

# 國立交通大學

電信工程學系

碩士論文



基於 MIMO-OFDM 無線區域網路頻寬效能上的配對  
策略

A Bandwidth Efficient Pairing Strategy for the  
MIMO-OFDM Based WLANs

研究生：黃明智

指導教授：李程輝 教授

中華民國九十七年十月

基於 MIMO-OFDM 無線區域網路頻寬效能上的配對策略  
**A Bandwidth Efficient Pairing Strategy for the MIMO-OFDM Based  
WLANs**

研究生：黃明智

Student: Ming-Chih Huang

指導教授：李程輝 教授

Advisor: Dr. Tsern-Huei Lee



Submitted to Department of Communications Engineering  
College of Electrical and Computer Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
In

Communications Engineering

October 2008

HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年十月

# 基於 MIMO-OFDM 無線區域網路頻寬效能上的配對策略

學生：黃明智

指導教授：李程輝 教授

國立交通大學電信工程學系碩士班

## 摘要

多使用者 MIMO-OFDM 架構可以提高頻寬的使用效率以及讓多個使用者同時與 AP 溝通且有少量的干擾。本論文以 AP 有兩根天線和使用者有一根天線的硬體架構為主，在 MAC 層提出三種演算法。此三種演算法為最大總和速率、最小時間差和最大平均吞吐量。它們可以找到適當的配對去存取 AP 以增進多使用者的多樣性增益。演算法根據 AP 與使用者間在 ATIM 區間交換的訊息選擇最佳的配對。下載連結和上載連結的資料傳輸在資料傳輸區間完成。最後在模擬的結果可以證明三種演算法和其他協定比較下有較佳的吞吐量和較低的能量消耗。

# **A Bandwidth Efficient Pairing Strategy for the MIMO-OFDM Based WLANs**

**Student: Ming-Chih Huang**

**Advisor: Dr. Tsern-Huei Lee**

**Department of Communications Engineering**

**National Chiao Tung University**

## **Abstract**

The multiuser MIMO-OFDM architecture can improve bandwidth efficiency and let many users communicate with the access point (AP) simultaneously with a little interference. This thesis proposes three different algorithms on MAC layer based on the architecture whose AP has two antennas and users have one antenna. The three algorithms are Max. Sum Rate, Min. Time Differences and Max. Average Throughput. They can find proper pairs to access the AP in order to improve multiuser diversity gain. The three algorithms choose the best pair according to the messages that are exchanged between AP and users during ATIM (Ad-hoc Traffic Indication Message) window. The data transmissions of downlinks or uplinks are completed in data transmission window. Finally, the simulation results demonstrate that the three algorithms compared with the other protocol have better throughput and lower energy consumption.

## 誌謝

感謝李程輝老師、景融學長、郁文學長、迺倫學姊以及勁文同學、耀誼同學在我研究所期間細心的指導和幫忙，讓我在專業領域上有更進一步的成長，才能順利完成論文的寫作。另外從做研究的過程中也讓我學到做事態度和責任，對於往後的人生更是莫大的幫助。還有感謝鈞傑、松晏、佑信、俊德、家豪學弟們，帶給實驗室歡熱的氣氛，讓實驗室有一家人的感覺。

此外感謝我的家人，提供我的生活上的資助，讓我能在研究所這段期間無後顧之憂的專心唸書，以及家人的支持和鼓勵，陪我度過心情上的低潮，順利完成學業。



# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
符號說明.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 章節介紹.....	3
第二章 多使用者 MIMO-OFDM 系統之相關工作.....	4
2.1 多使用者 MIMO-OFDM 實體層運作方法.....	4
2.1.1 接收端的訊號干擾雜訊比.....	7
2.2 媒介存取控制(MAC)層運作方法.....	10
2.2.1 IEEE 802.11 省電機制.....	10
2.2.2 PSM-MIMO/OFDM.....	12
第三章 提高系統效能之演算法.....	17
3.1 演算法之介紹與分析.....	17
3.1.1 選擇配對的原則.....	17
3.1.2 演算法流程.....	18
3.1.3 資料傳輸時間.....	21
3.2 演算法之優缺點.....	22
第四章 模擬結果之比較與分析.....	27

4.1 模擬環境.....	27
4.1.1 Rayleigh processes.....	27
4.1.2 系統環境和參數.....	28
4.2 模擬結果.....	29
第五章 結論與未來展望.....	35
參考文獻.....	36
簡歷.....	37



## 表目錄

表 1 配對後的資料速率和資料速率總和 .....	20
表 2 最大總和速率演算法選擇配對的結果 .....	21
表 3 A 到 F 緩衝區裡的封包數 .....	22
表 4 配對後的資料傳輸時間和最大資料傳輸間 .....	22
表 5 AP 針對每一組配對所花費的資料傳輸時間 .....	22
表 6 系統參數 .....	29
表 7 使用者個數和配對數 .....	31
表 8 演算法提供可選擇的配對數 .....	32



## 圖目錄

圖 1 多使用者 MIMO-OFDM 傳輸架構.....	4
圖 2 使用者和 AP 間之傳輸架構.....	7
圖 3 兩個使用者間之通道增益向量的關係圖(a)接近互相平行(b)接近互相正交.....	8
圖 4 IEEE 802.11 的省電機制.....	11
圖 5 IEEE 802.11 信標產生的方式.....	11
圖 6 PSM-MIMO/OFDM 協定.....	12
圖 7 改良式 PSM-MIMO/OFDM 協定.....	18
圖 8 通道增益向量間的關係.....	19
圖 9 平均吞吐量.....	30
圖 10 平均能量消耗.....	33



## 符號說明

$h_{i,n}$  : channel gain vector

$b_{i,n}$  : transmission signature

$R_i$  : data rate

$O_i$  : the number of packets in the buffer

$t_{i,p}$  : data transmission time



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

以目前的無線網路系統而言，最主要的研究方向是如何提高系統的吞吐量(throughput)以及能量使用效能，但是由於一些因素造成無線網路系統在這方面無法有更進一步的提升，例如無線網路中常會存在的干擾源、無線通道造成的訊號衰減等不利系統效能的因子，因此需要發展出新的硬體架構來克服這些問題，此外還必須有適當的機制來協調多個使用者(user)存取相同的無線通道，才能利於無線通道的存取效率，達到高吞吐量和低功耗的需求。



此新的硬體架構為結合多重輸入多重輸出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技術和正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技術。利用MIMO的多天線特性可以得到多樣性增益(diversity gain)和載量增益(capacity gain)，其中載量增益為不相同的天線分別送收不相同的資料，也就是達到增加傳輸量的目的，所以當這些資料屬於不同的使用者時，此系統便能同時讓多個使用者在相同的載波上送收資料，但是必須先克服使用者彼此之間造成的干擾。而OFDM為目前無線網路系統常用的技術，如IEEE 802.11a等。OFDM的好處為有效的使用頻寬以及能克服無線通道造成的符號間干擾(inter-symbol interference)[1]。結合這兩樣技術，也就是MIMO-OFDM，便可以有高吞吐量和抵抗無線環境造成的干擾。

在MIMO-OFDM的技術上讓多使用者同時收發資料，就必須先排除同通道干擾

(co-channel interference)的問題。在[2]中利用傳送識別標誌(transmission signature)也就是傳送波束(transmit beamforming)[3]技巧來達到消除同通道干擾的目的，因此存取點 (Access Point, AP)在 MIMO-OFDM 的技術下便可以同時和多個使用者做下載連結 (downlink)，也就是 AP 傳送資料給使用者，或是上載連結(uplink)，使用者傳送資料給 AP。在媒體存取控制層(Medium Access Control Layer, MAC)上則必須有一個協定來選擇哪些使用者適合同時存取無線通道，才能提高無線通道的使用效率，以至於增加每個使用者的吞吐量，而達到多使用者的多樣性增益(multiuser diversity gain)。

PSM-MIMO/OFDM 是在[2]中所提出的 MAC 層的協定，它是像 IEEE 802.11 的分散式協調功能(Distribution Coordination Function, DCF)[4]模式，具有省電機制(Power-Saving Mechanism, PSM)，除了可以省 AP 的能量，也可以從多個候選人中找出合適的多組配對(pair)的使用者，每一組配對都以較大的子載波通道載量(channel capacity)總和決定配對，再和 AP 做上載連結或是下載連結，但是 PSM-MIMO/OFDM 在多使用者的多樣性增益方面仍然有進步的空間，因此本論文的研究主要以 PSM-MIMO/OFDM 下的實體層硬體架構為基礎，在 MAC 層提出新的演算法，更進一步提升多使用者的多樣性增益。

要讓每一對配對後的使用者分別與 AP 同時傳輸資料，在 MAC 層就必須完成配對的組合。如何選擇配對，在這裡主要提出三種選擇的演算法，分別是最大總和速率(Max. Sum Rate)、最小時間差(Min. Time Differences)、最大平均吞吐量(Max. Average Throughput)，不同於 PSM-MIMO/OFDM 是依據配對後的最大子載波通道載量總和來選擇配對，有較多的優點。此外三種演算法提供選擇的配對數量方面，相較於

