

無線通訊的 多重存取技術

6

CHAPTER

本章的重要觀念

- 多重存取（multiple access）技術是什麼？
- 有那些多重存取的技術？
- 各種無線通訊系統使用什麼樣的多重存取技術？

由於頻寬（bandwidth）是有限的資源，最好讓多個使用者共同享用頻寬，這就是多重存取（multiple access）技術的由來。有線網路要解決多重存取的問題，我們曾經看到過以競爭方式共用介質時會發生碰撞（collision）的情況，無線網路裡頭同樣有多重存取的問題，所以才會有共用頻道的可能。在無線通訊網路的設計中，多重存取的技術會影響頻寬的使用效率，決定系統的容量（capacity），所以是相當重要的關鍵技術。尤其是在人群聚集擁擠的地方，依然要確保大家能同時順暢地使用無線通訊的服務，維持一定的通訊品質。

無線通訊中的多重存取（multiple access）技術可以讓多個行動通訊器具的使用者共用有限的無線電頻譜（radio spectrum）。網路的多重存取能提高系統的容量（capacity），而且要盡量避免降低系統的效能。圖 6-1 描述多重存取的基本概念，對於眾多的用戶來說，基地台提供了無線電頻道（radio channel）的共同介面（common interface），技術必須解決同時分享共用無線電頻道的問題，協定（protocols）則須對通訊的細節訂出標準，讓所有的軟硬體及設備遵循。行動無線通訊在不同世代的發展中，逐漸地改善了共用頻道的效能。

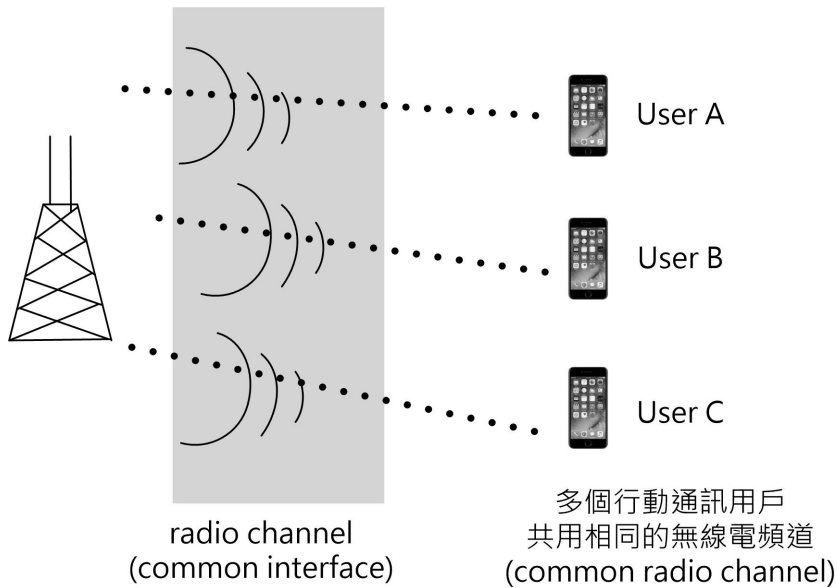


圖 6-1 多重存取 (multiple access) 的基本概念

在介紹多重存取的技術以前，我們可以先討論一下通訊的雙工的特性 (duplexity)，通常用戶必須能同時與基地台進行發訊與收訊的動作，這就是所謂的雙工的特性 (duplexity)。換句話說，基地台與用戶的設備都要有接收與發送訊號的功能。我們可以分別從頻率與時間的角色來詮釋雙工 (full-duplex)：

1. FDD 可以同時提供兩個單工的頻道 (simplex channel)。兩個頻道以隔離頻段 (guard band) 分開，前向頻道 (forward channel) 使用於基地台到行動台的流量，也稱為下傳連結 (downlink)，反向頻道 (reverse channel) 使用於行動台到基地台的流量，也稱為上傳連結 (uplink)。圖 6-2 顯示 FDD 的概念，雙工器 (duplexer) 的功能是將訊號分開到前向頻道與反向頻道。
2. TDD 可以在同樣的頻率下提供兩個單工的時槽 (simplex time slots)，相當於在不同的時槽範圍內分別進行發訊或是收訊。TDD 利用時間來分隔前向頻道與反向頻道，TDD 不需要雙工器。

