

第三代(第四代)無線蜂巢系統中調幅式空時碼於陣列天線中之應用  
A Class of PAM Space-Time Code Design in Array Antenna for 3G and/or 4G Wireless Cellular System

計畫編號：90-2213-E-034-001

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：劉宗慶 私立中國文化大學電機工程學系副教授

#### 壹、中文摘要

本計畫在探討於第三代或是第四代無線蜂巢系統中 Transmit Diversity 的應用。其內容如下：

- (1) 於 TDD 下，探討 MCA adaptive array[1] 若在通道狀態信息(CSI)Reciprocity 成立的條件下，不需使用空時碼(STC)，Transmit Diversity 的性能探討。
- (2) 於 FDD 或 Time selective fading channel 下，coherent time 很小時，於 MCA Adaptive Array 中加入 STC 之設計。此部份探討包括最佳 Space Time Trellis Code (STTC)的設計與找尋。我們採用 PAM TCM (Trellis Coded Modulation)為例子，將其擴展至多緯的 STC(Space Time Code)，此時 Calderbank-Mazo[2]可解析表示法將被使用，以得到最佳 Diversity gain 與 Coding gain 之 STC。
- (3)根據設計的最佳 STTC 碼，模擬 Symbol Error Rate 並作比較。

#### 貳、英文摘要

This project deals with the use of transmit diversity scheme used in the third and/or the forth generation wireless cellular system to improve the diversity gain and coding gain. Specifically, we propose a method to search the best PAM space-time trellis code. Simulation as well as implementation issue will be discussed. These cover:

- (1) Under TDD (Time Division Duplex) deal with the performance of our previous work [1] as reciprocity of channel exists and transmit diversity is achieved through optimal weights (gains) obtained during receive period.
- (2) Under FDD (Frequency Division Duplex) or time selective fading channel when coherent time is small, we set up a PAM-STTC scheme to improve the transmit diversity. Specifically, a method is used to search the best space-time trellis code given known CSI (Channel State Information). Symbol Error Rate simulation is performed to justify the designed optimal codes.

#### 參、計畫緣由與目的

於第三代蜂巢系統中，使用多從重天線於基地台，應用 adaptive array，可減少共同通道干擾 (Co-channel interference)、碼間干擾、改進信號雜音比、增進 diversity，進而增大服務範圍與增快資料速度，已經過廣泛的討論[3]。我們將基地台的 MCA adaptive array 中加入 Space Time Coding(STC)的設計，在 TDD (Time Division Duplex )傳輸時，由基地台於接收時收斂的 Optimal Weight，緊接著發射，使行動台達到 Diversity gain 增加的效果，此時並不需要使用 STC。但在 FDD(Frequency Division Duplex)傳輸或行動台速度與環境變化較快時，使用 STC 以增加 diversity。因行動台需輕便易於行動，限制了其接收天線的數量，一般皆使用單一或雙根天線為宜。使用 transmit diversity 的設計，其目的在將複雜的陣列架構放於基地台端，用增加 transmit diversity 的方法提昇行動台端的 diversity gain。STC 近兩年已被廣泛的探討與研究，且被第三代蜂巢系統中採用[4][5]，亦被提案於 WLL (Lucent's Blast Project)[6]與 Wide Area Packet Data Access (AT&T's Advanced Cellular Internet Service)[7]中使用。Alamouti[8]提出，若通道狀態信息(CSI)為已知的情況下，適當的設計 STC，配合基地台雙天線發射，以達成 orthogonal transmit，即使行動台使用單根天線，亦可達到如同使用雙天線接收一樣的 diversity 並達到如 MRRRC(Maximum Ratio Receive Combining 的性能。因此法使用雙倍的符號 coding，系統的頻寬會增加，且天線數限制為兩根，coding gain 部分的加強並不明顯，即使用任一種 Block Code 皆不影響其 orthogonal transmit 的條件，diversity 皆為 2。

