

智慧型天線及其在未來無線通訊系統的發展運用

林高洲

壹、前言

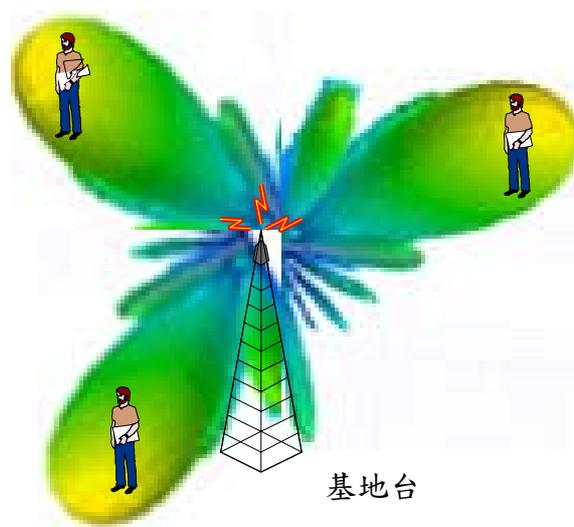
隨著無線通訊需求的迅速發展，多媒體資訊交流的急遽增加，下一世代的無線通訊技術將必需滿足高速率、高容量、高品質與高彈性等運用需求，亟需藉助高效率的頻譜運用技術來支持，其中頻譜勢必成為日益寶貴的資源之一；基此考慮，無線通訊系統應特別考慮到「無線接取(Radio Access)能力」的提升，期能達到最佳的頻譜運用效率；在諸多的技術發展中，智慧型天線(Smart Antenna)技術即為一提升頻譜資源效率、系統容量和通訊品質的有效途徑。

基於智慧型天線技術已蓬勃發展的運用於現有通訊系統中，並即將廣泛納入未來不同無線通訊系統規範中之考量，本文除將扼要介紹智慧型天線技術的原理、功能、特色外，並將進一步說明智慧型天線在未來無線通訊系統的研製運用與發展趨勢，期能使讀者能充分瞭解「智慧型天線技術」在無線通訊系統運用之重要性，並能有效掌握其未來發展趨向。

貳、智慧型天線的基本概念

智慧型天線之概念[1-5]源自於適應性天線陣列(Adaptive Antenna Array)[6]，最初是應用於雷達、聲納和軍事通訊領域，近年來由於數位訊號處理技術的迅速發展、IC 處理速度的提高和價格的普及，使得智慧型天線技術在商用無線通訊系統中的運用可能性大幅提高。所謂智慧型天線，可視為一種充分利用空間資源進行訊號品質

提升、干擾抑制(或消除)及適應性波束調整的機制。其最初的運用模式是利用天線陣列提供之天線增益(Antenna Gain)用以提升訊號雜訊比(SNR)；而為對抗無線通道的多路徑衰落現象，亦可利用天線陣列進行空間分集(Spatial Diversity)，以獲得分集增益(Diversity Gain)；另一種更具智慧的方式是利用訊號方向性之波束形成(Beamforming)技術，它能運用具自我適應、調整功能之演算法驅動陣列天線，使之產生特定的波束形狀，將主波束對準目標訊號用以強化接收品質，同時調整零陷(Null)點，使之對準干擾訊號用以抑制(或消除)干擾，從而達到增加系統容量、擴大涵蓋面和提高傳輸率的多重目的(如圖一)。



圖一：智慧型天線(Smart Antenna)運用示意

值得一提的是，智慧型「Smart」能力並非來自天線本身，而在於藉由巧妙的基頻(或包括中頻)數位訊號處理(Digital Signal Process, DSP)演算法，有效執行無線通道估計、訊號判別、分集、等化、耙狀接收等工作，最終是產生一個能極大訊號對干擾雜訊比(Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio, SINR)，或極小 BER 的空時場型。

智慧型天線技術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（如圖二） [1-2]。SDMA 的主要效果在壓抑共通道干擾(Cochannel 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。傳統使用之固定扇形區分(Sectorization)通常可提升少許容量或通訊品質，但在引進智慧型天線後，改善程度可大幅提高，其原因是智慧型天線不僅能有效地消除干擾，同時也能對目標訊號提供較大的增益。未來，SDMA 的終極理想目標是希望能達到每一用戶與基地台之間，均有一專屬的波束做為其上下鏈結之通道，而不同用戶之波束經由特殊設計後，具有不相互干擾之特性（如圖一）。