PSM-MIMO/OFDM 提供可選擇的配對數是有限組的情況下，可以找出所有可能的配對方式，如此才能從中找到較佳的配對組合和 AP 作資料傳輸。AP 和使用者之間會在隨意網路流量指示訊息(Ad-hoc Traffic Indication Message, ATIM)視窗期間作訊息的交換，AP 則會透過這些訊息，依據所提出的三種演算法來選擇配對。在選擇配對完成後，AP 會根據這些成功配對完成的配對數來調整 AP 的資料傳輸時間的長短，所以 AP 的信標區間(beacon interval)長度是可以調整的。在這樣的情況下才可以減少 AP 在資料傳輸時間的閒置時間，降低電力的消耗。最後從模擬的比較結果，所提出的三種新的演算法在省電和吞吐量方面，與 PSM-MIMO/OFDM 相比較下都有明顯的改進。

## 1.2 章節介紹

接下來的章節中，第二章主要是介紹多使用者 MIMO-OFDM 實體層相關工作的運作方式以及對 PSM-MIMO/OFDM 的介紹，第三章則是針對本論文提出的方法做詳細的分析與介紹，第四章是模擬結果的比較，最後第五章為結論和未來展望。

## 第二章 多使用者 MIMO-OFDM 系統之相關工作

本論文的研究主要是基於[2]所提出的硬體架構改進 PSM-MIMO/OFDM 協定，因此在本章將針對硬體架構和 PSM-MIMO/OFDM 做介紹。

### 2.1 多使用者 MIMO-OFDM 實體層運作方法

多個使用者同時透過無線通道與 AP 作資料傳輸時，彼此之間一定會造成干擾，所以需要設計一個架構讓干擾消除。這裡主要針對兩個使用者在同時存取 AP 時如何對彼此的干擾免疫。

在圖 1 中可以看到 AP 為两根天線，兩個使用者分別為一根天線，AP 的两根天線分別和兩個使用者傳輸資料，也就是 AP 的第一根天線負責使用者一的資料送收，第二根天線則負責使用者二，AP 可以同時和兩個使用者做下載連結或是上載連結。其中使用者一和 AP 間的通道增益(channel gain)為  $h_{1,n}$ ，使用者二則為  $h_{2,n}$ 。 $h_{i,n}$  為二維的向量，即  $[h_{i,n}^1, h_{i,n}^2]^T$  ( $i=1,2$  且  $n=1,\dots,N$ )，向量中的兩個元素皆為複數，其中  $i$  表示使用者， $n$  表示 OFDM 中的子載波，總共有  $N$  個子載波，而上標 1 表示針對 AP 第一根天線的無線通道，上標 2 表示針對 AP 第二根天線的無線通道。

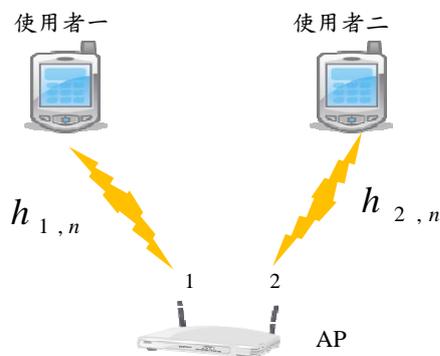


圖 1 多使用者 MIMO-OFDM 傳輸架構

在下載連結的情況下，使用者收到的訊號，在頻率域的數學式可以表示為：

$$\begin{cases} y_{1,n} = h_{1,n}^* x_n + w_n \\ y_{2,n} = h_{2,n}^* x_n + w_n \end{cases} \quad (2-1)$$

其中  $w_n$  表示在子載波  $n$  上的可加性白高斯雜訊(Additive White Gaussian Noise，

AWGN)， $y_{i,n}$  ( $i=1,2$ ) 表示使用者  $i$  收到的訊號，其中  $x_n$  包含 AP 傳給使用者一和使用者

二的資料，是一個二維向量，表示如下：

$$x_n = x_{1,n} b_{1,n} + x_{2,n} b_{2,n} = x_{1,n} \begin{bmatrix} b_{1,n}^1 \\ b_{1,n}^2 \end{bmatrix} + x_{2,n} \begin{bmatrix} b_{2,n}^1 \\ b_{2,n}^2 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$x_{1,n}$  是 AP 傳送給使用者一在子載波  $n$  的資料， $x_{2,n}$  則是 AP 傳送給使用者二在子載波  $n$

的資料， $b_{i,n}$  為 AP 針對使用者  $i$  在子載波  $n$  設計的傳送識別標誌，主要是用來消除兩個

使用者彼此造成的干擾，是一個二維向量，寫成  $[b_{i,n}^1, b_{i,n}^2]^T$  ( $i=1,2$ )，同樣地，上標 1 表示

針對 AP 第一根天線，上標 2 則針對第二根天線。將(2-2)式帶入(2-1)式後，可以寫成：

$$\begin{cases} y_{1,n} = (h_{1,n}^* b_{1,n}^1) x_{1,n} + (h_{1,n}^* b_{2,n}^1) x_{2,n} + w_n \\ y_{2,n} = (h_{2,n}^* b_{1,n}^2) x_{1,n} + (h_{2,n}^* b_{2,n}^2) x_{2,n} + w_n \end{cases} \quad (2-3)$$

從(2-3)式可以看到，假設  $h_{1,n}^* b_{2,n}^1$  和  $h_{2,n}^* b_{1,n}^2$  內積(inner product)的結果皆為零，就可以消除

使用者一和使用者二彼此的干擾，如(2-4)式所示：

$$\begin{cases} y_{1,n} = (h_{1,n}^* b_{1,n}^1) x_{1,n} + w_n \\ y_{2,n} = (h_{2,n}^* b_{2,n}^2) x_{2,n} + w_n \end{cases} \quad (2-4)$$

再將接收到的訊號分別除以  $h_{1,n}^* b_{1,n}$  和  $h_{2,n}^* b_{2,n}$ ，兩個使用者就可以各自得到在子載波  $n$  上的資料，而且不會互相干擾，假設訊號功率遠大於雜訊功率時。

當兩個向量內積為零時，表示兩個向量彼此成正交(orthogonal)，所以要讓  $h_{1,n}^* b_{2,n}$  和  $h_{2,n}^* b_{1,n}$  內積的結果皆成正交， $b_{1,n}$  必須在和  $h_{2,n}$  正交的平面上，而  $b_{2,n}$  在和  $h_{1,n}$  正交的平面上，因此設計傳送識別標誌  $b_{1,n}$  為  $h_{1,n}$  在  $h_{2,n}$  向量上的單位垂直分量， $b_{2,n}$  為  $h_{2,n}$  在  $h_{1,n}$  向量上的單位垂直分量。計算方式為：

$$\begin{cases} \hat{b}_{1,n} = h_{1,n} - \frac{\langle h_{1,n}, h_{2,n} \rangle}{\langle h_{2,n}, h_{2,n} \rangle} h_{2,n} \\ \hat{b}_{2,n} = h_{2,n} - \frac{\langle h_{1,n}, h_{2,n} \rangle}{\langle h_{1,n}, h_{1,n} \rangle} h_{1,n} \end{cases} \quad (2-5)$$

(2-5)式的計算方法就是 Gram-Schmidt 程序[5]，再將(2-5)式的結果單位化，如(2-6)式所示，即可以得到兩個使用者針對子載波  $n$  上的傳送識別標誌。

$$b_{1,n} = \frac{\hat{b}_{1,n}}{\|\hat{b}_{1,n}\|}, b_{2,n} = \frac{\hat{b}_{2,n}}{\|\hat{b}_{2,n}\|} \quad (2-6)$$

傳送識別標誌是由 AP 根據配對後的兩個使用者的無線通道增益計算而得。在下載連結時，AP 傳送資料給使用者前，會先將資料乘上傳送識別標誌後再送出。同樣地，在上載連結時，AP 會將收到的資料乘上傳送識別標誌後，才能正確收到使用者所送的資料，因此上載連結可以寫成(2-7)式所示。

$$\begin{cases} y_{1,n} = b_{1,n}^* \cdot \left[ \sum_{j=1}^2 (h_{j,n} x_{j,n}) + w_n \right] = b_{1,n}^* h_{1,n} x_{1,n} + w'_n \\ y_{2,n} = b_{2,n}^* \cdot \left[ \sum_{j=1}^2 (h_{j,n} x_{j,n}) + w_n \right] = b_{2,n}^* h_{2,n} x_{2,n} + w'_n \end{cases} \quad (2-7)$$

### 2.1.1 接收端的訊號干擾雜訊比

從(2-4)和(2-7)式可以看到接收的訊號包含通道增益、傳送識別標誌以及資料本

身，所以訊號的功率(power)大小為：

$$P_{i,n} \|h_{i,n}^* b_{i,n}\|^2 \quad (2-8)$$

假設  $P_{i,n}$  為 AP 傳送資料給使用者 i 在子載波 n 上所花的功率，而且相等於上載連結時，

使用者 i 在子載波 n 上傳送資料給 AP 所花的功率，因此在下載連結或是上載連結的情

況下訊號干擾雜訊比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)可以寫成：

$$SINR_{i,n} = \frac{P_{i,n} \|h_{i,n}^* b_{i,n}\|^2}{W_{i,n} + \sum_{i \neq j} P_{j,n} \|h_{j,n}^* b_{i,n}\|^2} = \frac{P_{i,n} \|h_{i,n}^* b_{i,n}\|^2}{W_{i,n}} \quad (2-9)$$

