

# 爆炸性之通訊技術—MIMO 多天線技術之發展及應用

廖建興

## 1.前言

隨著近年來個人通訊需求的迅速發展及多媒體訊息交流之急遽增加，頻譜已成為日益寶貴之資源。因此，第三世代(3rd Generation, 3G)及所謂超越第三世代(Beyond 3rd Generation, B3G)或甚至所謂第四世代(4th Generation, 4G)之無線通訊技術之重要課題即為在既定頻譜範圍內，加強無線接取(Radio Access)能力及提供更優異之頻譜利用效率及通訊吞吐容量(throughput)提昇。為滿足上述需求，諸多關鍵技術有待開發。其中，智慧型天線(Smart Antenna)通訊技術為極具代表性之研究主題[1][2]。智慧型天線技術主要係藉由空間自由度之引入，提供一個可受控制的空間多重進接(Spatial Division Multiple Access, SDMA)能力。SDMA 的主要效果在壓抑共通道干擾(Co-channel Interference)，可在不影響通訊品質的前提下提升系統容量，或在不改變系統容量的前提下提升通訊品質。

智慧型天線通訊技術其於目前 3G 及 B3G 無線通訊系統發展中受重視之主因，係因其具備三項特性，即波束成形(Beaming Forming)能力、分集(Diversity)增益，以及多工(Multiplexing)增益能力，其可分別利用收發天線間之通道狀態訊息(Channel State Information, CSI)，用以提昇訊雜比、降低通道衰落(Fading)影響，及有效提昇通訊吞吐容量等；亦即，在不需增加頻寬的前題下，有效降低干擾量（包含多重進接及共存通道干擾訊號）增加接收訊號的品質及可靠度、提供了空間分集(Spatial Diversity)效益克服通道衰減等問題；同時更可透過如本文所強調之多重輸入/輸出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)之多天線技術，以”爆炸性”(explosive)地增加傳輸吞吐容量(throughput) (參圖 1)。

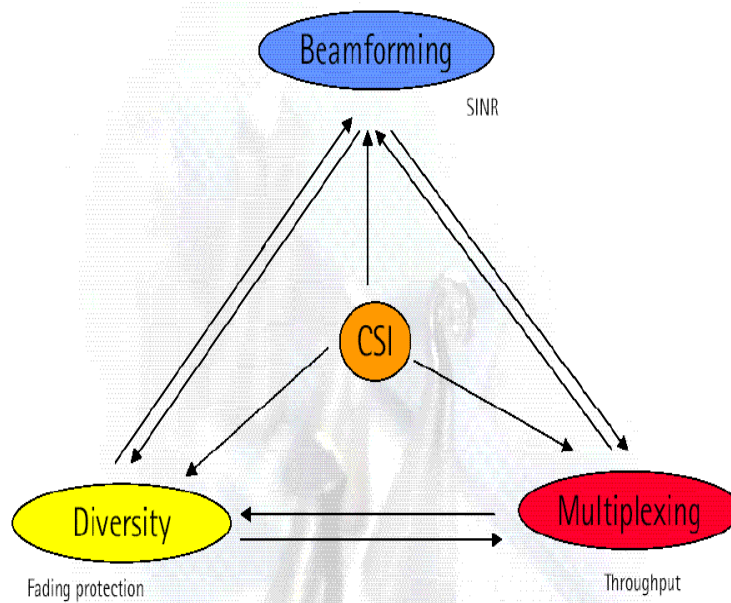


圖 1 智慧型天線特性與通道狀態訊息(CSI)關係示意圖

所謂“爆炸性”(explosive)地增加傳輸容量，或許吾人可以做一比喻，如果資料流(data stream)如流水般，則水管(Pipe)愈粗或水管愈多，則其能同時供水之能力或速率便愈大，但對“無線”通信(Wireless Communication)而言，又是如何？傳統之單發單收型天線架構(Single Input Single Output, SISO)，並未善加利用空域(Space)維度之通信能力，而通常係於時間(Time)或(及)頻域上(Frequency)著墨發展新的通訊技術能力，易言之皆在極力排除管內積垢(亦即提高信雜比之意)，有效容量之提升似乎長久皆受限於 Shannon 容量公式之對數(LOG)迷障中；而多發多收型 MIMO 天線架構之容量提升效益或可比擬如“有線”管線倍數提升效益(參圖 2 示意圖)，其可擺除 Shannon 容量公式之對數(LOG)迷障！

