

網路架構大概論 5—802.11 與 802.11a

網路架構大概論快要到最終篇了，就來談談無線網路的最底層，OSI 的第一層「實體層」。或許各位讀者會稍微覺得有些怪異，為何筆者會以無線網路做為實體層的討論對象。

其實基本上來說，TCP/IP 網路架構的第二~第三層基本上已經確定了，未來也不會有太大的變化；近幾年較為出名的就是 torrent 協定的推出，不過也只是個架構在應用層的協定。未來網路就是朝向最頂層的應用服務發展，或是最底層攸關實際資料傳輸速度的規格更新。當然，因應 IPv6 的誕生，第二~第三層可能會有新的協定，但 IPv4 的部分應該就是目前檯面上看到的這些，或是 v2、v3 的更新版而已。

細節藏在 802.11 裡

相對於有線網路來說，無線網路是近年規格變動相當快的媒體/實體層標準，不管是行動通訊由 2G、3G、4G 不斷往上提升，或是屬於個人網路的 IEEE 802.11 無線區域網路的規格更新，都比有線網路快多了。當然有線網路也並非停滯不前，光纖、雙絞線都有規格演進版本，但相對於光纖、10GbE 規格的企業骨幹有線網路，一般使用者能夠接觸到的 802.11n、802.11ac 顯得親民許多，也比較值得我們去關心。

無線網路的規格定義在 IEEE 802.11 一系列白皮書中，也是眾家網路廠商遵循的標準；說來也好玩，802.11 剛開始還有定義出以紅外線傳輸資料的規格，只不過從來都沒有產品問世。

最初的 802.11

IEEE 802.11 最初的版本在 1997 年 6 月發布，除了沒人愛的紅外線之外，IEEE 802.11 定義了運作頻率設定在 2.4GHz。會選擇這個頻率是因為 2.4GHz 屬於 ISM（Industrial, Scientific and Medical radio band，工業、科學以及醫療無線頻段），這個 ISM 是由 ITU（International Telecommunication Union，國際電訊聯盟）於 1947 年在美國喬治亞州亞特蘭大所發表的頻段。

如同它的名字一樣，這些頻率範圍保留做為工業、科學研究、醫療方面等用途，只要在不干擾他人的情況下，使用這些頻段並不需要像國家提出申請，想用就用毫無限制。話雖如此，各國對於 ISM 頻段的使用以及開放性還是略有不同，IEEE 802.11 採用的 2.4GHz，正好是絕大多數國家允許使用的頻段，有助於規格的普及化以及市場推廣。

格雷碼 (gray code)

十進位數字轉為二進位時，0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 分別會轉換成 0000、0001、0010、0011、0100、0101、0110、0111、1000、1001。但在通訊世界裡則是採用格雷碼，所以 0~9 會被轉換為 0000、0001、0011、0010、0110、0111、0101、0100、1100、1101，由於各組之間只有變換 1 個位元，可以降低傳輸時出錯的機會。

展頻資料變多

802.11 在媒體層的部分採用 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)，在上期的文末有做敘述，在此就不論述，直接進入實體層的部分。

首先說明展頻 (Spread Spectrum) 的概念，展頻就是把 1 組資料量較少的資訊，加以放大並放在 1 組資料量較多的資訊上，好比把 1MB 的資料，增肥到 10MB 的大小，但內部包含的實際資訊卻跟 1MB 沒有兩樣。這麼做當然對於傳輸速度是有害的，但在無線網路的環境中，有些事比起傳輸量來說更需要克服。

展頻有許多好處，第一就是對抗雜訊，由於生活環境中充滿許多電磁波，甚至是地球或是外太空也都會來尬一角。舉個簡單例子，展頻之後使用 11111111 代表原始的 1、00000000 代表原始的 0，如果今天好死不死 11111111 被干擾成 10111110，也可以辨識出這其實是代表 1。第二就是可以用來隱藏或是加密訊號，通常我們想要傳輸的資料只占據一個相當小頻寬的基頻訊號，利用展頻技術把基頻延伸到大範圍的頻帶上，讓傳輸能量降低成與背景值差不多，避免引起他人注意；此外把這個把原始信號與加密信號經過一翻計算後傳送出去，只有擁有加密信號的人能夠解出原始訊號，其他人看到就只是一些無意義的資料。

而且展頻之後，可同時容許多人在同一頻率中進行通訊，大家的頻寬都是相等的，這就是所謂的 CDMA (Code Division Multiple Access，分碼多重存取)。

