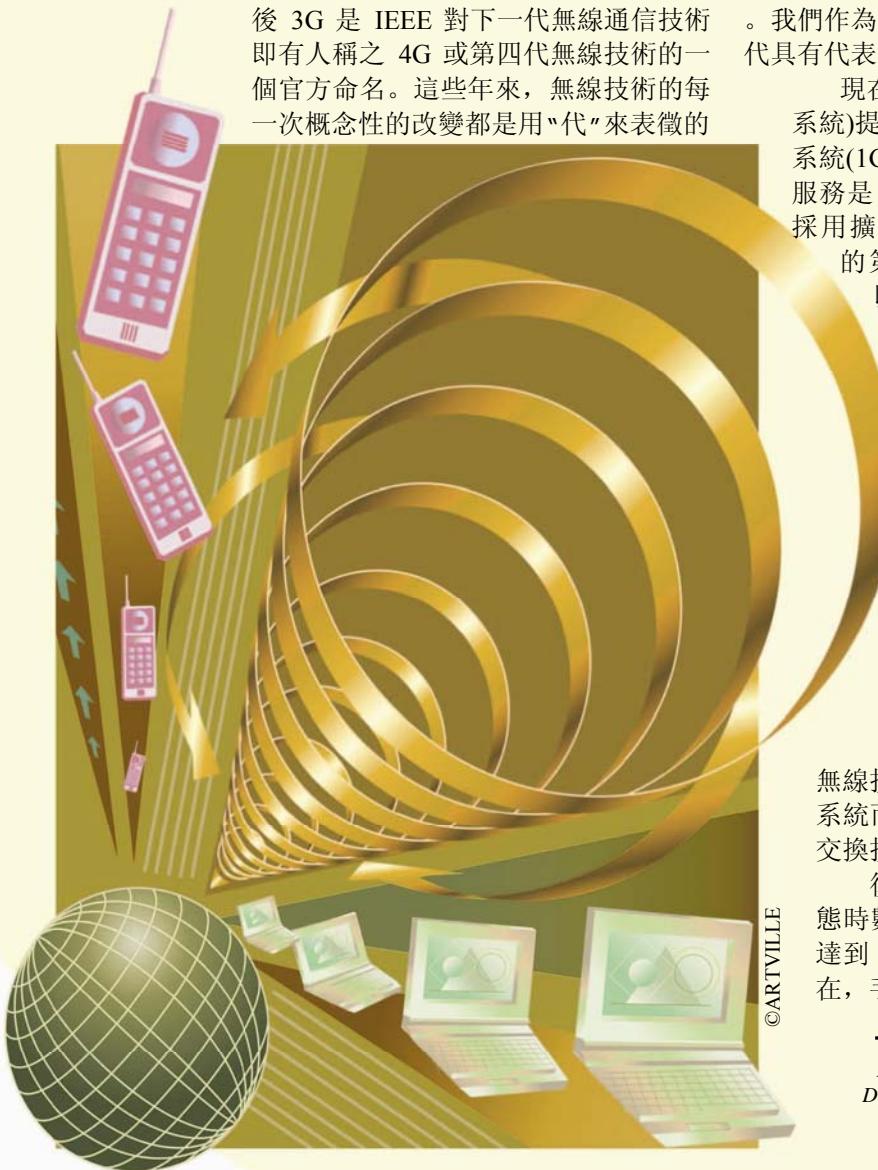


# 後 3G

Michael Steer



。我們作為事後諸葛亮把無線技術的“代”和對應的每一  
代具有代表性的系統在表 1 中作了一個歸納總結。

現在除了美國還在使用 AMPS(即現代移動電話  
系統)提供的基礎通信服務以外，其它的第一代通信  
系統(1G) 現在已基本上不存在了。目前大部分通信  
服務是由佔統治地位的全球移動通信系統(GSM)和  
採用擴頻技術的碼分多址接入(CDMA)系統為主  
的第二代通信系統所提供的。CDMA 是在  
以 GSM 為代表的第二代通信系統基礎上的一  
個概念性的推進結果，所以通常稱之  
為 2.5 代(2.5G)。第三代通信系統(或  
3G) 的容量有了很大的提高，是寬帶  
數據傳輸的最佳選擇。第三代通信  
技術包括寬帶移動多媒體網絡和寬帶  
混合型無線系統。移動通信系統可以  
根據需要和移動速度支持多個不同的  
數據傳輸速率。可支持的任意移動車  
載無線通信系統數據傳輸速率的典型  
值為 144Kb/s，支持行人移動的系統  
的帶寬更大。為了支持這種根據需求  
而分配帶寬(Bandwidth-on-demand)的  
應用環境，便需要採用數據包交換的  
無線技術和類似於寬帶 CDMA(等效於物理信道)  
系統而不能採用指定的物理信道技術(指的是電路  
交換技術)。