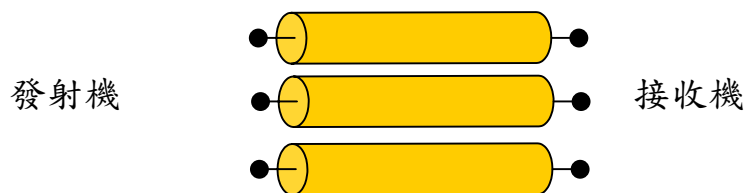


圖 2 MIMO 多天線架構等效有線管線(pipe)概念示意圖

## 2.MIMO多天線技術效益及原理

### 2.1 MIMO 多天線技術架構及效益

所謂之 MIMO 多天線技術係於發射端及接收端同時運用多根天線及相關之通訊信號處理技術，用以有效提昇系統容量，其中技術發展最早及最具代表性

者，當屬美國朗訊科技(Lucent Tech.)貝爾實驗室所發展出之 BLAST (Bell-labs Layered Space Time)通信技術。BLAST 亦是朗訊科技貝爾實驗室所擁有專利的一項劃時代及革命性之時空通信技術(BLAST 亦即大爆炸之意也)。它利用通道的空間特性來提高頻譜效率，要求使用多個天線來精確地取樣這些空間特徵，其架構示意圖參圖 3，其並已列入下一代通訊系統標準中[3]。

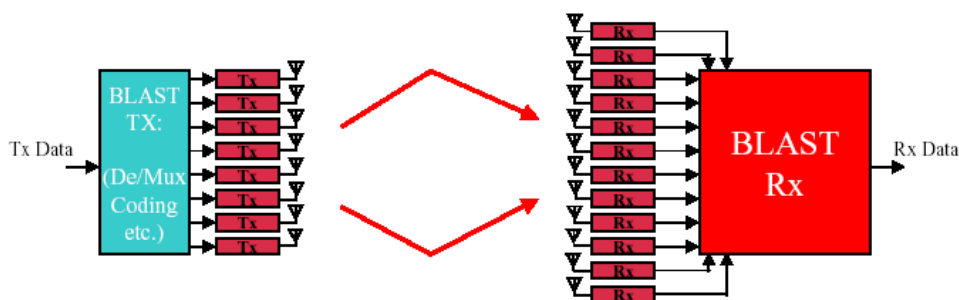


圖 3 MIMO 多天線架構示意圖

BLAST 是一種無線通信新技術，利用通道的散射(Scattering)來得到大的多工容量增益，利用信號的多重路徑傳播來提高系統的性能。貝爾實驗室的研究人員已在實驗室裡對 BLAST 系統進行了不斷地改進和驗證，顯示的結果令人感到驚喜，容量帶寬比甚至可達到 20-40 bps/Hz，例如頻帶寬 1MHz 則吞吐容量可達到 20-40 Mbps；而使用傳統無線調制技術則僅約為 1-5 bps/Hz 左右(蜂巢系統)，因此驗證 BLAST 乃是一種極具競爭力和技術優勢的通訊技術，可以顯著提高無線系統的容量及效率。

在 BLAST 系統中，輸入資料經解多工(DeMux)器或序列轉並列(Serial to Parallel, S/P)處理器處理後，分送至多個發射天線上，每個天線發射不同的資料流，但如果不標識區別這些資料流，共通道用戶干擾將減少多工容量增益，因此便需運用一些方法來標識區別這些資料流，例如使用 Walsh 碼、Hadamard 碼等正交可變展頻因子碼(Orthogonal Variable Spreading Factor, OVSF)。但是額外的帶寬需求將降低頻譜效率增益，所以尋找一種不降低系統增益的標識方法便相形重要。如果有足夠多的散射(Scattering)，通道本身便可以標識區別，但這需於所有的天線單元之間有一定程度的相關散射量；另外接收機亦須知道通道的散射特性，接收機可以使用發射機的導引信號(Pilot)和訓練序列(Training Sequence)來測量通道。利用導引信號與通道的特定標識進行卷積(Convolution)處理，如此接收機便可以進行區分而毋需增加系統帶寬。對於相關解調，即使不使用 BLAST 也必須使用導引信號；使用 BLAST 時，硬體設計複雜度大小隨發射天線之個數的增加而增加。

