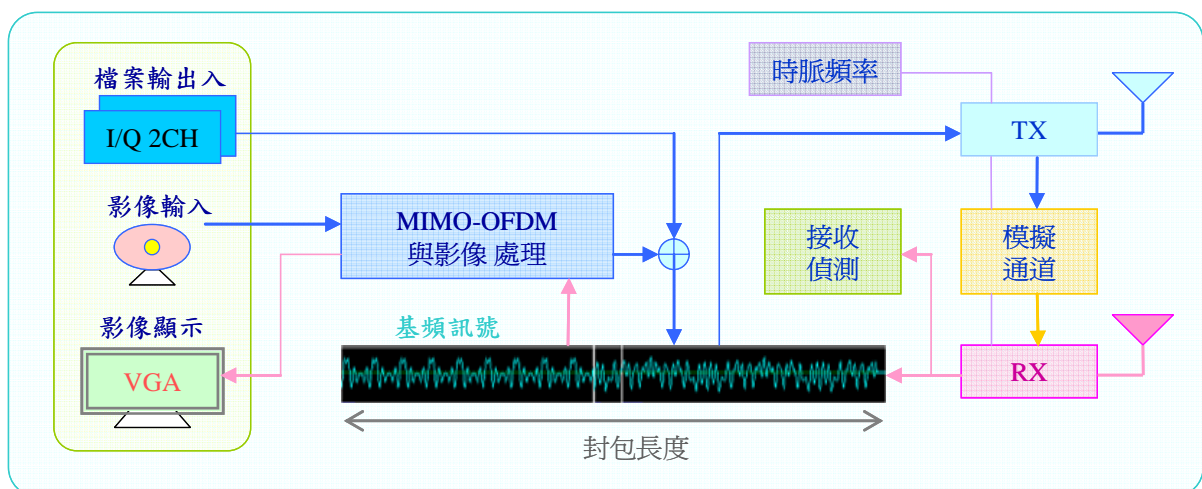


圖 4-6 通訊系統應用平台行程設定架構

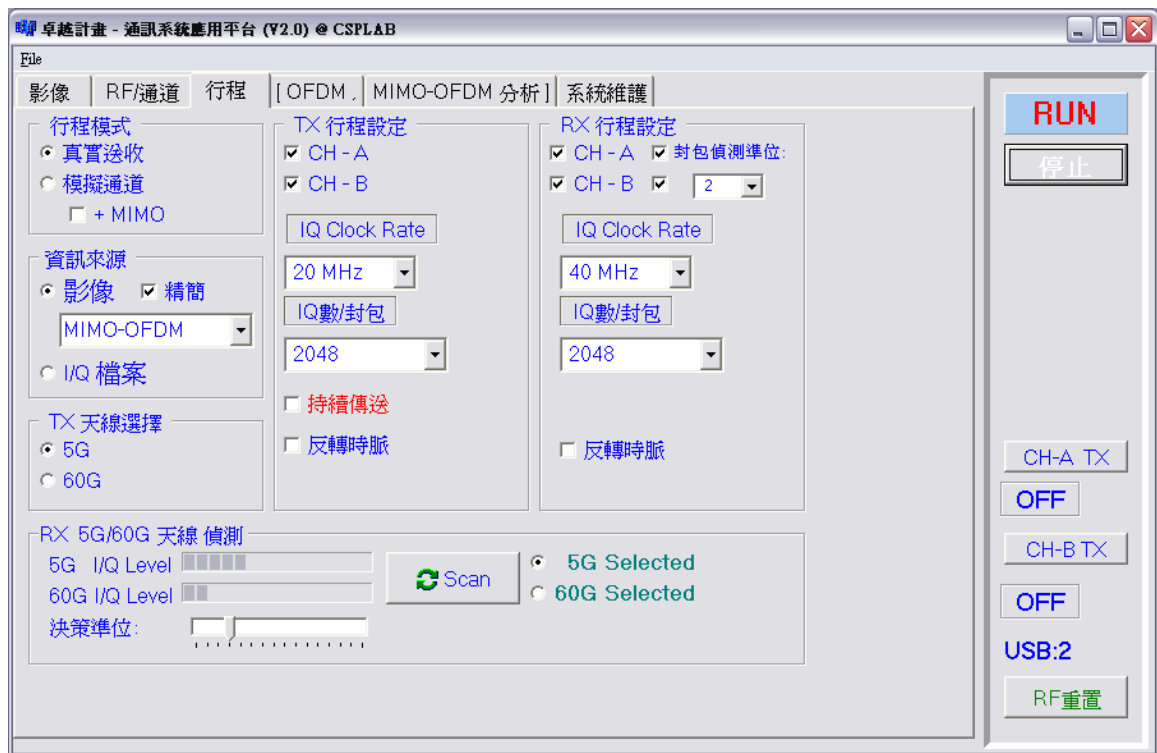


圖 4-7 通訊系統應用平台行程設定畫面

表格 4-1 MIMO-OFDM 系統通信參數

類別	功能	通信參數內容
資訊	存取	I/Q 檔案、影像
RF 模組	載波頻率	IEEE802.11a : 5.15GHz~5.35GHz IEEE802.11b/g : 2.4GHz~2.5GHz
	基頻增益	TX: -5 ~ 0 dB, RX: 0 ~ 31 dB
	射頻增益	TX: 0~63 dB, RX: min、mid、max
收發機	通訊系統	OFDM、MIMO-OFDM (ZF)
	天線	1x1、2x2
	基頻時脈	5MHz、10MHz、20MHz、40MHz
	封包長度	1024、2048、4096...
	FFT/IFFT	64、128、256



## 4.4 MIMO-OFDM 通訊系統實現與分析

通訊系統應用平台在初期發展時，吾人規劃先完成OFDM通訊系統，接著完成MIMO通訊系統，並進行兩通訊系統的整合，最後予以整合完成MIMO-OFDM通訊系統的實現。在通訊系統應用平台之行程功能執行後，系統程式依所設定通訊系統參數來重新建構收發機的架構，然後再藉由實體的MIMO-OFDM通訊系統平台使其基頻訊號傳送與接收之，而使得完成MIMO-OFDM通訊系統之收發機實現，所接收向量資訊依設定做檔案儲存與轉換影像顯示功能之外，在通訊系統應用平台自行研發向量訊號分析功能，做為解析MIMO-OFDM通訊系統效能估測與向量訊號之檢視，因此可以輕易藉由向量訊號分析功能來探索MIMO-OFDM通訊系統於實現過程中，所接收向量訊號經通訊系統各階段轉換過程中的對應關係資訊，使其在用於分析或瞭解通訊系統原理時將有莫大助益，如圖 4-8 所示為向量訊號分析之功能架構，並在通訊系統應用平台上使用了三個功能頁面來實現之，各頁面功能如下小節說明。