在一般架構下(非 orthogonal transmit)，如何有效的找到最佳的 code 配合多重天線，以達到最佳的 Diversity gain 與 coding gain，成爲一重要課題。其中 Trellis code 除了提供增加 diversity gain 之用，亦不增加頻寬，因而被採用。Space Time Coding 最先由 AT&T 研究室的 Tarokh [9]提出，其結合通道碼與多重天線將信號以不同的通道碼分別發射於每一根天線。

PAM-Trellis Code 被使用於 V.90 56 kbps

Modem 上，我們亦於八十八年度計畫中探討過，並提出同步的方法。此處採用 PAM-STTC 的目地，除了編解碼為實數運算，以簡化最佳碼的搜尋以外，於通信中適當的控制同步亦較不受相位與頻率偏移的影響。我們以 Tarokh 的設計為基礎來探討提升性能的一些設計。

#### 肆、研究方法與步驟

一、當互置定律(Reciprocity)滿足時，不需使用 STC，在基地台使用多重天線做接收天線，配合 Time processing，同通道干擾被大量減少，使用容量可提昇數十倍。當 adaptive antenna 收斂時，接收端具有最大 SNIR(信號與干擾雜音比)。於 TDD 中，若 Duplex time 相較於 coherent time 小時，我們便假設 reverse link 的 CSI(Channel State Information 通道狀態訊息) 與 forward link 的 CSI 相同，在基地台於 forward link 發射時亦用相同的 Optimal weight 發射信號於多重天線。

#### 二、Transmit Diversity 之考慮

CSI Reciprocity 不滿足時，使用 STC 可增加行動台接收之 Diversity。若於 FDD 或 Time selective fading channel, coherent time 很小時，Space-time encoder 可加於多重天線。

於 slow flat fading channel 中，假設發射機與接收機間的 fading 係數相互獨立，若如下之碼字被傳送於  $n_T$  根發射天線：

$$c = c_1^1 c_1^2 \cdots c_1^{n_T} c_2^1 c_2^2 \cdots c_2^{n_T} c_l^1 c_l^2 \cdots c_l^{n_T},$$

而 ML(Maximum Likelihood)解碼器錯誤的 (Erroneously)解碼為

$$e = e_1^1 e_1^2 \cdots e_1^{n_T} e_2^1 e_2^2 \cdots e_2^{n_T} e_l^1 e_l^2 \cdots e_l^{n_T},$$

[9]中定義差分矩陣(Difference Matrix)

$$B(c, e) = \begin{bmatrix} e_1^1 - c_1^1 & e_2^1 - c_2^1 & \cdots & e_l^1 - c_l^1 \\ e_1^2 - c_1^2 & e_2^2 - c_2^2 & \cdots & e_l^2 - c_l^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_1^{n_T} - c_1^{n_T} & e_2^{n_T} - c_2^{n_T} & \cdots & e_l^{n_T} - c_l^{n_T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

距離矩陣(distance matrix)為

$$A(c, e) = B(c, e)B^H(c, e). \quad (2)$$

如果於接收端 CSI(Channel State Information) 為已知，傳輸媒介為 Rayleigh fading channel，Tarokh 導出 Pairwise error probability 的 Chernoff Bound 如下

$$P(c \rightarrow e) \leq \left( \prod_{i=1}^r \lambda_i \right)^{-n_R} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-rn_R}, \quad (3)$$

$\lambda_i, i = 1, 2, \dots, r$  為距離矩陣  $A(c, e)$  的非零特徵值(eigenvalues),  $r$  為  $A(c, e)$  或  $B(c, e)$  的秩(rank),  $n_R$  為接收天線的數目。因此差分矩陣的秩決定漸進錯誤率的斜率，也就是 STC 的架構中影響 diversity gain 的部份。特徵值的乘積則影響 Coding Gain 的部份。因此一個理想的 STC 的設計目標包含如下兩大部份：