後 3G 系統有兩個最基本的概念。一是移動狀  
態時數據傳輸速率要達到 100Mb/s，而靜態時要  
達到 1 Gb/s。另外一個概念是由於各種網絡的存在，  
手機要能同時支持多種接入技術(如蜂窩式電

---

Michael Steer (e-mail: [mbs@ncsu.edu](mailto:mbs@ncsu.edu)) is with the  
Department of Electrical and Computer Engineering,  
North Carolina State University,  
Raleigh, NC 27695-7914 USA.

表 1 按年代順序列出的普遍使用的主要通信系統

系統名稱	年代	系統描述
0G		廣播，無蜂窩，用戶數量少，模擬調製
MTS	1946	移動電話服務，半雙工，借助接線員接通電話，模擬調製，一鍵通
AMTS	1965	先進的移動電話服務系統，日本發明，全雙工，900MHz
IMTS	1969	改進後的移動電話系統，全雙工，最多 13 個信道，覆蓋半徑為 60-100 公里(40-60 英里)，使用雙音多頻直撥電話鍵盤
0.5G		頻分複用 (FDMA)，模擬調製
PALM	1971	(包括自動電話)，公共自動化陸地移動無線電話服務，採用數字信令發送管理信息，IMTS 和 AMPS 之間的過渡技術
ARP	1971	無線車載電話，2000 年淘汰，採用蜂窩形式 (半徑 30 公里)，但沒有蜂窩之間的傳遞功能，150MHz 處有 80 個信道，半雙工，後來採用了全雙工
1G		模擬調製，移頻鍵控 (FSK)，移動蜂窩，頻分多路復用 (FDMA)
NMT	1981	北歐移動電話，12.5KHz 信道，工作頻率為 450MHz, 900MHz
AMPS	1983	先進的移動電話系統，30KHz 信道
TACS	1985	全接入通信系統，25KHz 信道，一直廣泛使用到 90 年代，與 AMPS 類似
Hicap	1988	日本電話電報公司 (NTT) 的移動電話服務系統
Mobitex	1990	國家公共接入無線數據網，第一個公共的無線接入數據通信服務，包括雙向尋呼網絡服務，12.5KHz 信道，高斯濾波最小頻移鍵控 (GMSK) 調製
DataTac	1990	點對點無線數據通信標準 (類似於 Mobitex)，無線廣域網，25KHz 信道，最大帶寬 19.2kb/s (使用在原裝的黑莓 (BlackBerry) 裝置中)
2G		數字調製
PHS	1990	小靈通系統，原是無繩電話，現既用作無繩電話，又用作移動電話
GSM	1991	全球移動通信系統，採用時分複用 (TDMA) 技術，GMSK，恆包絡，200KHz 信道，每個時隙最大傳輸速率為 13.4Kb (1900MHz)，20 億用戶，遍布 210 個國家
DAMPS	1991	數字式 AMPS 系統，窄頻，(先前的北美數字蜂窩通信系統，在此之前是美國數字式蜂窩通信系統)，pi/4DQPSK 調製，30KHz 信道
PDC	1992	日本的数字化蜂窩個人通信系統，25KHz 信道
cdmaOne	1995	第一個註冊的 CDMA 系統，眾所周知的 IS-95。擴頻，CDMA，1.25MHz 信道，QPSK 調製
CSD	1997	電路式數據交換，GSM 所使用的數據傳輸格式，最大帶寬 9.6kb/s，採用的是單時隙
2.5G		更高的數據傳輸速率
WiDEN	1996	寬帶綜合調度增強網絡，將 4 個 12.5KHz 信道組合，最大帶寬為 100kb/s
GPRS	2000	通用分組無線業務系統，與 GSM 兼容，使用 GSM 時隙和高階調製，每個時隙可發送 60kb，200KHz 信道，最大帶寬為 171.2kb/s
HSCSD	2000	高速電路式數據交換，與 GSM 兼容，最大帶寬為 57.6kb/s，在 CSD 基礎上開發的，具有比 GPRS 更高的服務質量
2.75G		中等帶寬—1Mb/s
CDMA2000	2000	CDMA，改進後的 cdmaOne 系統，兩種傳輸速率，1.25MHz 信道
EDGE	2003	是增強了數據傳輸速率的 GSM 的演變系統，提高了傳輸速率，與 GSM 兼容，8PSK，TDMA，帶寬 384kb/s，200KHz 信道
3G		擴頻通信
FOMA	2001	自由移動多媒體接入，第一個 3G 業務，日本 NTT 實施的寬帶碼分多址接入 (WCDMA)
UMTS		通用移動電話服務，5MHz 信道，傳輸速率可達 2Mb/s
• WCDMA	2004	除中國之外主要的 3G 產品
• OFDMA	2007	可演變為 4G 的產品 (下行高帶寬數據傳輸)
1xEV-DO		(IS-865) CDMA2000 的演變，最大下行帶寬為 307kb/s，最大上行帶寬為 153kb/s
TD-SCDMA	2006	中國提出的時分同步 CDMA。使用同一信道發送和接收數據，基站和手機使用不同的時隙 1.6MHz 信道
GAN/UMA	2006	通用接入網絡，即為從前的無需執照的移動接入，在無需執照的頻段內提供 GSM 和 GPRS 移動通信服務 (如藍牙系統和 WiFi 系統)
3.5G		
HSDPA	2006	高速下行包接入，極高的下行速度，可達 14.4Mb/s，集成在 UMTS 系統中
HSUPA	2007	高速上行包接入，極高的上傳速度，可達 5.76Mb/s，集成在 UMTS 系統中
4G		延遲小 (例如，語音 IP) + 多端輸入多端輸出 (MIMO) + 正交頻分複用 (OFDM) + 無線寬帶 (WBB, >100Mb/s) + 軟件無線電