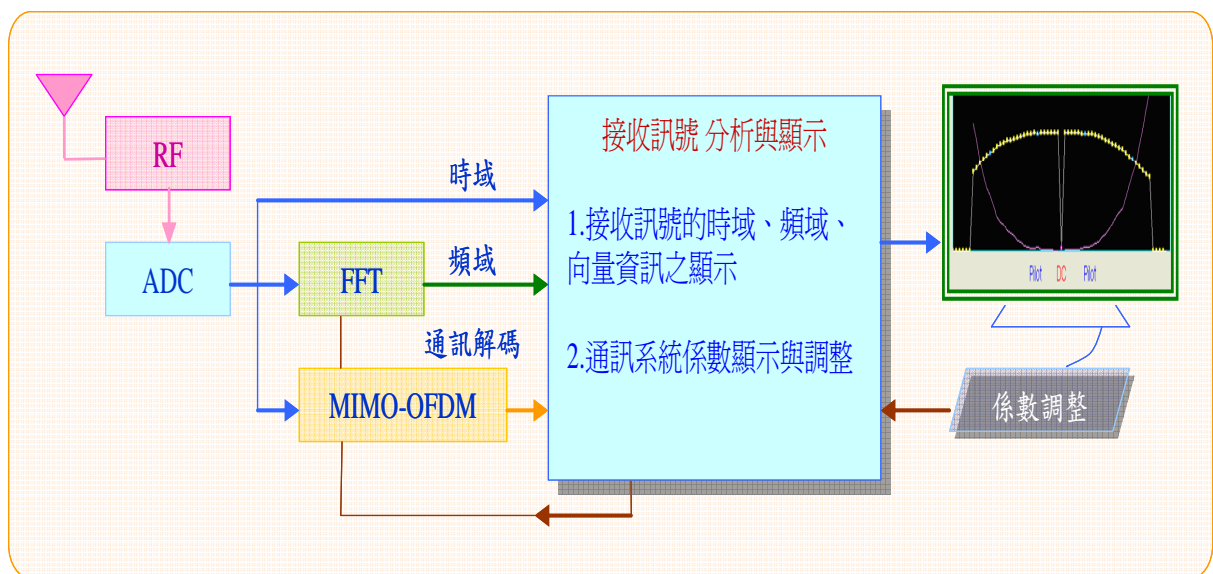


圖 4-8 自行研發向量訊號分析儀功能架構



## 4.4.1 MIMO-OFDM 向量訊號之時域、頻域分析

在向量訊號分析功能之第一頁面如圖 4-9 所示，主要功能為分析 MIMO-OFDM 通訊系統所接收的兩通道向量訊號於時域、頻域的分析與檢視，並藉由檢視選項的選擇，可以在顯示區域顯示之並與其他選項顯示做對應分析；在檢視選項所提供的檢視項目有分為時域與頻域兩部分，在時域部份的檢視選項有向量訊號的實部、虛部、相位與功率大小等，另外有標記的檢視選項，用來檢視 MIMO-OFDM 通訊系統於處理中的各框碼位置所在。在頻域部份同樣也檢視與時序相同的檢視選項；在操作上，使用者可以由滑鼠箭頭指標在時域顯示區域按住左鍵後，可以隨意移動向量訊號的位置，另外也可以藉由縮放比例值與位置物件來檢視最佳效果，同時在頻域也會同步更新畫面，使其使用者可以瞭解時域與頻域的相對應關係。

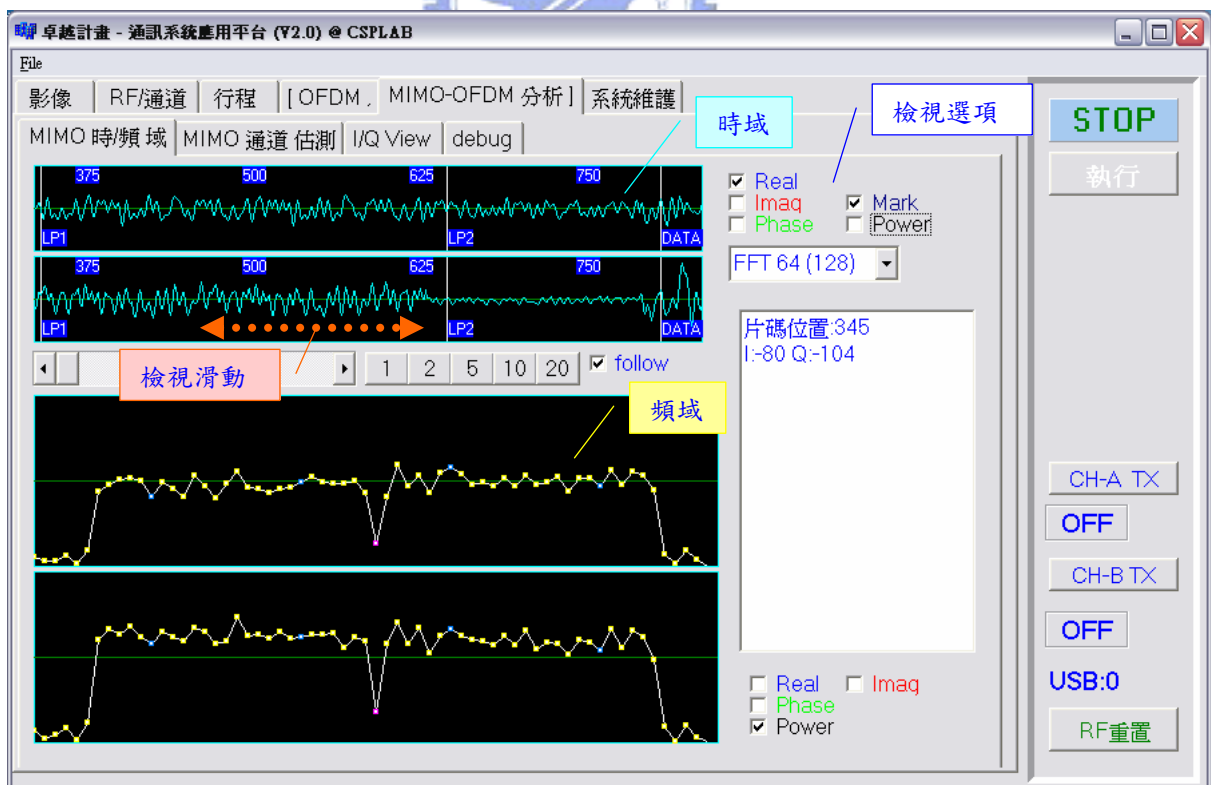


圖 4-9 MIMO-OFDM 接收訊號時域、頻域顯示

## 4.4.2 MIMO-OFDM 通訊系統估測分析

在向量訊號分析功能之第二頁面如圖 4-10 所示，主要功能為分析 MIMO-OFDM 通訊系統之通道估測(channel estimation)、框碼位置與接收向量訊號偏移頻率估測(frequency estimation)的分析與檢視，並藉由檢視選項的選擇，可以在顯示區域顯示之並與其他選項顯示做對應分析；在分析檢視頁面上有估測 MIMO-OFDM 通訊系統參數值與估測多輸入多輸出通道之頻域兩部分，估測 MIMO-OFDM 通訊系統參數有框碼位置與接收向量訊號頻率偏移，在估測多輸入多輸出通道之頻域共有 4 組通道，分別為 H11、H21、H12 與 H22 等 4 組通道，在通道之頻域的檢視選項有向量訊號的相位與功率大小等，在收發機於執行時，藉由觀察 4 個所估測多輸入多輸出通道之頻域的分析，可以用來調整 RF 模組功率大小與四組天線的位置，藉由此方式的調整，使其 MIMO-OFDM 通訊系統實現與運行在最佳的傳輸環境條件。