(2-9)式為接收端在子載波 n 上的訊號干擾雜訊比。其中  $h_{j,n}^* b_{i,n}$  因為正交的關係結果為

零。在(2-9)式中可以觀察到 SINR 的大小除了和傳送資料的功率以及雜訊功率有關外，

也和通道增益、傳送識別標誌兩個向量內積後的值有關。接下來就針對通道增益和傳送

識別標對 SINR 的影響做分析。

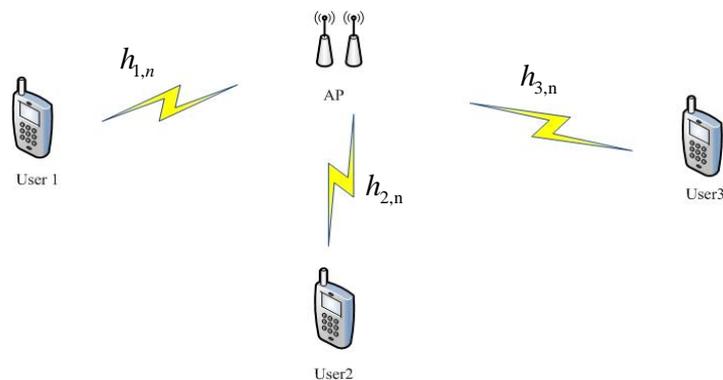


圖 2 使用者和 AP 間之傳輸架構

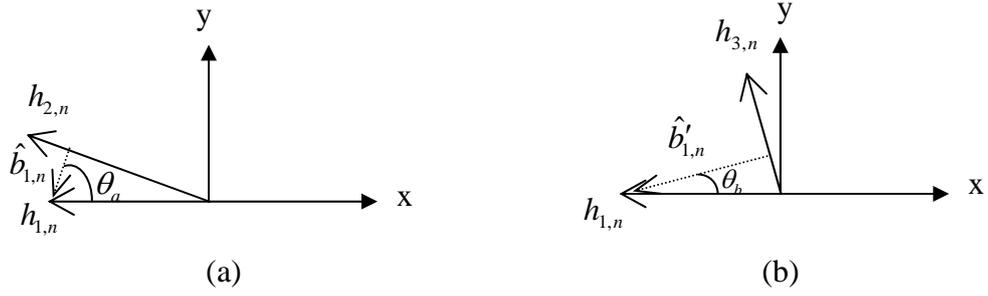


圖 3 兩個使用者間之通道增益向量的關係圖(a)接近互相平行(b)接近互相正交

以圖 2 為例，有三個使用者和一個 AP，每個使用者和 AP 間在子載波  $n$  的通道增益向量皆不同，假設子載波  $n$  上的通道增益向量中兩個元素為實數，方向和大小如圖 3 所示，其中圖 3(a)兩個使用者的通道增益向量接近互相平行，利用(2-5)式的算法可以求得  $h_{1,n}$  在  $h_{2,n}$  上的垂直分量  $\hat{b}_{1,n}$ 。圖 3(b)中兩個通道增益向量接近互相正交，同樣地利用(2-5)式求得  $h_{1,n}$  在  $h_{3,n}$  上的垂直分量  $\hat{b}'_{1,n}$ ，再將  $\hat{b}_{1,n}$  和  $\hat{b}'_{1,n}$  分別作單位化，便可得到  $b_{1,n}$  和  $b'_{1,n}$ 。兩圖中使用者一的訊號功率的表示式如同(2-8)式，分別為  $P_{1,n} \|h_{1,n}^* b_{1,n}\|^2$  和  $P_{1,n} \|h_{1,n}^* b'_{1,n}\|^2$ 。

$h_{1,n}$  和  $b_{1,n}$  的夾角等於  $h_{1,n}$  和  $\hat{b}_{1,n}$  間的夾角，在圖 3(a)中以  $\theta_a$  表示，另外  $h_{1,n}$  和  $b'_{1,n}$  的夾角等於  $h_{1,n}$  和  $\hat{b}'_{1,n}$  間的夾角，在圖 3(b)中以  $\theta_b$  表示，從兩圖中可以觀察到  $\theta_a > \theta_b$ ，不等式兩邊分別取餘弦(cos)，所以可以推得如下：

$$\cos \theta_a < \cos \theta_b \quad (2-10)$$

再依據兩向量夾角公式[5]，將(2-10)式改寫成：

$$\cos \theta_a = \frac{h_{1,n}^* b_{1,n}}{\|h_{1,n}\| \times \|b_{1,n}\|} < \cos \theta_b = \frac{h_{1,n}^* b'_{1,n}}{\|h_{1,n}\| \times \|b'_{1,n}\|} \quad (2-11)$$

因為  $\|b_{1,n}\| = \|b'_{1,n}\| = 1$ ，帶入(2-11)式後，則得到(2-12)式：

$$\frac{h_{1,n}^* b_{1,n}}{\|h_{1,n}\|} < \frac{h_{1,n}^* b'_{1,n}}{\|h_{1,n}\|} \quad (2-12)$$

且  $\|h_{1,n}\| = \|h_{1,n}\|$ ，最後的結果為：

$$h_{1,n}^* b_{1,n} < h_{1,n}^* b'_{1,n} \quad (2-13)$$

從(2-13)式可以推得到圖 3(a)和圖 3(b)兩種情況下的訊號功率大小的關係，為：

$$P_{1,n} \|h_{1,n}^* b_{1,n}\|^2 < P_{1,n} \|h_{1,n}^* b'_{1,n}\|^2 \quad (2-14)$$

所以兩個使用者的通道增益向量方向對彼此的 SINR 有明顯的影響，當和自己的通道增益向量方向接近正交的使用者配成一對時，可以得到較大的訊號功率；當和自己的通道增益向量方向接近平行狀態的使用者配成一對時，自己的訊號功率大小會比較小。

從以上的結果可以發現，只要適當的選擇配對，讓兩個使用者在所有的子載波上有較大的 SINR，就會得到較高的資料速率(data rate)來同時上載連結或是下載連結，也因此整個系統才會有較大的吞吐量。除此之外，不論上載連結或是下載連結，接收端子載波上的 SINR 和訊號的功率大小大於一定的門檻時，才能正確無誤地接收資料，如(2-15)式所示：

$$\begin{cases} SINR_{i,n} \geq SINR_{th}, \text{ for } i=1,2; n=1,2\dots N \\ P'_{i,n} = P_{i,n} \cdot \|h_{i,n}^* b_{i,n}\|^2 \geq P_{th}, \text{ for } i=1,2; n=1,2\dots N \end{cases} \quad (2-15)$$

其中  $SINR_{th}$  為接收端可以正確接收資料的最低訊號干擾雜訊比， $P_{th}$  為最低可以正確接收資料的功率大小， $SINR_{i,n}$  為接收端在子載波  $n$  的訊號干擾雜訊比，也就是(2-9)式所示， $P'_{i,n}$  為接收端在子載波  $n$  上的訊號功率。

所以如何選擇適當的配對，在 MAC 層就必須設計出一套協定，接下來的章節對 PSM-MIMO/OFDM 協定做詳細的介紹。

## 2.2 媒介存取控制(MAC)層運作方法

由於[2]提出的協定主要是基於 IEEE 802.11 獨立式基本服務組合(Independent Basic Service Set, IBSS)[4]的省電機制，因此對於此省電機制如何運作，以下將做初步的說明。

### 2.2.1 IEEE 802.11 省電機制



圖 4 是 IEEE 802.11 在獨立式基本服務組合下的省電機制，橫軸代表時間，縱軸代表使用者，總共有三位使用者。時間軸以一個信標區間為單位，周而復始地重複出現，信標區間又分為 ATIM 區間(ATIM window)和資料傳輸區間(data transmission)，每個使用者皆同步化，所以所有使用者的 ATIM 區間和資料傳輸區間的時間間隔都一致。在 ATIM 區間的起始點，每個使用者都會傳送信標(beacon)，信標的用途主要是同步用，開始傳送前會有一個延後(backoff)的計時器，延後計時器是一個介於零到兩倍最短競爭時間(minimum contention window)的隨機值，誰先倒數到零就有優先權傳送信標，其他還未倒數到零的使用者則終止倒數並停止傳送信標。如圖 5 所示，使用者一先結束延後計時器的倒數計時，因此可以傳送信標，使用者二和使用者三則停止倒數，並且取消傳送信標。