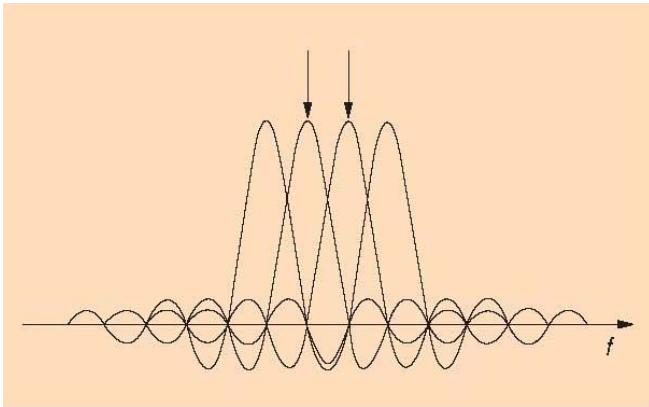


图 1 OFDM 频谱的正交性

話系統, UTM, WiFi 系統), 並且可能需要能同時在不同系統中平穩地切換。例如, 為了支持高速數據傳輸, 使用現有的 WiFi 系統比 UTM 系統效率更高。

兩種能夠支持高速數據傳輸的技術是在蜂窩通信網絡和無線網絡的基礎上發展起來的。一個是 OFDM, 即正交頻率複分法, 是將數據流分佈在大量低傳輸速率的不同頻率的載波上同時傳送的。因為每個碼元分佈在相對比較長的時間裡, 所以 OFDM 減小了衰落的影響。另一個是空間復用式多輸入多輸出 (MIMO) 技術, 指的是將多個數據流同時從多個發射天線經過多個通道發