CDMA

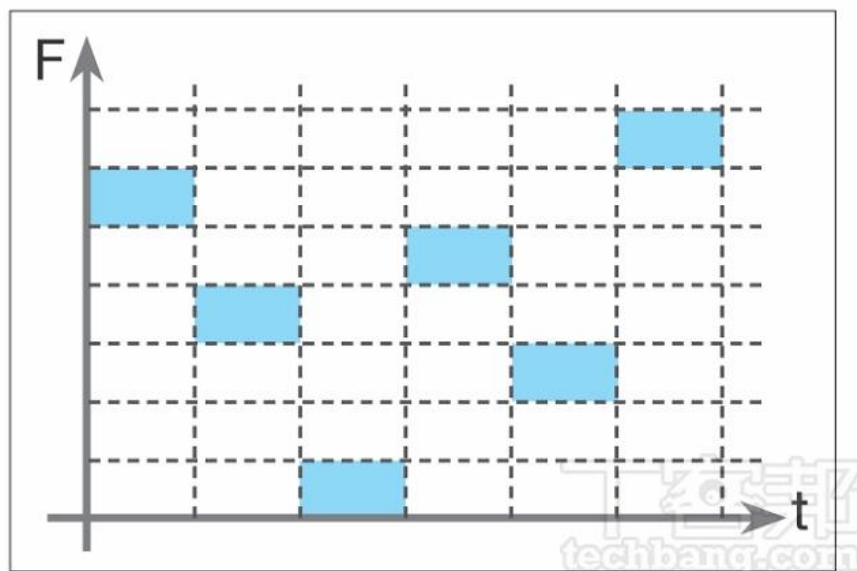
雖然 CDMA 沒有使用在 802.11 之中，但由於 CDMA 的原理相當神奇又有趣，容筆者在此先說明一下。想要使用 CDMA，則此網路中的每個節點都必須要有 1 組編碼，而大家的編碼必須兩兩呈現正交的性質，內積值必須為零。假設現在有 2 組節點，A 的編碼為[1、1]、B 為[1、-1]，兩者經計算後的內積值為零，符合正交的要求。如果今天 A 要傳送 1，則經過 CDMA 編碼後變成[1、1]；如果要 A 要傳送 0，則是取補數[-1、-1]，B 的原理也是一樣。

如果今天 A 點傳送 1[1、1]、B 傳送 0[-1、1]，兩者在空氣介質中向量合變成[0、2]；某 C 點想要解出[0、2]的資訊，便把[0、2]和 A[1、1]、B[1、-1]作內積，得出 2 和-2。在大於零等於 1、小於零等於 0、等於零沒發射訊號的原則下，得知 A 發出了 1、B 發出了 0。

FHSS

802.11 在 2.4GHz 傳輸頻率中定義的展頻方式有 2 種，一種是 FHSS（Frequency-Hopping Spread Spectrum，跳頻展頻），另一種則為 DSSS（Direct-Sequence Spread Spectrum，直接序列展頻）。

首先解釋 FHSS 跳頻機制，FHSS 需要一段較大的頻寬，再將這個頻寬切割成許多較小的頻寬，就可以在這些不同的小頻寬之間不斷切換傳輸，就是 FHSS 的跳頻機制。在 802.11 中，使用 FHSS 展頻使用 2.4~2.4835GHz 頻帶，將其以 1MHz 的方式切出頻道，每個頻道的停留時間為 19TU（Time Unit、1TU=1024μs）。事實上使用頻率範圍、切割的頻道數、各頻道駐留時間以各國規定為準，像是美國 FCC 聯邦通訊委員會就制定出 75 個以上的頻道數和最大駐留時間為 390TU。