系統理論與實驗模擬皆證明，智慧型天線技術於無線通訊的運用效能十分卓著。智慧型天線對於容量改善的助益，可以從 Shannon's 的容量 C 與頻寬 B 的關係式來瞭解 [5]：

$$C = B \log_2(1 + SNR) \text{ bit/s} \quad (2-1)$$

當使用 M 個單元天線時，其 SNR 將平均分攤到 M 個單元天線上，因此每個天線容量可表示為：

$$C_m = B \log_2(1 + SNR/M) \text{ bit/s} \quad (2-2)$$

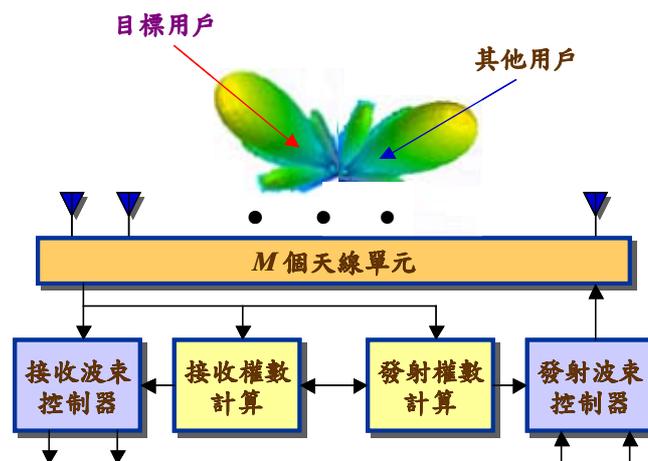
這裡 $m = 1, \dots, M$ 。因此， M 個單元天線的總容量 C 可簡單的表示成：

$$C = \sum_{m=1}^M C_m = MB \log_2(1 + SNR/M) \text{ bit/s} \quad (2-3)$$

上式簡單可看出當天線單元增加，則系統容量亦隨之增加，其關係如圖六所示，當 $M \rightarrow \infty$ 則容量 C 將直接與信號雜訊比(SNR)成正比關係： $C \propto SNR$ 。

綜言之，智慧型天線在無線通訊系統之運用具有下列優點：

- (1). 提高天線增益，降低訊號傳輸所需功率
- (2). 擴大系統的覆蓋區域，減少基地台部署個數
- (3). 減少用戶間干擾，提高系統容量
- (4). 有效控制波束，提高頻譜使用效率
- (5). 提供空間分集，降低多路徑衰落影響
- (6). 提昇鏈結品質，達到高速傳輸目的
- (7). 實現行動用戶定位，提供嶄新電信服務