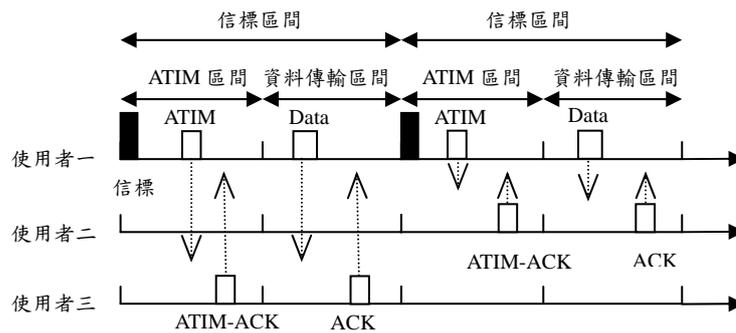


圖 4 IEEE 802.11 的省電機制

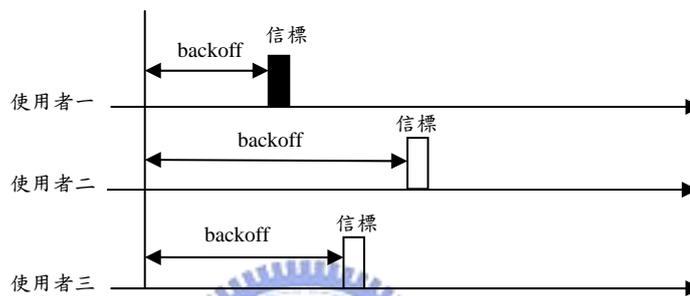


圖 5 IEEE 802.11 信標產生的方式

以圖 4 為例子，所有使用者在 ATIM 區間都維持清醒的狀態，假設使用者一都搶到傳送信標的機會，當使用者一要傳送資料給使用者三時會先傳送 ATIM 給使用者三，使用者三收到後回傳 ATIM-ACK 給使用者一，確認有收到使用者一送的 ATIM，並在接下來的資料傳輸區間維持醒著狀態，等待接收使用者一所傳送的資料，此時使用者二因為沒有收到 ATIM，在進入資料傳輸區間後便會進入睡眠狀態來達到省電的目的。使用者一收到回傳的 ATIM-ACK 後，便可以在資料傳輸區間傳送資料給使用者三，當使用者三收到資料後，回傳 ACK 給使用者一。不論是傳送 ATIM、ATIM-ACK、資料或是 ACK 等都是用 DCF 的方式。同樣地，當使用者一有資料要傳給使用者二時，在 ATIM 區間透過 ATIM 和 ATIM-ACK 交換後，確認彼此的送收關係，在資料傳輸區間開始傳

送資料，此時使用者三則進入睡眠狀態。

### 2.2.2 PSM-MIMO/OFDM

[2]所提出的 PSM-MIMO/OFDM 的機制就是參考 IEEE 802.11 IBSS 情況下的省電機制，同樣有信標區間，在信標區間又分為 ATIM 區間和資料傳輸區間，如圖 6 所示，此圖是以 AP 的觀點來看。在 ATIM 區間所有使用者都維持醒著，AP 和使用者間透過控制訊號，如 GATIM 等，來交換訊息，在資料傳輸區間，則是傳送資料。ATIM 區間起始點會傳送信標，是用來做 AP 和使用者間的同步化。

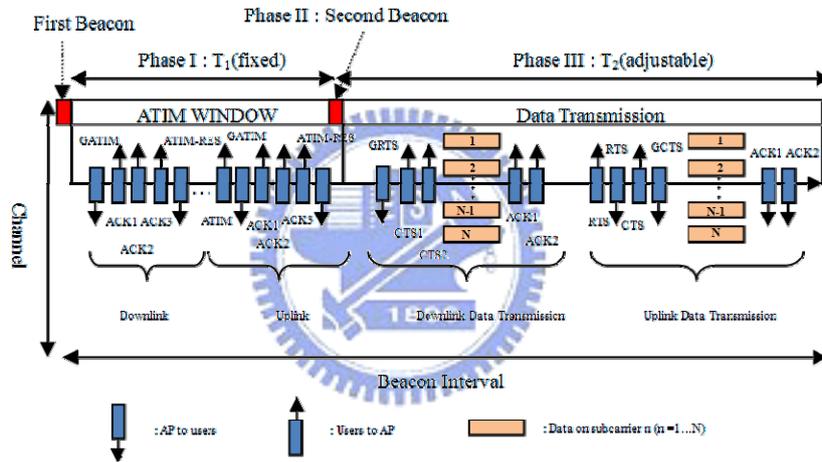


圖 6 PSM-MIMO/OFDM 協定

資料來源[2]

由於 AP 為兩根天線，使用者為一根天線，因此可以讓一對使用者和 AP 同時下載連結或是上載連結。下載連結時，AP 會先從有資料存放在 AP 的使用者中選出幾位候選人，以圖 6 為例，AP 每次會以知更鳥式循環(round robin)排程法選出三位候選人，然後透過 GATIM(Group ATIM)告知這三位候選人，當三位候選人都收到 GATIM 後，分別回傳 ACK 給 AP，此時根據組合公式(combination formula)，便可以得到三組的配對，供 AP 去選擇，如(2-16)式所示：

$$C_2^3 = \frac{3!}{2!(3-2)!} = 3 \quad (2-16)$$

AP 則依據最大載量(maximum capacity)原則，如(2-17)式所示，以及符合(2-15)式的情況下選出一組配對。

$$\max_{(i,j)} \sum_{n=1}^N c_n \cdot \log \left[ \left(1 + \frac{P_{i,n} \|b_{i,n}^* h_{i,n}\|^2}{w_{i,n}}\right) \left(1 + \frac{P_{j,n} \|b_{j,n}^* h_{j,n}\|^2}{w_{j,n}}\right) \right] \quad (2-17)$$

上式中  $c_n$  為在子載波  $n$  上的比重系數。之後，將選出的結果透過 ATIM-RES 告知兩個使用者。第二組以上的配對選擇方式也是一樣，直到 ATIM 區間結束為止。

在上載連結時，需要上載連結的使用者會先送出 ATIM 給 AP，AP 收到後同樣會以知更鳥式循環排程法找出三位候選人，幫要上載連結的使用者配對，AP 再透過 GATIM 告知這三位候選人，這三位候選人收到後分別回傳 ACK 給 AP，所以總共有三組配對方式，再依據(2-17)和(2-15)式選擇出一組最佳的配對，最後透過 ATIM-RES 告知這兩個使用者。假如還有第二個以上的使用者要上載連結，也是以同樣的方式選擇配對，直到 ATIM 區間結束為止。這方法的缺點為不保證 AP 幫需要上載連結的使用者所找的配對有資料要送給 AP，此時便會造成吞吐量的下降，以及空間自由度(spatial degrees of freedom)的浪費。

ATIM 區間是固定的，所有在 ATIM 區間傳送的訊息，如 GATIM、ATIM、ACK 等都是以前述方式透過無線通道傳送出去，在 ATIM 區間結束後，AP 就可以知道有幾組

的配對是要做下載連結或是上載連結。資料傳輸區則會根據這些配對成功的配對數動態調整資料傳輸區間的時間，成功的配對數越多，資料傳輸區就越長，相反的就越短，此做法的優點為減少 AP 處在閒置(idle)的狀態，避免能量的浪費，也可以提升系統的吞吐量。圖 6 中的第二個信標的用途除了和使用者做同步用外，同時告知所有使用者資料傳輸區的大小。

AP 為了避免在資料傳輸區傳送資料時產生碰撞，會紀錄每一組配對上載連結或是下載連結的起始時間，並且透過第二個信標告知使用者。計算起始時間的方式為：

$$ts_p = ts_{p-1} + t_{data}^{dl} \cdot \alpha_{p-1} + t_{data}^{ul} \cdot (1 - \alpha_{p-1}) \quad p = 1, 2, \dots, K \quad (2-18)$$

其中  $ts_p$  為第  $p$  組配對的起始時間， $t_{data}^{dl}$  為下載連結的時間， $t_{data}^{ul}$  為上載連結的時間，當  $\alpha_p = 1$  時表示第  $p$  組配對為下載連結，當  $\alpha_p = 0$  表示第  $p$  組配對為上載連結， $K$  則是總配對數，因此從(2-18)式可以看到，目前配對的連結的起始時間為前一組配對的起始時間加上前一組配對的連結時間，如果前一組配對為上載連結，則加上上載連結的時間，反之，則加上下載連結的時間。上載連結和下載連結的時間計算方式為控制訊號的傳送時間加傳送資料所需要的時間  $t_d$ ，再加上所花的時間間隔，在圖 6 中以下載連結為例，所需要花的時間為：

$$t_{data}^{dl} = DIFS + GRTS + 2CTS + 2ACK + 5SIFS + t_d \quad (2-19)$$

其中 DIFS 為分散式訊框間隔(Distributed Inter-Frame Space, DIFS)，SIFS 為短訊框間隔

(Short Inter-Frame Space, SIFS)[4]。AP 等一個 DIFS 時間後，傳送 GRTS(Group RTS)給配對成功的兩個使用者，兩個使用者收到後分別回傳 CTS 給 AP，完成 RTS 和 CTS[4]交換後，AP 同時傳送資料給這一組配對的兩個使用者，兩個使用者成功收到資料後各自回傳 ACK 給 AP，便完成下載連結。除了一開始須等 DIFS 的時間外，其他訊息交換的間隔皆為 SIFS 的長度。另外以圖 6 中的上載連結為例，所花的時間為：

$$t_{data}^{ul} = DIFS + 2RTS + CTS + GCTS + 2ACK + 6SIFS + t_d \quad (2-20)$$

要上載連結的使用者會先等一段 DIFS 的時間後，傳 RTS 給 AP，AP 收到後會傳送同樣是 RTS 給另一個使用者，也就是 AP 所找的另一個使用者，此使用者收到 RTS 後，回傳 CTS 給 AP，接下來 AP 便會送出 GCTS(Group CTS)給兩個使用者，完成這些動作後，兩個使用者就可以同時上載資料給 AP，AP 收到後資料後，分別對兩個使用者回傳 ACK，以確認資料正確接收。