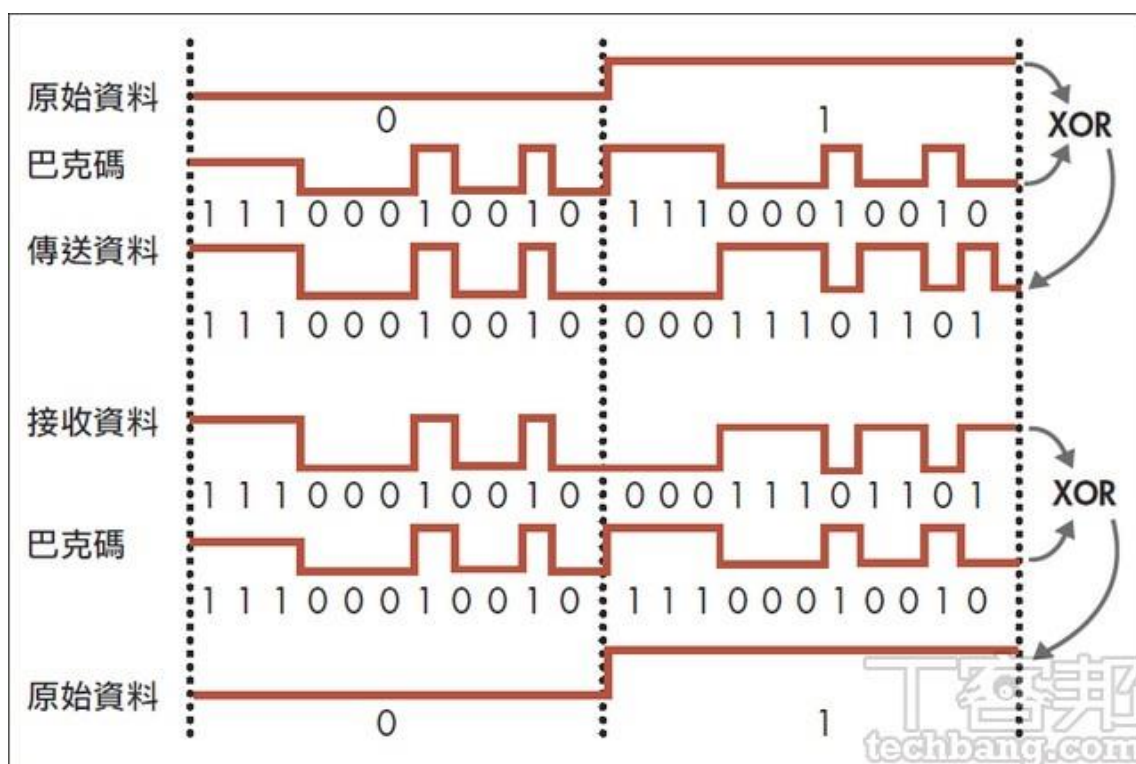
▲ FHSS 跳頻的時間與頻率對應關係示意圖

DSSS

DSSS 直接序列展頻顧名思義，直接將欲傳輸的 0 或是 1 代換成 1 串序列碼傳送出去，實際代換的方式為欲傳送的資料位元值與虛擬雜訊碼進行 XOR 運算，而虛擬雜訊碼在此使用巴克碼（Barker code）。

給定 1 串長度為 L 的序列 A_i ，其中 L 長度大於等於 2、 $A_i \in \{+1, -1\}$ ，只要這個序列符合 @算式_001.png，就算是巴克碼。巴克碼有些奇怪的特性，如果把巴克碼正負號互換，或是循環移位、順序相反，依然還是保持巴克碼的特性。802.11 使用長度為 11 的巴克碼，數列為 +1、+1、+1、-1、-1、-1、+1、-1、-1、+1、-1，但在位元數裡沒有負值，所以換成 11100010010 這串序列。

當傳送 0 時，與這串巴克碼進行 XOR 之後變為 11100010010；傳送 1 時，變為 000111101101。接收端將收到的序列再與 11100010010 進行 XOR 運算，就會得出原始的 0 或是 1。802.11 使用 DSSS 展頻之後的速率也是 1~2Mbps，但由於使用 DSSS 的緣故，對於運作頻率上有些限制，在接下來的調變中會提到。



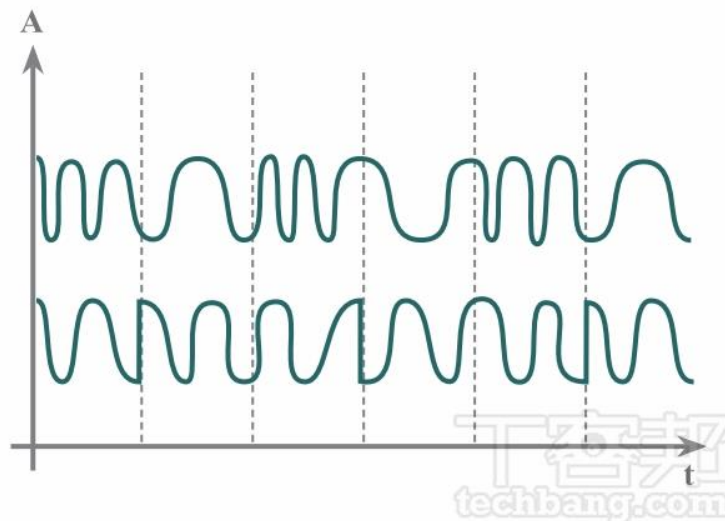
▲ DSSS 直接序列展頻的傳送 / 接收流程圖

調變

想要傳遞的資料經過展頻之後，接下來便是要如何把資料放在載波（carrier）上，而把 1010111110111011010101..... 這類的二元碼變成實際在介質中傳播，就稱為調變（modulation），無線網路就是變為電磁波傳送，光纖則是以光來傳送。