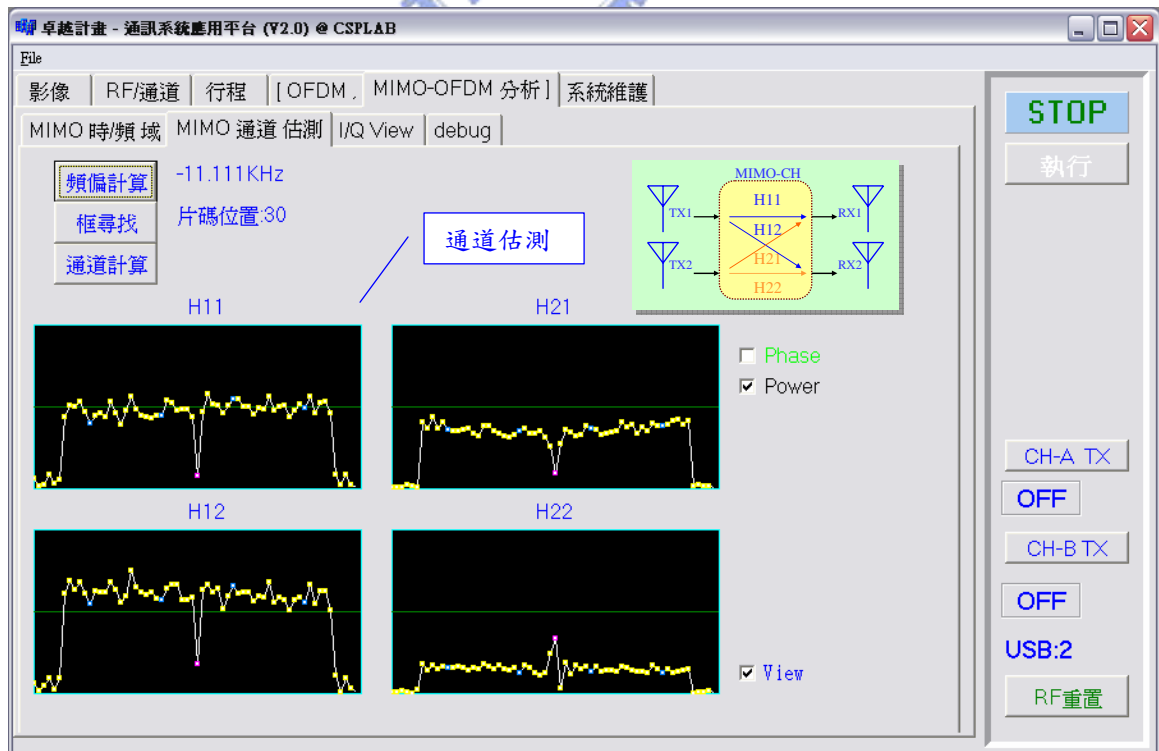


圖 4-10 MIMO-OFDM 通道估測、框碼位置、頻率偏移

### 4.4.3 MIMO-OFDM 通訊系統性能分析

在向量訊號分析功能之第三頁面如圖 4-11 所示，主要功能為分析 MIMO-OFDM 通訊系統之接收機的解碼性能分析，在分析畫面上有三個項目所構成，分別為 I/Q 星座圖對應、檢視選項與檢視訊息，在向量星座圖上顯示經 MIMO-OFDM 通訊系統解調出的 CH1 與 CH2 向量訊號，在檢視選項包含了片碼調整、通道調整、符元框選擇等項目，檢視訊息則顯示 MIMO-OFDM 通訊系統經演算後的估測係數；在使用程序上，首先需在檢視選項中選定在封包的任一符元框做為分析檢視，並以向量星座的顯示方式來表示符元框中的各子載訊息。還可以藉由檢視選項的上下係數調整，使 MIMO-OFDM 通訊系統依照新的係數重新解調出的 CH1 與 CH2 向量訊號並同步更新向量星座之顯示，經過檢視選項與向量星座圖的交互動作之分析下，可以瞭解各係數對於 MIMO-OFDM 通訊系統上影響程度。