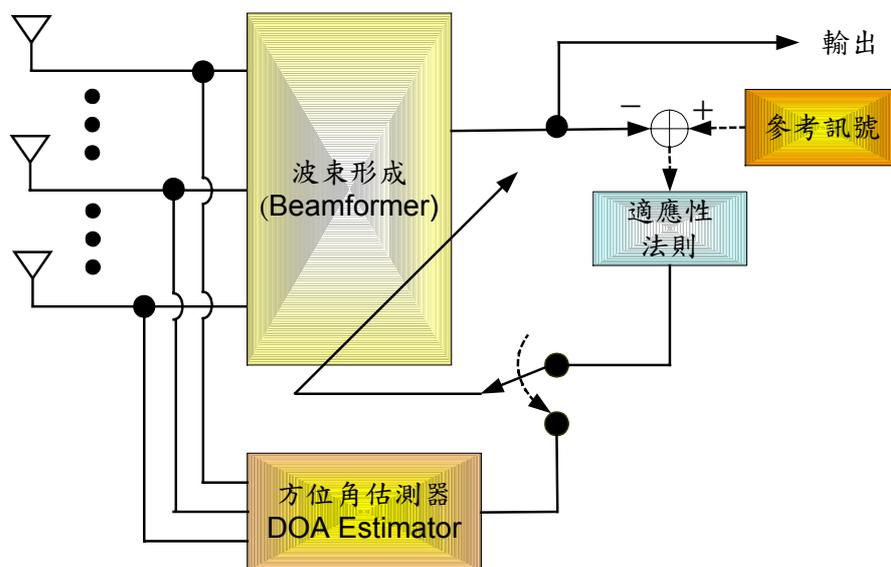


圖二：空間多重進接(SDMA)示意

參、智慧型天線的設計考量與功用比較

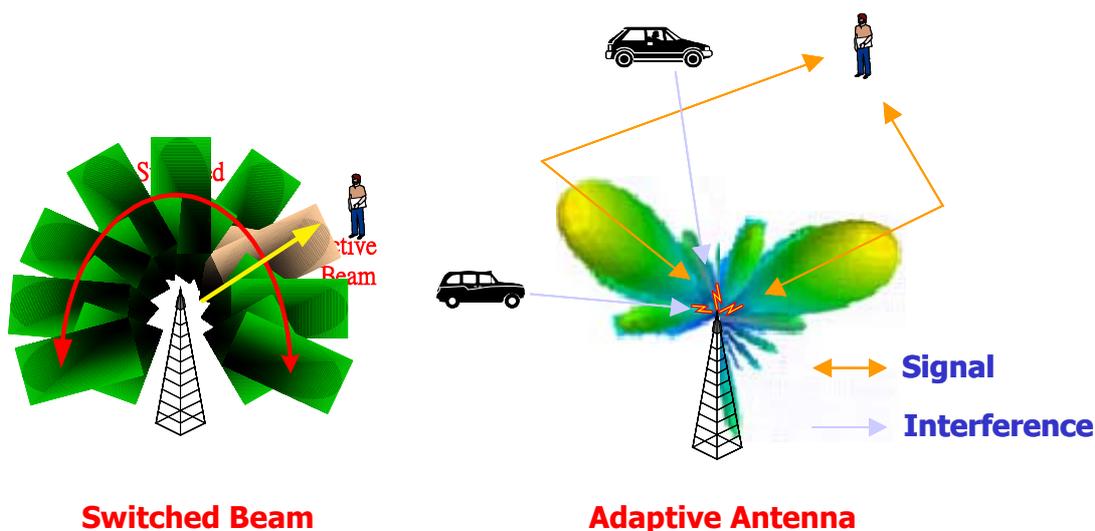
Smart Antenna 可用於接收及傳送的架構，但較常運用於接收端；一般的接收架構如圖三，主要利用陣列方位角(Direction of Array, DOA) 估測器來估計使用者的位置，或是使用參考訊號(Reference Signal)來執行適應性的調整法則，進而完成的波束控制；使用需要參考訊號的方式是比較容易的途徑，但較效率較低；而使

用不需要參考訊號的陣列方位角估測器方法則為較有效率的方式，但系統實現的複雜度提高。



圖三：智慧型天線的基本架構示意

一般將需依據系統運用需求來做智慧型天線的軟硬體運用規劃；至於常用的波束調整方式依照設計考量，可概分為切換波束 (Switched Beam)及適應性天線 (Adaptive Antenna)兩類（如圖四）[1]，概述如下：



圖四：智慧型天線的運用分類示意

(1). Switched Beam :

利用多個指向不同方向的波束覆蓋整個通訊區域，當用戶進入某特定波束的涵蓋區(Beam Footprint)時，智慧型天線會切換至該波束，使得接收訊號強度達到最大。由於方法簡單且不需複雜的運算，Switched Beam 智慧型天線仍為目前最被廣泛使用的類型。

(2). Adaptive Antenna :

運用數位訊號處理和適應性陣列技巧，藉訊號方向性及傳播通道特性計算並適應性地調整天線權值(Weights)，產生所需之波束場型 (Beam Pattern)。目的在將主波束對準目標訊號並同時抑制(或消除)其它干擾訊號，以強化接收品質。Adaptive Antenna 的效益雖高，但因需執行複雜的適應性演算法，實現成本較高。為滿足無線通訊高頻譜效率需求，Adaptive Antenna 智慧型天線仍為未來之趨勢。

