

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 基於多輸入多輸出正交分頻多工之寬頻無線進接技術(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2213-E-009-125-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學電信工程學系

計畫主持人：李大嵩

計畫參與人員：何從廉、毛禮偉、陳慶鴻

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 22 日

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

中進度  
報告

基於多輸入多輸出正交分頻多工之寬頻無線進接技術

**Broadband Wireless Access Techniques Based on**

**MIMO-OFDM**

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2213-E-009-125

執行期間：九十一年八月一日至九十二年七月三十一日

計畫主持人：李大嵩 交通大學電信系 教授

共同主持人：

計畫參與人員：何從廉、毛禮偉、陳慶鴻

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

中華民國九十二年五月二十二日  
基於多輸入多輸出正交分頻多工之寬頻無線進接技術

## Broadband Wireless Access Techniques Based on MIMO-OFDM

計劃編號：NSC 91-2213-E-009-125

執行期限：九十一年八月一日至九十二年七月三十一日

主持人：李大嵩 交通大學電信系 教授

計畫參與人員：何從廉、毛禮偉、陳慶鴻

### 一、中文摘要(關鍵詞：多輸入多輸出、正交分頻多工、空間多工、空時編碼)

在未來的寬頻無線通訊系統中，最主要的兩個挑戰為通道多路徑衰減效應以及頻譜效率的提升。正交分頻多工（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）能夠在頻域上將頻率選擇性衰落通道轉變成平坦式衰落通道，為一種有效克服多路徑衰減效應之技術。另一方面，多輸出多輸入（Multi-Input Multi-Output, MIMO）技術可在空間中創造獨立的平行通道來傳送不同資料串流，用以提升系統的整體傳輸速率。此種 MIMO 所提供的空間多工（Spatial Multiplexing）技術，可在不需佔用額外頻譜資源的前提下，大幅地提升頻譜效率。在本報告中，吾人將探討結合 OFDM 及 MIMO 技術的通訊系統，亦即 MIMO-OFDM 系統，此種系統架構可分為兩種功能類型：一為提高資料傳輸速率，另一為藉由分集提高接收資料的可靠度；基此兩種架構並運用適當的訊號處理演算法，提出能實現高傳輸速率並提高整體系統容量之 MIMO-OFDM 系統。

**英文摘要** (Keywords: multi-input multi-output (MIMO) system, orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), spatial multiplexing, space-time coding)

Two major challenges in future broadband wireless communication systems are the multipath fading effect and need for enhanced spectral efficiency. OFDM can convert frequency-selective multipath fading channels into flat fading ones in the

frequency domain, which makes it an effective technique for combating channel fading. On the other hand, the MIMO technique can create independent parallel channels in the spatial domain for simultaneously sending multiple data streams, thereby increasing the overall transmission rate of the system. The technique of spatial multiplexing offered by MIMO can effectively enhance the spectral efficiency without the need of extra frequency resources. In this report, we will consider a new wireless communications system combining MIMO and OFDM techniques, called the MIMO OFDM system. The proposed system can simultaneously achieve higher data rate and higher reliability through, respectively, spatial multiplexing and diversity. We will realize a high data rate, high capacity system by incorporating appropriate signal processing algorithms based on the above two techniques.

## 二、計畫緣由與目的

多輸出多輸入 (MIMO) 技術為近年來無線通訊界之重要研究方向及熱門議題，所謂「多輸入多輸出」意旨在傳送端及接收端均裝置天線陣列(antenna array)，亦即雙天線陣列，藉由適當的信號處理演算法在空間中形成等效空間通道來提高系統的傳輸速率及容量；系統容量會隨著所使用之天線數目成線性關係的增加。有別於傳統的智慧型天線(smart antenna)在不影響通訊品質之系統容量提升是隨著所使用之天線數目成對數關係的增加。

正交分頻多工(OFDM)可將頻率選擇性衰落(frequency-selective fading)通道轉變成平坦式衰落(flat fading)通道，不需複雜之等化器設計，為一有效克服多路徑衰減通道到有效方法。在本報告中，吾人提出一結合多輸入多輸出及正交分頻多工的 MIMO-OFDM 無線通訊系統，以期能夠同時提供高速傳輸以及高容量（如圖一及圖二所示）。

此外，考慮在某些通道環境下無法提供高速傳輸，此時可藉由提供分集(diversity)來克服通道的效應；基此考量，吾人亦提出一結合傳送分集以及接收分集的正交分頻多工系統並探討其對抗頻率選擇性衰減通道的效能表現（如圖三及圖四所示）。