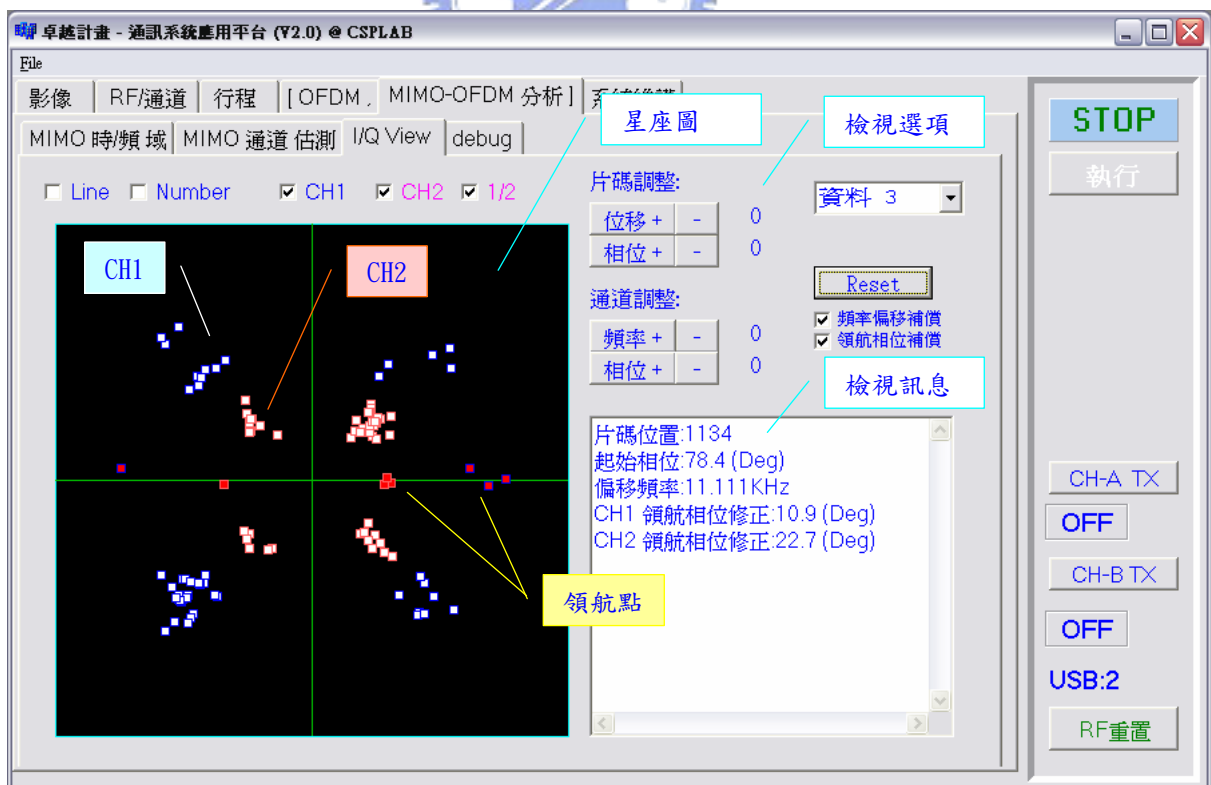


圖 4-11 MIMO-OFDM 解調向量訊號星座圖

## 4.5 MIMO-OFDM 通訊系統結合影像應用之實現

當完成MIMO-OFDM通訊系統電整合軟硬系統平台的實現，也對於其MIMO-OFDM通訊系統接收向量訊號使用向量分析功能做深入的分析檢視後，另外與多媒體領域的影像處理技術[31]的做一整合應用，可以用來展示說明MIMO-OFDM高傳輸率之特色優點，經整合後的影像執行畫面如圖 4-3 所示，在MIMO-OFDM通訊系統結合影像應用行程架構如圖 4-12 所示，其處理流程如下步驟說明：

- 步驟 1：由視訊攝影機的程式存取介面取得影像資訊並顯示之。
- 步驟 2：影像資訊經壓縮處理後，分為左右之兩資料流。
- 步驟 3：兩資料流經 OFDM 通訊系統編碼生成基頻訊號。
- 步驟 4：由基頻訊號傳送後，射頻訊號經 MIMO 通道後予以接收之。
- 步驟 5：經由 V-BLAST 之 ZF 演算法將原兩資料流解出。
- 步驟 6：兩資料流的資訊經過認證後，將資訊還原影像並顯示之。
- 步驟 7：在每一次行程處理上，產生一個接收分析報告的檢視，可以了解所接收向量訊號與影像的分析資訊。