圖 4 係一 4x4 MIMO 多天線發射端設計實作架構圖[4][5]，其中儘標示示意二組使用者碼(User Code)，其與四通道之導引(Pilot)通道碼皆需屬正交特性碼；Gold Code 係屬於一種擬正交隨機碼(Pseudo Random Noise Code)用以更加攪亂

四個天線通道之散射性(如前述)；而同步用 Sync 碼毋需正交，其係提供接收端載波同步參考之用。序列轉並列(Serial to Parallel, S/P)處理器係用以將資料流分成四組子資料流，覆經前述各功能區塊之功能，將原始高速資料流同時以四根天線通道匯送而出。

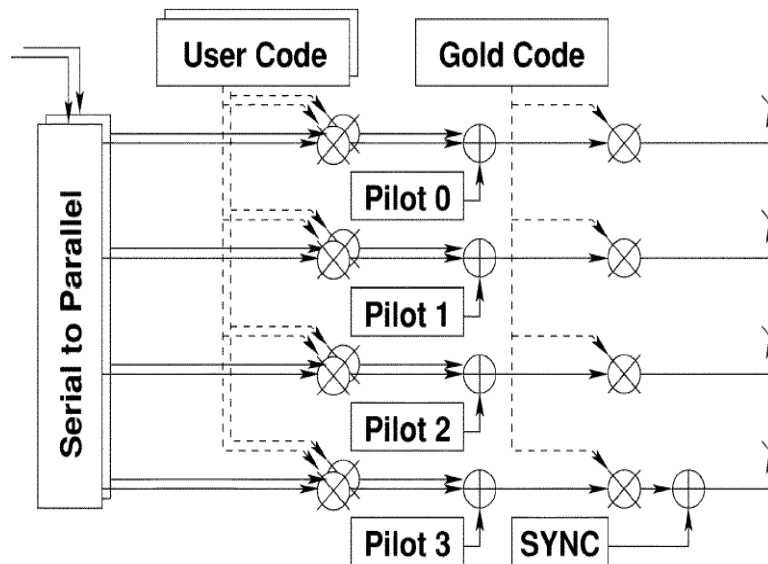


圖 4 4x4 MIMO 多天線發射端設計實作架構[4]

## 2.2 MIMO 多天線技術基本原理

有關一  $N \times M$  MIMO 多天線架構數學模型參圖 5，其中  $h_{NM}$  係一特定之發射和接收多天線間的通道傳播相關因子，其中包括發射端之信號特徵變化、收發天線間之通道環境變化(如通道衰減及多重路徑效應等)，以及接收端之信號特徵變化等， $N$  係指發射天線根數，而  $M$  係指接收天線根數。舉例而言，如  $N=M=2$ ，則原來的資料流(data stream)被分為兩個半速率的獨立子資料流(data sub-stream)，一個在發射端  $x_1$  上發射，接收端  $y_1$  通過傳播通道  $h_{11}$  接收到這個信號，接收端  $y_1$  通過傳播通道  $h_{21}$  接收到這個信號；而對於發射機  $x_2$  也是同樣的情況。當傳播環境中有足夠多的散射時，增加頻譜密度的關鍵在於這些相關因子之間是非相關(non-correlated)的。在室內環境中，這種前提是顯然成立的，而在一個典型的巨蜂巢中也可能有足夠多的通道散射量，足為 MIMO 使用。