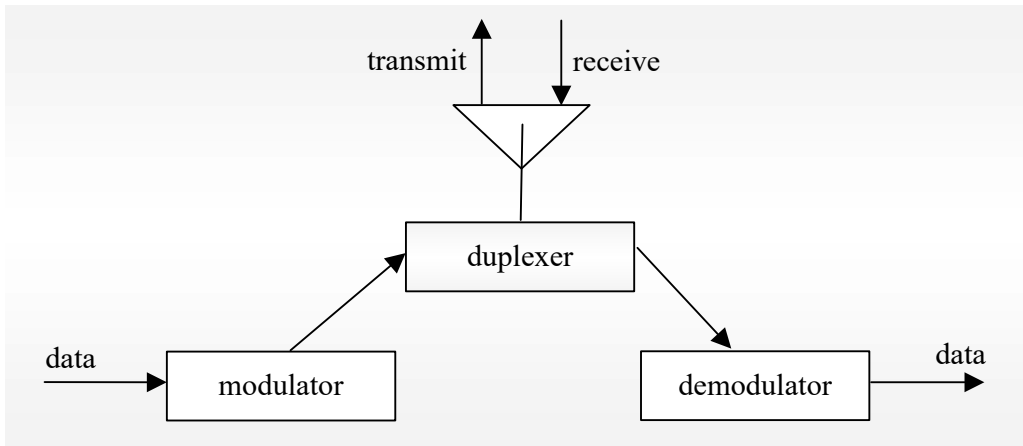


圖 6-2 頻率領域雙工 (FDD)

6.1 // 共用傳輸媒介的原理

在探討無線網路的多重存取 (multiple access) 問題之前，我們先來複習一下有線網路中介紹過的幾種方法。一般的區域網路中常見的相關協定是有關於傳輸媒介 (transmission medium) 的共用問題，其中最有名的是乙太網路的 CSMA/CD，在探討這個協定之前，我們要先認識 ALOHA，ALOHA 最早是為了封包無線電 (packet radio) 網路發展出來的，運作的原理如下：

1. 網路節點送出資料框 (frame) 以後，必須等待回應 (acknowledgement)，等待的時間約是封包預期在網路上來回一趟所需的時間 (也叫做 round-trip propagation delay)，再加上一段固定長度的時間。
2. 假如在時限內收到了回應，代表傳送成功，否則就要重新傳送 (resend)，若是數次傳送都失敗，則只有放棄了。
3. 接收端必須檢查收到的資料框是否有效 (valid)，這包括兩樣檢查，一個是資料框中的資料框檢查順序 (frame-check-sequence) 欄位，另一個則是資料框目的地位址是否與接收端位址相符，假如檢查無誤，就可以送出回應。若是檢查發現無效，接收端可以直接忽略所收到的資料框。

由於 ALOHA 的方式造成碰撞 (collision) 的機率很高，使網路效能大幅地降低，為了改善 ALOHA，有人提出了 slotted ALOHA 的方式，將通訊頻道的使用分成一小段時間，大約是將一個資料框送上介質的時間，所有的網路節點在時間上必須同步，

如此一來，只有在固定的時段上才能傳送資料框，代表也只有這些時段上才會發生碰撞，slotted ALOHA 稍微提昇了 ALOHA 的效能，不過還是不太理想。由於傳統的區域網路上傳輸延遲常小於資料框送上介質的時間，在這種情況下，通常一有節點在傳送資料，其他節點幾乎是立即察覺，假如節點在傳送資料前能先感測是否有節點已經在使用介質，則碰撞的情況應該可以降低。CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 就是針對這個特點來改進，運作的原理如下：

1. 網路節點送出資料框 (frame) 以前必須感測介質是否在使用中 (即 carrier sense)，假如使用中，則必須等待。
2. 若是介質可用，則可立即傳送，若是同時有多個節點傳送資料框，則發生碰撞，會造成資料失誤，因此網路節點送出資料框以後，要等待回應，超過時限的話，必須重新傳送。

假如資料框傳送時間越長，傳輸延遲 (propagation delay) 越短，則 CSMA 可達成的效能越佳。由於碰撞仍會造成介質使用率降低，有人提出 CSMA/CD 來改善因碰撞造成的困難：

1. 假如介質可用，直接傳送資料框。
2. 假如介質忙線中，繼續等待，直到介質可用為止。
3. 假如發生碰撞，送出簡短的壅塞訊號 (jamming signal)，告知其他節點，然後繼續等待一段時間。

由於壅塞訊號的送出可以防止碰撞發生時有其他的節點正在傳送資料，基本上可使碰撞發生的頻率降低，從 CSMA/CD 運作的原理，我們可以發現碰撞的偵測很重要，由於訊號傳送遠了會衰減，影響碰撞的偵測，IEEE 的標準才會規定 10 Base 5 網路的最大長度不超過 500 公尺，而 10 Base 2 網路的最大長度不超過 200 公尺。以上介紹的 MAC 技術可以簡單地綜合如下：

1. ALOHA
 - (1) Asynchronous ALOHA
 - (2) Slotted ALOHA

2. CSMA

- (1) CSMA/CA : collision avoidance
- (2) CSMA/CD : collision detection
- (3) Non-persistent
- (4) P-persistent

這些 MAC 技術屬於所謂的雜亂存取(random access)的方法，會有碰撞(collision)產生的可能，無線網路也可以運用類似的方法，例如 Wireless LAN 就常用 CSMA/CA。除了這些方法之外，還有很多其他的存取控制方式，圖 6-3 列出一個簡單的分類，決定性的存取(deterministic access)方式是無線通訊網路中最常使用的。