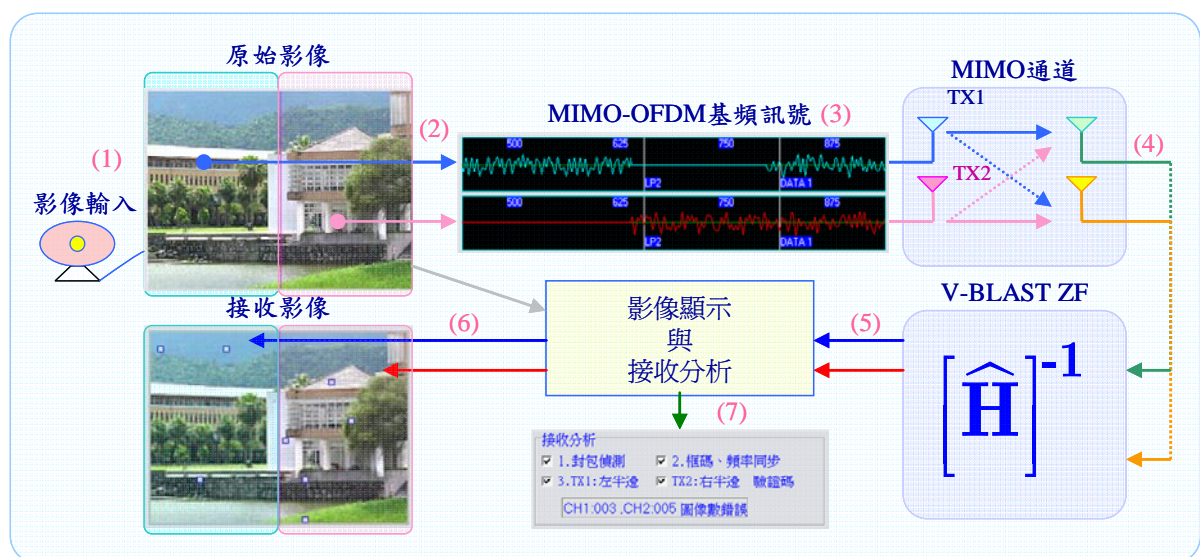


圖 4-12 MIMO-OFDM 通訊系統結合影像應用行程架構



## 4.6 通訊系統應用平台發展過程心得

在使用 BCB6 設計視窗程式來發展通訊系統應用平台的過程中，所發生的問題可歸納為兩類型，第一類型為發展視窗軟體時的程式碼與資源管理問題，第二類型為使用 C 語言程式來完成 MIMO-OFDM 通訊系統的演算處理問題，對於這兩類型問題的解決方法如下敘述。

第一類型為視窗軟體發展時的資源管理問題，並當程式寫到很大時，就會發生程式在撰寫或除錯時，會為之辛苦，所以需使用結構或類別宣告功能來將程式碼與資源做一類別定義，經由類別定義後，BCB6 系統自動彙整出所定義類別資訊庫，當在撰寫程式時，只要敲入所需類別的前幾碼關鍵字後，BCB6 會自動彈出該類別中所有程式函數與資源之選單供選擇，因此，藉由 BCB6 的引導式過程，使在大系統的程式撰寫與除錯就為簡便之。

在第二類型為用 C 語言完成 MIMO-OFDM 通訊系統演算法問題，由於 DAC 與 ADC 兩模組的資料寬度只有 10 至 12 位元，因此無法直接用 MATLAB 所寫的程式，需使用浮點轉至定點技術[32]-[35]，除此之外，為了加快演算速度，將演算核心資源以位元組(byte)或字組(word)資源來定義使用，並且為整數單位，使在數值運算上變的很危險，例如在一數值經過運算後的數值溢位問題與在降階時的誤差產生，譬如 0.1 與 -0.1 兩定點數值經降階為整數時會為 0 與 -1 之值，而 -1 就產生重大誤差，而且經過多次累積後其影響很可觀，如導引子載波(pilot subcarrier)之相位追蹤(phase tracking)數值，解決之方式為在為浮點數或整數之最低位元(least significant bit, LSB)之前一位元加上 0.5 或 1 之值再行降階，功能如同 MATLAB 的 round() 函數，這樣可以使誤差為最小值，雖然還是有誤差存在，但不會造成正負兩端之誤差不平衡現象產生，因此在使用程式語言處理定點與整數演算法時須注意運算後數值的溢位、極性轉態、降階誤差非平衡等項目。