由上述可知，Adaptive Antenna 與 Switched Beam 對於所要接收信號與干擾信號所形成的波束場型 (Beam Pattern) 的處理或調整是不同。如圖五所示，Switched Beam 只要求主波束(Main Lobe)能收到所要接收信號即可，而不要求將干擾信號零陷(Null)掉；至於 Adaptive Beam 則要求主波束要能對準所要接收信號且要求將干擾信號零陷掉，以期能提供一個能達到最大信號雜訊干擾比(MSINR)效果的波束場型 [7]。



圖五：切換波束與適應性天線之波束場型示意圖

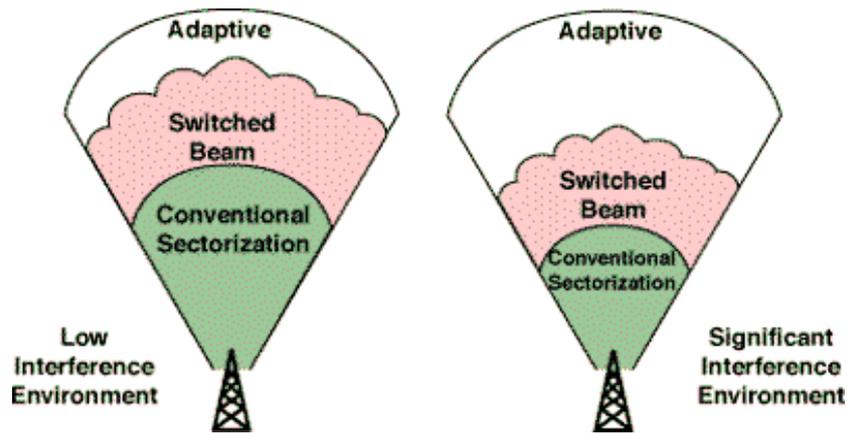
另外，涵蓋區域的改善也是智慧型天線運用的重要運用考慮，一般使用智慧型天線可比使用傳統天線獲得 20%~200%的區域改善效益，所獲得的區域改善效益與所運用的環境、系統的軟硬體架構息息相關，一般覆蓋改善效益因子與天線單元數有關，據研究可表示為 [5]：

$$\text{Increase Range Factor} = M^{1/\gamma} \quad (2-4)$$

這裡 γ 傳播損耗指數，一般 $\gamma=4$ 。由於覆蓋面增加，因此基地台站台數可減少：

$$\text{Reduce the No. of Base Station} = M^{2/\gamma} \quad (2-5)$$

至於運用環境的影響如圖六，在低干擾環境運用，Adaptive Antenna 與 Switched Beam 波束場所提供的改善效益差異不大，但在高干擾環境運用，Adaptive Antenna 將因具有良好的干擾抑制能力而能提供較好的改善效益 [7]。



圖六： 切換波束與適應性天線之波束涵蓋區域比較示意圖

肆、 智慧型天線在無線通訊系統的應用

智慧型天線技術具有良好的應用前景，但其市場現今仍未得到充分開發，目前在智慧型天線在無線通訊網路中主要是運用在 FDMA、TDMA 或 CDMA 等系統相關技術中，並已納入第三代行動通訊系統的規範中，茲簡述如下：

(1). 用於 FDMA 或 TDMA 系統 [8]：

在 FDMA 或 TDM 系統中，使用四個 30° 智慧型天線與傳統使用三個扇區(每扇涵蓋面 120°)系統相比，使用智慧型天線可將載波干擾比(C/I)平均提高約 6dB，大大改善了基地台覆蓋效果；至於 FDMA 之頻率復用(Frequency Reuse)系数則由 7 改善為 4，增加了系統容量。一般 TDMA 之系統容量是受限於存在每個 Cell 中的少數強干擾，因此只要使用少量陣列數，再配合 Adaptive Beam 的調整即可達到很好的通訊品質。