調變大致上可分為 2 種，分別為類比調變和數位調變。類比調變的例子就是收音機的調幅（AM）或是調頻（FM），波形雖然有振幅或是頻率上的變化，但波形是連續的，不會

發生這個時間點為波谷底點，下個時間點突然變成波峰頂點。而數位調變就會發生這種情形，比較像是由一段段的波形組合起來。若以道路來比喻，類比調變像是連續彎道山路，數位調變則比較像都市裡的十字路口。



▲圖片上方為類比調變，波形連續；下方為數位調變，可以看到波形會有斷崖、不連續的情況。

GFSK

因應 FHSS 和 DSSS 不同的特性，其調變的方式也不相同。FHSS 採用 GPSK（Gaussian frequency-Shift Keying，高斯頻率偏移調變、高斯頻移鍵控），GFSK 是 FSK 加上高斯濾波器組成，高斯濾波器的功用在於平滑化訊號，因此 GFSK 的本質還是 FSK。

FSK 的調變方式相當簡單，選定一載波頻率 F_c ，再選定一差值頻率 F_d ，如果今天想要傳送 1，就傳送 $F_c + F_d$ 的頻率，想要傳送 0，就傳送 $F_c - F_d$ 的頻率即可。FHSS 展頻再加上 2GFSK（2 種頻率變化的 GFSK）可帶來 1Mbps 的頻寬。

如果需要 2Mbps 的頻寬，則是改採 4GFSK，由於有 4 種頻率變化，可對應 2 種資料 00、01、11、10，所以每次傳輸時由 1bit 改為 2bit，頻寬直接翻倍。

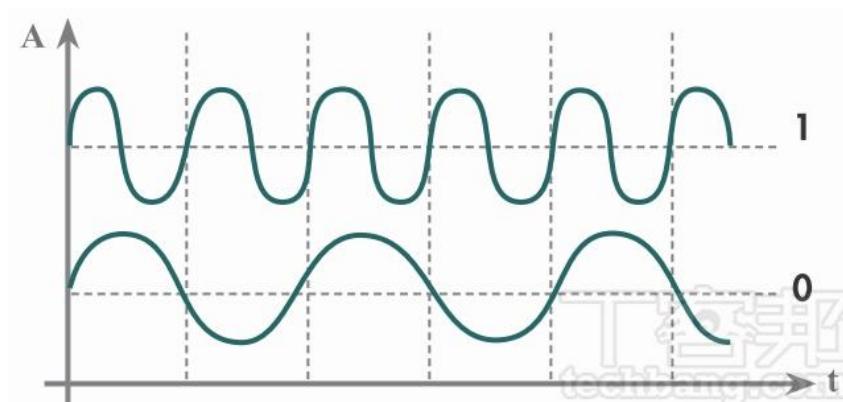
DPSK

另外一種 DSSS 所搭配的調變方式為 DPSK（Differential Phase-Shift Keying，相位差調變、差分相移鍵控），屬於 PSK 的 1 個分支。PSK 在傳輸訊號的時候，使用的頻率、振幅是相等的，差別在於相位的不同，藉由相位的不同代表不同的資訊。

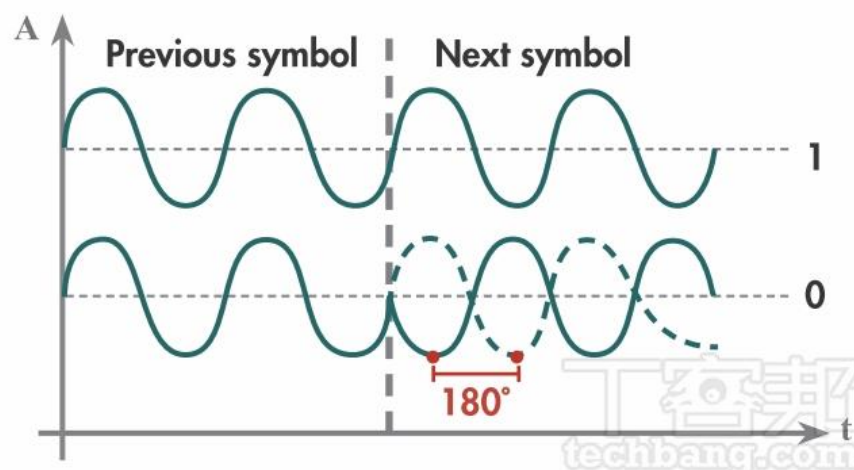
所謂 DPSK 的 D 就是相差、差異的意思，所以是藉由目前波形相位減去上次相位之後的角度差異作為判斷的依據。1 個完整的 sin 波形從 0 開始，到波峰時的相位角為 90 度，下降到 0 的相位角為 180 度，波谷的相位角則為 270 度。