## 第五章

### 結論

隨著多媒體資訊時代的來臨，與行動通訊多樣化服務為消費市場主流時，現今以 W-CDMA 為核心技術之第三代無線通訊系統，已無法滿足多媒體通訊之頻寬需求，在未來第四代無線通訊規範中，可能以 OFDM 為通訊技術，OFDM 技術可以支援高速率傳輸，並與 MIMO 的平行空間通道技術的結合，提升系統效能與傳輸速率，以滿足未來多媒體傳輸之需求；因此 MIMO-OFDM 通訊技術是為必行的發展趨勢，亦成為通訊產業在研發上的技術重點，深信在將來對無線電通訊系統的能力提升、高傳輸速率與強化鏈路品質等之規範制定下，會有十分顯著的貢獻。

在本論文中，在第一章先針對無線電通訊系統的歷史做一簡單的回顧，說明了在為了高傳輸頻寬需求下，MIMO-OFDM 技術已經為提升下一代無線通信系統的數據傳輸速度認為是一個有希望的解決辦法。在第二章說明了 OFDM 技術使用 IFFT 使各個子載波形成正交關係並使得頻寬重疊使用，使用頻寬為大幅減少頻寬的使用量，並利用加入保護區間與循環前置區段訊號，能適應因多重路徑產生的通道選擇性衰弱現象與引起符元間干擾；接著說明 MIMO 技術是一種在原使用的頻寬條件下能對系統提升鏈路品質與傳輸率，MIMO 技術在傳輸之運算處理分為兩類型架構，為空間多樣技術與空間分工技術架構，在空間多樣技術，首先在傳送端的資料會先經過 STBC 之編碼，然後由多接收天線的多樣與空時區塊解碼得到訊號



多樣式增益，因而提升接收性能；空間分工技術則在各個傳送天線傳送不同的獨立資料，在接收端使用 V-BLAST 執行權值計算與干擾消除，在  $2 \times 2$  天線架構中，資料傳輸率將比空間多樣式系統多一倍，因此可以提高資料傳輸容量，但接收性能則比空間分集式技術差。

在第三章說明介紹一自行研發 FPGA 數位系統平台與整合模組所架構成通訊系統平台，達成 MIMO-OFDM 無線通訊系統所需的硬體架構功能，自行研發 FPGA 數位系統平台規劃整合了有 DAC、ADC、RF 與 USB 等模組；在自行研發數位平台是由四個 FPGA 晶片所組合數位系統演算核心，並藉由 DAC 模組與 ADC 模組來做為數位與類比訊號的轉換，然後再透過 RF 模組將基頻訊號調變至射頻訊號後傳送與接收之；最後再藉由 USB 模組來與 PC 的應用軟體做系統控制連結；接著介紹通訊量測儀器，包含了頻譜儀器與向量訊號分析儀器等，最後於各硬體模組在開發過程中，吾人對於需要注意的整合技術與實現使用做一敘述。

在第四章說明在 PC 上使用 BCB6 所發展的通訊系統應用平台，在平台中有兩單元功能，第一為通訊參數的設定介面，包含了檔案與影像的輸出入、RF 晶片設定與通訊系統執行的行程設定等，當經由視窗選單的設定來重新建構 MIMO-OFDM 通訊系統的收發架構，並藉由 USB 模組在與自行研發 FPGA 數位系統平台之整合連結後，完成了 MIMO-OFDM 無線通訊系統之實現；在第二單元功能為使用圖形介面來分析接收機架構中的向量訊號之分析與表示，除了完成實現功能上，在通訊系統應用平台提供了向量訊號分析儀與儲存等功能，經由向量訊號分析儀的分析與檢視，瞭解 MIMO-OFDM 通訊系統接收機的實現過程，另外與多媒體領域的影像處理技術的做一整合應用，可以用來展示說明 MIMO-OFDM 高傳輸率之特色優點；最後對於使用 BCB6 在開發通訊系統應用平台的過程，對於視窗軟體發展時的資源管理問題與用 C 語言完成 MIMO-OFDM 通訊系統演算法的數值問題，提出了一個好的處理模式與方法來解決之。

在未來，第四代無線通訊系統，為了要能因應多媒體資訊及行動通訊多樣化服務的高傳輸速率下，如數位廣播、數位電視與 WiMAX 等最新規範，將使 MIMO-OFDM 技術勢必將成為極具有潛力之關鍵技術之一；在本論文中，吾人自行研發一套通訊系統平台來實現 MIMO-OFDM 通訊技術，除了在完成實現上，吾人可以藉由向量訊號分析儀之分析，來瞭解基頻訊號於接收機的演算過程與性能關鍵，可對於發展更強韌的通訊演算法有所助益；與再由通訊系統平台來完成收發機實現，對於通訊系統的研究與實現上提供了最佳的解決方案，最後再將新演算核心予以加入通訊參數中，使本論文所實現的 MIMO-OFDM 系統能具有可重構無線電之概念。