(2). 用於 CDMA 系統 [8]：

在 CDMA 系統中，智慧型天線除了可將載波干擾比(C/I)提高、降低 MAI 干擾外，並能透過智慧型天線進行話務均衡處理，將高話務扇區的部分話務量移轉至容量資源為充分使用的扇區；另外通過智慧型天線靈活的波束控制可進行軟/硬切換控制使跨區漫遊可以更平順進行；最後，智慧型天線的空間濾波處理也可以改善 CDMA 系統的遠近干擾效應，因而可簡化功率控制、降低系統成本、提高系統性能。

伍、 採用軟體無線電來實現智慧型天線

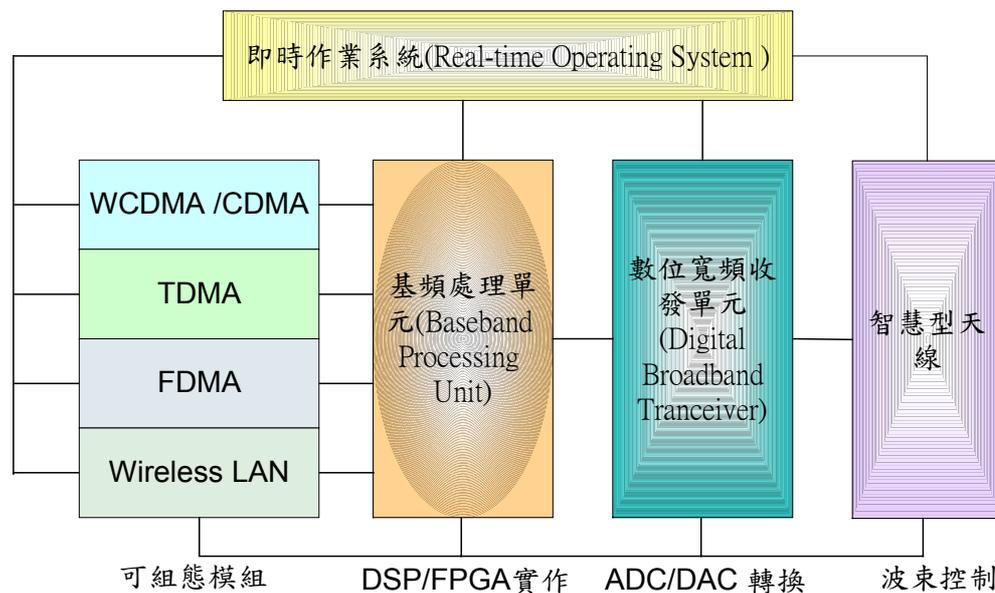
智慧型天線需根據通訊系統之傳輸特性與環境，選用不同的演算法來調整波束，甚至改變系統資源管理狀態，為提高其運用彈性和靈活度，採用軟體無線電(Software Defined Radio, SDR) [9] 的概念來實現智慧型天線已成為主流趨勢。

軟體無線電的主要概念為『採用開放式架構，系統可以軟體自行完成功能性的重組，用以滿足不同環境、多模式、多功能的通訊要求，同時具備可適性訊號處理、元件可程式化能力』，在此概念下，利用軟體控制方式以改變硬體特性的通訊設備，皆可廣泛視為軟體無線電系統；軟體無線電系統的發展方式類似於開發軟體，系統中各個硬體元件模組可視為功能不同的物件(Object)，視需要呼叫而啟動執行，因此可直接透過下載程式碼之方式來置換物件，即可改變系統運用架構，而不用對硬體組態進行任何改變。

鑑於未來無線通訊系統提案種類繁多，為使智慧型天線能平順的配合系統運用演進，進而能更彈性的運作於多模系統中，「軟體

無線電」將是未來智慧型天線研製的重要系統架構，如圖七所示；一個軟體無線電系統的基本架構，將由不同的硬體模組所構成，包含：可組態通訊系統模組、基頻處理單元（含 DSP 及 FPGA 模組）、數位寬頻收發單元（含類比-數位轉換器(ADC)、數位-類比轉換器(DAC)）、即時作業系統及智慧型天線單元等。