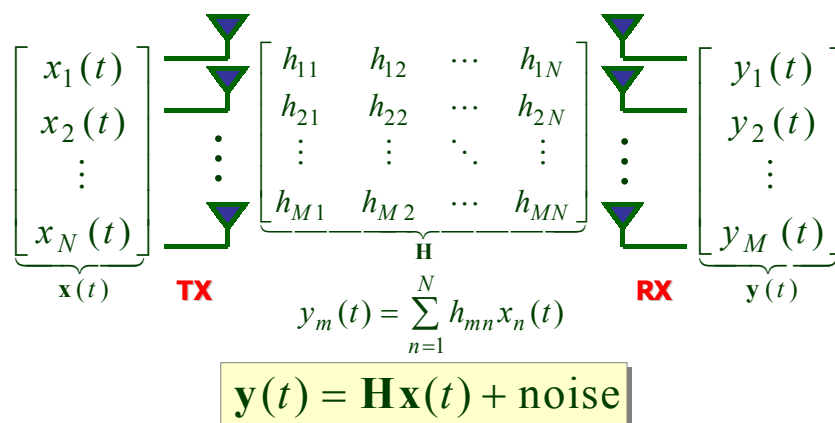


圖 5 NxM MIMO 多天線架構數學模型

而在解調所有的資料流之後，總的資料速率等於子資料速率乘以天線個數，這樣可以增加  $\min(N,M)$  倍容量，而沒有增加任何發射功率，無論多少個天線這種增加都是線性的。而主導 MIMO 多天線技術效益者，正如前述，為天線數目較少的一方，即  $\min(N,M)$ ，例如， $5 \times 2$  MIMO 技術和  $2 \times 2$  的效果相似，而  $3 \times 10$  的則和  $3 \times 3$  的相似。因此，以現今的技術而言，無論是傳輸方及接收方，均需同時增加天線數目，以使 MIMO 的成效更為明顯。

隨天線個數的增加，各子資料流的功率減少，但是如果接收天線的個數也增加，那麼同樣可以保證接收功率大小，而無任何額外代價。但如果無足夠多的散射來標識區別這些子資料流，則由於干擾，系統容量將因之減少。所以 BLAST 尤其適合於繁華和熱點地區，因為那裡有足夠多的散射，同時也有較高的容量和高速資料應用需求。對一  $2 \times 2$  MIMO 系統而言，在接收天線合併兩個子資料流時，區分子資料流的唯一方法係通過不同的傳播通道相關因子。以下係解調這些信號的基本可行方法：

- 由於接收機可以根據導引信號和訓練序列來區分通道，所以接收機可以使用匹配濾波器(Match Filter)來區分信號。
- 在一些應用中可以使用最大概數法(Maximum likelihood, ML)，這是一種最優檢測方案，但是它的複雜度隨著發射天線個數的增加而指數增加，所以只能應用於發射機個數比較少的情況。
- 較為常用而簡單且實用的方法是將它與多用戶檢測技術結合起來。在多用戶檢測系統中，每個用戶的信號被解調後，從目標信號中分離出去，可以使用類似的方法來解調子資料流。

所有的發射子資料流在每個接收天線合併，它們之間的唯一區別是不同的通道相關因子。在 CDMA 系統中可以從導引信號中得到通道相關因子，每個發射天線都有各自之導引信號為接收天線提供參考。由於通道的衰落特性不同，這

些子資料流的相對信號強度也不同，首先可選擇具有最佳信雜比的子資料流，並解調之，如果成功解碼便從接收信號中將此子資料流帶來的干擾分離出去，並將組合資料流中最強的一個分離出去；次則，尋找信雜比為最佳的子資料流，然後解調、分離之，而後循序執行此一過程直到解調所有的子資料流。這種方法與 ML 最大概數法相比，儘管是次優的方法，但是非常有效，且其複雜度隨著天線個數的增加而線性增加。圖 6 係一 4x4 MIMO 多天線接收端設計實作架構之前端處理部分(後端處理未圖示，但主要係將 RAKE 接收單元處理後之信號，以諸如 ML 法則進行 MIMO 偵測(Detector)處理)[4][5]。前置處理(Preprocessing, Prep.)單元係用以 AGC 自動增益迴路控制接收端信號，維持接收信號之一定位準，頻偏估測單元(Frequency Offset Estimator)係用以整合 NCO 數控振盪器構成修正迴路，修正發送端信號經通道環境後所可能引發之頻率偏移；通道估測單元(Channel Estimation)及鈹指搜索單元(Finger Search)係用以估測通道環境參數及搜索瞬時多重路徑參考係數，再彙送至 RAKE 鈹式接收單元(一種匹配濾波器)進行信號之有效組合匹配處理。

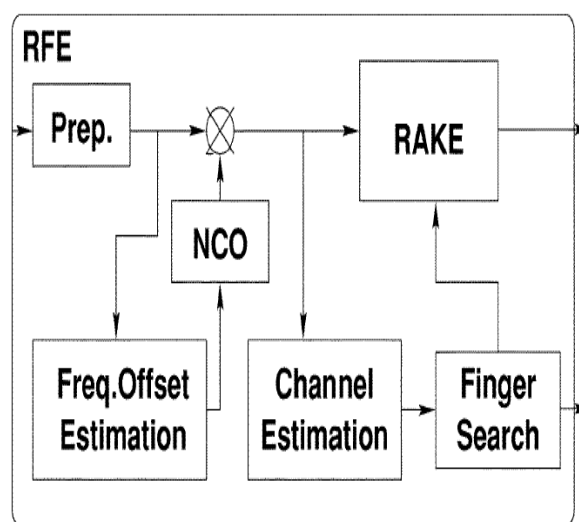


圖 6 4x4 MIMO 多天線接收端設計實作架構[4]