送。下面將要討論這兩種方式, 通過這兩種方式可以極大地提高頻譜效率。

## OFDM

在 OFDM 系統中, 數據同時在多個信道或子載波上傳輸, 而這些子載波彼此是正交的, 子載波之間有很精確的間隔頻帶。每個子載波是獨立進行調製的, 所以每個子信道只加載自己的數據。從圖 1 的頻譜中可以看出 OFDM 的概念, 其中箭頭處是兩個子載波的採樣點。理想的子載波是正交的。從圖中可以看出一個子載波的峰值對應於其它子載波的零點。當對一個子載波進行採樣時, 由於子載波之間的正交性, 其它子載波在這個採樣點上沒有貢獻。子載波的頻譜是有重疊部分的, 但這並沒有關係。通過這種技術有可能利用未加管制的頻帶中已被佔用的信道進行高速數據傳輸。OFDM 是將數據擴散到大量的子載波上進行傳輸的, 所以它實際上是一種擴頻技術。多路徑的影響被減弱了, 這是因為每一個子載波的帶寬很窄, 所以其在時域上的脈衝的持續時間很長。當通過多個相對低速的數據傳輸時, 多路徑的影響比採用一個高速數據傳輸信道時的要小。不同信道的信號強度和乾擾以及信號對乾擾的比率 (SIR) 是不同的, 這可以通過在每一個信道中採用不同的比特率和對功率進行調節來給予補償。OFDM 是通過對不同子載波使用獨立的調製器和解調器來實施的。更實際一點的方式是通過在數字信號處理器 (DSP) 中進行

表 2 OFDM 無線網絡標準 IEEE 802.11a, 即 WiFi 的各種調製方式[1]-[3]

傳輸速率(Mb/s)	調製方式	編碼效率	每個子載波的編碼位數	每個 OFDM 碼元編碼後的位數	每個 OFDM 碼元的數據位數
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	64	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	1/2	4	192	144
48	16-QAM	3/4	4	288	192
54	64-QAM	2/3	6	288	216

表 3 具有 5MHz 帶寬的 OFDM 無線網絡標準 IEEE 802.16d, 即 WiMax 的各種調製方式[4]-[6]

傳輸速率(Mb/s)	調製方式	編碼效率	每個子載波的編碼位數	每個 OFDM 碼元編碼後的位數	每個 OFDM 碼元的數據位數
1.89	BPSK	1/2	0.5	176	88
3.95	QPSK	1/2	1	368	184
6.00	QPSK	3/4	1.5	512	280
8.06	16-QAM	1/2	2	752	376
12.18	16-QAM	3/4	3	752	568
16.30	64-QAM	2/3	4	1140	760
18.36	64-QAM	3/4	4.5	1136	856

快速傅立葉變換（FFT）和反傅立葉變換（IFFT）來代替不同的調製器和解調器。這種使用 FFT/IFFT 方式的 OFDM 稱為離散多頻（DMT）OFDM 或 OFDM/DMT。此時子載波共用一個載波，數據流 FFT 的頻率輸出即為子載波。通常每個子載波有自己的數據流，完整的數據流被加載到比如說 256 個子載波上。在使用前向糾錯（FEC）編碼時，很大一部分的數據位可能會丟失（因為每個子載波都會與其它信號碰撞），但數據流最終是可以恢復的。

遺憾的是，OFDM 的功率峰值和平均值的比率（PAR）很大。因此，射頻前置端的非線性失真比其它類型的信號更嚴重，所以需要線性度更高的放大器。此問題可近似為將 OFDM 看成是由大量頻率組成的一個信號。在實際應用時，通過在 DSP 處理中對信號進行箝制從而降低 PAR（部分數據會因此丟失）。但是通過編碼技術有可能糾正錯碼和再生出丟失的數據位。理想的子載波是正交的，但是時域和頻域的漂移會使得子載波間互相產生干擾。這種干擾可以通過減少子信道的數量或者通過採用特殊的脈衝整形來降低，而後者對於時域誤差的減小更可靠有效。

OFDM 是一種傳輸技術，可用於以下幾個方面：如數字無線電，數字電視，高速無線局域網和城域網

[WLAN, WMAN，如 WiFi（特別是無線網絡標準 IEEE 802.11a，傳輸速率為 4Mb/s [1]-[3]）以及 WiMax（特別是城域網標準 IEEE802.16，傳輸速率可達 18.36Mb/s[4]-[6]），數字用戶線系統中使用電話線（DSL）的寬帶因特網。OFDM 幾乎可以達到最大的頻譜效率。IEEE 802.11a 標準中採用了 OFDM，這也是一種形式的 WiFi，在此標準中採用了具有不同信息傳輸能力的若干種調製方式；見表 2。每個碼元（Symbol）中的數據位數與編碼後的總位數之差是編碼位數，這些編碼是在 DSP 處理中為糾錯和提供有關信道的信息而添加的。數據位數和加了編碼後的總位數之比稱為編碼率。