本報告所提出之 MIMO-OFDM 系統，相信必將成為下一代寬頻無線傳輸的前瞻技術及發展趨勢。

## 三、研究方法及成果

### 研究方法

吾人所提出 MIMO-OFDM 系統架構與研究方法如下：

首先，吾人以 IEEE 802.11a Wireless LAN OFDM PHY Spec.為基礎，考慮

MIMO-OFDM 系統架構，建立模擬環境，其傳送端及接收端各配置  $N_T$  及  $N_R$  根天線，則訊號模型可表示為：

$$\mathbf{Y}[n] = \mathbf{H}[n] \cdot \mathbf{X}[n] + \mathbf{V}[n] \quad (1)$$

其中， $\mathbf{Y}[n] = [Y_1[n] \dots Y_{N_R}[n]]^T$  及為  $N_R \times 1$  之接收訊號， $\mathbf{X}[n] = [X_1[n] \dots X_{N_T}[n]]^T$  為  $N_T \times 1$  之傳送訊號， $\mathbf{V}[n] = [V_1[n] \dots V_{N_R}[n]]^T$  為  $N_R \times 1$  之可加白高斯雜訊(AWGN)，通道模型  $\mathbf{H}[n]$  為：

$$\mathbf{H}[n] = \begin{bmatrix} H_{11}[n] & H_{12}[n] & \dots & H_{1N_T}[n] \\ H_{21}[n] & H_{22}[n] & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_R1}[n] & \dots & \dots & H_{N_RN_T}[n] \end{bmatrix} \quad (2)$$

接收機將處理接收到的訊號  $\mathbf{Y}[n]$  及估測到的通道響應  $\hat{\mathbf{H}}[n]$ ，用以設計一組權重值  $\mathbf{w}$

以估測傳送訊號  $\hat{\mathbf{X}}[n] = \mathbf{w}^H \mathbf{Y}[n]$ 。

吾人運用各種演算法設計權重值  $\mathbf{w}$ ，其中包括通道估計演算法及 MIMO 訊號偵測演算法，各項演算法分述如下：

### 1. 通道估測演算法

第  $i$  根接收天線接收第  $j$  根傳送天線的頻域訓練符碼(training symbol)為：

$$\mathbf{T}_{ij} = [T(t_1) \dots T(t_{N_p})] \quad (3)$$

其中  $\{t_n | n=1 \dots N_p\}$  為第  $j$  根傳送天線  $N_p$  次通道(sub-carrier)的子集。經過通道後，接收端所接收到之訓練符碼為：

$$\mathbf{Y}_{ij} = [Y(t_1) \dots Y(t_{N_p})] \quad (4)$$

則第  $i$  根接收天線與第  $j$  根傳送天線間在此次集合的通道響應為：

$$\hat{\mathbf{H}}_{ij}(t_n) = \mathbf{Y}_{ij}^{-1}(t_n) \cdot \mathbf{T}_{ij}(t_n) \quad (5)$$

### 2. MIMO 訊號偵測演算法

#### (a) 零強制偵測(zero-forcing detector)

$$\mathbf{w}_{ZF} = (\hat{\mathbf{H}}[n] \hat{\mathbf{H}}^H[n])^{-1} \hat{\mathbf{H}}[n] \quad (6)$$

#### (b) 最小均方根誤差偵測(minimum mean squared error detector)

$$\mathbf{w}_{MMSE} = \hat{\mathbf{H}}^H[n] [\hat{\mathbf{H}}[n] \hat{\mathbf{H}}^H[n] + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R}]^{-1} \quad (7)$$

(c) 有序連續干擾消除偵測(order successive interference cancellation, OSIC)

初始化階段

$$i \leftarrow 1$$

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}^+$$

$$k_1 = \arg \min_j \left\| (\mathbf{G}_1)_j \right\|^2$$

遞迴階段

$$\mathbf{w}_{k_i} = (\mathbf{G}_i)_{k_i}$$

$$y_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i}^T \mathbf{r}_i$$

$$\hat{a}_{k_i} = \mathcal{Q}(y_{k_i})$$

$$r_{i+1} = r_i - \hat{a}_{k_i} (\mathbf{H})_{k_i}$$

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{H}_{k_i}^+$$

$$k_{i+1} = \arg \min_{j \notin \{k_1, \dots, k_i\}} \left\| (\mathbf{G}_{i+1})_j \right\|^2$$

$$i \leftarrow i+1$$

(d) 適應性群組偵測(adaptive group detection)

定義子空間投影(subspace projector)為：

$$\mathbf{P} = (\mathbf{Q}_K)^{-1} (\mathbf{R}^{-1})_{[1:K,:]} \mathbf{H}[n]^+ \quad (8)$$