傳送資料的方式是採用封包連續(Packet Concatenation, PAC)的方式[6]，也就是連續傳送多個封包後，接收端才回傳一個 ACK，此方法的優點為減少 ACK 封包的傳送以及等待 SIFS 時間所造成的吞吐量的下降，另外為了讓每一個使用者存取 AP 的時間都相同，以便達到公平性，因此規定每個使用者最多可以連續傳送的封包數為：

$$\left\lfloor \frac{R_i}{R_{base}} \right\rfloor \quad (2-21)$$

$R_i$  為使用者  $i$  和 AP 間目前使用的資料速率， $R_{base}$  為系統的基本資料速率，將兩個比值

取最大整數值(floor function)，就是每個使用者最多可以傳送的封包數[7]。兩個使用者配成一對後，AP 針對每一組配對的總資料傳輸時間以最長的傳輸時間為依據，如下式所示：

$$t_d = \max\left\{E(l) \cdot \left\lfloor \frac{R_i}{R_{base}} \right\rfloor / R_i, E(l) \cdot \left\lfloor \frac{R_j}{R_{base}} \right\rfloor / R_j\right\} \quad (2-22)$$

$E(l)$  為一個封包的平均長度， $i$  和  $j$  表示一組配對中的兩個使用者。每一組配對在資料傳輸區間將資料傳輸完畢後，就會進入睡眠狀態，直到下一個信標區間的 ATIM 區間才會醒來。

當使用者的緩衝區(buffer)裡的封包數沒有超過(2-21)式所規定的最大值時，會讓 AP 處在閒置的狀態，直到  $t_d$  結束為止，但是如果根據使用者的緩衝區裡有多少封包就計算有多長的傳輸時間，便會失去公平性。為了讓 AP 能減少閒置的時間，本論文不探討公平性的問題，因此提出的演算法和模擬的過程中不考慮(2-21)式定義的最大可傳輸的封包數。此外，由於 PSM-MIMO/OFDM 在選擇配對時只考慮到(2-17)式的最大載量和(2-15)式，並沒有考慮子載波上最小 SINR 實際可行的資料速率，因此在吞吐量和能量使用效率方面仍有改進的空間，在下一章裡針對提出的演算法如何達到提升系統的吞吐量和省電的目的，做詳細的分析。

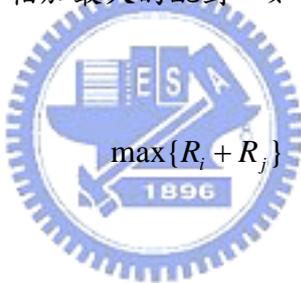
## 第三章 提高系統效能之演算法

### 3.1 演算法之介紹與分析

提出的演算法同樣是以第二章所提的硬體架構為基礎，也就是 AP 有兩個天線，使用者各為一根天線，AP 可以同時和兩個使用者上載連結或下載連結。演算法主要分為兩個部分，第一個部分為選擇配對的原則，第二個部分為演算法的流程。

#### 3.1.1 選擇配對的原則

選擇配對的原則分為三種原則，第一種為最大總和速率(Max. Sum Rate)，也就是找配對後兩個使用者的資料速率相加最大的配對，如下所示：


$$\max\{R_i + R_j\}$$

(3-1)

其中  $R_i$  為使用者  $i$  的資料速率， $R_j$  為使用者  $j$  的資料速率。此原則相較於

PSM-MIMO/OFDM 以子載波上通道載量相加最大的原則，也就是(2-17)式，計算上較為簡單，不需計算子載波上的通道載量，只需知道接收端子載波上最小的 SINR，並求出所對應的資料速率即可，所以在選擇配對上，有實際考慮到無線通道可行的資料速率。

第二種原則則是最小時間差(Min. Time Differences)，主要是根據兩個使用者的資料傳輸時間差距最小為原則，計算方式如下所示：

$$\min\left\{\left|\frac{O_i \times \text{Packet\_size}}{R_i} - \frac{O_j \times \text{Packet\_size}}{R_j}\right|\right\}$$

(3-2)

其中  $O_i$  為使用者  $i$  在緩衝區(buffer)裡的封包數量， $O_j$  為使用者  $j$  在緩衝區裡的封包數量，將封包數量乘上封包大小再除以資料速率即是資料傳輸時間。此方法和(3-1)式比較較為複雜，必須考慮到緩衝區裡的封包數。

第三種原則為最大平均吞吐量(Max. Average Throughput)，如下所示：

$$\max \left\{ \frac{(O_i + O_j) \times Packet\_size}{\max \left\{ \frac{O_i \times Packet\_size}{R_i}, \frac{O_j \times Packet\_size}{R_j} \right\}} \right\} \quad (3-3)$$

此計算方式更為複雜，除了必須考慮緩衝區裡的封包數和計算資料傳輸時間外，還必須計算配對後的吞吐量。(3-3)式中的分子為兩個使用者的總資料大小，分母為配對中最大的資料傳輸時間，計算後的結果就是一組配對的吞吐量大小。

### 3.1.2 演算法流程

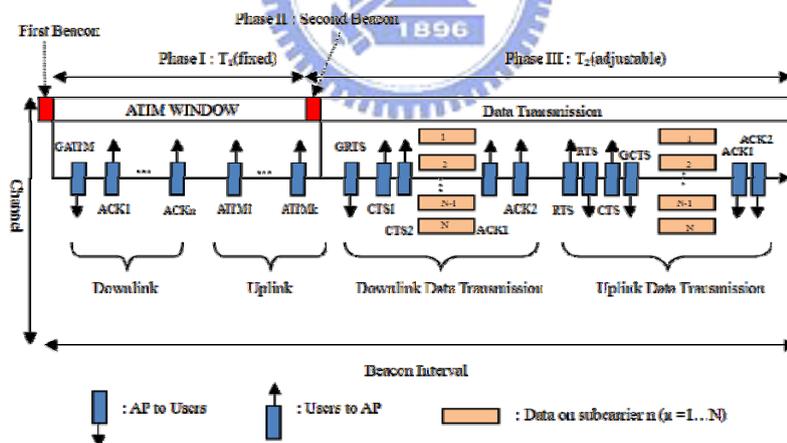


圖 7 改良式 PSM-MIMO/OFDM 協定

配對的產生方式以圖 7 的下載連結為例，有存放資料在 AP，等待 AP 傳送的使用者都是配對的對象，AP 會透過 GATIM 告知這些使用者，有資料要傳送給他們，使用者收到 GATIM 後，分別回傳 ACK 給 AP，AP 收到這些 ACK 後便可以產生所有可能的配對方式。在圖 7 中假設有  $n$  個使用者回傳 ACK 給 AP，因此總配對數為  $C_2^n$ ，AP 依據配

對的原則從當中選出一組最佳的配對。至於第二組以後的配對，則是先扣除和第一組配對中的兩個使用者相關的配對，因此所有可能的配對總數為  $C_2^{n-2}$ ，AP 再依據選擇配對的原則從當中選出最佳的配對，也就是第二組配對，不斷重複相同的步驟，儘可能幫每一個需要下載連結的使用者完成配對。詳細的步驟如下：

步驟一：在 ATIM 區間結束後找出所有可能的配對方式。

步驟二：依據選擇配對的原則，從當中選出一組最佳配對。假如有兩組以上的配對符合相同的原則，則從中隨機選一組配對。

步驟三：扣除和步驟二所選出配對中兩個使用者有關的配對，重複步驟二。

在上載連結時，只要需要上載資料給 AP 的使用者都是配對的對象，在 ATIM 區間，當有使用者要上載連結時會傳送 ATIM 的訊息給 AP，ATIM 區間結束後，AP 便可以知道有多少使用者要做上傳連結，以圖 7 為例，AP 總共收到有  $k$  個 ATIM，所以有  $k$  個使用者需要上傳資料給 AP，總配對數為  $C_2^k$ 。AP 同樣依據上述的步驟，儘可能幫每一位使用者完成配對。在 ATIM 區間，AP 和使用者間的訊息傳遞，是以 DCF 方式來完成。根據前兩節所描述演算法舉一個例子，假設有六個使用者 A 至 F，六個使用者在所有子載波上的通道增益向量大小相同，而且向量中的兩元素皆為實數，但是彼此間的向量方向不同，如圖 8 所示。

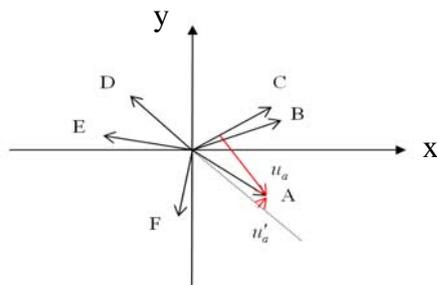


圖 8 通道增益向量間的關係

當兩向量接近正交時，在雜訊功率都相同的情況下，配對後可以得到較大的 SINR，因此對應的資料速率會較大，以 A 和 C 為例，兩者接近正交，A 在 C 上的垂直分量  $u_a$ ，即是 A 未做單位化的傳送識別標誌，將  $u_a$  單位化後再和 A 內積會有較大的 SINR。當兩向量接近反方向或是同方向時，配對後會有較小的 SINR，如 A 和 D，A 在 D 上的垂直分量為  $u'_a$ ，將  $u'_a$  單位化後和 A 內積所得到的 SINR 相對的會較小。假設配對後的 SINR 都符合(2-15)式，資料速率最小為一最大為八，根據彼此的向量方向來決定 SINR 和對應的資料速率，所得到的結果如表 1 所示。