採用 IEEE 802.16 標準的系統，如 WiMax，使用的也是 OFDM。該網絡是為了覆蓋大區域面積的，因此稱為城域網（WMAN）。該系統是一個蜂窩系統，在蜂窩內採用通用頻率復用，蜂窩直徑一般是幾公里。當有一個接收天線，而蜂窩採用三向發射天線時，其下行連接在 5MHz 帶寬的傳輸速率為 3Mb/s。當有兩根接收天線，而蜂窩是六角形時（與其它蜂窩之間的干擾降低了），在同樣的 5MHz 帶寬上，傳輸速率可達 7Mb/s。表 3 是 WiMax 所使用的多種調製方式。像 64-QAM 這樣的高階調製只能在干擾較小的環境下使用。

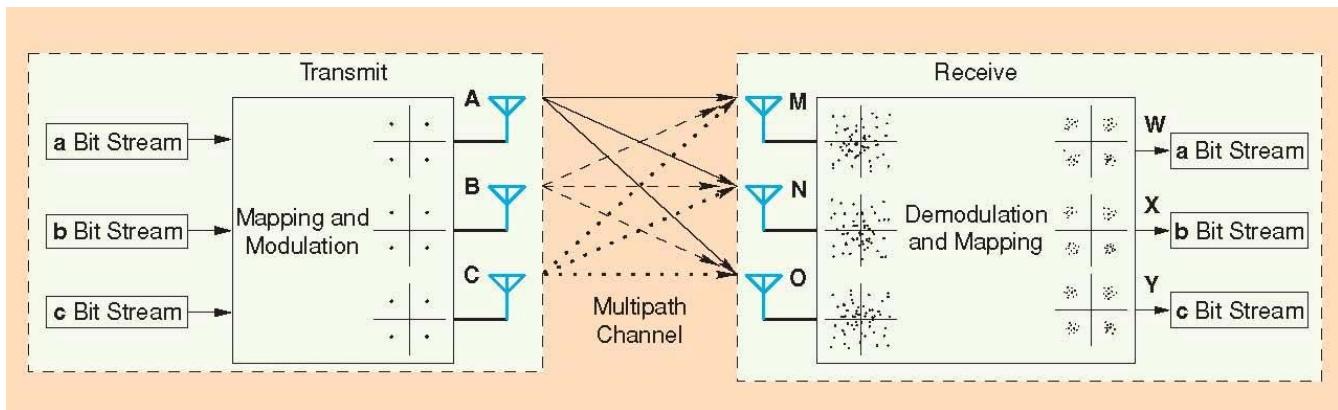


图 2 MIMO 中，每一個發射天線和接收天線之間有多條路經

表 4 採用 PSK 調製的 MIMO 系統在不同的 SIR 下（信號干擾比）的系統容量與常規非 MIMO 系統的最大容量的比較。 $M$  是發射天線的數量， $N$  是接收天線的數量。數據來源於[11]

調製方式	系統容量 (b/s/Hz - 比特數每秒每赫茲)				
	非 MIMO 系統, $M=1$ , $N$ 最大為 1		MIMO 系統, $M=2$ , $N=2$		
	SIR 0 dB	SIR 10 dB	SIR 20 dB	SIR 30 dB	
BPSK	1	1.2	2	2	2
QPSK	2	1.6	3.7	4	4
8PSK	3	1.6	4.8	6	6
16PSK	4	1.6	4.9	7.5	8

**OFDM** 減小了衰落的影響，因為每個碼元分佈在相對比較長的時間裡。

### 信道容量

頻譜效率是區分各種不同的射頻和調製系統中的一個重要概念。頻譜效率來源於香農公式（Shannon），是用来表徵信道的信息承載能力的：

$$\hat{C} = B_c \ln(1 + S/N), \quad (1)$$

其中， $\hat{C}$  為信道容量，單位是比特數/秒， $B_c$  是信道帶寬（單位為赫茲）， $S$  和  $N$  分別指信號和躁聲的功率， $S/N$  是信躁比（SNR）。假設  $N$  是高斯躁聲，當乾擾可近似看成是高斯干擾時，則可將躁聲功率和乾擾功率疊加，此時更適合用 SIR 來表示。這時，香農公式（1）則變為

$$\hat{C} = B_c \ln[1 + S/(N+1)] = B_c \ln(1 + SIR). \quad (2)$$

香農公式無法證明，但已被廣泛用來計算信道的容量上限。信號越強，或者說，干擾信號越弱，信道的容量就越大。如果沒有躁聲和乾擾，信道的容量則是無限的。從香農公式（2）可以看出，當乾擾增加時，SIR 會減小，但容量的降低比最初所預料的要小。即，當乾擾增加一倍時，容量並不是減少一半。這便是使用密集式蜂窩和頻率復用使得乾擾增加的理論依據，干擾增加對容量的中等程度的影響可通過使用更多的蜂窩來得到補償。