採用軟體無線電來實現智慧型天線系統將直接透過下載程式碼之方式來置換物件，在同一硬體平台上可適應性的調整其運用架構，藉以提高系統的運用彈性和擴充能力，以提供高效率、高彈性、高適應性的處理能力，同時具備易維護、易運用之操作環境；至於運用『軟體無線電系統架構』來發展智慧型天線最大挑戰則在於各種演算法則的建立。



圖七：軟體無線電來實現智慧型天線系統示意圖

陸、智慧型天線在未來無線通訊系統的運用

在未來的無線通訊環境中，將普遍存在 multi-tier 系統，同時服務不同資料速率、頻寬及功率之用戶，同一系統中之用戶可藉由通訊規約避免互相干擾，但不同系統之用戶卻可能因為頻帶重疊而造成干擾或資源管理的困擾。為解決未來無線通訊系統的潛在問題並滿足各種要求，智慧型天線的將朝以下趨勢發展：

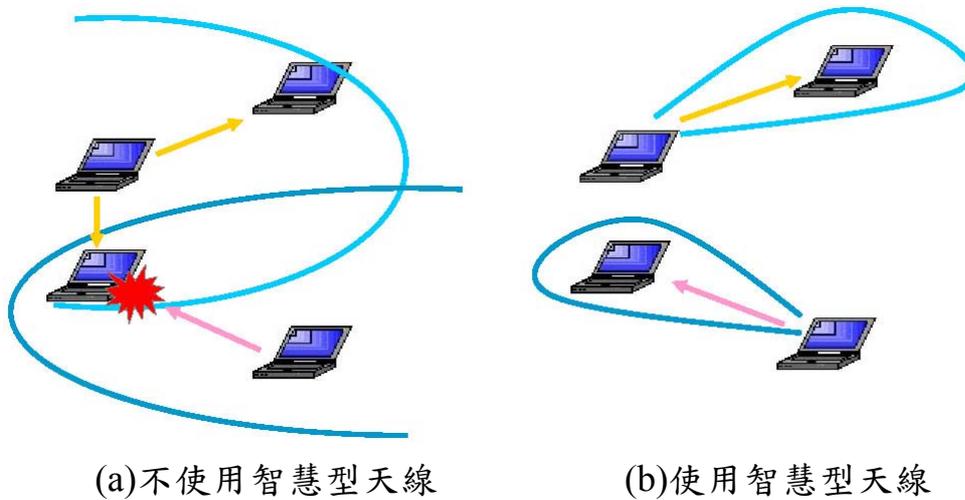
(1) 行動通訊系統方面：

智慧型天線技術將結合其它訊號處理技術，如多用戶偵測 (MUD) 技術[10]。系統理論與模擬實驗皆證明，MUD 技術於無線通訊的運用效能均十分卓著，結合智慧型天線後，將可更有效地去除干擾、提昇系統容量、提高資料速率及系統涵蓋區域，甚至在頻帶重疊的通訊環境下，也能偵測出不同系統之用戶資訊，因此非常適用於 multi-tier 系統。

(2) 網路資源管理系統方面：

智慧型天線技術與無線資源管理(Radio Resource Management)的關係將更緊密，對於功率控制(Power Control)、通道指定(Channel Assignment)及換區服務(Hand off)等處理程序，都將因智慧型天線的納入而有所更動。此外，智慧型天線將根據網路流通量來調整輻射的波束強度、方向、形狀，以達到無線資源的最佳運用；例如為有效提升整體系統的容量，可考量使用智慧型天線於 IEEE 802.11 系統規範的網路中，可針對所傳送的目的地或是信號來源的方向形成一波束；如此則可避免碰撞，且能在不同方向上的其他工作站以同樣的方