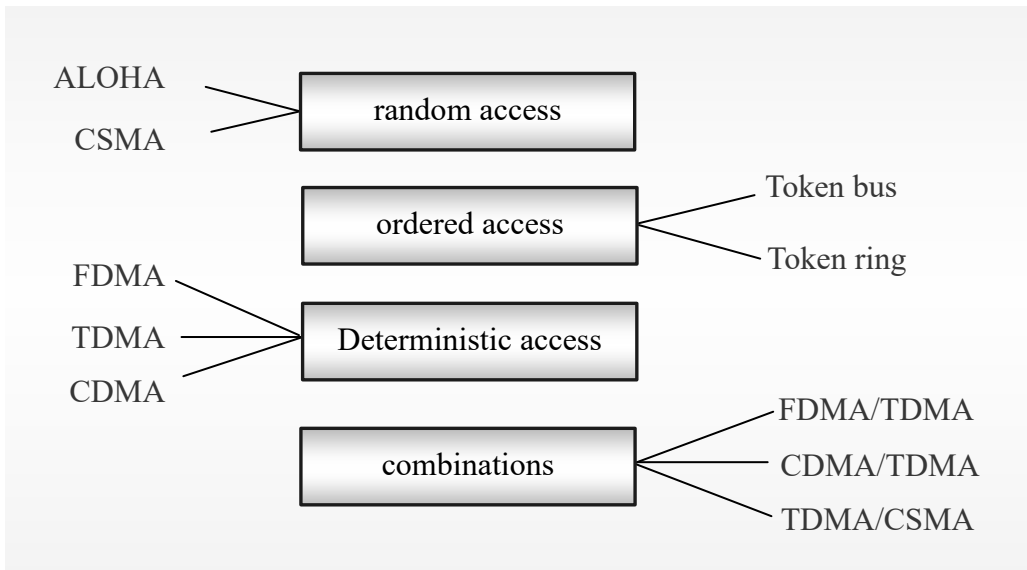


圖 6-3 存取控制技術的分類

圖 6-4 整理出多重存取協定的分類，這樣比較容易整體地看到各種不同的選擇，通訊頻道的共用是通訊系統設計時都要慎重考量的問題。

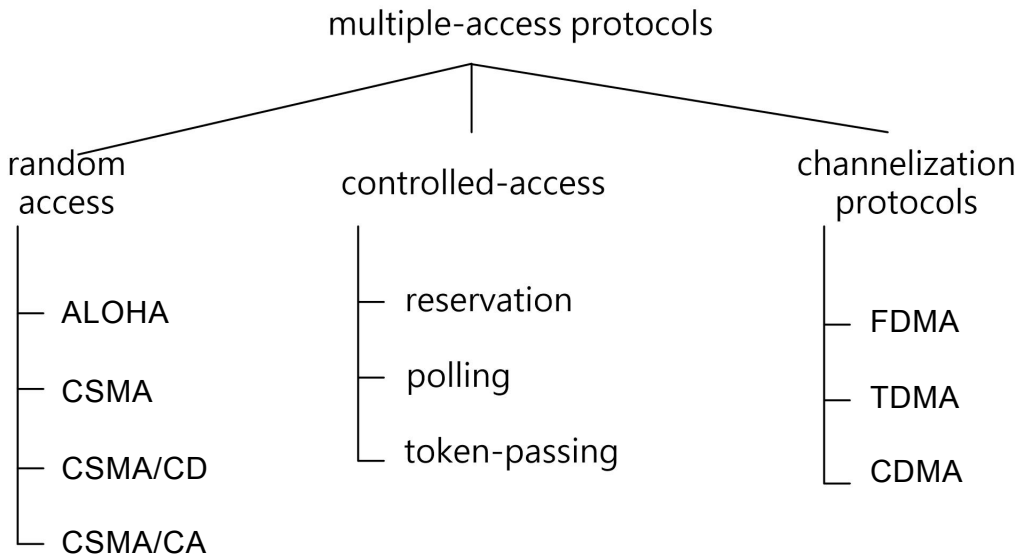


圖 6-4 多重存取協定的分類

6.2 // 有趣的隱藏節點 (hidden node) 問題

圖 6-5 顯示 A、B 與 C 共 3 個節點，以及各自的有效通訊範圍，A 與 B 或是 B 與 C 都能互相通訊，但是 A 與 C 由於距離太遠，無法通訊，A 對於 C 或是 C 對於 A 來說，算是對方的隱藏節點 (hidden node)。隱藏節點會造成一些問題，例如 A 在範圍內沒有感測到有其他的傳輸，所以送封包給 B，C 在範圍內也沒有感測到有其他的傳輸，所以送封包給 B，這兩個封包在 B 發生了碰撞 (collision)。要解決這樣的問題必須想出跟上面的 MAC 技術不同的方法來。