在 802.11 中使用的 DPSK 有 2 種，分別為 DBPSK 和 DQPSK，其中 B 代表 Binary（雙）、Q 代表 Quadrature（正交），DBPSK 利用 2 種相位差表示，DQPSK 利用 4 種相位差表示，這兩種調變正好可提供 1Mbps 和 2Mbps 的傳輸速率。

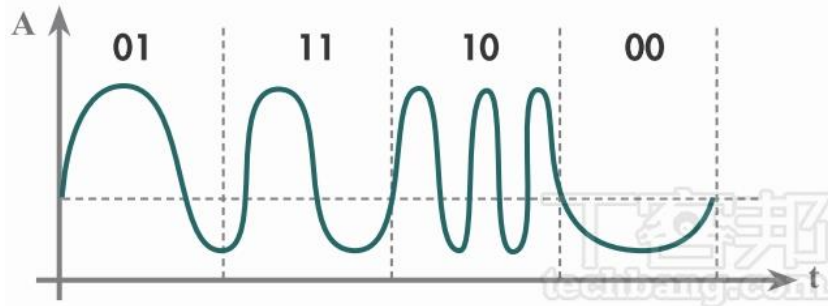
但由於使用編碼速率 11M symble/sec 的關係，加上 DPSK 調變，傳輸能量會在選定的頻率 $\pm 11\text{MHz}$ 的地方以 $|\sin(x)|$ 函數的方式出現，共佔去 22MHz 的頻寬。這在使用 11 個頻道（2.412~2.462GHz，以 5MHz 劃分）的國家地區使用時，僅有 3 個不相互干擾的頻道（頻道 1、6、11）。



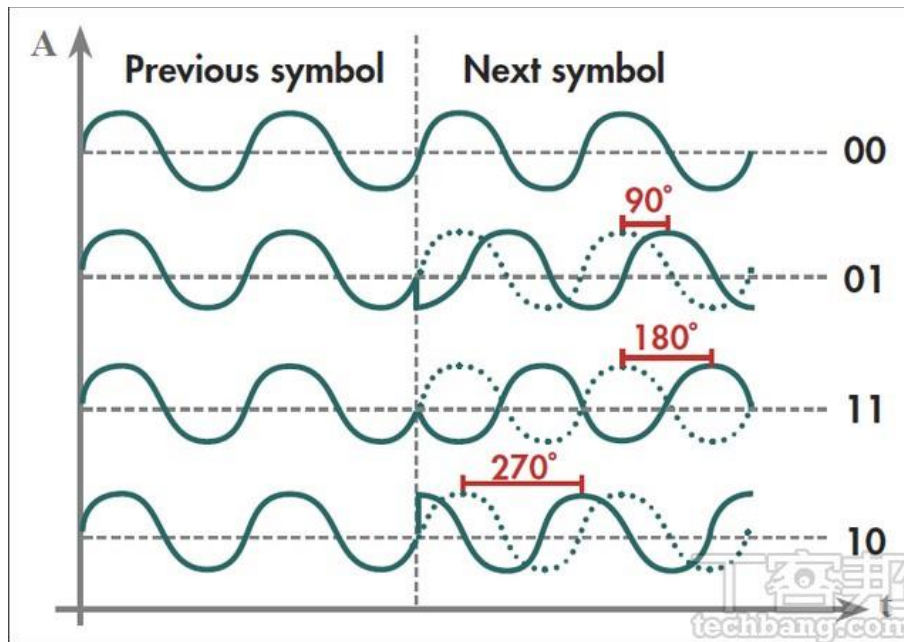
▲藉由 2 種不同頻率分別傳輸 0 與 1



▲DBPSK 利用相位差 0 度和 180 度分別代表 0 和 1



▲以 4 種頻率分別表示 00、01、11、10，以及實際傳送時的頻率變化圖



▲DQPSK 則使用相位差 0 度、90 度、180 度、270 度分別代表 00、01、10、11

802.11a

原始的 802.11 在市面上的產品相當少見，起因在於 802.11 原始規格提供許多可選的標準，使得產品之間的互通性以及相容性不佳，這狀況直到 802.11b 的出現才有改善。有一個小地方需要注意的是，802.11 的無線網路規格發布的順序是 a→b→g→n→ac，之所以有 b 比 a 先出來的錯覺，是因為 b 的產品的確比 a 較早出現，加上 a 完全不相容於 b，所以 a 的存在感變得比較模糊。