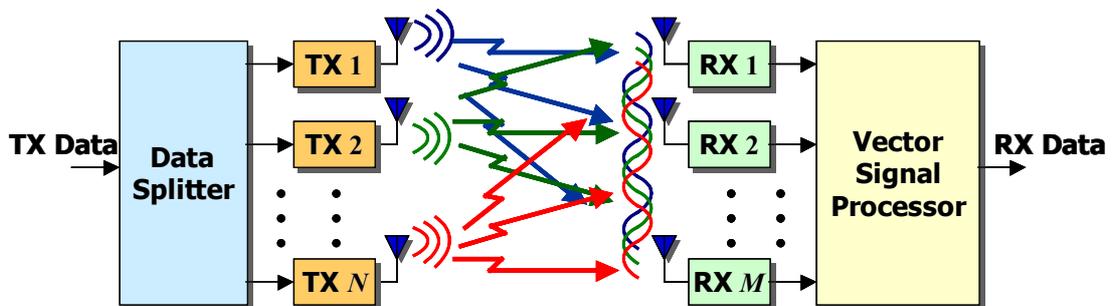
式同時進行傳輸，因而可大幅增進整個系統的容量，如圖八所示：



圖八：智慧型天線技術運用於資源管理示意

(3) 高速寬頻無線接取 (Broadband Wireless Access, BWA) 系統方面 [11-12]：

低行動性的 Wireless LAN 及都會 Wireless Cable 系統的通訊環境，具有豐富的多路徑反射，方向性較不明確，故不適合高增益之波束形成。未來的研發趨勢，將不再視多路徑訊號為干擾，而是要善用其豐富的空間特徵協助訊號之分辨。此種概念可藉多輸入-多輸出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技術達成 (請參考圖九)。



圖九：MIMO 架構示意

MIMO 系統可經由豐富的空间特徵形成多組平行空间通道，在不同發射天線同時傳送不同訊號。如此即可達到高速傳輸與高系統容量的目的，此即空間多工之概念。此外，MIMO 系統亦可提供發射及接收分集，藉以提升訊號品質。一般相信，結合了空間多工及空間分集交互運用的 MIMO 技術，將是下一代高速無線通訊系統的主流平台。

柒、 結語

智慧型天線的優越性來自於兩方面：一是充份利用訊號的空间方向性，藉由指向性天線加強訊號接收強度同時消除干擾；另一是於利用豐富的空间通道特性，藉由發射及接收多天線提供空间分集或提高傳輸速率。智慧型天線已是因應下世代無線通訊系統，提供高速、多元、高品質、高頻譜效率及低耗電等需求之主要關鍵技術之一，當然也是一個極具潛力的研發領域，充滿機會與挑戰。世界各通訊先進國家均已投入大量的經費與人力在智慧型天線相關技術之研發，並經實際場測證實智慧型天線對於覆蓋面積、系統容量與訊號品質的提升有極為顯著的效果，深信將對未來無線通訊網路的系統容量提升、傳輸速率提高及鏈路品質強化等要求，有著特別重要的貢獻並會開創出一片嶄新的視野與遠景。

捌、 參考資料

- [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] J. H. Winters, "Smart antennas for wireless systems," *IEEE Personal Commun.*, pp. 23-27, Feb. 1998.
- [4] G. Tsoulos, M. Beach and J. McGeehan, "Wireless personal communication for the 21st century: European technological advances in adaptive antennas," *IEEE Commun. Magazine*, pp. 102-109, Sept. 1997.
- [5] G. V. Tsoulos, "Smart antennas for mobile communication systems: benefits and challenges," *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp. 84-94, Apr. 1999.
- [6] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, **Array Signal Processing: Concept and Techniques**, Prentice Hall, 1993.
- [7] M. Chryssomllis, "Smart Antennas," *IEEE Antennas and Propagation Mag.*, pp. 129-136, June 2000.
- [8] J. H. Winters, "Smart Antenna for Wireless Systems," *IEEE Perdonal Commun.*, pp. 23-27, Feb. 1998.
- [9] A. Perez-Neira, X. Mestre and J. R. Fonollosa, "Smart antennas in software radio base stations," *IEEE Commun. Magazine*, pp. 166-173, Feb. 2001.
- [10] S. Verdu, **Multiuser Detection**, Cambridge Univ. 1998.
- [11] D. Gesbert, L. Haumont, H. Bolcskei, R. Krishnamoorthy and A. j. Paulraj, "Technologies and performance for non-line-of-sight broadband wireless access networks," *IEEE Commun. Magazine*, pp. 86-95, Apr. 2002.
- [12] R. D. Murch and K. B. Letaief, "Antenna system for broadband wireless ccess" *IEEE Commun. Magazine*, pp. 76-83, Apr. 2002.