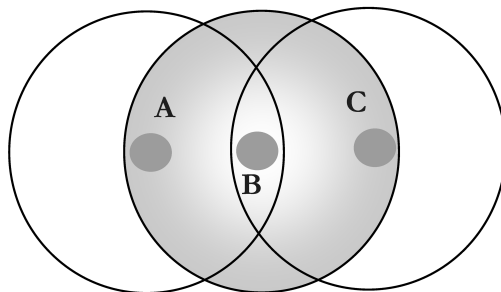


圖 6-5 有趣的隱藏節點問題

圖 6-6 顯示一個簡單的解決隱藏節點問題的方法，假設節點 A 想送資料封包給節點 B，則 A 先送 RTS (request to send) 的封包給 B，裡頭記載何時會送出多少資料給 B，B 送回 CTS (clear to send) 的封包給 A，這時候 C 會感測到 CTS 的封包，等於間接感受到 A 的存在，如此一來，CSMA/CA 的程序可以稍微修改如下：

1. 檢查載波是否存在，即是否有節點正在使用介質。
2. 假如載波不存在 (no carrier)，檢查 CTS 表格看是否有涵蓋區域外的節點要傳送資料。
3. 假如載波不存在而且 CTS 表格也顯示介質可以用，則開始傳送資訊。

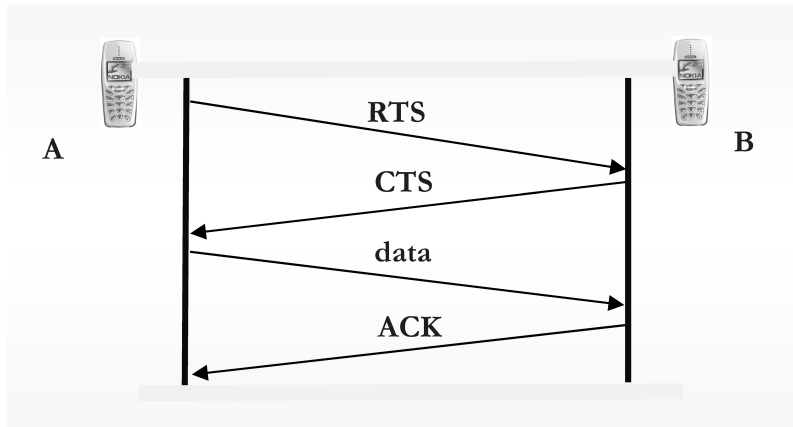


圖 6-6 隱藏節點問題的解決方法

6.3 // 無線存取 (Wireless Access) 技術簡介

一般人用手機撥號之後，過了不久就可以連線通話，這之間其實發生了很多事件，跟網路的存取技術有關，所謂的存取技術 (access technology) 是指使用者連上通訊管道或是網路的方式，以無線通訊來說，FDMA、TDMA 與 CDMA 是最常見的存取技術。各種不同的存取技術搭配雙工 (duplex) 的特性就會產生了像 FDMA/FDD、TDMA/FDD 或 TDMA/TDD 等技術。表 6-1 整理出幾種無線存取技術的特性。

表 6-1 無線存取（Wireless Access）技術

無線存取（Wireless Access）技術	說明
FDMA （Frequency Division Multiple Access）	FDMA 使用不同的頻率來區別不同的傳輸通道，傳輸通道本身還可以分成上傳（uplink）與下傳（downlink）兩大類，上傳通道處理用戶送往基地台的訊號，下傳通道處理由基地台傳給用戶的訊號。在使用 FDMA 來存取的網路中，不管是上傳或下傳，都要先找到一個目前沒有在使用的頻率，指定給該段通訊（session）使用。FDMA 的缺點是指定的頻率相近時容易彼此產生干擾（interference），指定頻率與頻率再用的程序也比較沒有效率。
TDMA （Time Division Multiple Access）	TDMA 可以把同一個頻率用時間間隔分割給多個用戶使用，有關於 TDMA 的技術性資料可以在 www.iec.org/tutorials/tdma 找到。
CDMA （Code Division Multiple Access）	CDMA 採用展頻（spread-spectrum）的技術，可以將訊號分成小片段（segment），然後分到整個頻寬裡頭。CDMA 使用封包交換的資料傳輸（packet-switched data transmission）技術，對無線傳輸指定唯一的辨識碼，可以用來決定傳輸發生的時間與地點。
WCDMA （Wideband CDMA）	WCDMA 是 CDMA 的延伸，支援封包交換（packet-switched）與電路交換（circuit-switched）的資料傳輸。由於使用較大的頻寬，所以傳輸的速率也比較高。

6.3.1 無線多重存取（multiple access）技術的簡單分類

無線多重存取（multiple access）技術多半屬於所謂的決定性的存取（deterministic access）技術，當節點需要頻道容量（channel capacity）時必須向控制點（control point）提出請求。FDMA、TDMA 與 CDMA 都是決定性的存取技術，請求的程序雖然是系統的負擔，但是能保證請求者能得到所需要的頻寬。到底各種無線通訊網路使用什麼樣的無線多重存取技術呢？表 6-2 列出常見的幾種無線通訊系統的選擇。我們可以從頻段（band）來對無線多重存取的技術做一個簡單的分類：