在 802.11a/b 規格推出的 1999 年，Wi-Fi 聯盟（Wi-Fi Alliance）也隨之成立，主要是為了解決 IEEE 制定無線標準，卻不測試設備的缺點，避免消費者買了產品卻不相容，讓無線網路的推廣受到阻礙。

802.11a

802.11a 相對於原始的 802.11 標準有相當大的改進，不但頻率使用較少干擾的 5GHz，調變也改為 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交分頻多工），直接從 1~2Mbps 的雞肋速率躍昇到 54Mbps。802.11a 除 54Mbps 之外，尚定義了 48、36、24、18、12、9、6Mbps 的速率，其中調變技術包含了 64-QAM（54、48Mbps）、16-QAM（36、24Mbps）、QPSK（18、12Mbps）、BPSK（9、6Mbps）。

抵禦多重路徑

在無線訊號的傳遞裡，只在相當少數的情況下，發射端和接收端兩者之間可相互以直線連接，訊號可由發射端直接抵達接收端。其它大部分的情況下，訊號會在不同的介質或物體表面穿透、反射、折射、繞射過後，才會抵達接收端，形成所謂的「多重路徑」。多重路徑讓溝通的雙方雖然看不見彼此，也能進行通訊，卻也會造成一些問題。

由於訊號經過不同路徑抵達接收端，會造成時間上不同的延遲，接收端收到的訊號有極大的可能已與原始訊號不同。越高的傳輸速率，「同調頻寬」也就越小，越容易受到多重路徑干擾；所謂同調頻寬，是一個經由統計出來的數值，在此頻寬內能夠保證在傳輸通道中傳輸時的波形不會失真變形。

大家應該能夠想像，在密集的住宅區中，因為有著許多的物體，所以多重路徑干擾也會比較嚴重，同調頻寬較小；相反的在較大的公園中央，多重路徑干擾輕微，同調頻寬

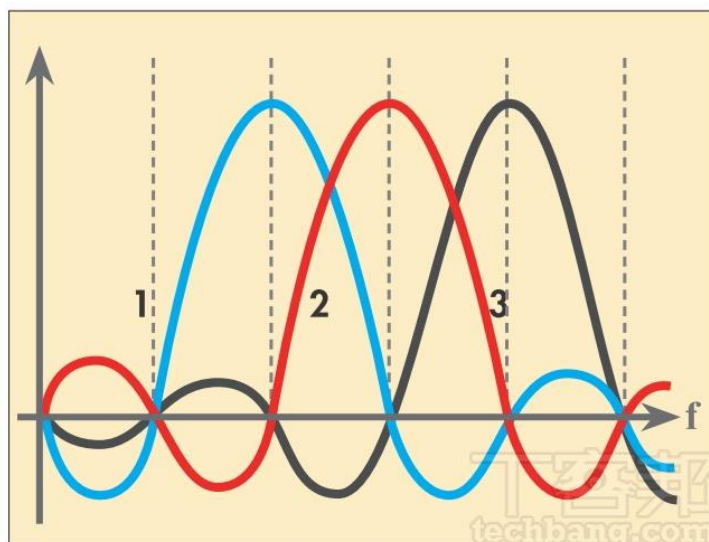
（coherence bandwidth）比較大。如果我們傳輸大於同調頻寬的訊號頻寬，接收端就會無法正確接收，此時降低傳輸速率及可對抗此現象。不過在無線傳輸中傳輸速率是很重要的一環，因此降低傳輸速率並不是個對抗多重路徑干擾的好辦法。