- (1) Rank Criterion: 需達到對任一組字碼儘量使  $B(c, e)$  具有比較高的秩(Rank)。當  $A(c, e)$  為 Full Rank 時，Diversity Gain 為最大值 (i.e.,  $n_T \times n_R$ )
- (2) Product Criterion:  $A(c, e)$  的非零特徵值乘積需儘量最大化。

#### PAM-STTC(Space Time Trellis Code) 設計

PAM-TCM 設計簡述:

格狀碼調變 TCM(Trellis Coded Modulation) 有兩種表示法: Ungerboeck 表示式[10]與解析性函數表示法(Calderbank-Mazo 演算法[2])，其設計可先使用解析性函數表示法，再轉換成 Ungerboeck 表示式。如[10]所述，格狀碼調變有如一滑動視窗，將數位資料轉換成一連串符號(Symbols)於傳輸通道，格狀碼為一實數函數，輸入變數為以延遲器相關連之 data bit sequence。每一個 Trellis 圖都可以一個數學函數來表示，此函數稱為 Analytic Representation。其一般式為：

$$f(b_1, b_2, \dots, b_n) = d^{(0)} + \sum_i d_i^{(1)} b_i + \sum_{j>i} d_{ij}^{(2)} b_i b_j + \sum_{k>j>i} d_{ijk}^{(3)} b_i b_j b_k + \dots + d_{1 \dots n}^{(n)} b_1 b_2 \dots b_n \quad (4)$$

其中  $b_1, \dots, b_n$  為輸入變數與狀態變數，其值屬於集合  $\{-1, 1\}$ 。我們可將 Trellis 圖上輸入與輸出的關係代入 Analytic Representation，以求得其係數  $(d^{(0)}, d^{(1)}, \dots, d^{(n)})$ 。對於上式運算我們可用矩陣來表示： $\mathbf{f}$  表所有可能值的向量列，維度為  $2^n$ ； $\mathbf{B}$  為  $2^n \times 2^n$  的矩陣，且  $\mathbf{B}_i = [1, 1, b_2, \dots, b_n, b_1 b_2, b_2 b_3, \dots, b_1 b_2 \dots b_n]$ ， $\mathbf{d}$  表所有  $d^{(i)}$  係數的向量列，

$$\mathbf{d}^T = [d_0, d_1, \dots, d_{12}, \dots], \text{ 且 } d^{(i)} \text{ 的數量 } \binom{n}{i}$$

滿足

$$\binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \dots + \binom{n}{n} = 2^n$$

所以  $\mathbf{d}$  的維度為  $2^n$ ，因此  $\mathbf{f} = \mathbf{B}\mathbf{d}$ ,

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(1, 1, \dots, 1) \\ f(-1, 1, \dots, 1) \\ \vdots \\ f(-1, -1, \dots, -1) \end{bmatrix}$$

因  $\mathbf{B}$  為正交矩陣 ( $\mathbf{B}\mathbf{B}^T = 2^n \mathbf{I}$ ), 所以  $\mathbf{B}^{-1} = \mathbf{B}^T$  導出

$$\mathbf{d} = \frac{1}{2^n} \mathbf{B}^T \mathbf{f} \quad (5)$$

Tarokh 的 Trellis Transition 表設計如下，

		$b_2 b_1$			
		1 1	1 -1	-1 1	-1 -1
$b_4 b_3$					
1 1	3 3	3 1	3 -1	3 -3	
1 -1	1 3	1 1	1 -1	1 -3	
-1 1	-1 3	-1 1	-1 -1	-1 -3	
-1 -1	-3 3	-3 1	-3 -1	-3 -3	

天線 1      天線 2

表 1. Tarokh 的 STTC Transition 設計

由(5) 解出

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_1 = [0012000000000000]^T$$

$$\mathbf{d}_2 = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_2 = [1200000000000000]^T \text{ 所以}$$

$$f_1 = b_3 + 2b_4, \quad f_2 = b_1 + 2b_2,$$

**Set Partition 法**

根據 Criteria (1)、(2)以第一根天線做 set partition，能有效的加大 Euclidean distance，使得 coding gain 能提升，第二根天線之輸出設計以保證 rank criterion 能滿足。設計的表如下：