BLAST 系統的容量隨發射天線的個數線性增加，根據 Shannon 通訊容量理論給出的資料容量  $C$ ，單位為 Mbps，在單發射天線和單接收天線情況下： $C/B = \log_2(1+S/N)$ ， $B$  是系統帶寬(MHz)， $r = S/N$  是訊雜比， $C/B$  是頻譜效率，隨  $S/N$  對數增加。而在一個多天線系統中，資料容量等式發生了很大變化，BLAST 容量  $C/B = \log_2(\det(I+r/N \times \mathbf{H}\mathbf{H}^*))$ ， $I$  是一個  $M \times M$  矩陣。為了進行公平的比較，每個天線的發射功率減少到  $1/N$ ，儘管這個結果表面上類似於單天線結果，頻譜效率現在包含一個決定性的因子，其取決於通道相關因子的線性相關特性( $H$  列)。頻譜效率隨  $\min(N,M)$  線性增加，這是一個相當大的提昇。容量等式是一個理論上的最大值，實際實現的速率小於這個值，可以使用通道的多維特性來實現增益的提高。在目前之發展系統中，為了提高資料傳輸速率，必須增加星座圖



(Constellation)的維數(Dimension)，星座圖的增加有效地增加了用戶速率，但卻降低了整個系統的效率，這就是在話音系統中使用 QPSK 和 GMSK，而在 EDGE 中使用 GMSK 和 8-PSK 的原因了。除了兩個接收天線的系統外，BLAST 很顯然優於增加星座圖維數此法。

### 3.MIMO多天線技術應用

#### 3.1 MIMO 多天線技術特性應用範疇

近年來，無線通訊系統一直隨著高速度、高頻寬這兩個方向發展；而未來行動電話的主要用途，已不會再侷限於現在的語音通訊及低速上網，反之將是高速上網、視像傳送等等需求。然而，要提高速度、頻寬及傳送的品質，每個基地台能覆蓋的面積就會降低；因此，若網絡商要為同一面積的地區提供無線寬頻通訊服務，基地台數目就勢必要較現時者大幅提升，其所衍生的問題並非單單是成本的問題，基地台距離過近會帶來嚴重的多址干擾問題，也會影響資料傳送的穩定性。因此，為解決此兩難問題，MIMO 技術藉由基地台及手機分別安裝多根天線方式，可提供更穩定的資料傳輸連線，而使網絡的容量及頻寬能更有效地運用。同時，由於雜訊量減少，資料傳輸的品質及速度會有所提升，而每個基地台的涵蓋範圍亦可擴大，例如使用  $3 \times 3$  MIMO 技術(基地台 3 條天線，手機 3 條天線)，基地台的涵蓋範圍可增大五倍。有關 MIMO 多天線技術特性應用範疇示意圖如圖 7 所示，尤其在愈嚴重散射通道(Scattering Channel)環境中(非較單純之鏡射通道環境(Specular Channel))，如室內及部分之如都會區室外環境當中，MIMO 技術能提供愈明顯之分集增益(Diversity Gain)或多工容量增益(Multiplex Gain)。