OFDM 多重資料流

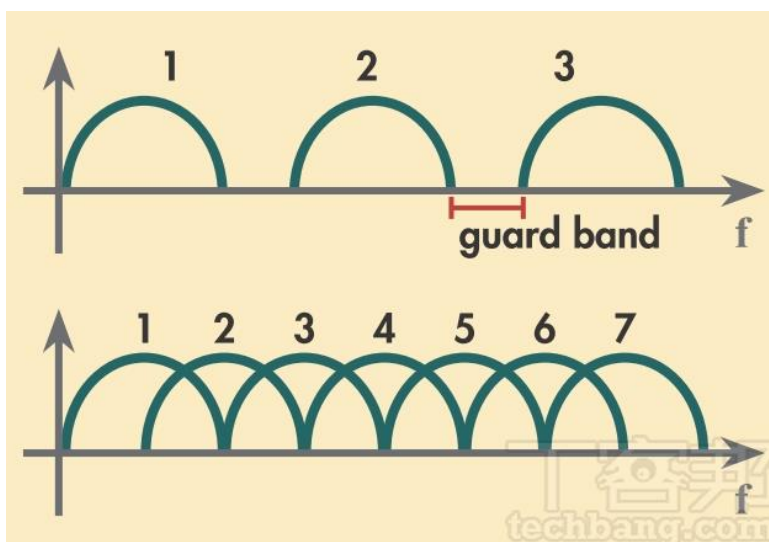
為了抵抗複雜環境下的多重路徑干擾，讓同調頻寬變小的問題，專家們想出了相當聰明的方法：「頻寬小就讓它小，我用多個小頻寬組合成 1 個大頻寬總可以吧！」OFDM 就是這樣的概念，把原本 1 段大頻寬的訊號頻寬，切割成許多小頻寬進行傳輸；以 802.11a 為例，分成 48 個附載波進行傳輸，一下子把訊號頻寬降為 1/48，就算同調頻寬變小也不怕。

切成 48 個附載波，難道就不怕各個頻率之間相互干擾嗎？OFDM 的 O 及為正交的意思，那麼何謂頻率的正交？在通訊裡的正交，指的是 2 個不同訊號在 1 個符號周期裡完全不相關。請參考下列圖片，每個顏色線條代表 1 組訊號，由於物理以及製造限制的關係，沒有辦法發射出單一頻率的訊號，大多都會溢波到上下幾個周期，所以能量最強的頻率中心左右還是會有些訊號。

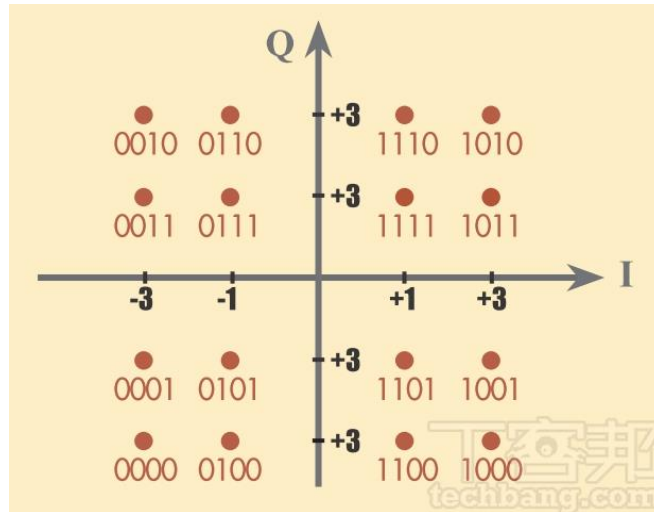
但仔細觀察過後即可發現，每個最強的訊號中心，剛好都沒有其它頻率的溢波訊號存在，所以能夠以相當接近的頻率同時發送訊號而不干擾，前提是精準選擇頻率間隔，以編碼速率作為 2 頻率間隔，使其各個訊號之間維持正交。



▲OFDM 讓訊號之間維持正交，訊號之間便不會相互干擾



▲上圖為一般的分頻多工，由於需要 guard band 的關係，各個頻率沒有辦法得到相當好的運用。下圖是 OFDM 正交分頻多工，每組訊號的能量中心點正好沒有其它訊號，不需要 guard band，同一頻寬下可塞入更多訊號



▲一個採用矩型 QAM 的 16-QAM 星座圖

抗干擾、省頻寬

OFDM 的抗干擾能力也很不錯，由於切割成多組，若當其中 1 組或數組訊號受到干擾時，其它組還可繼續傳輸。此外一般分頻多工都需要寬度不等的保護頻段（guard band），避免多組頻率相互干擾，而 OFDM 利用正交特性，讓多組頻率即使是沒有保護頻段的狀況下，依然能夠運作不會干擾。