表 1 配對後的資料速率和資料速率總和

	A	B	C	D	E	F
A		12	16	2	4	8
B	(6,6)		4	14	8	10
C	(8,8)	(2,2)		16	10	10
D	(1,1)	(7,7)	(8,8)		6	12
E	(2,2)	(4,4)	(5,5)	(3,3)		16
F	(4,4)	(3,3)	(5,5)	(6,6)	(8,8)	

從表 1 可以看到 A 和 C 的通道增益向量因為彼此接近正交，所以可以對應的資料速率為最大，又因為彼此的通道增益向量大小相同，配對後兩使用者對應的資料速率也會相同。A 和 D 的通道增益向量因為彼此接近相反方向，所以配對後的資料速率為最小。

表格中的上三角形為配對後的資料速率總和，依據最大總和速率演算法，有兩組配對符合最大總和速率的原則，分別是 A 和 C 這一組配對和 E 和 F 這一組配對，從中任意挑選一組，則先挑選 AC，之後，將 AC 兩個使用者有關的配對排除，也就是表 1 中將屬於 A 和 C 的行跟列去除，再從剩下的配對做選擇，因此第二組配對選擇 EF，最後剩下第三組為 BD。結果如表 2 所示。

表 2 最大總和速率演算法選擇配對的結果

Candidates	$C_2^6 = 15$	$C_2^4 = 6$	$C_2^2 = 1$
Chosen pairs	AC	EF	BD
Max. sum rate	16	16	14

### 3.1.3 資料傳輸時間

在圖 7 中除了更改原來 PSM-MIMO/OFDM 的 ATIM 區間的運作方式外，在資料傳輸區間，由於不考慮公平性的問題，因此在資料傳輸時間上的計算方式也會不同，主要在於不考慮最多可連續傳送封包的數目，如(2-21)式所定義，所以緩衝區有多少封包，就連續傳送多少封包。計算 AP 在每一組配對所花的資料傳輸時間以(3-4)式所示：

$$\max\{t_{i,p}, t_{j,p}\}; i=1\dots n; j=1\dots n; i \neq j \quad (3-4)$$

其中  $t_{i,p}$  為使用者 i 在第 p 組配對所花的資料傳輸時間， $t_{j,p}$  為使用者 j 在第 p 組配對所花的資料傳輸時間，AP 花費在每一組的資料傳輸時間則以最大的時間為依據。

以表 1 中配對後的資料速率為例，假設 A 到 F 的緩衝區裡的封包數如表 3 所示，封包的大小皆為一，將封包數乘以封包大小再除以資料速率，所得到的結果即是資料傳輸時間，如表 4 中下三角形所示。由於 A、C 的資料速率都是八，A 和 C 的封包數分別為十六和四，因此可以得到資料傳輸時間分別為二和零點五。以 AP 的角度而言，此配對所花的資料傳輸時間為取最大值，即是二，記錄在表 4 的上三角形中。AP 在資料傳輸區間，花在此三組配對的資料傳輸時間分別如表 5 所示。如同 PSM-MIMO/OFDM，

每一組配對在資料傳輸區間，將資料傳輸完畢後，立即進入睡眠狀態，直到下一個 ATIM 區間才會醒來。

表 3 A 到 F 緩衝區裡的封包數

	A	B	C	D	E	F
Buffer status	16	4	4	16	8	16

表 4 配對後的資料傳輸時間和最大資料傳輸間

	A	B	C	D	E	F
A		2.7	2	16	8	4
B	(2.7,0.7)		2	2.3	2	3.2
C	(2,0.5)	(2,2)		2	1.6	3.2
D	(16,16)	(0.6,2.3)	(0.5,2)		5.3	2.7
E	(8,4)	(1,2)	(0.8,1.6)	(5.3,5.3)		2
F	(4,4)	(0.8,3.2)	(0.8,3.2)	(2.7,2.7)	(1,2)	

表 5 AP 針對每一組配對所花費的資料傳輸時間

	AC	EF	BD
Transmission time	2	2	2.3

### 3.2 演算法之優缺點

在探討演算法的優缺點之前，先解釋何謂最佳的配對關係，所謂有最佳的配對關係是指配對後的吞吐量為最大。如(3-5)式所示：

係是指配對後的吞吐量為最大。如(3-5)式所示：

$$\begin{cases} R_i = R_j = R_{\max} \\ O_i = O_j \\ \text{throughput} = \frac{(O_i + O_j) \cdot \text{packet\_size}}{\text{packet\_size} \cdot \frac{O_i}{R_{\max}}} = 2R_{\max} \end{cases} \quad (3-5)$$

其中  $R_i$  為使用者 i 的資料速率， $R_j$  為使用者 j 的資料速率， $O_i$  為使用者 i 在緩衝區裡的封包個數， $O_j$  為使用者 j 在緩衝區裡的封包個數，假如是下載連結，就是指在 AP 緩衝區裡的封包，假如是上載連結，則是指使用者緩衝區裡的封包， $R_{\max}$  為系統最大的資料速率。當兩個使用者的資料速率相同而且都是最大資料速，緩衝區裡的封包數也是相同時，可以推得吞吐量為最大，即  $2R_{\max}$ ，所以當一組配對中彼此的資料速率和緩衝區裡的封包數有(3-5)式裡的關係時，就是最佳的配對。證明(3-5)式為最佳配對，利用反證法來證明，方法如下所示。

$$\begin{cases} R_{\max} = \lambda R_j, \lambda \geq 1 \\ R_i = \alpha R_j, 0 < \alpha \leq \lambda \\ O_i = \beta O_j, 0 < \beta \end{cases} \quad (3-6)$$

先假設一組配中的兩個使用者 i 和 j 有(3-6)式的關係，也就是  $R_{\max}$  是  $R_j$  的  $\lambda$  倍， $R_i$  是  $R_j$  的  $\alpha$  倍， $O_i$  是  $O_j$  的  $\beta$  倍。(3-7)式為兩個使用者資料傳輸時間的關係，使用者 i 的資料傳輸時間是使用者 j 的  $\frac{\beta}{\alpha}$  倍。配對後的吞吐量的大小為(3-8)式所示，而且配對後的吞吐量會大於最佳配對的  $2R_{\max}$ 。

$$T_i = \frac{O_i \cdot \text{Packet\_size}}{R_i} = \frac{\beta \cdot O_j \cdot \text{Packet\_size}}{\alpha \cdot R_j} = \frac{\beta}{\alpha} T_j \quad (3-7)$$

$$throughput = \frac{(O_i + O_j) \cdot Packet\_size}{\max\{T_i, T_j\}} = \frac{(\beta O_j + O_j) \cdot Packet\_size}{\max\{\frac{\beta}{\alpha} \cdot T_j, T_j\}} \quad (3-8)$$

假設  $\alpha > \beta$ ，(3-8)式的吞吐量為(3-9)式所示：

$$\frac{(1 + \beta) \cdot O_j \cdot Packet\_size}{T_j} = (1 + \beta) \cdot R_j \quad (3-9)$$

又(3-9)式大於  $2R_{\max}$ ，所以推導如下：

$$\begin{aligned} (1 + \beta) \cdot R_j &> 2 \cdot R_{\max} \\ 1 + \beta &> 2 \cdot \lambda \\ \frac{1}{\lambda} + \frac{\beta}{\lambda} &> 2 \end{aligned} \quad (3-10)$$

從(3-10)式的結果可以發現， $\lambda > 1$ ，且  $\lambda \geq \alpha > \beta$ ，所以不可能大於二，因此之前假設(3-9)式大於  $2R_{\max}$  會得到矛盾的結果。

假設  $\alpha < \beta$ ，(3-8)式的吞吐量為(3-11)式所示：

$$\frac{(1 + \beta) \cdot O_j \cdot Packet\_size}{\frac{\beta}{\alpha} \cdot T_j} = \frac{\alpha(1 + \beta)}{\beta} \cdot R_j \quad (3-11)$$

又(3-11)式大於  $2R_{\max}$ ，所以推導如下：

$$\begin{aligned} \frac{\alpha(1 + \beta)}{\beta} \cdot R_j &> 2R_{\max} \\ \frac{\alpha(1 + \beta)}{\beta} &> 2 \cdot \lambda \\ \frac{\alpha}{\beta \cdot \lambda} + \frac{\alpha}{\lambda} &> 2 \end{aligned} \quad (3-12)$$

同樣的，從(3-12)式可以發現到， $\beta > \alpha$ ， $\lambda \geq \alpha$ ，所以不可能大於二，之前假設(3-11)

式大於 $2R_{\max}$  是矛盾的。藉由反證法的證明，可以得到一個結論，就是任一種配對關係的吞吐量大小不會超過 $2R_{\max}$ 。所以最佳的配對，兩個使用者間的關係必須有(3-5)式中的關係。知道最佳配對的關係後，分別以最大總和速率、最小時間差、最大平均吞吐量三種演算法所找出的配對和(3-5)式做比較，辨別是否接近(3-5)中的配對關係，並且從當中的差距來說明三種演算法的優缺點。

最大總和速率的優點為，不需要複雜的計算，從(3-1)式可以觀察到，AP 只需要將兩個使用者子載波上最小的 SINR 所對應的資料速率相加即可，也不需要如同 PSM-MIMO/OFDM 去計算子載波上通道載量的大小，所以算是三種演算法中較簡單的。

它的缺點為，要找到一組配對有(3-5)式中的關係較不容易，主要是因為演算法沒有考慮緩衝區裡的封包數，配對後的兩個使用者封包數就不會相同或是接近。另一方面，資料速率相加最大時，兩個資料速率不一定相等，也不一定是最大的資料速率，因此算是三種演算法中，所找的配對關係距離(3-5)式最大的。