## 參考文獻

- [1] H. Yang, "A road to future broadband wireless access: MIMO-OFDM-based air interface," *Bell Labs Syst. Tech. J.*, vol. 1, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [2] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, 2000.
- [3] R. W. Chang, "Synthesis of band limited orthogonal signals for multichannel data transmission," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 45, pp. 1745-1796, Dec. 1996.
- [4] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Syst. Tech. J.*, vol. 1, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [5] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, 1998.
- [6] A. F. Naguib and R. Calderbank, "Space-time coding and signal processing for high data rate wireless communications," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, pp.13-34, 2001.
- [7] A. J. Paulraj and C. B. Papadias, "Space-time processing for wireless communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 14, pp. 49-83, Nov. 1997.
- [8] R. D. Murch and K. B. Letaief, "Antenna systems for broadband wireless access," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 40, pp. 76-83, Apr. 2002.
- [9] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi, "Spatio-temporal coding for wireless communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 357-366, Mar. 1998.
- [10] J. Kim and J. Cioffi, "Spatial multiuser access with antenna diversity using singular value decomposition," *IEEE ICC*, vol. 3, pp. 1253-1257, 2000.
- [11] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Trans. Commun.* vol. 16, no.8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

- [12] B. Lu and X. Wang, "Space-time code design in OFDM systems", *IEEE Global Telecommu. Conference*, vol. 2, pp. 1000-1004, Dec. 2000.
- [13] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inform Theory*, vol. 44, pp. 744-756, Mar. 1998.
- [14] A. V. Zelst, "Space division multiplexing algorithms," in *Proc. 10th Mediterranean Electrotech. Conf.*, vol. 3, pp. 1218-1221, 2000.
- [15] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture," *Electronics Letters*, vol. 35, pp. 14-16, Jan. 1999.
- [16] A. V. Zelst and T.C.W. Schenk, "Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, Issue 2, pp. 483 - 494, Feb. 2004.
- [17] P. T. Lee, "DSP Realization of MIMO-OFDM Transceiver and V-BLAST", NCTU, MS. Thesis, Jun. 2003.
- [18] J. W. Huang, "FPGA Realization of MIMO-OFDM Transceiver", NCTU, MS. Thesis, Jun. 2003.
- [19] Y.. Y.. Chen, "FPGA Realization of a MIMO-OFDM System with Optimized Hardware Resource Utilization", NCTU, MS. Thesis, Jun. 2006.
- [20] "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 5 GHZ Band," *IEEE Std. 802.11a*, Sep. 1999.
- [21] A. N. Mody and G. L. Stüber, "Synchronization for MIMO OFDM systems," *IEEE Global Commun. Conf.*, vol. 1, pp. 509-513, Nov. 2001.
- [22] J. Bhasker, *A VHDL Primer*, Prentice Hall, 1998.
- [23] 林傳生, *使用 VHDL 電路設計語言之數位電路設計*, 儒林, 2000.
- [24] 鄭信源, *Verilog 硬體描述語言數位電路設計實務*, 儒林, 2000.
- [25] 國家晶片系統設計中心, *Xilinx (PC)*, 2000.
- [26] 鄭群星, *FPGA/CPLD 數位晶片設計入門使用 Xilinx ISE 發展系統*, 全華, 2005.
- [27] 蔡國瑞, *快速數位系統IC 雛形設計實務-使用VHDL Xilinx ISE6.X*, 學貫行銷, 2005.
- [28] 吳進男, *USB 微控制器理論與實務*, 宏友, 2005.
- [29] 林士靖, *Borland C++ Builder 完全征服手冊*, 松崗, 1997.
- [30] 余明興, *Borland C++ Builder 6 程式設計經典*, 文魁, 2002.

- [31] 繆紹綱，*數位影像處理-活用Matlab*，全華，2000.
- [32] C. Shi, “Statistical method for floating-point to fixed-point conversion,” MS thesis, Electrical Eng. and Computer Science Dept., Univ. of California, Berkeley, 2002.
- [33] W. Sung and K. I. Kum, “Simulation-based word-length optimization method for fixed-point digital signal processing systems,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 43, no. 12, Dec. 1995.
- [34] H. Keding, M. Willems, M. Coors, and H. Meyr, “FRIDGE: A fixed-point design and simulation environment,” *Proc. Design, Automation, and Test in Europe*, pp. 429-435, 1998.
- [35] S. Roy and P. Banerjee, “An algorithm for trading off quantization error with hardware resources for MATLAB-based FPGA design,” *IEEE Trans. Computers*, vol. 54, Issue 7, pp. 886 – 896, Jul. 2005.