1. 窄頻段系統（narrowband systems）：在窄頻段多重存取的系統中，可用的無線電頻譜會分成很多個窄頻段的頻道。

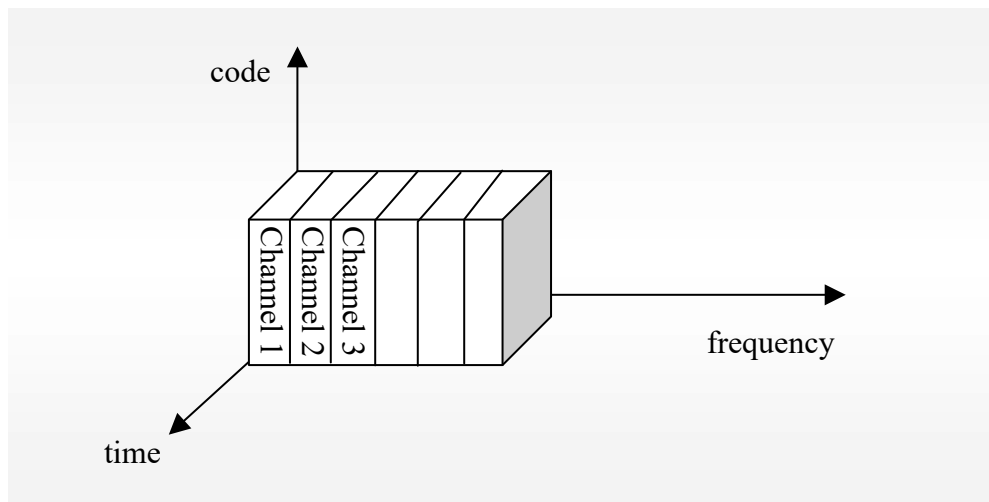


圖 6-8 FDMA 的基本原理

頻率分割多重存取 (FDMA, Frequency Division Multiple Access) 把頻寬分割成多個不同頻率的頻道 (frequency channel)，不同的使用者利用不同的頻道來傳訊，靜態的 FDMA 對於資料的傳送不是很好的選擇，在網路的設計上必須考慮 FDMA 的基本特徵：

1. 一個 FDMA 頻道一次只能承載一通電話的電路，假如 FDMA 頻道沒有正在使用中，無法讓其他使用者共享。
2. 一旦 FDMA 的語音頻道指定了以後，基地台與行動台可以在頻道上同時而且連續地傳訊。
3. FDMA 頻道的頻寬通常很窄，例如 AMPS 使用 30 KHz，因此 FDMA 常見於窄頻的系統。
4. FDMA 系統的複雜度比 TDMA 的系統低，由於 FDMA 提供連續的通訊，所以所需要傳輸的額外的控制資訊也比較少。
5. FDMA 行動台需要使用雙工器 (duplexer)，因為接收器與傳送器會同時作業。因此用戶的設備成本會增加。

6.4.2 時間分割多重存取 (TDMA, time division multiple access)

TDMA 的系統將無線電頻道以時間來切割，分成多個時槽 (time slots)，每個時槽內只有一個用戶可以傳送或接收資料。假設一個封包 (frame) 含有 N 個時槽，則每個時槽就有點像個別的頻道，對於使用者來說，傳訊的過程是不連續的，因此，雖

然 FDMA 可以使用類比的 FM (frequency modulation) ，TDMA 卻只能用於數位資料與數位調變的情況。圖 6-9 顯示 TDMA 的基本原理。