最小時間差的優點為，不會造成空間自由度的浪費，也就是當兩個使用者的資料傳輸時間差距最小時，AP 的兩根天線處在閒置的時間最小，讓兩根天線盡可能的無時無刻和兩個使用者同時做上載連結或下載連結。

此演算法找到的配對會有如(3-13)式的關係，使用者 i 的資料速率大小等於使用者 j 的資料速率或是彼此接近，使用者 i 在緩衝區的封包數等於使用者 j 緩衝區的封包數或是彼此接近，但是資料速率卻不一定是最大的，所以配對關係和(3-5)式仍然有一些差距，然而可以找到和(3-5)式中的配對關係的機會，相較於最大總和速率演算法，會較大。

$$\begin{cases} R_i = R_j; R_i \cong R_j \\ O_i = O_j; O_i \cong O_j \end{cases} \quad (3-13)$$

此演算法的另一個缺點為，當找到的配對關係如(3-14)式時，雖然此配對的資料傳輸時間差距為零，但是吞吐量卻是較差，無法達到如(3-5)式的最大吞吐量。

$$\frac{R_i}{R_j} = \frac{O_i}{O_j}, R_i \neq R_j, O_i \neq O_j \quad (3-14)$$

最大平均吞吐量的優點為，找配對的原則就是根據每一組配對的吞吐量的大小去做選擇，吞吐量越接近  $2R_{\max}$  越好，因此選擇配對的原則跟吞吐量有直接的關係。選擇後的配對，相較於前兩種演算法，可以有較大的吞吐量，增加系統的多使用者的多樣性增益。而它的缺點為，和前兩的演算法相比較下，計算上較為複雜。



## 第四章 模擬結果之比較與分析

本章主要的內容為透過模擬比較三種演算法和 PSM-MIMO/OFDM 之間的差異，第一節是介紹模擬的環境和參數，第二節則是針對模擬的結果做分析和比較。

### 4.1 模擬環境

在模擬的通道增益方面，是採用 Rayleigh processes，也就是 Rayleigh fading 的無線通道，並且將時域的 Rayleigh fading 無線通道脈衝響應經過快速傅利葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)轉換成頻域的通道增益。

#### 4.1.1 Rayleigh processes

無線的通道通常是多重路徑，接收端則是把經過這些路徑的訊號加起來，假如每一條路徑的散射越多，根據中央極限定理(central limit theorem)可以觀察到，每一條無線通道路徑是零平均複數高斯隨機程序(zero-mean complex Gaussian random process)，如(4-1)式所示：

$$g(t) = g_1(t) + jg_2(t) \quad (4-1)$$

其中  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  為實數高斯隨機程序(real-valued Gaussian random process)，彼此的關係是統計不相關的(statistically uncorrelated)，而且變異數相等。將(4-1)式取絕對值後，可以得到 Rayleigh processes[8]，如(4-2)所示：

$$|g(t)| = \frac{t}{\sigma^2} e^{-t^2/2\sigma^2}, t \geq 0 \quad (4-2)$$

其中  $\sigma^2$  是  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  的變異數。零平均複數高斯隨機程序的功率頻譜密度(power spectral density)如(4-3)式所示：

$$S_{gg}(f) = S_{g_1g_1}(f) + S_{g_2g_2}(f) \quad (4-3)$$

其中

$$\begin{cases} S_{g_i g_i}(f) = \frac{\sigma^2}{\pi f_{\max} \sqrt{1 - (f/f_{\max})^2}}, |f| \leq f_{\max} \\ S_{g_i g_i}(f) = 0, |f| > f_{\max} \end{cases} \quad (4-4)$$

$i=1,2$ ， $f_{\max}$  為最大都卜勒頻率(maximum Doppler frequency)。將(4-4)式做反傅利葉轉換(Inverse Fourier Transform)即可得到自相關函數(autocorrelation function)為：

$$a_{gg}(\tau) = a_{g_1g_1}(\tau) + a_{g_2g_2}(\tau) \quad (4-5)$$

其中

$$a_{g_i g_i}(\tau) = \sigma^2 J_0(2\pi f_{\max} \tau), i = 1, 2 \quad (4-6)$$

$J_0(\cdot)$ 表示第一種零階的 Bessel function。

#### 4.1.2 系統環境和參數

在模擬系統的環境方面，假設使用者個數為偶數，所有使用者和 AP 之間都是下載

連結，使用者配對後的 SINR 都大於  $SINR_{th}$ ，接收端的功率則大於  $P_{th}$ ，因此所有使用者都可以配對成功和正確接收 AP 送的資料。在緩衝區裡的封包數，由於不考慮(2-21)所定義最大可傳送的封包數，所以 AP 在每一個信標區間結束後，緩衝區裡的封包都可以傳送完畢，而且每一個信標區間週期，AP 都有資料要傳送給配對後的使用者。緩衝區裡的封包數，每一個信標區間就隨機產生，通道增益則是每兩個信標區間，隨機產生一次，提高通道增益的相關性。

在系統的參數方面如表 6 所示。子載波數有六十四個，資料速率如同 IEEE 802.11a 有八種，AP 和使用者的資料傳輸功率皆為一點八瓦，閒置功率為一瓦，緩衝區最多可以存放二十個封包。



The number of subcarriers	64
Data rate	6,9,12,18,24,36,48,54(Mbps)
Transmission power	1.8W
Idle power	1.0W
Max. buffer size	20 data packets

## 4.2 模擬結果

模擬的部分主要是比較三種演算法和 PSM-MIMO/OFDM 在吞吐量和能量消耗方

面彼此之間的差異。首先針對吞吐量的結果做分析，模擬的結果如圖 9 所示。吞吐量的計算方式如(4-7)式所示。

$$\begin{cases} t_p = \max\{t_{i,p}, t_{j,p}\}; i=1\dots n; j=1\dots n; i \neq j \\ T = \sum_{p=1}^{n/2} t_p \\ \text{Throughput} = \frac{\text{total\_tx\_bits}}{T} \end{cases} \quad (4-7)$$

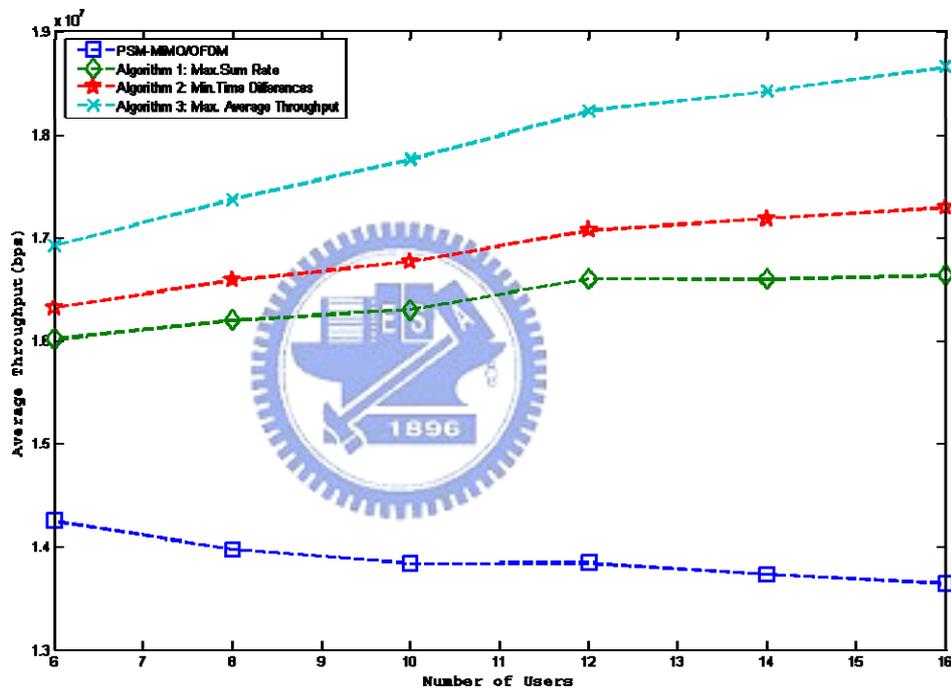


圖 9 平均吞吐量

(4-7)式中  $t_{i,p}$  表示第  $p$  組配對中使用者  $i$  的資料傳輸時間， $t_{j,p}$  表示第  $p$  組配對中使用者  $j$  的資料傳輸時間。將每一組最大的資料傳輸時間相加得到  $T$ ，即是 AP 的總資料傳輸時間，再將所有使用者緩衝區裡的封包數相加後乘上單一封包的大小，得到總傳輸資料的位元數，總傳輸資料位元數除以  $T$  後的結果就是的系統的吞吐量。

由於最大平均吞吐量演算法所找的配對關係會接近或是等於(3-5)式中的關係，所

以平均吞吐量會大於最小時間差和最大總速率兩演算法所找出的配對。最小時間差演算法會優於最大總和速率演算法的原因可以從上一章優缺點分析得知，最小時間差演算法所找的配對關係較有機會接近(3-5)式的最佳配對關係，也就是兩個使用者的資料速率和緩衝區裡的封包數相同，但資料速率不一定是最大。最大總和速率演算法所找的配對關係較不易接近(3-5)式的最佳配對關係，原因為配對後的資料速率和緩衝區裡的封包數皆不一定相同，資料速率也不一定最大。