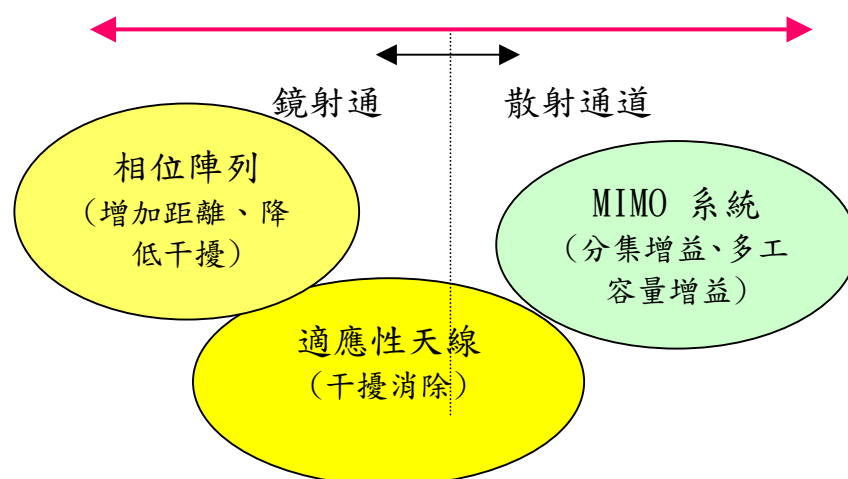


圖 7 MIMO 多天線技術特性應用範疇示意圖

MIMO 技術所帶來的額外速度提升，比 TCM 等資料壓縮技術高約十倍，因此，未來 3G 及 4G 行動電話將勢必要配合 MIMO 技術，以提升其速度及

頻寬，擴充其可用性；並為網絡商減低興建基地台所需的成本，間接使其服務收費有更大的下調空間，而使更多使用者能享受到無線高速傳輸所帶來的方便。BLAST技術實際將主要應用於UMTS和CDMA2000的高速資料業務(High Speed Data, HSD)，終端設備主要是PDA和筆記本電腦等。

### 3.2 3G 無線基地台解決方案—OneBTS

正如前述，所謂之MIMO多天線技術發展中，其技術發展最早及最具代表性者，當屬美國朗訊科技(Lucent Tech.)貝爾實驗室所發展出之BLAST MIMO多天線通信技術。同時，朗訊科技公司為強化其3G無線基地台平臺(Platform)，從而提高平臺的性能和容量；同時為移動網路運營商用戶帶來長遠的投資保護，其支持3G的OneBTS基地台採用了貝爾實驗室設計的MIMO BLAST技術以及增強放大器能力，可以確保支持未來不斷增長的顧客群以及移動語音和資料業務，其與單純的智慧型天線解決方案不同，OneBTS基地台可以方便地集成多種天線和放大器技術，從而隨著需求的增長，而不斷提高容量和涵蓋範圍——而無需新增基地台！其方式類似於PC製造商在主板上增加更大的容量和更多的功能一般；其並借助先進的軟體無線電(Soft Radio)信號處理技術，確保行動通訊營運商在未來網路方面的投資能得到充分的保護。

OneBTS體系結構係為W-CDMA和cdma2000等擴展頻譜及3G標準提供的通用基地台解決方案，可以通過多種創新性的傳輸技術，實現從原始的部署配置到智慧型天線，最終到突破性的MIMO BLAST多天線技術的演變。而各大全球標準化組織已考量或已將BLAST等多天線技術作為迅速擴大無線網路容量和涵蓋範圍的技術手段之一[3]。而視營運商網路設計與配置不同，智慧型天線技術可以將涵蓋範圍或將資料訊息容量提高。面對高速移動互聯網業務即將出現的爆炸性增長，OneBTS平臺則進一步充分利用了MIMO BLAST——這一當今無線市場最先進的智慧型天線技術創新所帶來的更高頻譜效率。事實上，通過在OneBTS的設計中運用BLAST技術，既定波段的容量將與使用的天線數量成正比。MIMO BLAST技術並可協助營運商改善3G商業環境與戰略相吻合，對於那些已經或計劃在頻譜許可和基礎設施方面耗費巨資，以便迅速經濟地滿足高速移動互聯網服務需求的營運商而言，該技術帶來的優勢尤其顯著。

其所有無線接取網路產品均根基於CDMA(分碼多重進接)專門技術，這些產品具備以下三個基本優點：擁有一個通用的無線接取平臺，可使營運商在針對不同客戶群體實施不同的標準和分配頻譜資源時具備極大的靈活性；模組化放大器設計，可以幫助運營商逐步擴大功率大小和網路容量；智慧型天線技術和專用的MIMO BLAST多天線技術創新將帶來循序改善的性能和容量。此些處理方式均可以提高個別用戶的資料傳輸率或系統的總體容量，或二者兼顧。而至於如何減少在另一重要課題——無線射頻方面的成本，目前正在與手機生產廠商聯合研究和解決中。One BTS外觀圖參圖8(a)之OneBTS平台[4]，而以之為模擬基地台(Base Transceiver Station, BTS)，所發展出之一4x4 MIMO BLAST接收機雛型如