今天的通信系統雖然沒有達到香農公式所給出的容量極限，但已經非常接近了。不同的調製方法和射頻方案已經很接近這個容量極限了，我們可以用兩個量化的指標來表徵不同系統的性能。從容量公式出發可以定義不同調製方式的性能優劣程度的衡量標準。這便是信道效率（或信道頻譜效率），

$$\eta_c = R_c / B_c \quad (3)$$

其中， $R_c$ （每秒的比特數）是信道的傳輸速率，所以  $\eta_c$  的單位是 b/s/Hz。其實 b/s/Hz 是沒有單位的，因為 Hz 的單位是 s-1，但採用 b/s/Hz 可以提醒我們該參數的物理意義（與分貝類似，它也沒有單位，但卻是一個重要的考核參量）。

在蜂窩式無線系統中，每一個蜂窩中的蜂窩數量同樣也應被包含在系統的衡量參數中[7]。可使用的信道被分配給蜂窩中的每個蜂窩，一個蜂窩的一個信道會成為另一個蜂窩中某一個蜂窩的干擾。因此，SIR 減小了，信道的容量也下降了。但是由於相距很近的蜂窩的密集度和數量的增加，因此整個系統的容量增加了。所以，系統的數據吞吐量是頻

**OFDM** 是將數據擴散到大量的子載波上進行傳輸的，所以它實際上是一種扩頻技術。

率復用狀態的函數。比較適合於衡量系統性能的參數定義為射頻頻譜效率  $\eta_r$ ，該參數加進了一個窩群的蜂窩數  $K$

$$\eta_r = \frac{R_b}{B_c K} = \frac{\eta_c R_b}{K R_c}. \quad (4)$$

其中  $R_b$  是有用信息的比特率，給信道比特率  $R_c$ （由於採用編碼的原因， $R_c$  比  $R_b$  大）打了個折扣。採用信道編碼可以糾錯，幫助識別一個數據包的開始和結束，並且為如 CDMA 這樣一些將用戶重疊的系統的用戶提供了正交性。 $\eta_r$  的單位是 b/s/Hz/蜂窩。由於每個窩群中的蜂窩數量減少，蜂窩彼此相距更近，即  $K$  較小，從而使得 SIR 增加，進而導致的信道容量下降，被系統整體所增加的容量彌補了。

對於頻譜效率有兩種定義；一種是信道頻率效率  $\eta_c$ ，用來表徵調製方式的效率，另一種是射頻的頻譜效率  $\eta_r$ ，該參數包含了由於頻率復用而產生的附加干擾。的確，頻率復用所產生的干擾決定了蜂窩式系統的躁聲，所以在評估系統性能時可以忽略背景躁聲。這兩個參數都稱為頻譜效率，只能從單位上加以區別。總之，

- $\hat{C}$  是給定條件下，信道最大比特率的理論值。
- $R_c$  是給定條件下，信道實際的比特率。
- $R_b$  是給定條件下，信道實際的比特率減去由於編碼所佔據的額外帶寬後的比特率。。