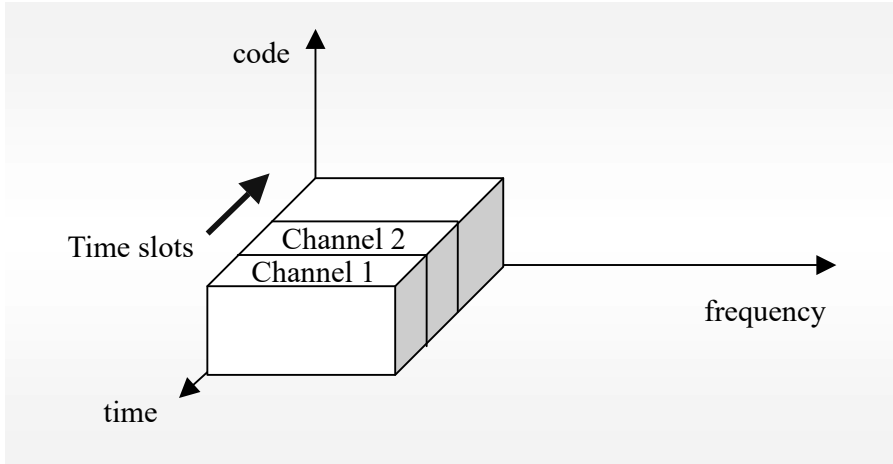


圖 6-9 TDMA 的基本原理

圖 6-10 顯示 TDMA 封包的結構 (frame structure) ，一個封包含有數個時槽，以 TDMA/TDD 來說，有一半的時槽用於前向頻道 (forward channel) ，另一半的時槽用於反向頻道 (reverse channel) ，在 TDMA/FDD 中，相同或類似的封包結構個別使用於前向頻道與反向頻道，但兩個頻道的載波頻率是不同的。TDMA frame 中的 preamble 欄位含有基地台與行動台的位址與同步資訊，讓彼此之間能相互辨識，不同的 TDMA 標準所用的 TDMA frame 結構可能會有一些差異，TDMA 具有以下描述的特徵。

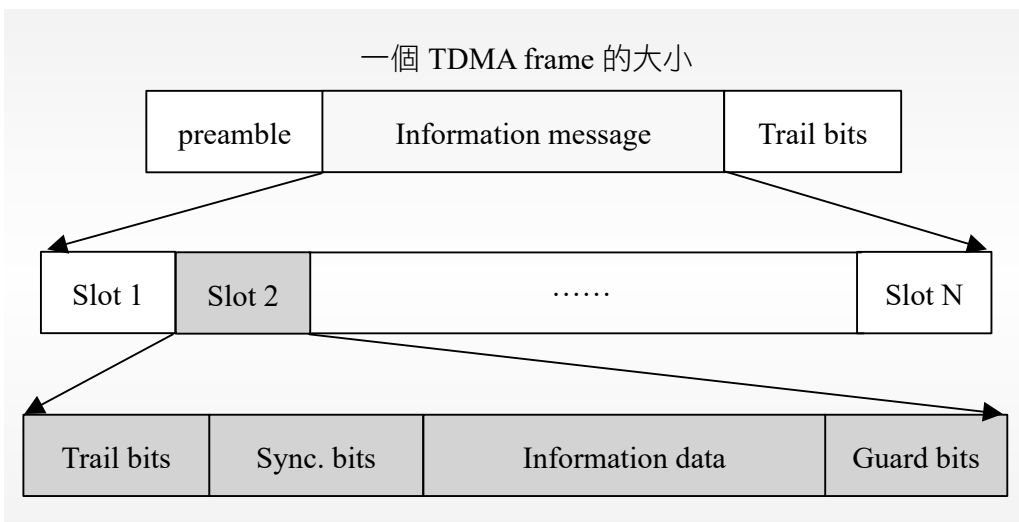


圖 6-10 TDMA 封包的結構 (frame structure)

6.4.5 正交分頻多工 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

無線通訊有許多發展中的技術，包括 WLAN 802.11a、802.11g、4G、數位廣播、數位電視等，這些技術都有用到正交分頻多工（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）技術。OFDM 技術能提高無線電頻寬的使用效益與容忍雜訊的能力，同時降低多路徑衰減效應，已經成為多方投入研發的調變技術。

OFDM 的基本原理是把高速率的資料流（data stream）分割成數個低速率的資料串。等於把傳輸通道分成 N 個符號然後同時在這些子通道上傳送。這樣會把符號傳送的週期延長 N 倍。OFDM 中的 tone 是指一種頻率，OFDM 可以看成是一種 FDM，不過 OFDM 有一個很重要的特徵，就是 tone 與 tone 之間是正交的（orthogonal）。頻率之間有保護頻段（guard band），避免頻率互相干擾，OFDM 可以讓 tone 重疊（overlap），由於正交的特性，tone 之間不會有干擾的問題，重疊的結果是讓整體的頻寬需求降低了。OFDM 可以算是一種調變的技術，因為使用者的資料調變到 tone 所代表的頻率。通常會採用 PSK 或 QAM 來調變。OFDM 系統可以把一個資料流分成 N 個平行的資料流，各資料流的速率變成原來的 1/N。

OFDM 是一種綜合了調變（modulation）與多重存取（multiple access）的技術，主要的功能是讓通訊頻道給多人共享。圖 6-13 顯示 OFDM 傳送端的處理（transmitter chain）程序，資料流分割之後，每個子資料流對應到一個各別的頻率，然後使用 IFFT（inverse fast fourier transform）合併在一起。OFDM 也可以看成是一種多重存取（multiple access）的技術，因為個別的 tone 或是一組 tone 可以分配給不同的使用者，多個用戶可利用這種方式來分享頻寬，這樣的系統也稱為 OFDMA。基本上，用戶可以分配到一個固定數目的 tone 來傳送資料，或是依照所傳輸的資料量來分配不定數目的 tone，這些分配都是透過 MAC 層次來進行的，可依據用戶的需求來進行資源的分配與排程。