從圖 9 中可以觀察到隨著使用者的增加，最大平均吞吐量、最小時間差和最大總和速率三種演算法的平均吞吐量有增加的趨勢，主要在於每增加兩個使用者，就可以增加配對的方式供演算法去選擇，以表 7 為例，十個使用者可以分成五組配對，八個使用者可以分成四組配對，從一到四組配對，十個使用者供演算法選擇的配對數都多於八個使用者，因此較有機會找到符合最佳配對關係的配對。但是最小時間差演算法和最大總和速率演算法所找的配對和吞吐量的大小沒有直接的關係，所以隨著使用者的增加，平均吞吐量增加的幅度逐漸趨緩。最大平均吞吐量演算法方面，由於找的配對其吞吐量越大越好，所以增加的幅度最大。另一方面，在 ATIM 區間結束後，需要和 AP 做上載連結或下載連結的使用者增加時，三種提出的演算法尋找配對的複雜度也會跟著增加。

表 7 使用者個數和配對數

Pair Users	1	2	3	4	5
10	$C_2^{10} = 45$	$C_2^8 = 28$	$C_2^6 = 15$	$C_2^4 = 6$	$C_2^2 = 1$
8	$C_2^8 = 28$	$C_2^6 = 15$	$C_2^4 = 6$	$C_2^2 = 1$	

提出的三種演算法在平均吞吐量都高於 PSM-MIMO/OFDM 協定的主要原因，從表 8 可以觀察到，假設有十個使用者，可以分成五組配對，PSM-MIMO/OFDM 協定以知更鳥式循環排程法找配對，假如每次只選出三位候選人，最多只有三種配對可以選擇。提出的三種演算法，由於考慮所有可能的配對方式，可以選擇的配對數相對較多，找到最佳配對的機會也較大。此外，PSM-MIMO/OFDM 協定在選擇配對時，並沒有考慮子載波上最小 SINR 實際可行的資料速率以及使用者緩衝區裡的封包數，因此很容易有較差的吞吐量的配對產生，而且當使用者增加時，出現的機率更會提高，所以從圖 9 可以觀察到 PSM-MIMO/OFDM 協定的平均吞吐量會隨者使用者增加而逐漸降低。

表 8 演算法提供可選擇的配對數

	1	2	3	4	5
Max. Average Throughput					
Min. Time Differences	$C_2^{10} = 45$	$C_2^8 = 28$	$C_2^6 = 15$	$C_2^4 = 6$	$C_2^2 = 1$
Max. Sum Rate					
PSM-MIMO/OFDM	$C_2^3 = 3$	$C_2^3 = 3$	$C_2^3 = 3$	$C_2^3 = 3$	$C_2^2 = 1$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_i = \text{idle\_power} / 2 \cdot \sum_{p=1}^{n/2} |t_{i,p} - t_{j,p}|, i \neq j \\ E_t = \text{tx\_power} / 2 \cdot \sum_{p=1}^{n/2} (t_{i,p} + t_{j,p}), i \neq j \\ \text{Energy\_consumption} = (E_i + E_t) / \text{total\_tx\_bits} \end{array} \right. \quad (4-8)$$

下載連結時，AP 的能量消耗計算方式，如(4-8)式所示。i, j 為使用者，p 為配對， $t_{i,p}$  表示使用者 i 在第 p 組配對所花的資料傳輸時間， $t_{j,p}$  表示使用者 j 在第 p 組配對所

花的資料傳輸時間，所以將兩者的時間相減就是 AP 的其中一根天線處在閒置的時間長度，將兩者的時間相加就是 AP 花在傳送資料的總消耗功率時間，將閒置功率(idle power)和傳輸功率(transmission power)分別除以二則表示一根天線平均所消耗的閒置功率和傳輸功率，計算的結果  $E_i$  為 AP 所消耗的總閒置能量， $E_t$  為 AP 所消耗的總資料傳輸能量。

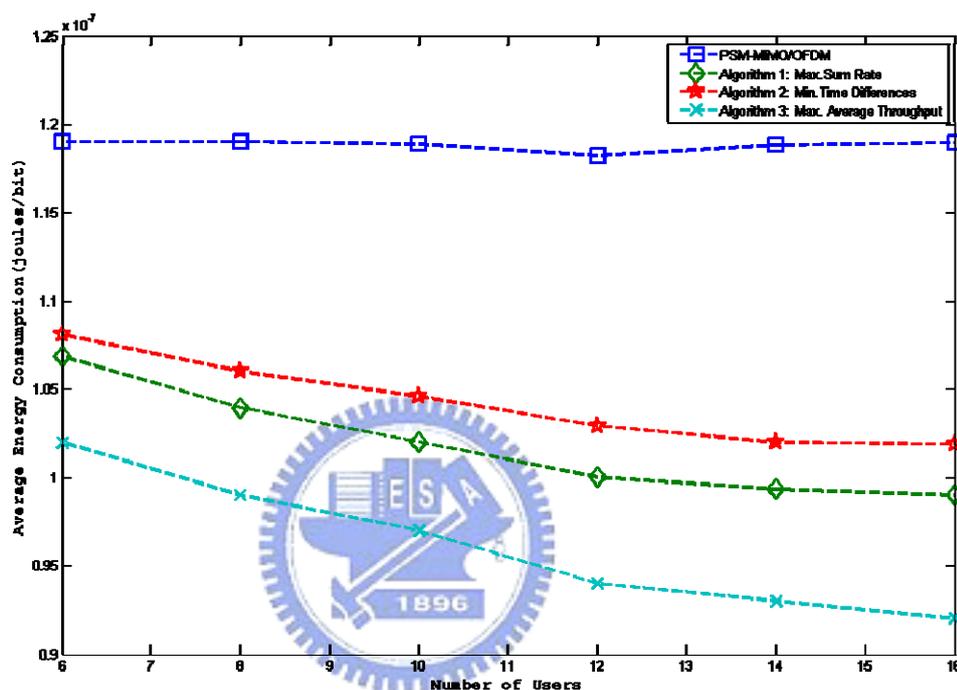


圖 10 平均能量消耗

從圖 10 中可以觀察到最大平均吞吐量演算法的平均能量消耗最小，主要是因為和平均吞吐量的表現成反比關係，而且隨著平均吞吐量遞增，平均消耗能量就遞減。最小時間差演算法在平均吞吐量的表現比最大總和速率演算法好，但是在平均能量消耗上卻是比最大總和速率演算法來的高，原因為在於兩個演算法的平均吞吐量差距不大的情況下，最小時間差演算法所找到的兩使用者的資料傳輸時間差距小，最大總和速率演算法所找到的配對，彼此資料傳輸時間差距會較大，分別將資料傳輸時間相加後，最小時間差演算法得到的總消耗功率的時間通常會比最大總和速率演算法的長，也就是 AP 的兩根天

線處在資料傳輸的狀態較久。此外，與平均吞吐量所得到的結果成反比，當隨者使用者的增加時，平均消耗能量會逐漸減小，而且以最大平均吞吐量演算法減小的幅度最大。PSM-MIMO/OFDM 協定方面，從圖 9 平均吞吐量的表現就可以推論平均消耗能量是最高的，而且維持一個穩定的大小。



## 第五章 結論與未來展望

本論文提出的三種演算法，分別有各自的優缺點，和 PSM-MIMO/OFDM 協定相比較下，在平均吞吐量 and 平均能量消耗上都有較佳的表現，但是隨著 ATIM 區間結束後，需要上載連結或下載連結的使用者增加時，演算法尋找配對的複雜度會增加。另外在公平性上，為了讓使用者存取 AP 的時間一致，資料傳輸時間與連續傳送封包個數的上限值有關，此方式容易造成 AP 處在閒置的時間，而導致能量的浪費。如何讓每一個使用者傳輸資料的時間達到公平性，又不會使 AP 處在閒置的時間過多，是未來研究的方向。



## 參考文獻

- [1] Ahmad R. S. Bahai, Burton R. Saltzberg, Mustafa Ergen, Multi-Carrier Digital Communications Theory and Applications of OFDM, Second Edition, Springer, 2004.
- [2] Miao Zhao and Yuanyuan Yang, “A Joint Design of MIMO-OFDM Transceiver and Power-Saving MAC in WLANs,” *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007*. IEEE, pp.947 – 952, March 2007.
- [3] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, May 2005.
- [4] Matthew S. Gast, 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition, O’Reilly, 2006.
- [5] David C. Lay, Linear Algebra and Its Applications, Second Edition, Addison Wesley, 1997.
- [6] Z. Ji, Y. Yang, M Takai and R. Bagrodia, “Exploiting medium access diversity in rate adaptive wireless LANs,” *Proc. ACM MOBICOM ’04*, Philadelphia, Sept. 26-Oct. 1 2004.
- [7] B. Sadeghi, V. Kanodia, A. Sabharwal and E. Knightly, “Opportunistic media access for multirate ad hoc networks,” *Proc. ACM MOBICOM ’02*, Atlanta, GA, Sept. 2002.
- [8] Matthias Pätzold, Mobile Fading Channels, John Wiley, 2002

## 簡歷

小學	台北市立福德國小
國中	台北市立介壽國中
五專	國立台北工業專科學校 電子科
大學	國立台北科技大學 電子工程系
碩士	國立交通大學 電信研究所