### MIMO

MIMO 技術採用多個天線來發射和接收信號。MIMO 的概念起始於 90 年代[8]-[10]，已經在不同的 WLAN 系統

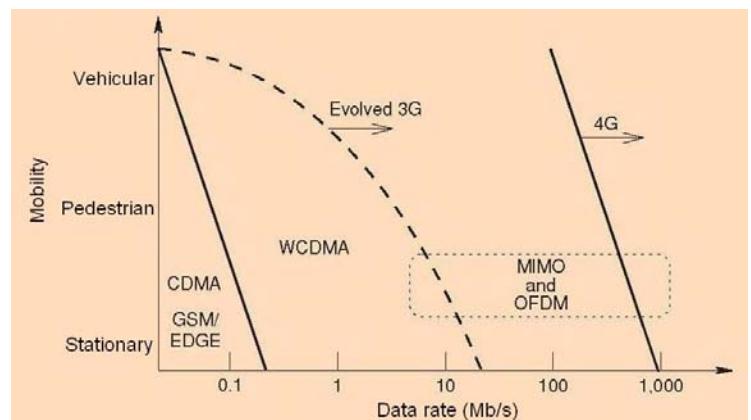


圖 3 經過演變的 3G 和後 3G 蜂窩通信系統的容量

## OFDM 是一種傳輸技術，可用於以下幾個方面：如數字無線電，數字電視，高速無線局域網和城域網，數字用戶線系統中使用電話線（DSL）的寬帶因特網

中使用了，並且逐漸發展成為蜂窩式通信系統的標準。MIMO 有以下幾個特點。首先，每個發射天線同時在同一共用頻率信道發射不同的數據流。其次，MIMO 最吸引人的特性在於信號是在發射天線和接收天線陣列之間眾多個路徑之間傳輸的。在傳統的通信系統中，不同路徑會產生干擾和衰落，但是在 MIMO 系統中，這些路徑被用來承載更多的信息。在 MIMO 系統中，每個路徑傳播的是發射信號的一個“鏡像”（從一個天線發出），該鏡像的振幅和相位與通過其它路徑傳播過來的均不相同。可根據每一個信號到達不同接收天線的微弱的時間和相位之差來對信號進行區分。事實上，每個發射天線和接收天線之間存在著多個無線連接路徑；見圖 2。為簡單起見，圖中只顯示出了 3 個發射天線和 3 個接收天線。MIMO 系統最少使用 2 個發射天線，一個接收天線。但使用多個天線可大大提高系統的容量。一個高速數據流被分為若干個低速數據流 a, b, c。對這些數據流進行映射變換，這樣就將不同版本的數據混合在一起，經過調製，按照標記為 A,B,C 的星座圖將其通過每個天線發射出去。每個數據流通過不同的路徑而到達所有的接收天線。

每個接收天線的輸出是這幾個數據流的線性組合，其射頻採樣相圖標為 M, N, O（其實將它們稱為星座圖並不太合適）。即，每一個接收天線所接收的是多個發射信號“鏡像”的線性組合。實際上，每一個接收天線的輸出可以認為是一組線性方程的解，其中每一條路徑對應於一個方程。由此類推，每一個發射天線發出的信號代表一個變量。這樣可以通過同時求解一系列方程而得到原始的數據流。通過解調和映射，再加上信道特性的獲取，我們可以恢復被干擾影響了的原始發射信號。最終獲取的是星座圖 X, Y, Z。組合信道的特性可通過測試信號來獲取。在傳輸信號中嵌入一種被稱為時空碼的特殊編碼，同樣可以用來估測信道的通信矩陣。時空編碼對每個傳輸的數據進行編碼，編碼信息可以用來在其它端重建所發送的原始數據。這種方法比通過在不同時間發射測試信號要更加可靠。

隨著 MIMO 的出現，有必要對香農公式進行修正，這是因為 MIMO 的容量超出了香農公式所計算的單信道的理論容量極限。MIMO 系統的香農公式可修改如下：

$$\hat{C} = B_c \ln(1 + SIR \times H) \quad (5)$$

其中，H 是 MIMO 系統的容量係數，取決於 M, N 中的較小值，H 與 SIR 相乘有效地提高了 SIR[12]。

在 MIMO 系統中，每個路徑傳播的是發射信號的一個“鏡像”，該鏡像的振幅和相位與通過其它路徑傳播過來的均不相同

具有較高 SIR 的 MIMO 系統的容量與 (M, N) 中的較小值成近似線性的關係，其中 M 為發射天線的數量，N 為接收天線的數量（假設有大量的路徑）[12], [13]。當 M=N=4 時，系統的容量是只有 1 個發射天線和 1 個接收天線時系統容量的 4 倍。非最佳狀態條件下的系統的容量會略小一些。表 4 列出了有 2 個發射天線和 2 個接收天線並採用理想的 PSK 調製方法的 MIMO 系統的系統容量（即，沒有控制功率的峰值和平均值之比 PAR），並且與傳統的（非 MIMO）系統進行了比較。系統的數據吞吐量是通過每赫茲每秒傳輸的比特數來表徵的。可以看出 SIR 較高時，系統容量明顯較高。WiMax (IEEE 802.16) 和 WiFi (IEEE 802.11n) 標準中都採用了 MIMO，所實施的商業用系統的頻譜效率已經達到了 6.35b/s/Hz。