其中  $\mathbf{Q}_K$  為  $\mathbf{R}^{-1}$  之  $K \times K$  首要矩陣(principal matrix)，則投影後之最大似然率偵測可表示為：

$$\mathbf{x}_K = \arg \min_{\mathbf{x}_K} \mathbf{y}^+ \mathbf{Q}_K \mathbf{y} \quad (9)$$

其中  $\mathbf{y} = \mathbf{r}_K - (\mathbf{Q}_K)^{-1} \mathbf{x}_K$ ，AGD 方法可結合 OSIC 來提升系統的表現。

(e) 最大似然率偵測(maximum likelihood detection)

$$\tilde{\mathbf{X}} = \min_{\mathbf{X}} \left( \left\| \mathbf{Y}[n] - \mathbf{H}[n] \cdot \mathbf{X}[n] \right\|^2 \right) \quad (10)$$

為了提高接收訊號的可靠度，本計畫亦討論訊號分集技術；基於系統複雜度考量，吾人所使用的分集技術為空時塊狀碼(Space-Time Block Code, STBC)，並有效的運用於 MIMO- OFDM 系統中，有關 STBC 演算法詳述如下：

(a) STBC 編碼器輸出訊號為：

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(2i) & \mathbf{X}(2i+1) \\ -\mathbf{X}(2i+1)^* & \mathbf{X}(2i)^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

(b) 接收訊號為：

$$\mathbf{Y}(2i) = \mathbf{D}_1 \mathbf{X}_1(2i) + \mathbf{D}_2 \mathbf{X}_2(2i+1) \quad \mathbf{Y}(2i+1) = \mathbf{D}_1 \mathbf{X}_1(2i+1) + \mathbf{D}_2 \mathbf{X}_2(2i) \quad (12)$$

其中  $\mathbf{D}_i = \text{diag}([H_i(e^{j0}) \dots H_i(e^{j2\pi(N-1)})])$

(c) STBC 解碼器輸出訊號為：

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}(2i) \\ \tilde{\mathbf{X}}(2i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^* & \mathbf{D}_2 \\ \mathbf{D}_2^* & -\mathbf{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(2i) \\ \mathbf{Y}^*(2i+1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

## 成果

本計畫已完成下列工作：

1. 完成以 IEEE 802.11a 正交分頻多工實體層傳收機模擬架構與分析。
2. 完成 MIMO-OFDM 空時通道模型與理論容量分析。並評估 MIMO 之訊號偵測演算法及干擾消除方法之效能表現。
3. 完成建構 MIMO-OFDM 系統之完整架構，並在不同通道環境下藉由電腦模擬進行 MIMO-OFDM 系統之模擬與評估。
4. 評估用於 MIMO-OFDM 系統之多通道頻率響應估計。
5. 建立 STBC 及傳輸分集之 MIMO-OFDM 系統模擬環境，並完成具有 STBC 之正交分頻多工系統之模擬與分析並評估其效能。

## 四、結論與討論

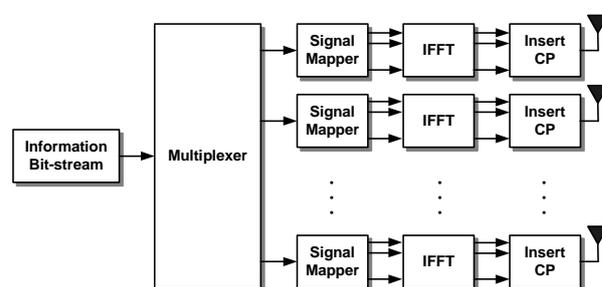
吾人已建立了 MIMO-OFDM 之系統架構與模擬環境，經由電腦模擬探討完成各種信號處理演算法之效能表現比較；如圖五呈現基於 OFDM 之空間多工系統效能表現，由圖五可知零強制偵測之效能最差，最大似然率偵測具有最佳的效能但複雜度最高，循序干擾消除能提供比最小均方根誤差偵測更佳的效能表現，結合適應性群集偵測及循序干擾消除法，其效能可近似最大似然偵測。圖六呈現最大似然率、零強制偵測和其他演算法的比較；由圖可知，此法適用於高階調變系統（如使用 16 QAM 調變）。圖七比較具有傳送分集與接收分集之 OFDM 系統之效能表現，由圖七可知當系統所提供的分集維度越多，位元錯誤率的曲線斜率也會隨之成正比。圖八展示了具有傳輸分集及接收分集之 MIMO-OFDM 系統之效能表現，證明傳輸分集能達到和接收分集相同的效果。最後，圖九及圖十則分別展示了具有二、三及四根傳送天線之 STBC OFDM 系統之效能表現，對於三及四根傳送天線的系統，吾人藉由改變調變方式來補償因 STBC 所造成的傳送速率降低。