圖 8(b)[4]，其係以如 FPGA、DSP 等整合性之快速雛型之軟體無線電(Soft Radio)發展方法所發展而成。

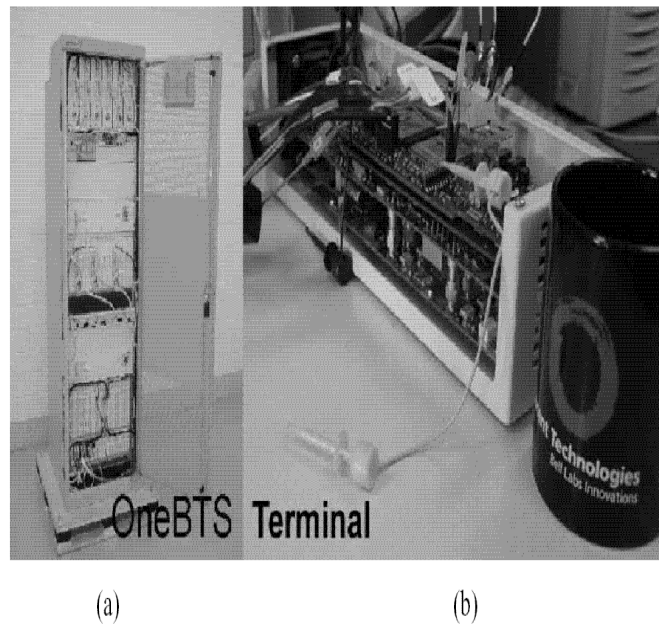


圖 8 One BTS 外觀圖(a)OneBTS 平台；(b)4x4 MIMO BLAST 接收機雛型[4]

## 5. 結論

智慧型天線通訊技術具備提昇訊雜比、降低通道衰落影響，及有效提昇通訊吞吐容量等；亦即在不需增加頻寬的前題下，有效降低干擾量、增加接收訊號的品質及可靠度、提供了空間分集效益克服通道衰減等問題；同時更可透過如本文所強調之多重輸入/輸出 MIMO BLAST 多天線技術，於既定波段帶寬大小下的容量將與使用的天線數量成正比，”爆炸性”(explosive)地增加傳輸容量；亦由於此突破性的 MIMO BLAST 多天線技術的演變，各大全球標準化組織已將 BLAST 等多天線技術作為迅速擴大無線網路容量和涵蓋範圍的技術手段。MIMO BLAST 技術並可協助營運商改善 3G 商業環境與戰略相吻合，對於那些已經或計劃在頻譜許可和基礎設施方面耗費巨資，以便迅速經濟地滿足高速移動互聯網服務需求的營運商而言，該技術帶來的優勢尤其顯著！

我國亦已將此 MIMO 技術列於電信國家型計畫—B3G 之重要發展關鍵技術之一[6]，藉由投入此 B3G 行動通訊技術相關研究，以因應無線通訊與寬頻網際網路結合之未來電信發展趨勢，激勵無線網際網路(Wireless Internet)服務與內容，以服務與內容發展帶動國家整體電信產業。

## 6. 參考文獻

- [1]. J. C. Liberti and T. S. Rappaport, Smart Antennas for Wireless Communication Communications: IS-95 and Third Generation CDMA

Applications , Prentice Hall PTR 1999.

- [2]. S. Bellofiore , C. A. Balanis , J. Foutz and A. S. Spanias , “Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1: Overview and antenna design,” *IEEE Antenna’s and Propagation Magazine*, pp. 145-154, June 2002.
- [3]. 3GPP , “Physical layer aspects of UTRA high speed downlink packet access ,” tech. spec. TR 25.848 V4.0.0 , Mar. 2001.
- [4]. Ali Adjouani , Eric C. Beck , Andreas P. Burg , Goran M. Djuknic , Thomas G. Gvoth , D. Haessig , Salim Manji , Michelle A. Milbrodt , Markus Rupp , Dragan Samardzija , Arnold B. Siegel , Tod Sizer II , C. Tran , Susan Walker , Stephen A. Wilkus , and Peter W. Wolniansky , “Prototype experience for MIMO BLAST over third-generation wireless system ,” *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS* , vol. 21 , no. 3 , Apr. 2003 , pp. 440-451.
- [5]. A. Burg , E. Beck , M. Rupp , D. Perels , N. Felber , and W. Fichtner , “FPGA implementation of a MIMO receiver front-end for UMTS ,” in *Zürich Seminar* , Zürich , Switzerland , Feb. 2002 , pp. 8-1–8-2.
- [6]. 鄧啟福/林一平 , ”電信國家型計畫—B3G 規劃概述” , 通訊雜誌第 97 期 2002.2 月號。