總之，MIMO 系統是通過以下 4 個同時產生的優勢來提高系統的傳輸能力和傳輸距離的：

- 1) 天線陣列優勢，這是通過將輸入和輸出的同步性來提高獲取的平均 SNR 而實現的。為了達到這個目的，必須測試信道的特性。這樣可以提高覆蓋面積和服務質量 (QoS)。
- 2) 通過多個天線接受同樣的信號而得到一個多樣性的優勢，這樣可以減小衰落。從而同樣可以提高覆蓋面積和服務質量 (QoS)。
- 3) 通過從不同天線發射獨立的數據流以提高信息吞吐量而得到的複用優勢。這種複用優勢提高了頻譜的效率減小了共信道干擾。這樣可以提高蜂窩系統的容量。

MIMO 可以與擴頻技術相結合而成為 MIMO-CDMA。當 SIR 較小，如低於 10dB 時，MIMO-CDMA 比 MIMO-OFDM 的容量更高[14]。當 SIR 較大時，MIMO-OFDM 比 MIMO-CDMA 的容量要高。

## 總結

毫無疑問，後 3G 的蜂窩系統通信技術的基礎將是 OFDM 和 MIMO 的結合 (MIMO-OFDM) 或 MIMO 和 CDMA 的結合 (MIMO-CDMA)。特別是當 SIR 較高時，信道容量將會大幅度地提高。圖 3 將 2G 系統的容量 (GSM 和 CDMA)，3G 系統以及稱為演變的 3G 和 4G 系統的容量進行了比較。事實上，演變的 3G (演變的第三代蜂窩通信系統) 包含了 4 G 的許多特性。第四代通信系統在 MIMO 或 OFDM，或者 CDMA 技術上加入了時空編碼。要成為一個好的射頻硬件電路設計者，

工程師們必須對信號的特性非常熟悉，並且要深刻理解日益複雜的通信系統背後的概念。

## 參考文獻

- [1] IEEE Std 802.11a-1999, Supplement, Supplement to IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band, Dec. 30, 1999.
- [2] IEEE Std 802.11a-1999, Amendment 1, IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks— Specific Requirements Part II: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2003.
- [3] IEEE Std 802.11a-1999, Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band, 2000.
- [4] C. Eklund, R.B. Marks, K.L. Stanwood, and S. Wang, “IEEE Standard 802.16: A technical overview of the wireless MAN air interface for broadband wireless access,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 6, pp. 98–107, June 2002.
- [5] IEEE Std. 802.16-2001, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 2002.
- [6] IEEE Std 802.16c-2002, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Amendment 1: Detailed System Profiles for 10-66 GHz (Amendment to IEEE Std 802.16-2001), 2002.
- [7] W.C.Y. Lee, “Spectrum efficiency in cellular [radio],” *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, vol. 38, no. 2, pp. 69–75, May 1989.
- [8] G.J. Foschini, “Layered space-time architecture for wireless communication in a environment when using multi-element anten-nas,” *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, Autumn 1996.
- [9] G.G. Raleigh and J.M. Cioffi, “Spatio-temporal coding for wireless communications,” in Proc. Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM) 1996, Nov. 1996, vol. 3, pp. 1809–1814.
- [10] G.G. Raleigh and J.M. Cioffi, “Spatio-temporal coding for wire-less communication,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 3, pp. 357–366, Mar. 1998.
- [11] W.He and C.N. Georghiades, “Computing the capacity of a MIMO fading channel under PSK signaling,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, no. 5, pp. 1794–1803, May 2005.
- [12] A. Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, “Capacity limits of MIMO channels,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 684–702, June 2003.
- [13] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P.J. Smith, and A. Naguib, “From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wire-less systems,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, Apr. 2003.
- [14] T. Abe, T. Asai, and K. Suda, “A practical throughput compari-son of MIMO-CDMA and MIMO-OFDM,” in Proc. IEEE 60th Vehicular Technology Conf. (VTC2004-Fall. 2004), 26-29 Sept. 2004, vol. 2, pp. 1431–1438.

## 射 频 和 天 线 设 计 培 训 课 程 推 荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>

---



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

---

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程，共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解，并多结合设计实例，由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS，迅速提升个人技术能力，把 ADS 真正应用到实际研发工作中去，成为 ADS 设计专家…



课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>

---



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出，是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装，所有课程都由经验丰富的专家授课，视频教学，可以帮助您从零开始，全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装，还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…



详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验，
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>