由於在一定的傳送天線數目下，系統所能提供的分集維度以及可使用的傳送天線數目之和等於接收天線數目。亦即系統無法同時建立最多的空間通道又提供最大分集維度。因此吾人將於下一年計畫中藉由遞迴處理 (iterative processing) 的方式使系統不但可達到最大容量並且每個傳送天線都能達到最大分集增益。

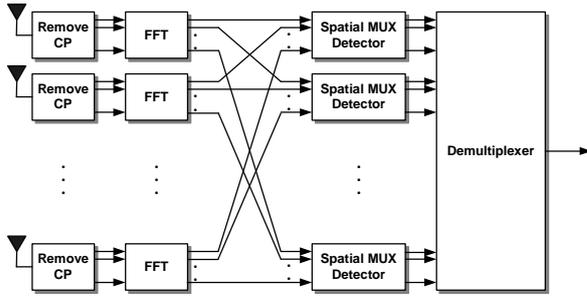
## 五、參考文獻

- [1] Helmut Bölcskei, A. J. Paulraj, et al, "Fixed Broadband Wireless Access: State of the Art, Challenges and Future Directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, pp.100-108, Jan. 2001.
- [2] 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, 1996.
- [3] R. van Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications," Artech House, 2000.
- [4] P. Vandenameele, L. Van Der Perre, M. Engels, B. Gyselinckx and H. J. De Man, "A combined OFDM/SDMA approach," *IEEE J. Select Areas. Commun.*, vol. 18, pp. 2312-2321, Nov. 2000.
- [5] A. F. Naguib, N. Seshadri and A. R. Calderbank, "Increasing data rate over wireless channels," *IEEE Signal Processing Mag.*, pp. 76-92, May 2000.
- [6] P. W. Wolnainsky, G. J. Foschini, G. D. Golden and R. A. Valenzuela, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture," *Electronics Letters*, vol. 35, pp. 14-16, Jan. 1999.
- [7] X. Li, Huang, H.C. Lozano and G.J. Foschini, "Reduced-complexity detection algorithms for systems using multi-element arrays", *IEEE GLOBECOM*, vol. 2, pp. 1072-1076, 2000.