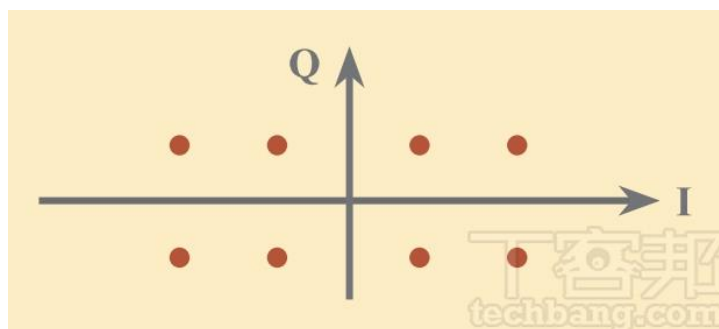
QAM

還記得前段所說的 PSK 相位調變方式嗎？PSK 利用波形相位差的方式讀出其傳輸位元，而 QAM 則是利用 2 組頻率相同但相位正交的載波進行傳輸，並加入振幅的改變（ASK、Amplitude-Shift Keying，振幅調變，）。一般來說，PSK 能夠做到 8 種的相位辨識（每個相位代表 3bit），再多下去就會因為相位差較小，較難進行判斷，因此就會轉換為 16-QAM 進行調變。同樣的，QAM 更低也可以進行 8-QAM，4-QAM 等的調變，但由於 QAM 必須同時檢測相位以及振幅變化，對於調變解調器的要求較高，成本也隨之提升，不像 PSK 只需檢測相位就好。因此在實際應用中大約是以 8-PSK 和 16-QAM 作分野。

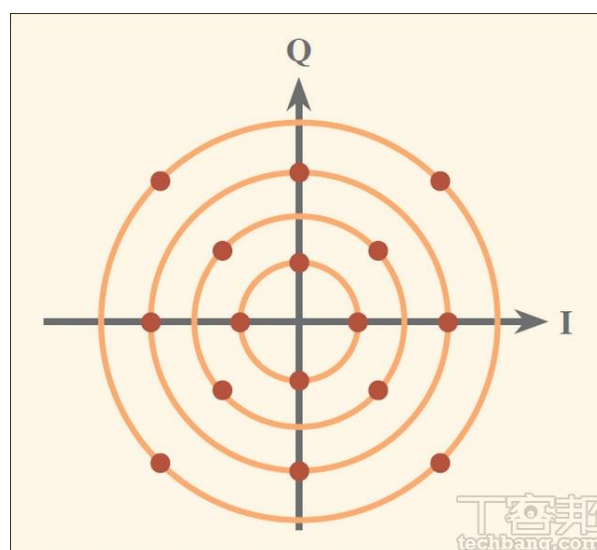
星座圖好理解

想要了解 QAM 的調變方式，最好的版法就是利用星座圖去理解。通信裡的星座圖其實沒有星座般的那樣複雜，就像是 x,y 軸圖上面點幾點那樣的簡單。數位 QAM 必須使用 2 的冪次項作為相位和振幅的變化集合數量（2、4、8、16、32……），類比 QAM 則無（如類比電視訊號的調變）。

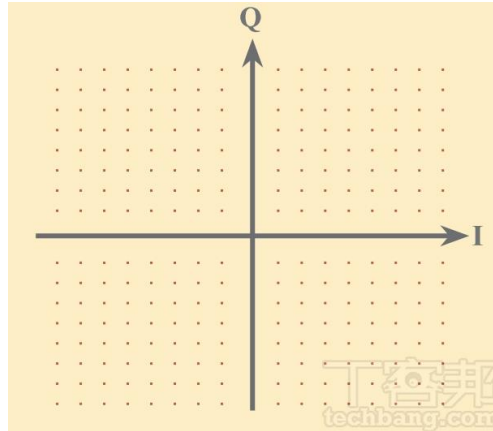
利用上圖來加以說明 16-QAM 的調變方式，如果今天得出的訊號是 45 度向位角、+1 的振幅，那麼就從 x 軸逆時針轉 45 度，直線延伸+1 的長度，就會指向 1111 這個數字，解出訊號所傳遞的訊息。如果現在的訊號是 45 度向位角，但卻有+3 的振幅，於是便會指向 1010 的位置，其它的訊號也以此類推。



▲將 16-QAM 星座圖上下兩排去掉所形成的 8-QAM 星座圖



▲星座圖並不一定是方形的，像是此種的 16-QAM 星座圖因為各點距離較大的關係，能夠容忍比較大的訊號干擾



▲256-QAM 的星座圖，各點的距離靠得相當接近，訊號易受干擾變得無法解讀。

一般我們在分配星座圖時，通常都是使用矩形星座圖，矩形星座圖雖不是最佳的排列方式，但是由於矩形星座圖的排列剛好是 2 個正交載波的相加值，比較容易調變和解調。當然，矩形星座圖也不必是正方形，把 16-QAM 的上下兩排去掉也可成為 8-QAM 的星座圖。

讀者們應該也猜到了，QAM 前方的數字越高，傳輸速率越高，像是現今還在 draft 5.0 的 802.11ac 已經採用到 256-QAM，光是調變規格就比 802.11a 的 64-QAM 多出 4 倍的傳輸速度。但在給定的傳輸能量範圍之內，在星座圖中增加越多點，代表著各點之間的距離越近，越容易受到干擾而無法傳輸。