		$b_2 b_1$			
		1 1	1 -1	-1 1	-1 -1
$b_4 b_3$					
1 1	3 3	3 1	-1 -1	-1 -3	
1 -1	1 3	1 1	-3 -1	-3 -3	
-1 1	-1 3	-1 1	3 -1	3 -3	
-1 -1	-3 3	-3 1	1 -1	1 -3	

表 2 Set Partiton 之設計

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_1 = [0010000020000000]^T$$

$$\mathbf{d}_2 = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_2 = [1200000000000000]^T$$

$$f_1 = b_3 + 2b_2b_4, \quad f_2 = b_1 + 2b_2$$

顯然第一根天線的輸入輸出關係為非線性，不同於 Tarokh 的設計皆為線性的關係。

**天線 1&2 相加後再 Set Partition**

假設輸出電壓為 3 1 -1 -3，相加後的值為 6 4 2 -2 -4 -6，以這組來做 set partition 決定 diagram 的結構，我們得到如下之 Output table:

		$b_2 b_1$			
		1 1	1 -1	-1 1	-1 -1
$b_4 b_3$					
1 1	6	-2	2	-4	
1 -1	2	-6	-2	4	
-1 1	2	-4	6	-2	
-1 -1	-2	4	2	-6	

表 3. 相加後再 Set Partition 之設計  
再將 symbol 分離，便可完成雙輸出的 output table:

		$b_2 b_1$			
		1 1	1 -1	-1 1	-1 -1
$b_4 b_3$					
1 1	3 3	-3 1	3 -1	-1 -3	
1 -1	3 -1	-3 -3	-3 1	1 3	
-1 1	1 1	-1 -3	3 3	-1 -1	
-1 -1	-1 -1	1 3	1 1	-3 -3	

表 4. 相加後 Set Partition 後之再分解

$$\mathbf{d}_1 = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_1 = [0 \ 1.25 \ 0 \ 0.5 \ 0.25 \ 0 \ -0.5 \ 0.25 \ 0.75 \ 0 \ 1.25 \ -0.25 \ 0 \ 0.25 \ -0.75]^T,$$

$$\mathbf{d}_2 = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_2 = [0 \ 0.75 \ 0 \ 0 \ -0.25 \ 0 \ 0.5 \ -0.25 \ 0.75 \ 0 \ 0.75 \ 0.25 \ 1.5 \ -0.25 \ -0.75]^T$$

可看出輸入輸出的關係非線性的成份增加了。

**伍、結果與討論**

於 TDD 下，MCA adaptive array 若在通道狀態信息(CSI) Reciprocity 成立的條件下，理論上 Transmit Diversity 的性能應和 Receive Diversity 一樣。由於 MCA adaptive array 優異的性能，使得在 MIMO 狀況下的接收信號估計，與於 SIMO 狀況下所模擬出的結果，幾乎

一樣(參考[11])，因此分析上我們可以採用[11]之結果(SIMO 的 Receive Diversity)，即此時的 Transmit Diversity 約為  $\text{const.} (1/\sigma^2)^{-n_t}$

模擬結果如圖 1。MAC adaptive array 之結果比對於[11]之結果(此處使用 Bit Error Rate)