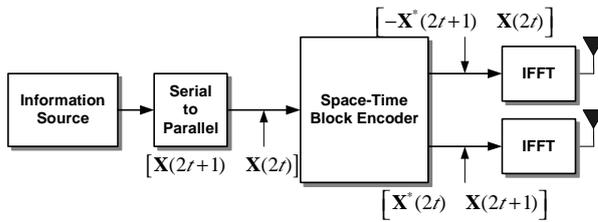
## 六、圖表



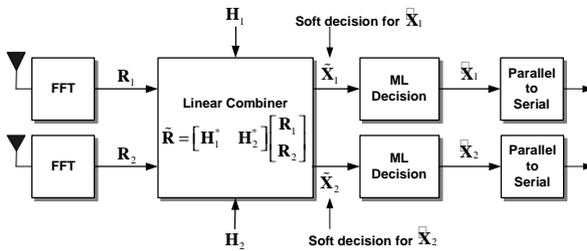
圖一：多輸入多輸出正交分頻多工系統發射機架構圖



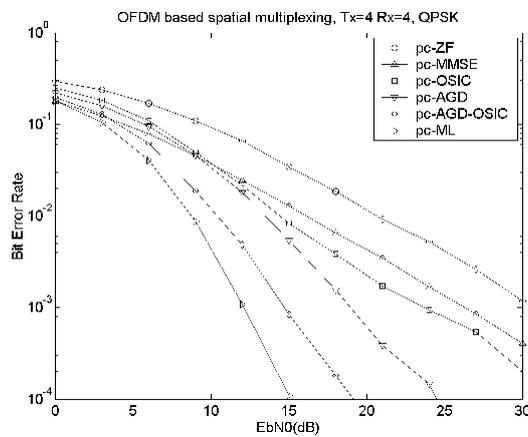
圖二：基於正交分頻多工之空間多工接收機架構圖



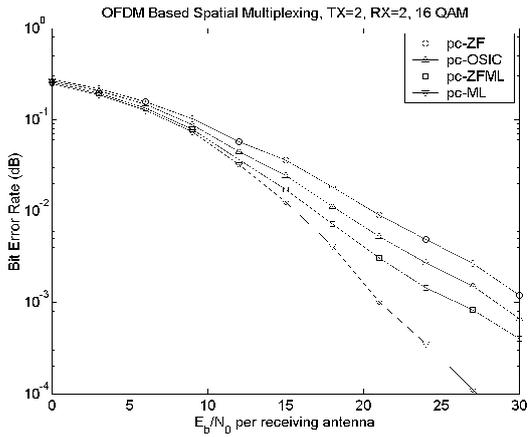
圖三：具有空時編碼之正交分頻多工系統發射機架構圖



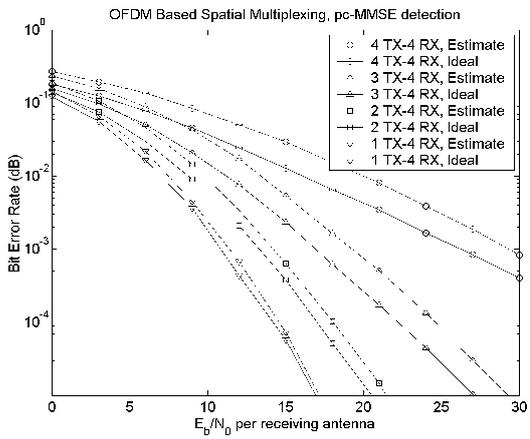
圖四：空時編碼之正交分頻多工系統接收機架構圖



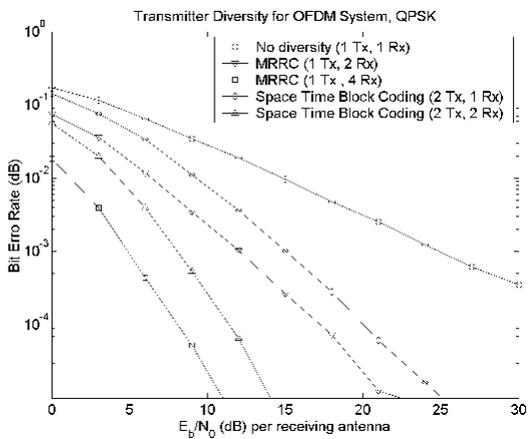
圖五：基於正交分頻多工之空間多工系統位元錯誤率比較：所使用的偵測演算法包含：pc-ZF, pc-MMSE, pc-OSIC, pc-AGD, pc-AGD-OSIC, pc-ML;使用 QPSK 調變



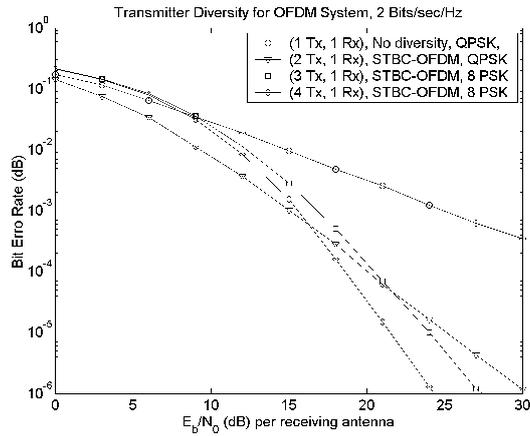
圖六：基於正交分頻多工之空間多工系統位元錯誤率比較：所使用的偵測演算法包含：pc-ZF, pc-OSIC, pc-ZFML, pc-ML detection;使用 16 QAM 調變



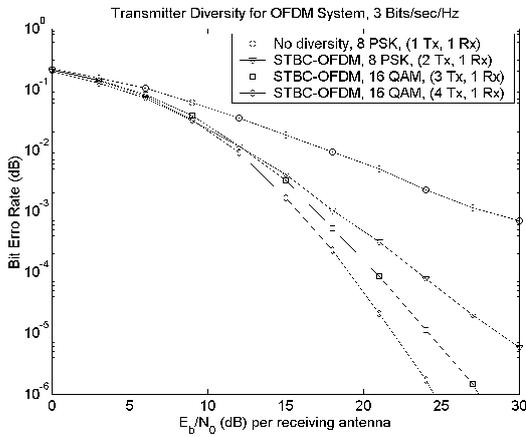
圖七：於正交分頻多工之空間多工系統位元錯誤率比較：使用 QPSK 調變



圖八：具有空時編碼之正交分頻多工系統位元錯誤率比較：傳送分集以及接收分集，使用 QPSK 調變



圖九：空時編碼之正交分頻多工系統位元錯誤率比較：一及二根傳送天線時，使用 QPSK 調變；三和四根傳送天線時，使用 8 PSK 調變



圖十：具有空時編碼之正交分頻多工系統位元錯誤率比較：一及二根傳送天線時，使用 8PSK 調變；三和四個傳送天線時，使用 16 QAM 調變