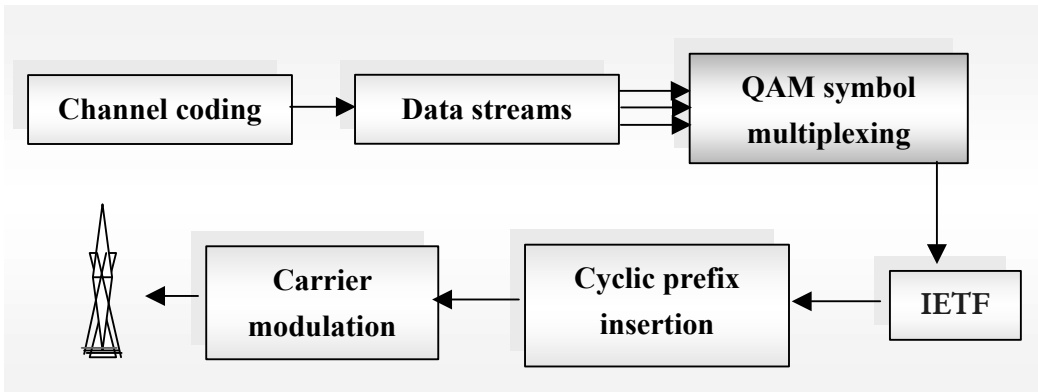


圖 6-13 OFDM 傳送端的處理 (transmitter chain)

OFDM 可以與跳頻的技術結合，得到所謂的展頻系統 (spread spectrum system)，在探討這種結合之前，我們先來看一下圖 6-14 中顯示的 OFDM 的 tone 彼此正交的特性，從 A、B、C、D 與 E 在 X 軸的 0 點相交的特徵可以發現這些 tone 是正交的 (orthogonal)，現在我們要再加入跳頻的特質。

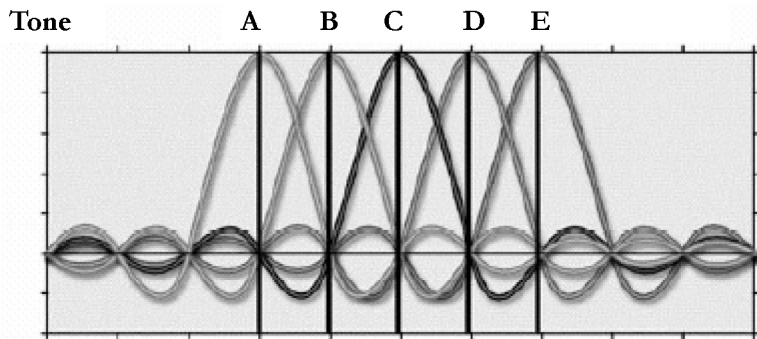


圖 6-14 OFDM 中的 tone

前面提到 OFDM 可以結合跳頻 (frequency hopping) 的技術來產生一個展頻的系統 (spread spectrum system)，在這種情況下，每個使用者占用的一組 tones 在一段時間之後會改變，通常是一個 modulation symbol 的時間，這樣有什麼好處呢？

1. 所得到的多種頻率的使用 (frequency diversity) 以及干擾平均化 (interference averaging) 的好處跟 CDMA 一樣。
2. 由於頻率在每個 symbol period 之後都會改變，使得頻率選擇漸弱 (frequency selective fading) 的效應降低。

OFDM 可以得到 TDMA 的好處，這是來自各使用者的 tone 正交的特徵。同時由於跳頻而具有像 CDMA 的優點，除此之外，OFDM 沒有 TDMA 與 CDMA 的一些限制，例如 TDMA 所要進行的頻率的規劃，以及 CDMA 的多重存取干擾。圖 6-15 顯示 OFDM 的頻道資源使用情況。 T_{sym} 代表傳送一個符號的時間，tone 代表頻道。

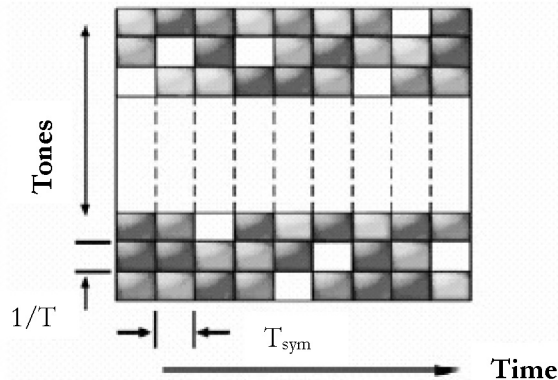


圖 6-15 OFDM 的頻道資源使用情況

✎ OFDM 作業的原理

OFDM 的 tones 的正交特性 (orthogonality) 是非常重要的，OFDM 鄰近的 tone 之間彼此不會互相干擾。符號之間的保護時間 (guard time) 可以讓 tones 在多路徑效應的影響下仍舊保持正交的特性。這是 OFDM 能避免多重存取干擾的主因，這種干擾在 CDMA 系統中是存在的。