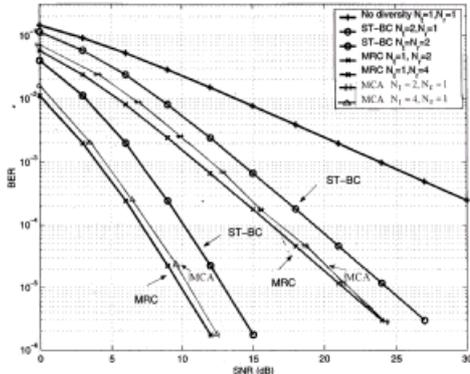


圖 1. MCA adaptive array 不用 STC 時，其 Transmit diversity 與其他架構之比較

由圖 1.所示，在 Coherent time 大時，於 TDD 下 Reciprocity 成立，MCA Adaptive array 不需 Space Time Coding 亦可達到 Transmit Diversity 的功能，且性能優異，與 MRC (Maximum Receive Combining)約為相同。但在 FDD 或 Time selective fading channel 下，coherent time 很小時，於 MCA Adaptive Array 中必須加入 STC 之設計，以增加 Transmit Diversity。於圖 2.模擬 Tarokh 與改良後之 PAM STTC。(1 frame=130 symbols, FER (Frame Error Rate))

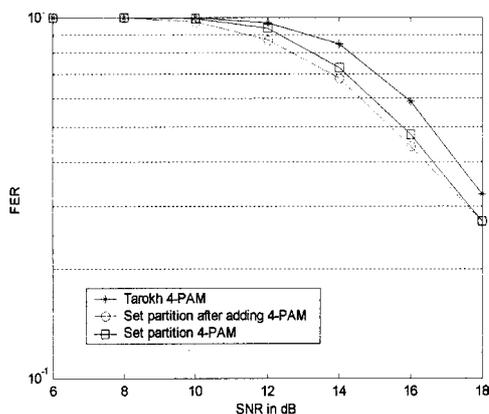


圖 2. 改良後之 PAM STTC 與 Tarokh 的比較

由上圖可看出使用不同的 set partition 可增加 coding gain，但必須保持距離矩陣為全秩。如何解析性的找出最佳碼，以及超過兩根以上發射天線的設計，留待未來的研究方向。

## 陸、參考資料

- [1] Tsung-Ching Liu, "The Modular Covariance Adjustment Adaptive Array for CDMA Wireless Communications," IEEE International Conf. On ASSP, April 1993, pp. IV-180-IV-183
- [2] A.R. Calderbank and J.e. Mazo, "A New Description of Trellis Codes," IEEE Trans. On Information Theory, Vol.30, Nov. 1984, pp. 784-791
- [3] Arogyaswami J. Pauraj and Boon Chong Ng, "Space-time Modems for Wireless Personal Communications" IEEE Personal Communications, Feb., 1998, pp. 36-48
- [4] TIA 45.5 Subcommittee, "The CDMA 2000 candidate submission" draft June 1998
- [5] R. Wichman and A. Hottinen, "Transmit Diversity WCDMA system," Tech. Rep., Nokia Research Center, 1998
- [6] P.W. Wolniansky, G.J. Foshini, G.D. Golden and R.A. Valenzuela, "V-Blast: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over Rich Scattering Wireless Channels," in Proc. ISSSE-98, Sept. 1998, pp.295-300
- [7] L.J. Cimini, Jr., J.C.-I. Chuang and N.R. Sollenberger, "Advanced Cellular Internet Service (ACIS)," IEEE Commun. Mag., Vol.36, pp. 150-159, Oct 1998
- [8] Siavash M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," IEEE Journal on Select Areas in Communications, Vol. 16, No. 8, Oct., 1998, pp. 1451-1458 M.J. Borran, M.
- [9] V. Tarokh, N. Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time Codes for High Data Rates Wireless Communications: Performance Criterion and Code Construction," IEEE Trans. of Information Theory, Vol. 44, Mar. 1998, pp. 744-765
- [10] G. Ungerboeck, "Trellis-Coded Modulation with Redundant Signal Sets. Part I: Introduction; Part II: State of the Art," IEEE Commun. Mag., Vol.25, Feb. 1987, pp. 5-21
- [11] Ganesan, G. and Stoica, P "Space-time diversity using orthogonal and amicable orthogonal designs" Wireless Personal Comm. 18:165-178