為了要維持正交的特性，符號週期 (symbol period) 必須是 tone 波形週期的整數倍。多路徑效應使 tones 與被延遲送達的 tones 的複製版本 (delayed replicas of tones) 在接收器發生延遲的延展 (delay spread)，造成正弦波 (sinusoidal) 的異位 (misalignment)，必須加上循環前置波形 (cyclic prefix) 使 tones 的波形在接收端重置，維持正交的特性。圖 6-16 顯示加入 cyclic prefix 的情況。圖 6-17 顯示符號週期 (symbol period) 與 tone 波形週期的關係。

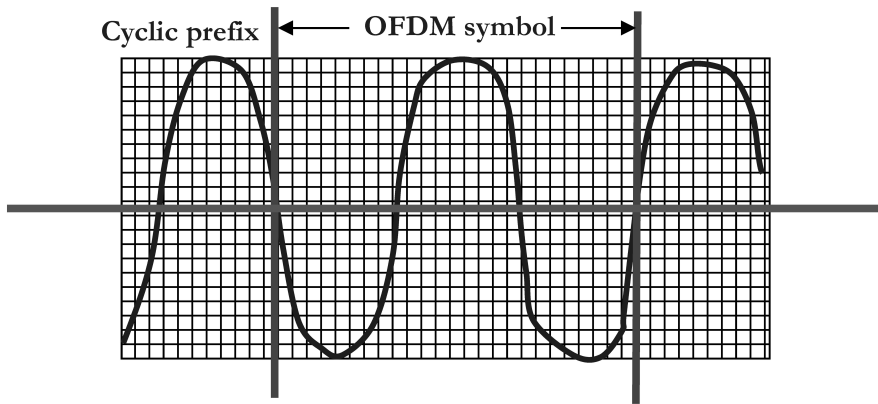


圖 6-16 OFDM 中的 cyclic extension

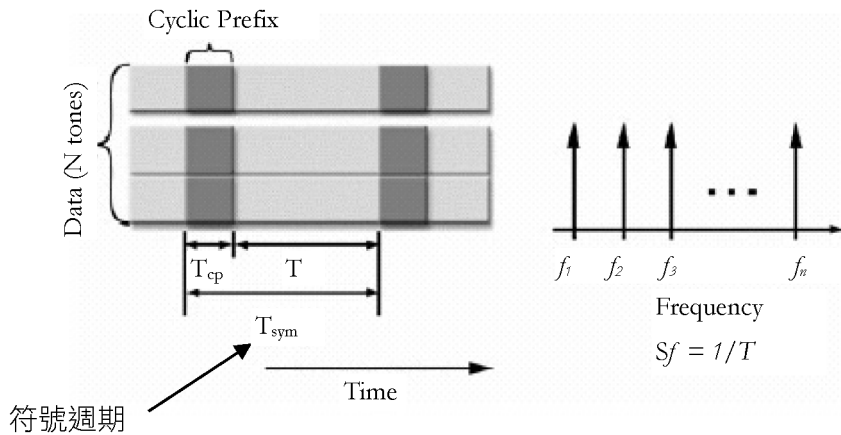


圖 6-17 符號週期 (symbol period) 與 tone 波形週期的關係

☑ OFDM 技術的優點

OFDM 的技術可以設計成支援封包交換 (packet-switched) 的系統，針對多個網路模型的層次進行最適化 (optimization)。OFDM 對於頻道的減損容忍度高，例如多路徑漸弱 (multipath fading)、延遲延展 (delay spread) 與都普勒效應等，所受到的影響不大。未來在很多的無線通訊系統中可能都會看到 OFDM 的應用。



常見問答集

Q1 1 G 與 2 G 行動無線通訊系統的差別在那裡？

答：1 G 與 2 G 行動無線通訊系統的主要差異在於 1 G 的系統使用類比通訊（analog signaling），也就是說，使用者的訊號在空氣介面中以 FDMA 的技術傳送。2 G 的系統使用數位通訊（digital signaling），利用 TDMA 或 CDMA 的技術共享頻道，由於 2 G 的系統使用數位通訊，比較容易以編碼（encryption）來增加安全性。

Q2 骨幹化（trunking）與多重存取（multiple access）的涵義有何差異？

答：無線通訊的骨幹化（trunking）是指在某個數目的用戶的通訊環境中需要多少通訊頻道讓大家隨機使用。通常所有的用戶不會同時通訊，因此總頻道數一般都比用戶數目少。多重存取（multiple access）指同一頻道讓多個用戶共用的方法。



自我評量

1. 有線網路與無線網路在多重存取（multiple access）上所面對的問題有何差異？
2. 隱藏節點（hidden node）在無線網路中會造成什麼問題？
3. 各種無線通訊系統對於多重存取技術的選擇通常會有什麼樣的考量？
4. 為什麼有線網路的存取協定不一定適用於無線網路的情況？
5. 為什麼展頻多重存取（SSMA, Spread Spectrum Multiple Access）的技術受多路徑的影響小？
6. 正交分頻多工（OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing）的技術有那些重要的優點？